



TUGAS AKHIR - MO 141326

ANALISA KEKUATAN *ANCHOR CHAIN* PADA *SINGLE POINT MOORING* FSO ARCO ARDJUNA

Annisa Fitrah Ramialis

NRP. 4312 100 134

DOSEN PEMBIMBING :

Ir. Handyanu, M.Sc., Ph.D.

Ir. Mas Murtedjo, M.Eng.

JURUSAN TEKNIK KELAUTAN

Fakultas Teknologi Kelautan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya 2016



FINAL PROJECT - MO 141326

ANCHOR CHAIN STRENGTH ANALYSIS OF SINGLE POINT MOORING AT FSO ARCO ARDJUNA

Annisa Fitrah Ramialis

NRP. 4312 100 134

ADVISORS :

Ir. Handyanu M, Sc. Ph. D.

Ir. Mas Murtedjo, M.Eng.

DEPARTEMENT OF OCEAN ENGINEERING

Faculty of Marine Technology

Sepuluh Nopember Institute of Technologi

Surabaya 2016

**ANALISA KEKUATAN ANCHOR CHAIN PADA SINGLE POINT
MOORING FSO ARCO ARDJUNA**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada Program Studi S-1 Jurusan Teknik Kelautan Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

ANNISA FITRAH RAMIALIS

NRP. 4312 100 134

Disetujui oleh:

1. Ir. Handayanu, M.Sc., Ph.D. (Pembimbing 1)

2. Ir. Mas Murtedjo, M.Eng. (Pembimbing 2)

3. Suntoyo, S.T., M.Eng., Ph.D. (Penguji 1)

4. Sholihin, S.T., M.T. (Penguji 2)

5. Agro Wisudawan, S.T., M.T. (Penguji 3)

6. Sujantoko, S.T., M.T. (Penguji 4)

SURABAYA, JULI 2016

ANALISA KEKUATAN *ANCHOR CHAIN* PADA *SINGLE POINT MOORING* FSO ARCO ARDJUNA

Nama Mahasiswa : Annisa Fitrah Ramialis
NRP : 4312100134
Jurusan : Teknik Kelautan – FTK ITS
Dosen Pembimbing : Ir. Handayanu M, Sc. Ph. D.
Ir. Mas Murtedjo, M. Eng

ABSTRAK

FSO (*Floating Storage and Offloading*) merupakan fasilitas terapung yang dioperasikan di suatu ladang minyak dan gas bumi lepas pantai yang berfungsi untuk menerima, menyimpan, dan menyalurkan hidrokarbon, terutama untuk menyalurkan ke *shuttle tanker*. Pada tempatnya beroperasi, FSO akan dikenai beban lingkungan yang dapat menyebabkan ia berperilaku dinamis. Untuk mengurangi gerakan dan menjaga supaya FSO tetap berada pada tempatnya beroperasi, maka dibutuhkan suatu sistem tambat. Analisa terhadap sistem tambat perlu dilakukan, untuk mengetahui kekuatan sistem tambat sehingga operasi lepas pantai dapat berjalan aman. Dalam Tugas Akhir ini, dilakukan analisis kekuatan *anchor chain* pada *single point mooring* tipe CALM (*Catenary Anchored Leg Mooring*) *buoy* yang menambat FSO dan *shuttle tanker*. Dengan mengetahui perilaku gerak antara *Single Point Mooring*, FSO Arco Ardjuna, dan *Shuttle Tanker* akibat beban lingkungan perairan pada kondisi tertambat, akan didapatkan nilai *tension* pada *anchor legs* dari beberapa konfigurasi pembebanan. Pada saat tertambat RAO pada SPM cenderung mengalami kondisi puncak pada kondisi FSO *full load* ketika gerakan rotasional *Rolling* saat arah datang gelombang *Beam Sea* (90°) dengan frekuensi sebesar 2,944 rad/sec. Hasil analisa dengan *Finite Element Methode* (FEM) untuk hasil *tension* pada *anchor legs* terbesar yaitu 1662,35 kN pada *anchor leg*₂ pada arah 90° dengan *safety factor* 4,24, hasil ini memenuhi *safety factor* menurut *American Bureau of Shipping* (ABS) untuk kondisi *intact* (ULS) yaitu lebih besar dari 1,67. Besar tegangan maksimum (*Von Mises stress*) pada *anchor chain* sebesar 311,24 Mpa lebih kecil dibandingkan dengan tegangan ijin (*Yield Strength*) dikali 0,9 sebesar 369 Mpa sehingga memenuhi aturan dan standar yang ditetapkan oleh ABS.

Kata Kunci: *Anchor chain, Buoy, Tension, Floating Storage and Offloading, Von Mises stress*

(halaman ini sengaja di kosongkan)

ANCHOR CHAIN STRENGTH ANALYSIS OF SINGLE POINT MOORING AT FSO ARCO ARDJUNA

Name : Annisa Fitrah Ramialis
NRP : 4312100134
Department : Ocean Engineering – FTK ITS
Advisors : Ir. Handayanu M,Sc. Ph.D
Ir. Mas Murtedjo, M.Eng

ABSTRACT

FSO (Floating Storage and Offloading) is a floating facility that operates on an oil and gas offshore source. Its function is for receiving, keeping, and distributing the hydrocarbon mainly to the shuttle tanker. In its place, FSO will be charged by the environmental loads. It makes the FSO will be dynamic. It needs a tether system to reduce and keep the FSO, so that it will stay in the its operation place. The analysis of tether system is needed to check the strength of that system so the offshore operation can be done safely. In this final project, the anchor chain strength analysis has been done on the Single Point Mooring CALM (Catenary Anchored Leg Mooring) model buoy that tethered FSO and shuttle tanker. Due to know the movement attitude between Single Point Mooring, FSO Arco Ardjuna, and Shuttle Tanker that caused by water environment charge on the tethered condition, it will be got the tension scale on the anchor legs from some charging configuration. RAO of SPM tend to have maximum condition when FSO was on full load condition and the Rolling rotation movement came with 90^0 Beam Sea phase with 2.944 rad/sec for the frequency. By using Finite Element Method (FEM), result of the analysis that appeared was the tension on the anchor legs was 1662.35 kN on the 2nd anchor leg with 90^0 direction with 4.24 safety factor. This result fulfils the safety factor based on American Bureau Shipping (ABS) for intact condition (ULS) is bigger than 1.67. The maximum strength (Von Mises stress) on the anchor chain was 311.24 Mpa. It smaller than the Yield Strength that multiplies by 0.9 as much as 369 Mpa. So, it passes the rule and standard that used by ABS.

Keywords : Anchor Chain, Buoy, Tension, Floating Storage and Offloading, Von Mises stress

(halaman ini sengaja di kosongkan)

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis ucapkan kepada Allah SWT yang telah memberikan segala rahmat dan hidayah kepada penulis, sehingga dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir yang berjudul, “**Analisa Kekuatan *Anchor Chain* Pada *Single Point Mooring Fso Arco Ardjuna***” ini dengan lancar dan tepat waktu. Laporan Tugas Akhir ini disusun sebagai syarat untuk mendapatkan gelar sarjana (S-1) di Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Laporan Tugas Akhir ini berisi tentang analisis gerakan pada SPM saat kondisi tertambat dengan FSO Arco Ardjuna dan *Shuttle Tanker*, kemudian didapatkan *tension* pada *anchor legs* yang menghubungkan antara SPM dengan *anchor* untuk dipakai sebagai pembebanan pada pemodelan lokal struktur sehingga didapatkan hasil tegangan maksimum pada *anchor chain*.

Penulis mengharapkan saran dan kritik dari para pembaca demi perbaikan dan kesempurnaan penyusunan dan penulisan berikutnya. Penulis juga berharap semoga laporan ini bermanfaat bagi pembaca pada umumnya dan bagi penulis sendiri pada khususnya.

Surabaya, 29 Juli 2016

Annisa Fitrah Ramialis

(halaman ini sengaja di kosongkan)

UCAPAN TERIMA KASIH

Penyelesaian Tugas Akhir ini tidak lepas dari bantuan dan dukungan berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan kali ini, penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Allah SWT yang telah memberikan petunjuk dan kemudahan sehingga penulis mampu menyelesaikan Tugas Akhir ini tepat pada waktunya,
2. Mama, Ayah, dan Nenek Rafi'ah tercinta, serta Kak Indah, Elin dan Fuad, yang selalu memberikan motivasi, doa, dukungan, dan menjadi penyemangat bagi penulis selama ini.
3. Bapak Ir. Handayanu M,Sc. Ph.D. selaku dosen pembimbing pertama dan Ir. Murtedjo, M.Eng. selaku dosen pembimbing kedua yang selalu dengan sabar membimbing penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini,
4. Bapak Dr. Eng. Rudi Walujo Prastianto, S.T, M.T. selaku dosen wali yang selalu membimbing penulis dalam segala urusan dari awal hingga akhir perkuliahan.
5. Bapak-bapak dosen penguji yang telah memberikan masukan sehingga Tugas Akhir ini dapat terselesaikan dengan baik.
6. Ericza, Mba Yani, Mba Devi, Mba Gea, Mba Eva, Mas Yuda, dan Mas Bagus, untuk waktu, pembelajaran, ilmu, dan bantuannya selama pengerjaan Tugas Akhir ini.
7. Teman-teman seperjuangan yang luar biasa dalam menyelesaikan Tugas Akhir, Ustazah Aulia, Novia Noor Azkia, Danny, dan Evan, untuk pembelajaran, kerjasama, dan semangatnya selama ini.
8. Sahabat-sahabat penulis, khususnya Anis, Reni, Sukma, Imami 2012, dan Settingan, untuk segala bantuan, kebersamaan dan semangatnya selama pengerjaan Tugas Akhir ini.
9. Semua teman-teman Varuna yang selalu memberikan dukungan demi terselesaikannya Tugas Akhir ini.
10. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu

(halaman ini sengaja di kosongkan)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	v
<i>ABSTRACT</i>	vii
KATA PENGANTAR.....	ix
UCAPAN TERIMA KASIH	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xxvii
DAFTAR LAMPIRAN	xxix

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Batasan Masalah	3
1.6 Sistematika Penulisan	5

BAB II TINJAUAN PUSTAKA DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka	7
2.2 Dasar Teori.....	9
2.2.1 Analisis Dinamis	9
2.2.2 <i>Floating Storage and Offloading System</i>	10
2.2.3 Sistem Tambat.....	11
2.2.4 Moda Gerak Struktur Terapug	17
2.2.5 <i>Heading</i> Kapal terhadap Arah Gelombang	19
2.2.6 Gerakan <i>Surge</i> Murni	20
2.2.7 Gerakan <i>Sway</i> Murni.....	22
2.2.8 Gerakan <i>Heave</i> Murni	24

2.2.9 Gerakan <i>Roll</i> Murni	27
2.2.10 Gerakan <i>Pitch</i> Murni	30
2.2.11 Gerakan <i>Yaw</i> Murni.....	33
2.2.12 Gerakan Kapal <i>Six Degree Of Freedom</i>	36
2.2.13 <i>Response Amplitude Operator</i>	36
2.2.14 Spektrum Gelombang	39
2.2.15 Spektrum Respon	40
2.2.16 Konsep Pembebanan.....	40
2.2.17 Jenis <i>Mooring Line</i>	41
2.2.18 <i>Anchor Chain Rantai</i> (Rantai Jangkar).....	42
2.2.19 <i>Tension</i> pada <i>Mooring Line</i>	44
2.2.20 Tegangan Aksial	46
2.2.21 <i>Bending Stress</i>	47
2.2.22 Tegangan <i>Von Mises</i>	48

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir.....	49
3.2 Prosedur Penelitian	51
3.3 Pengumpulan Data.....	53

BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Pemodelan Struktur	61
4.1.1 FSO Arco Ardjuna	61
4.1.2 <i>Single Point Mooring</i>	63
4.1.3 <i>Shuttle Tanker</i>	64
4.2 Validasi Hidrostatik.....	65
4.2.1 FSO	65
4.2.2 <i>Single Point Mooring</i>	68
4.2.3 <i>Shuttle Tanker</i> 85000 DWT	68

4.3	<i>Lines Plan</i>	69
4.3.1	FSO.....	69
4.3.2	<i>Shuttle Tanker 85000 DWT</i>	70
4.4	Spektrum Gelombang.....	71
4.5	Analisis Gerakan Kapal.....	72
4.5.1	FSO	72
4.5.2	<i>RAO Single Point Mooring</i>	73
4.5.3	<i>Shuttle Tanker 85000 DWT</i>	74
4.6	Konfigurasi Arah Pembebanan Gelombang	75
4.7	<i>Respon Amplitudo Operator</i>	76
4.7.1	FSO Arco Ardjuna Kondisi <i>Mooring</i>	77
4.7.2	<i>Single Point Mooring</i> Kondisi <i>Mooring</i>	85
4.7.3	<i>Shuttle Tanker 85000 DWT</i> Kondisi <i>Mooring</i>	92
4.8	Respon Spektra	100
4.8.1	Respon Spektra FSO Arco Ardjuna saat Kondisi Tertambat	100
4.8.2	Respon Spektra <i>Single Point Mooring</i> saat Kondisi Tertambat	107
4.8.3	Respon Spektra <i>Shuttle Tanker</i> Kondisi Tertambat	113
4.9	Distribusi <i>Tension</i> pada Tali Tambat	120
4.10	Analisa Kekuatan <i>Anchor Chain</i>	124

BAB V PENUTUP

5.1	Kesimpulan	131
5.2	Saran.....	132

DAFTAR PUSTAKA	xxxi
-----------------------------	-------------

LAMPIRAN

BIODATA PENULIS

(halaman ini sengaja di kosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Sistem Tambat.....	11
Gambar 2.2 <i>Fixed Tower</i>	12
Gambar 2.3 <i>Single Anchor Leg Mooring (CALM) Buoy</i>	12
Gambar 2.4 <i>Catenary Anchor Leg Mooring (CALM) Buoy</i>	13
Gambar 2.5 <i>Articulated Loading Platform (ALP)</i>	13
Gambar 2.6 <i>Single Point and Reservoir (SPAR)</i>	13
Gambar 2.7 <i>Single Anchor Loading (SAL)</i>	14
Gambar 2.8 <i>Turret Mooring</i>	14
Gambar 2.9 Gambaran sistem CALM pada SPM 3.....	17
Gambar 2.10 Moda Gerak Struktur Apung.....	18
Gambar 2.11 Definisi Arah Datang Gelombang Terhadap <i>Heading</i> Kapal	19
Gambar 2.12 Ilustrasi gerakan <i>Surge</i>	20
Gambar 2.13 Ilustrasi gerakan <i>Swaying</i>	22
Gambar 2.14 Ilustrasi gerakan <i>Heaving</i>	24
Gambar 2.15 Ilustrasi gerakan <i>Rolling</i>	28
Gambar 2.16 Ilustrasi kondisi <i>Pitch</i>	31
Gambar 2.17 Ilustrasi kondisi <i>Yawing</i>	34
Gambar 2.18 Bentuk Umum Grafik Respons Gerakan Bangunan Apung.....	38
Gambar 2.19 Komponen dan Konstruksi Rantai Jangkar.....	43
Gambar 2.20 Ilustrasi Tegangan Normal Akibat Gaya Aksial	46
Gambar 2.21 <i>Bending Stress</i> pada Suatu Penampang.....	47
Gambar 2.22 <i>Von Mises Stress</i> pada Suatu Penampang	48
Gambar 3.1 Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir.....	49
Gambar 3.1 Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir (Lanjutan).....	50

Gambar 3.2 <i>Structural General Arrangement Plan of Arco Ardjuna</i>	54
Gambar 3.3 <i>Structural General Arrangement of Buoy Body</i>	55
Gambar 3.4 <i>Anchoring System Pattern</i>	56
Gambar 3.5 <i>Anchoring System Chain</i>	57
Gambar 3.6 <i>Anchoring Leg</i>	58
Gambar 4.1 <i>General Arrangement FSO Arco Ardjuna</i>	61
Gambar 4.2 Hasil pemodelan FSO Arco Ardjuna pada Maxsurf Tampak Samping	62
Gambar 4.3 Hasil pemodelan FSO Arco Ardjuna pada Maxsurf Tampak Depan.....	62
Gambar 4.4 Hasil pemodelan FSO Arco Ardjuna pada Maxsurf Tampak Atas	62
Gambar 4.5 Hasil pemodelan FSO Arco Ardjuna pada Maxsurf Tampak Isometri.....	63
Gambar 4.6 Hasil Permodelan <i>Single Point Mooring</i> pada Maxsurf.....	64
Gambar 4.7 Hasil Permodelan <i>Shuttle Tanker</i> dengan Menggunakan <i>Software Maxsurf</i>	65
Gambar 4.8 <i>Lines Plan Arco Ardjuna</i>	70
Gambar 4.9 <i>Lines Plan Shuttle Tanker 85000 DWT</i>	70
Gambar 4.10 Spektrum Jonswap Perairan Laut Jawa dengan Hs = 3,6 meter	71
Gambar 4.11 Model FSO Arco Ardjuna pada Ansys.....	73
Gambar 4.12 Model SPM pada Ansys	74
Gambar 4.13 Model <i>Shuttle Tanker</i> pada Ansys.....	75
Gambar 4.14 Konfigurasi Arah Pembebanan Gelombang pada SPM.....	75
Gambar 4.15 Konfigurasi Sistem Tandem <i>Offloading</i> pada struktur SPM, FSO, dan <i>Shuttle Tanker</i>	76

Gambar 4.16 Grafik RAO Gerakan Translasi pada FSO Arco Ardjuna kondisi <i>Light load</i> saat <i>Mooring</i> dengan <i>Heading</i> Pembebanan 0 derajat	78
Gambar 4.17 Grafik RAO Gerakan Rotasi pada FSO Arco Ardjuna kondisi <i>Light load</i> saat <i>Mooring</i> dengan <i>Heading</i> Pembebanan 0 derajat	78
Gambar 4.18 Grafik RAO Gerakan Translasi pada FSO Arco Ardjuna kondisi <i>Light load</i> saat <i>Mooring</i> dengan <i>Heading</i> Pembebanan 90 derajat	79
Gambar 4.19 Grafik RAO Gerakan Rotasi pada FSO Arco Ardjuna kondisi <i>Light load</i> saat <i>Mooring</i> dengan <i>Heading</i> Pembebanan 90 derajat	79
Gambar 4.20 Grafik RAO Gerakan Translasi pada FSO Arco Ardjuna kondisi <i>Light load</i> saat <i>Mooring</i> dengan <i>Heading</i> Pembebanan 180 derajat	80
Gambar 4.21 Grafik RAO Gerakan Rotasi pada FSO Arco Ardjuna kondisi <i>Light load</i> saat <i>Mooring</i> dengan <i>Heading</i> Pembebanan 180 derajat	80
Gambar 4.22 Grafik RAO Gerakan Translasi pada FSO Arco Ardjuna kondisi <i>Full load</i> saat <i>Mooring</i> dengan <i>Heading</i> Pembebanan 0 derajat	81
Gambar 4.23 Grafik RAO Gerakan Rotasi pada FSO Arco Ardjuna kondisi <i>Full load</i> saat <i>Mooring</i> dengan <i>Heading</i> Pembebanan 0 derajat	82
Gambar 4.24 Grafik RAO Gerakan Translasi pada FSO Arco Ardjuna kondisi <i>Full load</i> saat <i>Mooring</i> dengan <i>Heading</i> Pembebanan 90 derajat	82
Gambar 4.25 Grafik RAO Gerakan Rotasi pada FSO Arco Ardjuna kondisi <i>Full load</i> saat <i>Mooring</i> dengan <i>Heading</i> Pembebanan 90 derajat	83
Gambar 4.26 Grafik RAO Gerakan Translasi pada FSO Arco Ardjuna kondisi <i>Full load</i> saat <i>Mooring</i> dengan <i>Heading</i> Pembebanan 180 derajat	83

Gambar 4.27 Grafik RAO Gerakan Rotasi pada FSO Arco Ardjuna kondisi <i>Full load</i> saat <i>Mooring</i> dengan <i>Heading</i> Pembebanan 180 derajat.....	84
Gambar 4.28 Grafik RAO Gerakan Translasi pada SPM saat <i>Mooring</i> dengan FSO Arco Ardjuna kondisi <i>Light load</i> dengan <i>Heading</i> Pembebanan 0 derajat.....	85
Gambar 4.29 Grafik RAO Gerakan Rotasi pada SPM saat <i>Mooring</i> dengan FSO Arco Ardjuna kondisi <i>Light load</i> dengan <i>Heading</i> Pembebanan 0 derajat.....	86
Gambar 4.30 Grafik RAO Gerakan Translasi pada SPM saat <i>Mooring</i> dengan FSO Arco Ardjuna kondisi <i>Light load</i> dengan <i>Heading</i> Pembebanan 90 derajat.....	86
Gambar 4.31 Grafik RAO Gerakan Rotasi pada SPM saat <i>Mooring</i> dengan FSO Arco Ardjuna kondisi <i>Light load</i> dengan <i>Heading</i> Pembebanan 90 derajat.....	87
Gambar 4.32 Grafik RAO Gerakan Translasi pada SPM saat <i>Mooring</i> dengan FSO Arco Ardjuna kondisi <i>Light load</i> dengan <i>Heading</i> Pembebanan 180 derajat.....	87
Gambar 4.33 Grafik RAO Gerakan Rotasi pada SPM saat <i>Mooring</i> dengan FSO Arco Ardjuna kondisi <i>Light load</i> dengan <i>Heading</i> Pembebanan 180 derajat.....	88
Gambar 4.34 Grafik RAO Gerakan Translasi pada SPM saat <i>Mooring</i> dengan FSO Arco Ardjuna kondisi <i>Full load</i> dengan <i>Heading</i> Pembebanan 0 derajat.....	89
Gambar 4.35 Grafik RAO Gerakan Rotasi pada SPM saat <i>Mooring</i> dengan FSO Arco Ardjuna kondisi <i>Full load</i> dengan <i>Heading</i> Pembebanan 0 derajat.....	89
Gambar 4.36 Grafik RAO Gerakan Translasi pada SPM saat <i>Mooring</i> dengan FSO Arco Ardjuna kondisi <i>Full load</i> dengan <i>Heading</i> Pembebanan 90 derajat.....	90
Gambar 4.37 Grafik RAO Gerakan Rotasi pada SPM saat <i>Mooring</i> dengan FSO Arco Ardjuna kondisi <i>Full load</i> dengan <i>Heading</i> Pembebanan 90 derajat.....	90

Gambar 4.38 Grafik RAO Gerakan Translasi pada SPM saat <i>Mooring</i> dengan FSO Arco Ardjuna kondisi <i>Full load</i> dengan <i>Heading</i> Pembebanan 180 derajat	91
Gambar 4.39 Grafik RAO Gerakan Rotasi pada SPM saat <i>Mooring</i> dengan FSO Arco Ardjuna kondisi <i>Full load</i> dengan <i>Heading</i> Pembebanan 180 derajat	91
Gambar 4.40 Grafik RAO Gerakan Translasi pada <i>Shuttle Tanker</i> kondisi <i>Light load</i> saat <i>Mooring</i> dengan <i>Heading</i> Pembebanan 0 derajat	93
Gambar 4.41 Grafik RAO Gerakan Rotasi pada <i>Shuttle Tanker</i> kondisi <i>Light load</i> saat <i>Mooring</i> dengan <i>Heading</i> Pembebanan 0 derajat	93
Gambar 4.42 Grafik RAO Gerakan Translasi pada <i>Shuttle Tanker</i> kondisi <i>Light load</i> saat <i>Mooring</i> dengan <i>Heading</i> Pembebanan 90 derajat	94
Gambar 4.43 Grafik RAO Gerakan Rotasi pada <i>Shuttle Tanker</i> kondisi <i>Full load</i> saat <i>Mooring</i> dengan <i>Heading</i> Pembebanan 90 derajat	94
Gambar 4.44 Grafik RAO Gerakan Translasi pada <i>Shuttle Tanker</i> kondisi <i>Full load</i> saat <i>Mooring</i> dengan <i>Heading</i> Pembebanan 180 derajat	95
Gambar 4.45 Grafik RAO Gerakan Rotasi pada <i>Shuttle Tanker</i> kondisi <i>Full load</i> saat <i>Mooring</i> dengan <i>Heading</i> Pembebanan 180 derajat	95
Gambar 4.46 Grafik RAO Gerakan Translasi pada <i>Shuttle Tanker</i> kondisi <i>Full load</i> saat <i>Mooring</i> dengan <i>Heading</i> Pembebanan 0 derajat	96
Gambar 4.47 Grafik RAO Gerakan Rotasi pada <i>Shuttle Tanker</i> kondisi <i>Full load</i> saat <i>Mooring</i> dengan <i>Heading</i> Pembebanan 0 derajat	97
Gambar 4.48 Grafik RAO Gerakan Translasi pada <i>Shuttle Tanker</i> kondisi <i>Full load</i> saat <i>Mooring</i> dengan <i>Heading</i> Pembebanan 90 derajat	97

Gambar 4.49 Grafik RAO Gerakan Rotasi pada <i>Shuttle Tanker</i> kondisi <i>Full load</i> saat <i>Mooring</i> dengan <i>Heading</i> Pembebanan 90 derajat.....	98
Gambar 4.50 Grafik RAO Gerakan Translasi pada <i>Shuttle Tanker</i> kondisi <i>Full load</i> saat <i>Mooring</i> dengan <i>Heading</i> Pembebanan 180 derajat.....	98
Gambar 4.51 Grafik RAO Gerakan Rotasi pada <i>Shuttle Tanker</i> kondisi <i>Full load</i> saat <i>Mooring</i> dengan <i>Heading</i> Pembebanan 180 derajat.....	99
Gambar 4.52 Grafik Respon Spektra Gerakan Translasi pada FSO Arco Ardjuna saat kondisi <i>Light load</i> Tertambat SPM dengan <i>Heading</i> Pembebanan 0 derajat.....	101
Gambar 4.53 Grafik Respon Spektra Gerakan Rotasi pada FSO Arco Ardjuna saat kondisi <i>Light load</i> Tertambat SPM dengan <i>Heading</i> Pembebanan 0 derajat.....	101
Gambar 4.54 Grafik Respon Spektra Gerakan Translasi pada FSO Arco Ardjuna saat kondisi <i>Light load</i> Tertambat SPM dengan <i>Heading</i> Pembebanan 90 derajat.....	102
Gambar 4.55 Grafik Respon Spektra Gerakan Rotasi pada FSO Arco Ardjuna saat kondisi <i>Light load</i> Tertambat SPM dengan <i>Heading</i> Pembebanan 90 derajat.....	102
Gambar 4.56 Grafik Respon Spektra Gerakan Translasi pada FSO Arco Ardjuna saat kondisi <i>Light load</i> Tertambat SPM dengan <i>Heading</i> Pembebanan 180 derajat.....	103
Gambar 4.57 Grafik Respon Spektra Gerakan Rotasi pada FSO Arco Ardjuna saat kondisi <i>Light load</i> Tertambat SPM dengan <i>Heading</i> Pembebanan 180 derajat.....	103
Gambar 4.58 Grafik Respon Spektra Gerakan Translasi pada FSO Arco Ardjuna saat kondisi <i>Full load</i> Tertambat SPM dengan <i>Heading</i> Pembebanan 0 derajat.....	104
Gambar 4.59 Grafik Respon Spektra Gerakan Rotasi pada FSO Arco Ardjuna saat kondisi <i>Full load</i> Tertambat SPM dengan <i>Heading</i> Pembebanan 0 derajat.....	104

- Gambar 4.60 Grafik Respon Spektra Gerakan Translasi
pada FSO Arco Ardjuna saat kondisi *Full load*
Tertambat SPM dengan *Heading* Pembebanan 90 derajat 105
- Gambar 4.61 Grafik Respon Spektra Gerakan Rotasi
pada FSO Arco Ardjuna saat kondisi *Full load*
Tertambat SPM dengan *Heading* Pembebanan 90 derajat 105
- Gambar 4.62 Grafik Respon Spektra Gerakan Translasi
pada FSO Arco Ardjuna saat kondisi *Full load*
Tertambat SPM dengan *Heading* Pembebanan 180 derajat 106
- Gambar 4.63 Grafik Respon Spektra Gerakan Rotasi
pada FSO Arco Ardjuna saat kondisi *Full load*
Tertambat SPM dengan *Heading* Pembebanan 180 derajat 106
- Gambar 4.64 Grafik Respon Spektra Gerakan Translasi
pada *Single Point Mooring* Tertambat FSO Arco Ardjuna
Kondisi *Light Load* dengan *Heading* Pembebanan 0 derajat 107
- Gambar 4.65 Grafik Respon Spektra Gerakan Rotasi
pada *Single Point Mooring* Tertambat FSO Arco Ardjuna
Kondisi *Light Load* dengan *Heading* Pembebanan 0 derajat 108
- Gambar 4.66 Grafik Respon Spektra Gerakan Translasi
pada *Single Point Mooring* Tertambat FSO Arco Ardjuna
Kondisi *Light Load* dengan *Heading* Pembebanan 90 derajat .. 108
- Gambar 4.67 Grafik Respon Spektra Gerakan Rotasi
pada *Single Point Mooring* Tertambat FSO Arco Ardjuna
Kondisi *Light Load* dengan *Heading* Pembebanan 90 derajat .. 109
- Gambar 4.68 Grafik Respon Spektra Gerakan Translasi
pada *Single Point Mooring* Tertambat FSO Arco Ardjuna
Kondisi *Light Load* dengan *Heading* Pembebanan 180 derajat 109
- Gambar 4.69 Grafik Respon Spektra Gerakan Rotasi
pada *Single Point Mooring* Tertambat FSO Arco Ardjuna
Kondisi *Light Load* dengan *Heading* Pembebanan 180 derajat 110
- Gambar 4.70 Grafik Respon Spektra Gerakan Translasi
pada *Single Point Mooring* Tertambat FSO Arco Ardjuna
Kondisi *Full Load* dengan *Heading* Pembebanan 0 derajat 110

- Gambar 4.71 Grafik Respon Spektra Gerakan Rotasi
pada *Single Point Mooring* Tertambat FSO Arco Ardjuna
Kondisi *Full Load* dengan *Heading* Pembebanan 0 derajat.....111
- Gambar 4.72 Grafik Respon Spektra Gerakan Translasi
pada *Single Point Mooring* Tertambat FSO Arco Ardjuna
Kondisi *Full Load* dengan *Heading* Pembebanan 90 derajat.....111
- Gambar 4.73 Grafik Respon Spektra Gerakan Rotasi
pada *Single Point Mooring* Tertambat FSO Arco Ardjuna
Kondisi *Full Load* dengan *Heading* Pembebanan 90 derajat.....112
- Gambar 4.74 Grafik Respon Spektra Gerakan Translasi
pada *Single Point Mooring* Tertambat FSO Arco Ardjuna
Kondisi *Full Load* dengan *Heading* Pembebanan 180 derajat...112
- Gambar 4.75 Grafik Respon Spektra Gerakan Rotasi
pada *Single Point Mooring* Tertambat FSO Arco Ardjuna
Kondisi *Full Load* dengan *Heading* Pembebanan 180 derajat...113
- Gambar 4.76 Grafik Respon Spektra Gerakan Translasi pada
Shuttle Tanker saat kondisi *Light load* Tertambat dengan
SPM dan FSO dengan *Heading* Pembebanan 0 derajat114
- Gambar 4.77 Grafik Respon Spektra Gerakan Rotasi pada
Shuttle Tanker saat kondisi *Light load* Tertambat dengan
SPM dan FSO dengan *Heading* Pembebanan 0 derajat114
- Gambar 4.78 Grafik Respon Spektra Gerakan Translasi pada
Shuttle Tanker saat kondisi *Light load* Tertambat dengan
SPM dan FSO dengan *Heading* Pembebanan 90 derajat115
- Gambar 4.79 Grafik Respon Spektra Gerakan Rotasi pada
Shuttle Tanker saat kondisi *Light load* Tertambat dengan
SPM dan FSO dengan *Heading* Pembebanan 90 derajat115
- Gambar 4.80 Grafik Respon Spektra Gerakan Translasi pada
Shuttle Tanker saat kondisi *Light load* Tertambat dengan
SPM dan FSO dengan *Heading* Pembebanan 180 derajat116
- Gambar 4.81 Grafik Respon Spektra Gerakan Rotasi pada
Shuttle Tanker saat kondisi *Light load* Tertambat dengan
SPM dan FSO dengan *Heading* Pembebanan 180 derajat116

Gambar 4.82 Grafik Respon Spektra Gerakan Translasi pada <i>Shuttle Tanker</i> saat kondisi <i>Full load</i> Tertambat dengan SPM dan FSO dengan <i>Heading</i> Pembebanan 0 derajat.....	117
Gambar 4.83 Grafik Respon Spektra Gerakan Rotasi pada <i>Shuttle Tanker</i> saat kondisi <i>Full load</i> Tertambat dengan SPM dan FSO dengan <i>Heading</i> Pembebanan 0 derajat.....	117
Gambar 4.84 Grafik Respon Spektra Gerakan Translasi pada <i>Shuttle Tanker</i> saat kondisi <i>Full load</i> Tertambat dengan SPM dan FSO dengan <i>Heading</i> Pembebanan 90 derajat.....	118
Gambar 4.85 Grafik Respon Spektra Gerakan Rotasi pada <i>Shuttle Tanker</i> saat kondisi <i>Full load</i> Tertambat dengan SPM dan FSO dengan <i>Heading</i> Pembebanan 90 derajat.....	118
Gambar 4.86 Grafik Respon Spektra Gerakan Translasi pada <i>Shuttle Tanker</i> saat kondisi <i>Full load</i> Tertambat dengan SPM dan FSO dengan <i>Heading</i> Pembebanan 180 derajat.....	119
Gambar 4.87 Grafik Respon Spektra Gerakan Rotasi pada <i>Shuttle Tanker</i> saat kondisi <i>Full load</i> Tertambat dengan SPM dan FSO dengan <i>Heading</i> Pembebanan 180 derajat.....	119
Gambar 4.88 Konfigurasi Sistem Tandem <i>Offloading</i>	121
Gambar 4.89 Kriteria Perancangan Konstruksi Lokal Berdasarkan ABS	125
Gambar 4.90 Hasil Pemodelan <i>Anchor Chain</i> pada <i>Ansys Mechanical</i>	126
Gambar 4.91 Hasil <i>Meshing Chain</i> pada <i>Ansys Mechanical</i>	126
Gambar 4.92 Grafik <i>Mesh Sensitivity</i>	127
Gambar 4.93 Beban pada <i>Anchor Chain</i>	128
Gambar 4.94 <i>Solving</i> Tegangan Von Mises.....	128
Gambar 4.95 <i>Solving</i> <i>Deformasi</i>	129

(halaman ini sengaja di kosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1. Ukuran Utama FSO Arco Ardjuna.....	53
Tabel 3.2. <i>Main Dimension CALM buoy</i>	53
Tabel 3.3. Karakteristik <i>Anchor Legs</i>	56
Tabel 3.4. Karakteristik <i>Mooring Hawser</i>	59
Tabel 3.5. <i>Principal Dimension Shuttle Tanker</i>	59
Tabel 3.6. Data Lingkungan Perairan Laut Jawa	60
Tabel 4.1. <i>Main Dimension CALM buoy</i>	63
Tabel 4.2. Ukuran Utama (<i>Principal Dimension</i>) <i>Shuttle Tanker</i>	64
Tabel 4.3. Koreksi Hidrostatik Data dengan Model Maxsurf pada Kondisi <i>Full Load</i>	67
Tabel 4.4. Koreksi Hidrostatik Data dengan Model Maxsurf pada Kondisi <i>light load</i>	67
Tabel 4.5. Koreksi Hidrostatik Data dengan Hidrostatik Model <i>Single Point Mooring</i> pada Maxsurf	68
Tabel 4.6. Koreksi Hidrostatik Data dengan Model Maxsurf pada <i>Shuttle Tanker</i> saat Kondisi <i>Full Load</i>	69
Tabel 4.7. Koreksi Hidrostatik Data dengan Model Maxsurf pada <i>Shuttle Tanker</i> saat Kondisi <i>Light Load</i>	69
Tabel 4.8. Data Titik Berat, <i>Displacement</i> , dan <i>Radius Gyration</i> pada FSO	72
Tabel 4.9. Data Lingkungan	72
Tabel 4.10. Data Titik Berat, <i>Displacement</i> , dan <i>Radius Gyration</i> pada SPM.....	73
Tabel 4.11. Data Titik Berat, <i>Displacement</i> , dan <i>Radius Gyration</i> pada <i>Shuttle Tanker</i>	74
Tabel 4.12. Nilai Maksimum RAO FSO Arco Ardjuna <i>Light Condition</i>	81
Tabel 4.13. Nilai Maksimum RAO FSO Arco Ardjuna <i>Full Condition</i>	84

Tabel 4.14. Nilai Maksimum RAO SPM Tertambat dengan FSO Arco Ardjuna <i>Light Condition</i>	88
Tabel 4.15. Nilai Maksimum RAO SPM Tertambat dengan FSO Arco Ardjuna <i>Full Condition</i>	92
Tabel 4.16. Nilai Maksimum RAO <i>Shuttle Tanker Light Condition</i>	96
Tabel 4.17. Nilai Maksimum RAO <i>Shuttle Tanker Full Condition</i>	99
Tabel 4.18. Nilai <i>Tension</i> pada <i>Anchor Legs</i> untuk Kondisi FSO <i>Full Load</i> dan <i>Shuttle Tanker 10% Bunker</i>	122
Tabel 4.19. Nilai <i>Tension</i> pada <i>Anchor Legs</i> untuk Kondisi FSO <i>Light Load</i> dan <i>Shuttle Tanker Full Load</i>	123
Tabel 4.20. Data <i>Anchor Leg</i>	124
Tabel 4.21. <i>Mesh Sensitivity</i>	127
Tabel 4.22. Tegangan Von Mises dan Deformasi Maksimum pada <i>Chain</i>	129

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN A	<i>Response Amplitude Operator Struktur Saat Free Floating</i>
LAMPIRAN B	Perhitungan
LAMPIRAN C	Respon Spektra Struktur Saat <i>Free Floating</i>
LAMPIRAN D	<i>Mesh Sensitivity</i>

(halaman ini sengaja di kosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang Masalah

FSO (*Floating Storage and Offloading*) merupakan struktur terapung yang berfungsi untuk menerima, menyimpan, dan menyalurkan hidrokarbon. Struktur FSO menerima hidrokarbon melalui *offloading line* lalu menyalurkannya pada *shuttle tanker* untuk ditransportasikan ke suatu *site*.

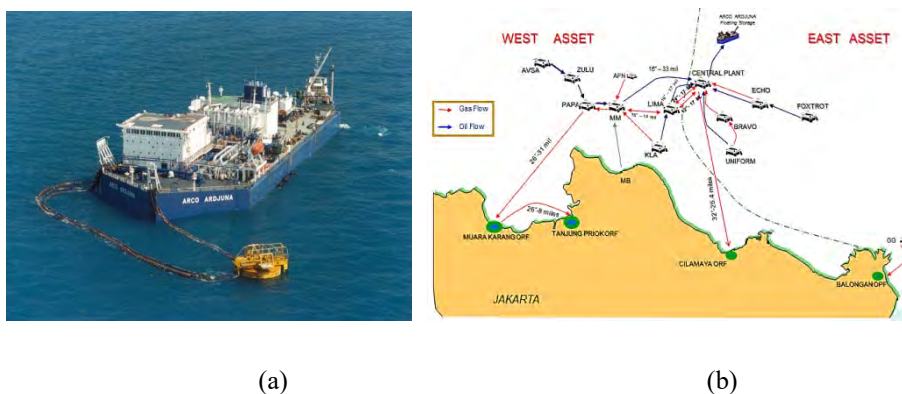
Pergerakan struktur terapung sangat dipengaruhi oleh eksitasi beban lingkungan (gelombang, arus, dan angin). Gerakan struktur yang terjadi mempengaruhi *offset* struktur sehingga pada saat beroperasi dibutuhkan sistem tambat untuk mempertahankan FSO dan *shuttle tanker* agar tetap stabil terutama pada saat proses *offloading* berlangsung. Sistem tambat yang digunakan dalam operasi FSO ini adalah sistem tambat SPM (*Single Point Mooring*) tipe CALM (*Catenary Anchored Leg Mooring*). Jenis *single point mooring* adalah tipe sistem tambat yang bersifat dapat mengikuti kondisi lingkungan (*weathervane*). Jadi saat beroperasi, FSO atau struktur terapung lainnya dapat bergerak mengikuti arah gelombang namun tetap tertambat pada *mooring*. Berikut adalah bentuk struktur SPM disajikan pada Gambar 1.1:



Gambar 1.1. *Single Point Mooring*
(Sumber: PT. PHE ONWJ, 2013)

Untuk meningkatkan produktifitas dan distribusi saat *offloading*, FSO akan lebih mempunyai banyak manfaat jika ditambahkan dengan sistem *offloading* berupa sistem tandem. Respon struktur terapung mempengaruhi *tension* pada *anchor chain*. Selanjutnya, dilakukan pemodelan *finite element* untuk mengetahui kekuatan pada tiap-tiap *anchor chain*. Analisis kekuatan pada *anchor chain* SPM perlu dilakukan guna menjaga operabilitas dan keselamatan kinerja tempat dimana FSO tersebut beroperasi.

Penelitian ini mengambil studi kasus *shuttle tanker* dengan kapasitas 85000 DWT dan FSO Arco Ardjuna yang ditambat dengan SPM 3 (*Single Point Mooring*) tipe CALM (*Catenary Anchored Leg Mooring*) buoy yang beroperasi di Ardjuna Marine Terminal, lokasi dan bentuk detail dari struktur tersebut dapat dilihat pada Gambar 1.2. Dalam penelitian ini akan dibahas bagaimana mengetahui pengaruh gerakan 6 *degree of freedom* pada FSO, *shuttle tanker*, dan SPM yang disebabkan oleh beban lingkungan yang akan menimbulkan *tension* maksimal pada *anchor chain* kemudian dilanjutkan dengan menganalisa kekuatan tiap-tiap *anchor chain* pada *Single Point Mooring* FSO Arco Ardjuna, sehingga memenuhi aturan dan standar yang ditetapkan oleh *codes* atau *class* yang berlaku.



Gambar 1.2 (a) FSO Arco Ardjuna Tertambat SPM 3; (b) Ardjuna Marine Terminal
(Sumber: PT. PHE ONWJ, 2013)

1.2. Perumusan Masalah

Permasalahan yang menjadi kajian dalam Tugas Akhir ini antara lain:

1. Bagaimana perilaku gerak FSO, *shuttle tanker*, dan SPM saat tertambat?
2. Berapa besar *tension* maksimal yang terjadi pada *anchor legs*?
3. Bagaimana analisa kekuatan *anchor chain* pada CALM *buoy* akibat gaya yang bekerja pada *anchor chain*?

1.3. Tujuan

Tujuan dari tugas akhir ini adalah :

1. Menghitung perilaku gerak FSO, *shuttle tanker*, dan SPM saat tertambat.
2. Menghitung besar *tension* maksimal yang terjadi pada *anchor legs*.
3. Menghitung kekuatan *anchor chain* pada CALM *buoy*.

1.4. Manfaat

Dari pengerjaan tugas akhir ini, akan dapat diketahui respon gerak FSO, *shuttle tanker*, dan SPM saat tertambat dalam gerakan *surge*, *sway*, *heave*, *roll*, *pitch* dan *yaw*. Dan diketahui besar nilai *tension* maksimal serta kekuatan *anchor chain* pada *single point mooring* FSO Arco Ardjuna. Sehingga memenuhi aturan dan standar yang ditetapkan oleh *codes* atau *class* yang berlaku.

1.5. Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan agar topik yang dibahas tidak melebar adalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini merupakan studi kasus pada FSO Arco Ardjuna milik Pertamina Hulu Energi *Offshore North West Java* (PHE ONWJ).
2. FSO dianggap sebagai *rigid body*, sehingga kekuatan memanjang dari FSO tidak diperhitungkan.

3. Skema *heading* yang dianalisa hanya pada *head sea*, *beam sea*, dan *following sea*.
4. Beban lingkungan yang ditinjau adalah beban arus, beban angin dan beban gelombang pada kondisi lingkungan 100 tahunan (kondisi ekstrim).
5. *Riser* dan *Floating Hose* tidak dimodelkan.
6. Sistem tambat yang ditinjau dalam tugas akhir ini adalah *single point mooring* tipe CALM (*Catenary Anchored Leg Mooring*) dengan analisis yang dilakukan adalah untuk kondisi ULS (*Ultimate Limit State*) atau *all lines intact*.
7. Jangkar dianggap *fixed* sehingga tidak dilakukan analisa terhadap *holding capacity*.
8. Jenis dan penyambungan pada *anchor legs* diasumsikan tersambung dengan baik dan tanpa cacat.
9. Gesekan antar *Chain* diabaikan
10. Validasi Maxsurf FSO Arco Ardjuna pada kondisi *Light Condition* (muatan -50%) dan *Full Condition*.
11. Analisis *mooring* dilakukan dalam dua kondisi *offloading* yaitu kondisi FSO *full load - shuttle tanker light load*, dan kondisi FSO *light load* (muatan -50%) - *shuttle tanker full load*.

1.6. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan laporan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

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

BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

Bab II berisi tinjauan pustaka dan dasar teori yang menjadi acuan dari penelitian tugas akhir ini. Penelitian dan tugas akhir sebelumnya yang pernah membahas topik yang berkesinambungan dengan penelitian yang akan dilakukan, dijelaskan secara terangkum untuk menjadi dasar pengembangan penelitian.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab III menjelaskan mengenai langkah-langkah pelaksanaan penelitian dan data-data yang telah didapatkan penulis untuk memulai penelitian.

BAB IV ANALISIS HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini, penulis membahas seluruh hasil dari penelitian yang dilaksanakan dan pencapaian hasil dari pelaksanaan prosedur penelitian. Penulis membahas mengenai permodelan yang dilakukan hingga hasil analisis yang telah dilakukan.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisi kesimpulan yang merupakan uraian singkat dari keseluruhan hasil analisis. Uraian singkat ini diharapkan bisa menjawab rumusan masalah yang ada pada Bab I. Pada bab ini juga berisikan saran yang bermanfaat guna keberlanjutan penelitian terkait kedepannya.

(halaman ini sengaja di kosongkan)

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Anjungan terapung merupakan anjungan yang mempunyai karakter bergerak mengikuti gerakan gelombang. Seringkali anjungan tipe ini dihubungkan dengan dasar laut menggunakan peralatan mekanik seperti kabel atau rantai. Untuk anjungan tipe ini, yang utama adalah mobilitas dan kemampuannya mengantisipasi gerakan akibat gelombang dan arus laut (Djarmiko, 2003).

FSO (*Floating Storage Offloading*) merupakan bangunan apung berbadan kapal yang mempunyai fasilitas penyimpanan dan *offloading* atau penyaluran minyak dan gas bumi. Secara sederhana FSO merupakan tanker yang ditambat pada sistem tambat. Sistem tambat yang biasa digunakan yaitu SPM (*Single Point Mooring*). Namun pada kondisi tertentu sistem tambatnya dapat digantikan dengan *spread mooring system* dengan mempertimbangkan kondisi *offloading* yang dilakukan dengan *shuttle tanker* (Paik, et.al., 2007).

Single Point Mooring (SPM) seringkali digunakan pada eksplorasi dan eksploitasi minyak dan gas untuk menahan tegangan yang terjadi pada FSO akibat adanya beban lingkungan yang terjadi. Sedangkan beban lingkungan yang selama ini memiliki pengaruh paling signifikan adalah beban gelombang di perairan laut.

Menurut Kusumawardhani (2011) komponen *mooring system* dibedakan menjadi dua yaitu *Wire Rope* dan *Chain* (Rantai). *Chain* (Rantai) merupakan sistem rantai telah terbukti untuk meredam gerakan FSO. Rantai lebih baik untuk pencegahan akan abrasi pada dasar laut dan memberikan kontribusi yang signifikan pada daya cengkram jangkar.

Banyak penelitian yang telah dilakukan mengenai analisa sistem tambat pada anjungan terapung. Salah satu diantaranya yaitu penelitian yang dilakukan oleh (Setyawan, 2012) tentang Analisis kekuatan *chain line* pada mooring sistem akibat konversi *motor tanker* menjadi *mooring storage tanker* (MST). MST memiliki karakteristik operasional yang berbeda dengan *Motor Tanker*. MST bersifat tetap, sedang *Motor Tanker* bersifat *mobile*, oleh karena itu dibutuhkan sistem tambat yang handal dan memenuhi beberapa karakteristik tertentu serta mampu menahan beban operasional tambahan akibat kondisi lingkungan saat menjadi MST.

Analisis tentang analisis kekuatan struktur sistem tandem juga sudah pernah dilakukan (Pratiwi, 2013). Analisis yang dilakukan meliputi analisis *tension* maksimum pada *hawser* dihitung untuk mendapatkan kekuatan *smit bracket* dan *panama chock*. Analisis dilakukan dalam kondisi tandem *offloading* dengan *shuttle tanker* 85.000 DWT. Penelitian terhadap kekuatan struktur global *buoy* pada *single point mooring* FSO Arco Ardjuna telah dilakukan oleh (Mauliani, 2015). *Buoy* pada sistem tambat FSO Arco Ardjuna telah memasuki umur operasi sehingga memerlukan adanya analisis ulang kekuatan global dari stuktur *buoy*.

Berdasarkan penelitian-penelitian yang telah dilakukan diatas, perlu adanya penelitian lebih detail mengenai analisa kekuatan setiap *anchor chain* pada *single point mooring* FSO Arco Ardjuna. Sehingga memenuhi *rule* yang ditetapkan oleh *codes* atau *class* yang berlaku, dan *anchor chain* pada SPM aman untuk beroperasi di ladang minyak yang diinginkan (dalam penelitian ini adalah Ardjuna Marine Terminal).

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Analisis Dinamis

Analisis dinamis memperhitungkan respon dinamis dari tali tambat. Efek variasi waktu akibat massa tali tambat, redaman dan percepatan relatif fluida disertakan. Dalam pendekatan ini, gerakan *fairlead* variasi waktu dihitung dari gerakan *surge*, *sway*, *heave*, *pitch*, *roll* dan *yaw* dari bangunan apung. Berdasarkan DNV OS E301 (2004), metode analisis simulasi domain pada bangunan lepas pantai dibagi menjadi dua, yaitu:

a. *Frequency Domain Analysis*

Frequency domain analysis adalah simulasi kejadian pada saat tertentu dengan interval frekuensi yang telah ditentukan sebelumnya. Metode ini bisa digunakan untuk memperkirakan respon gelombang acak, seperti gerakan dan percepatan *platform*, gaya tendon dan sudut. Keuntungan metode ini adalah tidak membutuhkan banyak waktu untuk perhitungan, *input* dan *output* juga lebih sering digunakan oleh perancang. Kekurangannya adalah untuk setiap persamaan *non-linear* harus diubah menjadi *linear*. Pada *frequency domain analysis*, keseimbangan dinamik dari sistem *linear* dapat diformulasikan dengan persamaan (1).

$$M_{(\omega)} \ddot{r} + C_{(\omega)} \dot{r} + K_{(\omega)} r = X e^{i\omega t} \dots\dots\dots(1)$$

dengan:

$M_{(\omega)}$ = matrik massa fungsi frekuensi (ton)

$C_{(\omega)}$ = matrik damping fungsi frekuensi (ton/s)

$K_{(\omega)}$ = matrik kekakuan fungsi frekuensi (kN/m)

X = vektor beban kompleks memberikan informasi pada amplitudo beban dan fase pada semua derajat kebebasan. Pola $e^{i\omega t}$ menetapkan variasi harmonik dari contoh beban dengan frekuensi ω .

r = vektor *displacement* (m)

b. Time Domain Analysis

Time domain analysis adalah penyelesaian gerakan dinamis berdasarkan fungsi waktu. Pendekatan yang dilakukan dalam metode ini akan menggunakan prosedur integrasi waktu dan menghasilkan *time history response* berdasarkan fungsi waktu $x(t)$. Metode analisis *time domain* umumnya seperti program komputer dapat digunakan untuk menganalisis semua situasi tali tambat di bawah pengaruh dinamika frekuensi gelombang. Periode awal harus dimaksimalkan untuk meminimalkan efek *transient*. Namun, metode ini membutuhkan proses lebih kompleks dan waktu yang lama. Hal ini membutuhkan simulasi *time history*. *Time history* memberikan hasil *tension* maksimum, beban jangkar dan lain-lain. Keuntungan metode ini dibandingkan *frequency domain* adalah semua tipe *non-linear* (matriks sistem dan beban-beban eksternal) dapat dimodelkan dengan lebih tepat. Sedangkan kerugiannya adalah membutuhkan waktu perhitungan yang lebih. Menurut DNV OS E301, minimal simulasi *time domain* adalah selama 3 jam (10800 s).

Simulasi yang digunakan pada tugas akhir ini adalah simulasi *time domain* sebagai metode untuk analisa dinamis dalam mencari nilai *tension* dan simulasi *frequency domain* untuk mencari respon struktur. Metode ini biasa digunakan pada kondisi ekstrim tetapi tidak digunakan untuk analisis kelelahan (*fatigue*).

2.2.2 Floating Storage and Offloading System (FSO)

Floating Storage and Offloading System merupakan struktur terapung yang berfungsi menyimpan dan menyalurkan minyak dan gas bumi tanpa dilengkapi dengan fasilitas pemrosesan. Menurut *OCIMF Tandem Mooring Offloading Guidelines for CTs at F(P)SO Facilities*, FSO serupa dengan FPSO, yang membedakan hanya minyak atau gas tidak diproses di kapal. Jadi, FSO dapat didefinisikan sebagai suatu sistem terapung yang beroperasi untuk:

- Menerima hasil proses *crude oil* atau gas dari fasilitas pemrosesan eksternal,
- Menyimpan *crude oil* yang telah diproses,
- Menyalurkan *crude oil* atau gas ke *shuttle tanker*.

2.2.3 Sistem Tambat

Sistem tambat pada prinsipnya berfungsi untuk mengamankan kapal agar posisinya tetap pada tempatnya. Pada FSO, sistem tambat dikategorikan menjadi dua jenis yaitu *weathervaning* dan *non-weathervaning*. Yang termasuk dalam sistem tambat *weathervaning* adalah *single point mooring* (SPM), *turret mooring system* dan *tower yoke mooring system* bentuk dari sistem tambat tersebut disajikan pada Gambar 2.1. Sedangkan sistem tambat *non-weathervaning* adalah *spread mooring* dan *jetty mooring system*.



Gambar 2.1 Sistem Tambat (a) *Tower Yoke Mooring System*; (b) SPM
(Sumber: Helmidadang, 2012)

2.2.3.1 *Single Point Mooring* (SPM)

Single Point Mooring (SPM) adalah suatu struktur terapung berlokasi di lepas pantai yang berfungsi sebagai penambatan dan interkoneksi untuk muatan *tanker* atau pembongkaran produk gas atau cairan. SPM adalah hubungan antara *subsea manifold geostatic* koneksi dan *weathervaning tanker*. Salah satu kelebihan SPM, mampu menangani kapal ukuran apapun, bahkan kapal pengangkut minyak yang sangat besar sekalipun

dimana tidak ada fasilitas alternatif yang tersedia. *Single Point Mooring* ini sangat efektif sekali dalam proses penambangan minyak sehingga sering sekali digunakan sebagai satu komponen dalam penambangan minyak bersama dengan FPSO / FSO.

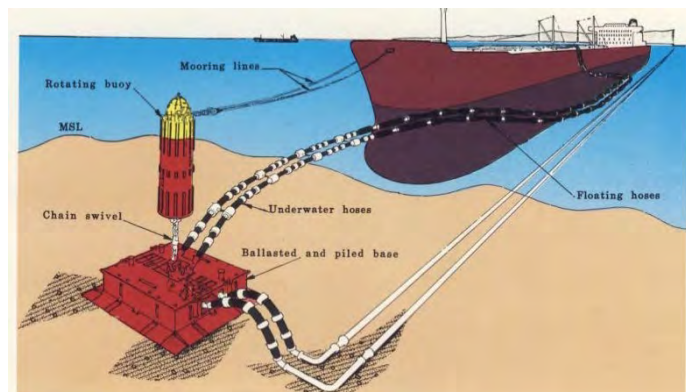
Ada beberapa macam tipe dari SPM (Barltrop, 1998), diantaranya adalah sebagai berikut pada Gambar 2.2 sampai dengan Gambar 2.8:

a. *Fixed Tower*



Gambar 2.2 *Fixed Tower*
(Sumber: Helmidadang, 2012)

b. *Single Anchor Leg Mooring (SALM) buoy*



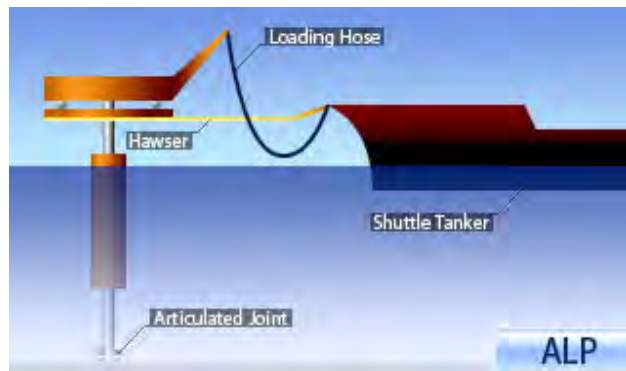
Gambar 2.3 *Single Anchor Leg Mooring (SALM) buoy*
(Sumber: Helmidadang, 2012)

c. *Catenary Anchor Leg Mooring (CALM) buoy*



Gambar 2.4 *Catenary Anchor Leg Mooring (CALM) buoy*
(Sumber: PT. PHE ONWJ, 2013)

d. *Articulated Loading Platform (ALP)*



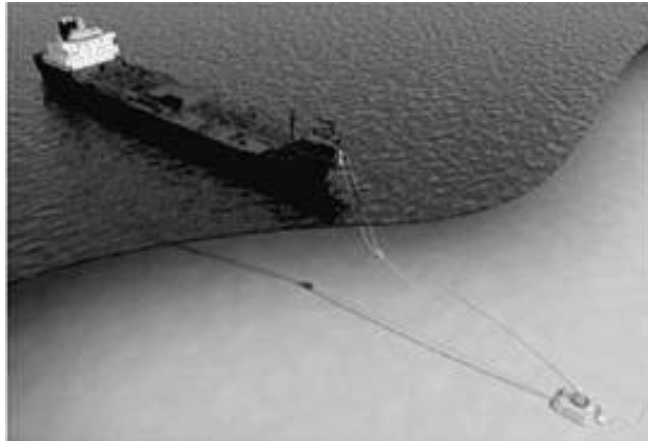
Gambar 2.5 *Articulated Loading Platform (ALP)*
(Sumber: Helmidadang, 2012)

e. *Single Point and Reservoir (SPAR)*



Gambar 2.6 *Single Point and Reservoir (SPAR)*
(Sumber: Helmidadang, 2012)

f. *Single Anchor Loading (SAL)*



Gambar 2.7 *Single Anchor Loading (SAL)*

(Sumber: Helmidadang, 2012)

g. *Turret Mooring*



Gambar 2.8 *Turret Mooring*

(Sumber: Helmidadang, 2012)

Sistem *Single Point Mooring* terbagi atas empat bagian, yaitu tubuh pelampung, *mooring* (tambat atau elemen penahan), sistem transfer dan komponen lainnya. Semua bagian ini sama-sama penting.

a. Tubuh pelampung

Tubuh pelampung biasanya didukung pada kaki statis melekat pada dasar laut, dengan bagian yang berputar di atas permukaan air yang terhubung ke kapal *tanker loading*. Dua bagian dihubungkan oleh bantalan rol, disebut sebagai “bantalan utama”. Kapal *tanker* ditambatkan bebas di sekitar pelampung dan mencari posisi yang stabil dengan pengaturan yang sudah ditentukan.

b. *Mooring* (Tambat atau Elemen Penahan)

Mooring berfungsi menahan pelampung di dasar laut. Desain pelampung harus disesuaikan dengan kondisi atau perilaku angin, gelombang, arus, dan ukuran kapal *tanker*. Hal ini menentukan susunan *mooring* optimal dan ukuran komponen kaki semua tambatan. *Anchoring poin* juga sangat tergantung pada kondisi tanah setempat.

Komponen *mooring* terbagi atas:

1. Jangkar , untuk menghubungkan tambatan ke dasar laut
2. Rantai jangkar
3. *Chainstoppers* untuk menghubungkan rantai pada pelampung
4. Tambang kapal, sebuah kapal *tanker* ditambatkan ke sebuah pelampung dengan menggunakan tambang kapal. Susunan tambang kapal biasanya terdiri dari tali nilon yang diikat ke tambat yang ada di dek pelampung. Sistem tambang kapal menggunakan satu atau dua tali tambang tergantung pada ukuran kapal yang akan berlabuh ke pelampung.

c. Sistem transfer

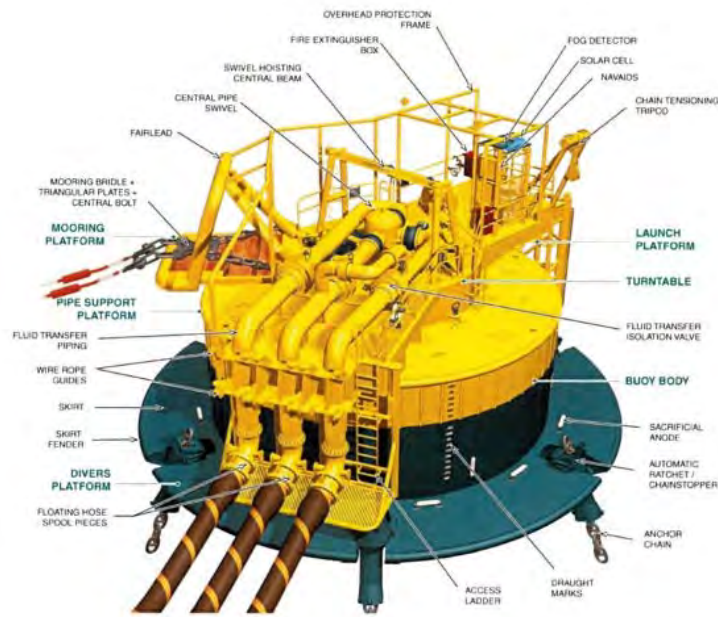
Fungsi masing-masing pelampung adalah sebagai sistem transfer. Dari lokasi geostatik yang terletak di dasar laut lalu sistem ini mentransfer produk ke kapal tanker yang berlabuh di sekitar pelampung. Komponen sistem transfer produk dari dasar laut adalah:

1. *Flexible Subsea Hoses* yang biasa disebut dengan “*Risers*”. *Riser* adalah selang fleksibel yang menghubungkan pipa bawah laut ke pelampung. Pengaturan *riser* ini dapat bervariasi tergantung pada kedalaman air laut, gerakan pelampung dan lain-lain.
2. *Floating Hose*, menghubungkan pelampung ke kapal tanker. *Floating Hose* dilengkapi dengan lapisan yang banyak untuk mencegah pecahnya selang dan menghindari tumpahan minyak.
3. *Swivel*, adalah hubungan antara geostatik atau dasar laut dengan bagian yang berputar dari pelampung. *Swivel* mempunyai berbagai ukuran tergantung pada ukuran pipa yang terpasang dan *riser*. *Swivel* adalah jalur independen khusus untuk produk atau satu cairan yang akan diambil dari dasar laut. *Swivel* dilengkapi dengan pengaturan segel ganda untuk meminimalkan kemungkinan kebocoran produk ke lingkungan.
4. *Valves* (katup)
5. *Piping* (pipa)

d. Komponen Lainnya

1. Sebuah *landing* perahu yang menyediakan akses ke geladak pelampung dari kapal *tanker*
2. *Fendering* untuk melindungi pelampung
3. *Toolkit* untuk penanganan penanganan material yang rusak
4. Navigasi maritim
5. Sebuah subsistem listrik untuk memungkinkan operasi katup dan navigasi atau peralatan lainnya

Dalam Tugas Akhir ini obyek yang dianalisis adalah FSO (*Floating Storage and Offloading System*) yang memiliki sistem tambat berupa *single point mooring* tipe CALM (*Catenary Anchored Leg Mooring*) milik PT. PHE ONWJ. Berikut adalah gambaran Sistem CALM pada SPM 3 yang disajikan pada Gambar 2.9 :



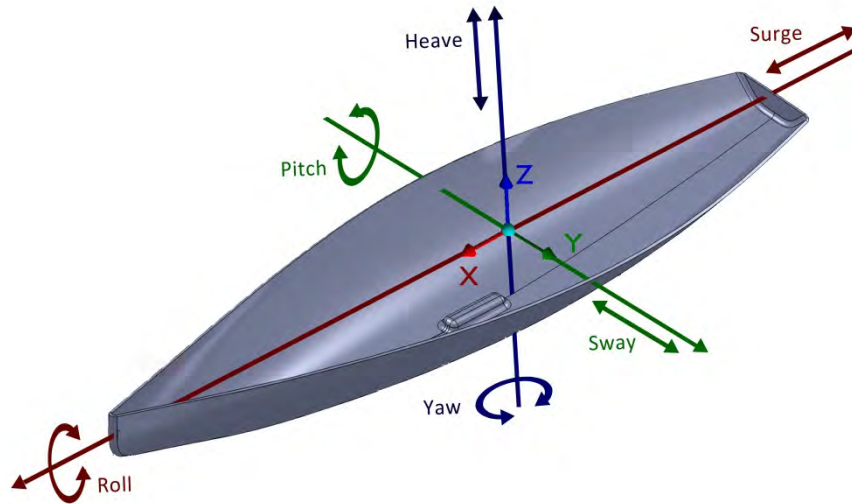
Gambar 2.9 Gambaran Sistem CALM pada SPM 3

(Sumber: PT. PHE ONWJ, 2015)

2.2.4 Moda Gerak Struktur Terapung

Gerakan Floating Body diperairan bergelombang terdiri atas 3 gerakan Translational (terhadap sumbu x , y , z) dan 3 gerakan Rotational (terhadap sumbu x , y , z). Ada 3 gerakan gerakan asli dari kapal yaitu: *heave*, *roll*, dan *pitch*. Gerakan ini dipengaruhi *Restoring Force* (gaya pengembali) atau momen saat struktur terapung (dalam bentuk kapal) dipengaruhi dari posisi setimbangnya. Gerakan yang lain tidak dapat mengembalikan kapal pada posisi setimbang, selain itu tidak adanya pengaruh dari *Exciting Force* (gaya luar) atau momen yang menyebabkan aktivitas gangguan dari arah kebalikanya (Bhattacharya, 1978).

Gerakan kapal di laut lepas sangat penting untuk diprediksi. Macam gerakan osilasi pada kapal memiliki enam derajat kebebasan yaitu *Surging*, *Swaying*, *Heaving*, *Rolling*, *Pitching*, *Yawing*. Enam derajat kebebasan dapat dibedakan menjadi dua macam mode gerak, yaitu Translational dan Rotasional. Berikut dijelaskan pada Gambar 2.10 :



Gambar 2.10 Moda gerak struktur apung
(Sumber: Ramadhan, 2010)

1. Mode gerak osilasi translasional :

- *Surging* : Gerak osilasi translasi pada sumbu-x
- *Swaying* : Gerak osilasi translasi terhadap sumbu-y
- *Heaving* : Gerak osilasi translasi terhadap sumbu-z

2. Mode gerak osilasi rotasional :

- *Rolling* : Gerak osilasi rotasional terhadap sumbu-x
- *Pitching* : Gerak osilasi rotasional terhadap sumbu-y
- *Yawing* : Gerak osilasi rotasional terhadap sumbu-z

2.2.5 Heading Kapal terhadap Arah Gelombang

Selain faktor gelombang, terdapat juga faktor gelombang papasan, dimana gelombang tersebut berpapasan terhadap kapal. Dalam ilustrasinya di perlihatkan sebagai berikut :

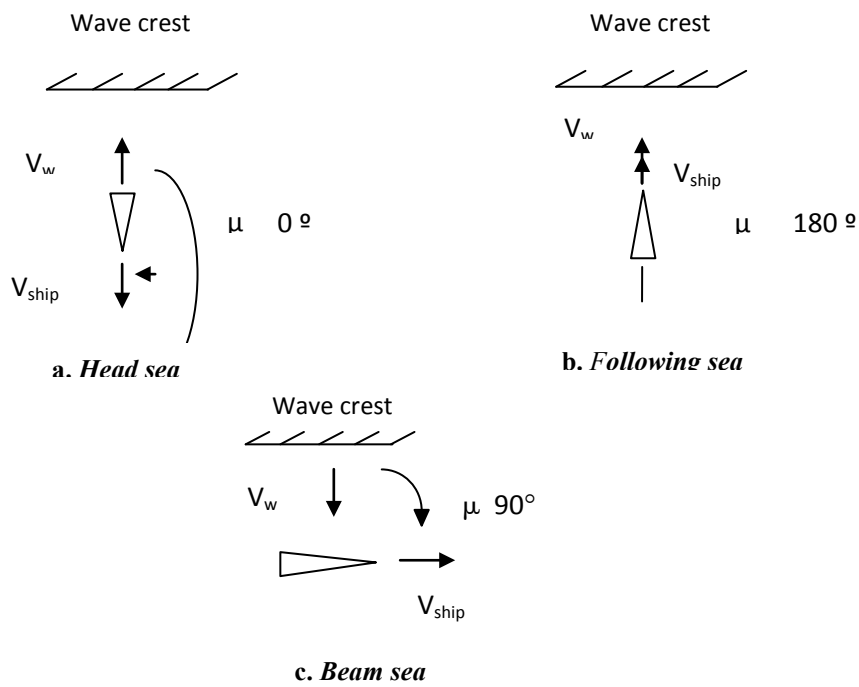
$$T_{\theta} = \frac{L_w}{V_w - V \cos \mu} \dots \dots \dots (2)$$

$$V_w = \omega_{\theta} \left(1 - \frac{V}{V_w} \cos \mu\right) \dots \dots \dots (3)$$

dengan:

- T_{θ} = Periode *Encountering* (s)
- V_w = Kecepatan Gelombang (m/s)
- V = Kecepatan Kapal (*knot*)
- μ = Sudut Datang Gelombang

Sebagai gambaran arah kapal terhadap arah gelombang untuk kondisi *Head Sea*, *Following Sea*, *Beam Sea* dapat dilihat pada Gambar 2.11 :



Gambar 2.11 Definisi arah datang gelombang terhadap *heading* kapal
 (Sumber: Bhattacharyya 1978)

2.2.6 Gerakan *Surge* Murni

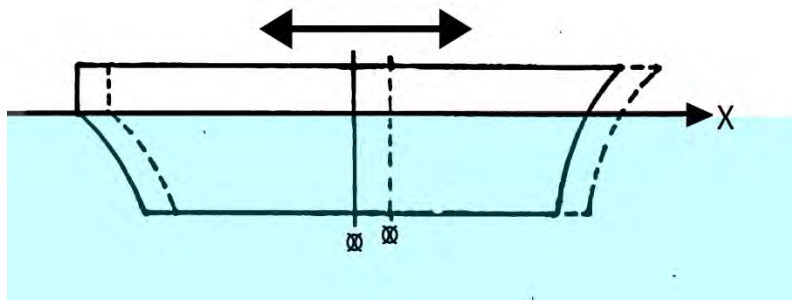
Surge merupakan gerak osilasi translasi kapal dengan sumbu X sebagai pusat gerak. Persamaan umum pada kapal kondisi *surging* adalah:

$$a\ddot{x} + b\dot{x} + cx = F_o \cos \omega_e t \dots\dots\dots(4)$$

dengan:

- $a\ddot{x}$: *Inertial force* (N)
- $b\dot{x}$: *Damping force* (N)
- cx : *Restoring force* (N)
- $F_o \cos \omega_e t$: *Exciting force* (N)

Berikut pada Gambar 2.12 adalah ilustrasi gerakan *Surge*:



Gambar 2.12 Ilustrasi gerakan *Surge*
(Sumber: Murtedjo 1999)

Ada empat elemen penting dalam gerakan *surge*, yaitu:

1. *Inertial Force* ($a\ddot{x}$)

Merupakan percepatan gerakan secara kontinu dari fluida yang terjadi, gaya yang lebih besar dari massa percepatan waktu kapal (Bhattacharyya, 1978).

$$a \frac{d^2x}{dt^2} = \text{massa kapal} + \text{massa tambah} \dots\dots\dots(5)$$

$$a \frac{d^2x}{dt^2} = M \frac{d^2x}{dt^2} + a_x \frac{d^2x}{dt^2} \dots\dots\dots(6)$$

Dengan:

M : Massa dari kapal

a_x : Massa tambah

2. *Damping Force* ($b\dot{x}$)

Damping force selalu bergerak berlawanan arah dari gerakan kapal dan menyebabkan redaman yang berangsur-angsur pada amplitudo gerakan.

$$F_b = -b \frac{dx}{dt} = b \cdot \dot{x} \dots \dots \dots (7)$$

Dimana b adalah koefisien untuk gaya *damping* kondisi *surgings*. Normalnya koefisien *damping* ini bergantung pada faktor:

- a. Tipe dari gerakan osilasi
- b. Frekuensi *encountering*
- c. Bentuk kapal

3. *Restoring Force* (cx)

Restoring force untuk *surgings* diberikan sebagai tambahan gaya *bouyancy* kapal ketika di bawah permukaan air. Sehingga *restoring force* diberikan sebagai jumlah *displacement* air atau berat spesifik tambahan pada volume tercelup.

$$cz = \rho \cdot g \cdot A_{wp} \cdot x = \rho \cdot g \cdot L \cdot B \cdot C_{wp} \cdot x \dots \dots \dots (8)$$

dengan:

A_{wp} : *Water plane area* (m^2)

x : Simpangan gerak *surgings* (m)

C_{wp} : Koefisien *water plane area*

ρ : Massa jenis air laut (1025 kg/m^3)

g : Kecepatan gravitasi ($9,81 \text{ m/s}^2$)

4. *Exciting Force (F)*

Gaya eksitasi pada *surgin* adalah pengintegrasian dari penambahan *buoyancy* karena gelombang melewati sepanjang kapal sehingga dapat dirumuskan:

$$F = F_o \cos \omega_e t \dots \dots \dots (9)$$

dengan:

F_o : Amplitudo gaya eksitasi (m)

ω_e : Frekuensi gelombang *encountering* (rad/sec)

2.2.7 Gerakan *Sway* Murni

Sway merupakan gerak osilasi translasi kapal dengan sumbu Y sebagai pusat gerak. Persamaan umum kapal pada kondisi *swaying* adalah:

$$a\ddot{y} + b\dot{y} + cy = F_o \cos \omega_e t \dots \dots \dots (10)$$

dengan:

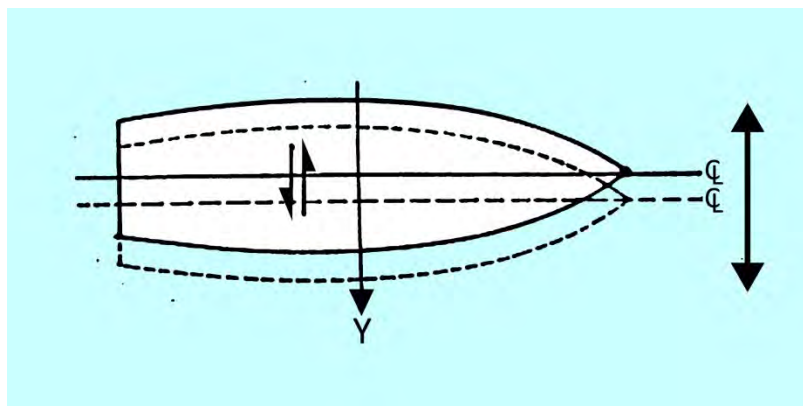
$a\ddot{y}$: *Inertial force* (N)

$b\dot{y}$: *Damping force* (N)

cy : *Restoring force* (N)

$F_o \cos \omega_e t$: *Exciting force* (N)

Berikut pada Gambar 2.13 adalah ilustrasi gerakan *Sway*:



Gambar 2.13 Ilustrasi gerakan *Sway*

(Sumber: Murtedjo 1999)

Terdapat empat elemen penting dalam gerakan *sway*, yaitu:

1. *Inertial Force* ($a\ddot{y}$)

Merupakan percepatan gerakan secara kontinu dari fluida yang terjadi, gaya yang lebih besar dari massa percepatan waktu kapal (Bhattacharyya, 1978).

$$a \frac{d^2y}{dt^2} = \text{massa kapal} + \text{massa tambah} \dots \dots \dots (11)$$

$$a \frac{d^2y}{dt^2} = M \frac{d^2y}{dt^2} + a_y \frac{d^2y}{dt^2} \dots \dots \dots (12)$$

Dengan:

M : Massa dari kapal

a_y : Massa tambah

2. *Damping Force* ($b\dot{y}$)

Damping force selalu bergerak berlawanan arah dari gerakan kapal dan menyebabkan redaman yang berangsur-angsur pada amplitudo gerakan.

$$F_b = -b \frac{dy}{dt} = b \cdot \dot{y} \dots \dots \dots (13)$$

Dimana b adalah koefisien untuk gaya *damping* kondisi *swaying*. Normalnya koefisien *damping* ini bergantung pada faktor:

- d. Tipe dari gerakan osilasi
- e. Frekuensi *encountering*
- f. Bentuk kapal

3. *Restoring Force* (cy)

Restoring force untuk *swaying* diberikan sebagai tambahan gaya *bouyancy* kapal ketika di bawah permukaan air. Sehingga *restoring force* diberikan sebagai jumlah *displacement* air atau berat spesifik tambahan pada volume tercelup.

$$cz = \rho \cdot g \cdot A_{wp} \cdot y = \rho \cdot g \cdot L \cdot B \cdot C_{wp} \cdot y \dots \dots \dots (14)$$

dengan:

- A_{wp} : *Water plane area* (m²)
- y Simpangan gerak *swaying* (m)
- C_{wp} : Koefisien *water plane area*
- ρ : Massa jenis air laut (1025 kg/ m³)
- g : Kecepatan gravitasi (9,81 m/s²)

4. *Exciting Force* (F)

Gaya eksitasi pada *swaying* adalah pengintegrasian dari penambahan *buoyancy* karena gelombang melewati sepanjang kapal sehingga dapat dirumuskan:

$$F = F_o \cos \omega_e t \dots \dots \dots (15)$$

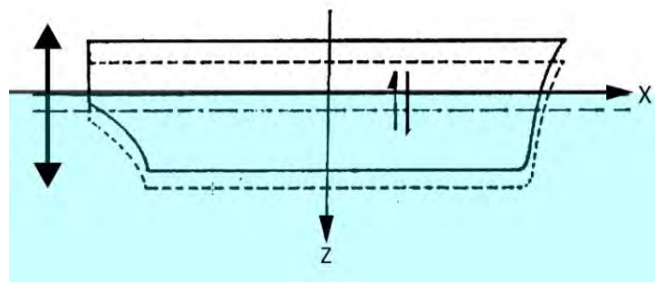
dengan:

- F_o : Amplitudo gaya eksitasi (m)
- ω_e : Frekuensi gelombang *encountering* (rad/sec)

2.2.8 Gerakan *Heave* Murni

Pada *heaving* gaya ke bawah akibat dari berat kapal membuat kapal tercelup ke air lebih dalam dan kembali ke awal hingga diperoleh kesetimbangan kapal. Ketika gaya *buoyancy* lebih besar akibat kapal tercelup, kapal akan bergerak vertikal ke atas, ketika posisi kapal telah setimbang kapal akan tetap naik dikarenakan ada pengaruh momentum.

Berikut pada Gambar 2.14 adalah ilustrasi gerakan *Heave*:



Gambar 2.14 Ilustrasi gerakan *heave*
(Sumber: Murtedjo 1999)

Dengan keterangan gambar sebagai berikut:

- Δ : *Displacement* kapal
- G : Titik tangkap gaya berat (Titik Berat)
- B : Titik tangkap gaya tekan keatas (Titik *Bouyancy*)
- γV : Gaya tekan keatas
- $W_0 L_0$: *Water line* keadaan awal
- $W_1 L_1$: *Water line* keadaan *heave*
- $a_z \ddot{z}$: Tambahan gaya tekan keatas karena *added mass*
- δ_z : Besar jarak simpangan *heave*

Maka dapat dituliskan persamaan umum pada kapal kondisi heaving adalah :

$$a\ddot{z} + b\dot{z} + cz = F_o \cos \omega_e t \dots\dots\dots(16)$$

dengan:

- $a\ddot{z}$: *Inertial force*
- $b\dot{z}$: *Damping force*
- cz : *Restoring force*
- $F_o \cos \omega_e t$: *Exciting force*

Empat elemen penting dalam gerakan *heave*, yaitu:

1. *Inertial Force* ($a\ddot{z}$)

Merupakan percepatan gerakan secara kontinu dari fluida yang terjadi, gaya yang lebih besar dari massa percepatan waktu kapal (Bhattacharyya, 1978).

$$a \frac{d^2 z}{dt^2} = \text{massa kapal} + \text{massa tambah} \dots\dots\dots(17)$$

$$a \frac{d^2 z}{dt^2} = M \frac{d^2 z}{dt^2} + a_y \frac{d^2 z}{dt^2} \dots\dots\dots(18)$$

Dengan:

M : Massa dari kapal

a_y : Massa tambah

2. *Damping Force* ($b\dot{z}$)

Damping force selalu bergerak berlawanan arah dari gerakan kapal dan menyebabkan redaman yang berangsur-angsur pada amplitudo gerakan.

$$F_b = -b \frac{dz}{dt} = b \cdot \dot{z} \dots \dots \dots (19)$$

Dimana b adalah koefisien untuk gaya *damping* kondisi *heaving*.
Normalnya koefisien *damping* ini bergantung pada faktor:

- g. Tipe dari gerakan osilasi
- h. Frekuensi *encountering*
- i. Bentuk kapal

3. *Restoring Force* (cz)

Restoring force untuk *heaving* diberikan sebagai tambahan gaya *bouyancy* kapal ketika di bawah permukaan air. Sehingga *restoring force* diberikan sebagai jumlah *displacement* air atau berat spesifik tambahan pada volume tercelup.

$$cz = \rho \cdot g \cdot A_{wp} \cdot z = \rho \cdot g \cdot L \cdot B \cdot C_{wp} \cdot z \dots \dots \dots (20)$$

dengan:

A_{wp} : *Water plane area* (m^2)

z : Simpangan gerak *heaving* (m)

C_{wp} : Koefisien *water plane area*

ρ : Massa jenis air laut (1025 kg/m^3)

g : Kecepatan gravitasi ($9,81 \text{ m/s}^2$)

4. *Exciting Force (F)*

Gaya eksitasi pada *heaving* adalah pengintegrasian dari penambahan *buoyancy* karena gelombang melewati sepanjang kapal sehingga dapat dirumuskan:

$$F = F_o \cos \omega_e t \dots \dots \dots (21)$$

dengan:

F_o : Amplitudo gaya eksitasi (m)

ω_e : Frekuensi gelombang *encountering* (rad/sec)

2.2.9 Gerakan *Roll Murni*

Rolling merupakan gerakan osilasi rotasional dengan sumbu X sebagai pusat geraknya. Gerakan ini akan berpengaruh terhadap initial velocity sehingga perlu dilakukan perhitungan terhadap momen gaya. Rumus umum dari persamaan gerak akibat *rolling* ialah:

$$a\ddot{\phi} + b\dot{\phi} + c\phi = M_o \cos \omega_e t \dots \dots \dots (22)$$

Dengan:

M_o = Amplitudo momen eksitasi (m)

ω_e = Frekuensi gelombang *encountering* (hz)

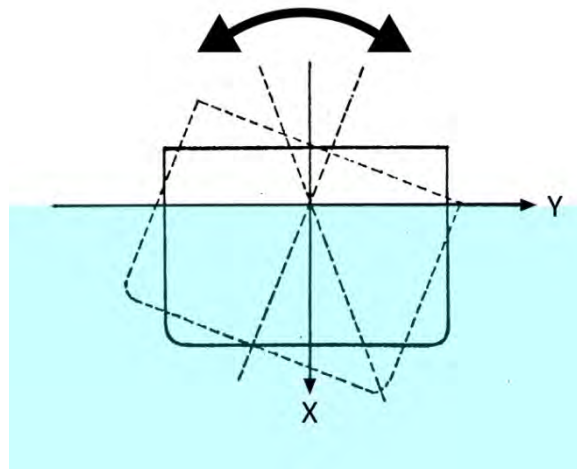
$a\ddot{\phi}$ = *Inertial moment* (N/m)

$b\dot{\phi}$ = *Damping Moment* (N/m)

$c\phi$ = *Restoring Moment* (N/m)

$M_o \cos \omega_e t$ = *Exciting moment* (N/m)

Berikut pada Gambar 2.15 adalah ilustrasi gerakan *Rolling* :



Gambar 2.15 Ilustrasi kondisi *rolling* kapal pada saat *still water*
(Sumber: Murtedjo 1999)

Karena *rolling* merupakan gerak *oscillasi rotasional*, maka terdapat empat jenis momen yang bekerja, yaitu:

1. *Inertial Moment* ($a\ddot{\phi}$)

a merupakan *inertia moment virtual mass* dari $\frac{d^2\phi}{dt^2}$, dengan $\frac{d^2\phi}{dt^2}$ adalah percepatan angular dari *rolling*, *inertia moment virtual mass* pada kondisi *rolling* adalah momen inersia kapal ditambah momen inersia massa tambah dari *rolling* (Bhattacharyya, 1978).

$$a = I_{xx} + \delta I_{xx} \dots \dots \dots (23)$$

$$a = \frac{\Delta}{g} k_{xx}^2 + \delta I_{xx} \dots \dots \dots (24)$$

dengan:

- δI_{xx} : Moment inertia massa tambah untuk gerakan *rolling*
- k_{xx}^2 : Kuadrat dari jari-jari girasi pada kondisi *rolling*
- I_{xx} : Moment inersia massa kapal

Menurut Bhattacharyya diasumsikan bahwa distribusi massa secara *longitudinal* adalah sama dengan distribusi *displacement* secara *longitudinal*. Sehingga distribusi *vertical* tidak begitu berpengaruh dan bahwa CG dari kapal diasumsikan di *midship section*. Secara pendekatan jari-jari gilasinya *rolling* adalah:

$$k_{xx}^2 = 0,33 \times B \dots \dots \dots (25)$$

2. *Damping Moment* ($b\dot{\phi}$)

Damping coefficient adalah koefisien redaman dan $b \frac{d\phi}{dt}$ merupakan momen redaman. *Damping coefficient* untuk *rolling* dapat dihitung dengan pendekatan *strip theory* yang ditentukan oleh tiap station dan diintegrasikan sebanyak station di kapal.

3. *Restoring Moment* ($c\phi$)

Restoring moment untuk *rolling* dapat dihitung dengan persamaan sederhana sebagai berikut:

$$c\phi = \rho \cdot g \cdot \phi \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} y^2 x(y) dy \dots \dots \dots (26)$$

$$c\phi = \rho \cdot g \cdot \phi \cdot I_x \dots \dots \dots (27)$$

Jari-jari *metacenter* melintang $\overline{M.B_T} = \frac{I_T}{\nabla}$, sehingga

$$c\phi = \overline{\rho \cdot g \cdot M B_T} \cdot \nabla \cdot \phi = \overline{\rho \cdot g \cdot M G_T} \cdot \nabla \cdot \phi \dots \dots \dots (28)$$

$$\overline{c\phi} = \overline{M G_T} \cdot \phi \dots \dots \dots (29)$$

dengan:

- c : *Restoring moment coefficient*
- I_x : Momen inersia dari beban *water plane area*
- ρ : Massa jenis air laut (1025 kg/ m³)
- g : Kecepatan gravitasi (9,81 m/s²)
- ∇ : Volume *displacement* (m³)

- Δ : Displacement (ton) = $\rho \cdot g \cdot \nabla$
- $\overline{MB_T}$: Jari-jari *metacenter* melintang
- $\overline{MG_T}$: Tinggi *metacenter* melintang

4. *Exciting Moment*

Exciting moment untuk *rolling* terjadi karena tidak seimbangnnya momen akibat dari gelombang *tranverse axis* dari kapal. *Rolling moment* dapat dengan mudah dinaikan, ini berarti distribusi tekanan hidrostatis dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$M_\theta = M_o \cos \omega_e t \dots \dots \dots (30)$$

2.2.10 Gerakan *Pitch* Murni

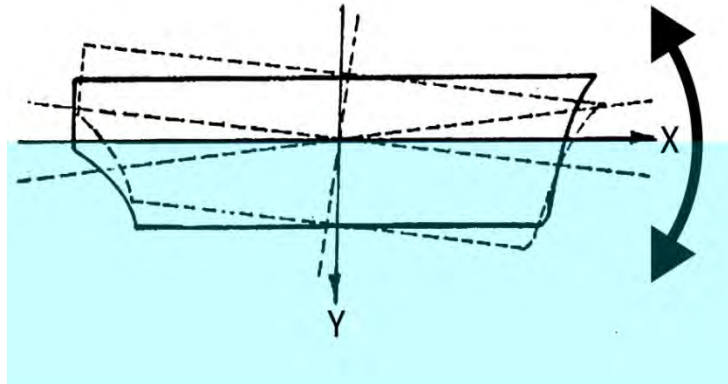
Pitching merupakan gerakan osilasi rotasional dengan sumbu Y sebagai pusat gerak. Karena gerak *pitching* akan berpengaruh terhadap kesetimbangan posisi, maka momen yang terjadi akibat *pitching* perlu diperhitungkan. Rumus umum dari persamaan gerakan akibat *pitching* adalah:

$$a\ddot{\theta} + b\dot{\theta} + c\theta = M_o \cos \omega_e t \dots \dots \dots (31)$$

dengan:

- M_o = amplitudo momen eksitasi (m)
- ω_e = frekuensi gelombang *encountering* (hz)
- $a\ddot{\theta}$ = *Inertial Moment* (N/m)
- $b\dot{\theta}$ = *Damping Moment* (N/m)
- $c\theta$ = *Restoring Moment* (N/m)
- $M_o \cos \omega_e t$ = *Exciting Moment* (N/m)

Berikut pada Gambar 2.16 adalah ilustrasi gerakan *Pitch*:



Gambar 2.16 Ilustrasi kondisi *pitch*
(Sumber: Murtedjo 1999)

Karena *pitching* merupakan gerak *oscillasi rotasional*, maka terdapat empat jenis momen yang bekerja, yaitu:

1. *Inertial Moment* ($a\ddot{\theta}$)

a merupakan *inertia moment virtual mass* dari $\frac{d^2\theta}{dt^2}$, dengan $\frac{d^2\theta}{dt^2}$ adalah percepatan angular dari *pitching*, *inertia moment virtual mass* pada kondisi *pitching* adalah momen inersia kapal ditambah momen inersia massa tambah dari *pitching* (Bhattacharyya, 1978).

$$a = I_{yy} + \delta I_{yy} \dots \dots \dots (32)$$

$$a = \frac{\Delta}{g} k_{yy}^2 + \delta I_{yy} \dots \dots \dots (33)$$

dengan:

δI_{yy} : Moment inertia massa tambah untuk gerakan *pitching*

k_{yy}^2 : Kuadrat dari jari-jari girasi pada kondisi *pitching*

I_{yy} : Moment inersia massa kapal

Menurut Bhattacharyya diasumsikan bahwa distribusi massa secara *longitudinal* adalah sama dengan distribusi *displacement* secara *longitudinal*. Sehingga distribusi *vertical* tidak begitu berpengaruh dan

bahwa CG dari kapal diasumsikan di *midship section*. Secara pendekatan jari-jari girasinya *pitching* adalah:

$$k_{yy}^2 = 0,24L - 0,26L \dots \dots \dots (34)$$

2. *Damping Moment* ($b\dot{\theta}$)

Damping coefficient adalah koefisien redaman dan $b \frac{d\theta}{dt}$ merupakan momen redaman. *Damping coefficient* untuk *pitching* dapat dihitung dengan pendekatan *strip theory* yang ditentukan oleh tiap station dan diintegrasikan sebanyak station di kapal.

3. *Restoring Moment* ($c\theta$)

Restoring moment untuk *pitching* dapat dihitung dengan persamaan sederhana sebagai berikut:

$$c\theta = \rho \cdot g \cdot \theta \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} x^2 y(x) dx \dots \dots \dots (35)$$

$$c\theta = \rho \cdot g \cdot \theta \cdot I_y \dots \dots \dots (36)$$

Jari-jari *metacenter* melintang $M.B_L = \frac{I_y}{\nabla}$, sehingga

$$c\theta = \rho \cdot g \cdot MB_L \cdot \nabla \cdot \theta = \rho \cdot g \cdot MG_L \cdot \nabla \cdot \theta \dots \dots \dots (37)$$

$$c\theta = MG_L \cdot \theta \dots \dots \dots (38)$$

dengan:

- c : *Restoring moment coefficient*
- I_x : Momen inersia dari beban *water plane area*
- ρ : Massa jenis air laut (1025 kg/ m³)
- g : Kecepatan gravitasi (9,81 m/s²)
- ∇ : Volume *displacement* (m³)
- Δ : *Displacement* (ton) = $\rho \cdot g \cdot \nabla$
- MB_L : Jari-jari *metacenter* melintang
- MG_L : Tinggi *metacenter* melintang

4. *Exciting Moment*

Exciting moment untuk *pitching* terjadi karena tidak seimbangnnya momen akibat dari gelombang *tranverse axis* dari kapal. *Pitching moment* dapat dengan mudah dinaikan, ini berarti distribusi tekanan hidrostatik dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$M_{\theta} = M_o \cos \omega_e t \dots\dots\dots(39)$$

2.2.11 Gerakan *Yaw* Murni

Gerak *yaw* merupakan gerak osilasi rotasional kapal dengan sumbu Z sebagai pusat gerak. Sama halnya seperti pada gerak *rolling* dan *pitching*, gerak ini pun akan berpengaruh terhadap kesetimbangan posisi kapal, sehingga perlu memperhitungkan momen gaya.

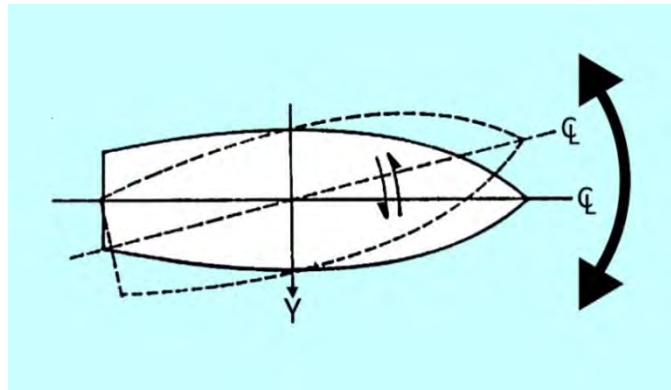
Persamaan umum gerak kapal untuk *yawing* ialah:

$$a\ddot{\phi} + b\dot{\phi} + c\phi = M_o \cos \omega_e t \dots\dots\dots (40)$$

dengan:

- M_o = amplitudo momen eksitasi (m)
- ω_e = frekuensi gelombang *encountering* (hz)
- $a\ddot{\phi}$ = *Inertial Moment* (N/m)
- $b\dot{\phi}$ = *Damping Moment* (N/m)
- $c\phi$ = *Restoring Moment* (N/m)
- $M_o \cos \omega_e t$ = *Exciting Moment* (N/m)

Berikut pada Gambar 2.17 adalah ilustrasi gerakan *Yaw*:



Gambar 2.17 Ilustrasi kondisi *Yaw*
(Sumber: Murtedjo 1999)

Karena *yawing* merupakan gerak *oscilasi rotasional*, maka terdapat empat jenis momen yang bekerja, yaitu:

1. *Inertial Moment* ($a\ddot{\phi}$)

a merupakan *inertia moment virtual mass* dari $\frac{d^2\phi}{dt^2}$, dengan $\frac{d^2\phi}{dt^2}$ adalah percepatan angular dari *yawing*, *inertia moment virtual mass* pada kondisi *yawing* adalah momen inersia kapal ditambah momen inersia massa tambah dari *yawing* (Bhattacharyya, 1978).

$$a = I_{zz} + \delta I_{zz} \dots \dots \dots (41)$$

$$a = \frac{\Delta}{g} k_{zz}^2 + \delta I_{zz} \dots \dots \dots (42)$$

dengan:

δI_{zz} : Moment inertia massa tambah untuk gerakan *yawing*

k_{zz}^2 : Kuadrat dari jari-jari girasi pada kondisi *yawing*

I_{zz} : Moment inersia massa kapal

Menurut Bhattacharyya diasumsikan bahwa distribusi massa secara *longitudinal* adalah sama dengan distribusi *displacement* secara *longitudinal*. Sehingga distribusi *vertical* tidak begitu berpengaruh dan bahwa CG dari kapal diasumsikan di *midship section*. Secara pendekatan jari-jari girasinya *yawing* adalah:

$$k_{yy}^2 = 0,24L - 0,26L \dots \dots \dots (43)$$

2. *Damping Moment* ($b\dot{\phi}$)

Damping coefficient adalah koefisien redaman dan $b \frac{d\phi}{dt}$ merupakan momen redaman. *Damping coefficient* untuk yawing dapat dihitung dengan pendekatan *strip theory* yang ditentukan oleh tiap station dan diintegrasikan sebanyak station di kapal.

3. *Restoring Moment* ($c\phi$)

Restoring moment untuk yawing dapat dihitung dengan persamaan sederhana sebagai berikut:

$$c\phi = \rho \cdot g \cdot \phi \int_{\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} y^2 x(y) dy \dots \dots \dots (44)$$

$$c\phi = \rho \cdot g \cdot \phi \cdot I_y \dots \dots \dots (45)$$

Jari-jari *metacenter* melintang $\overline{M.B_L} = \frac{I_y}{\nabla}$, sehingga

$$c\phi = \overline{M.B_L} \cdot \nabla \cdot \phi = \overline{M.G_L} \cdot \nabla \cdot \phi \dots \dots \dots (46)$$

$$\overline{c\phi} = \overline{M.G_L} \cdot \phi \dots \dots \dots (47)$$

dengan:

- c : *Restoring moment coefficient*
- I_x : Momen inersia dari beban *water plane area*
- ρ : Massa jenis air laut (1025 kg/ m³)
- g : Kecepatan gravitasi (9,81 m/s²)
- ∇ : *Volume displacement* (m³)
- Δ : *Displacement* (ton) = $\rho \cdot g \cdot \nabla$
- $\overline{M.B_L}$: Jari-jari *metacenter* melintang
- $\overline{M.G_L}$: Tinggi *metacenter* melintang

4. *Exciting Moment*

Exciting moment untuk *yawing* terjadi karena tidak seimbangnya momen akibat dari gelombang *tranverse axis* dari kapal. *Yawing moment* dapat dengan mudah dinaikan, ini berarti distribusi tekanan hidrostatis dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$M_{\theta} = M_o \cos \omega_e t \dots \dots \dots (48)$$

2.2.12 *Gerakan Couple Six Degree of Freedom*

Karena bangunan apung yang ditinjau terdiri dari enam mode gerakan bebas (*six degree of freedom*), dengan asumsi bahwa gerakan-gerakan osilasi tersebut adalah linier dan harmonik, maka persamaan diferensial gerakan kopel dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\sum_{n=1}^6 [(M_{jk} + A_{jk}) \xi_k + B_{jk} \dot{\xi}_k + C_{jk} \ddot{\xi}_k] = F_j e^{i\omega t}, j = 1 \dots \dots \dots (49)$$

dengan:

- M_{jk} = komponen matriks massa kapal
- A_{jk}, B_{jk} = matriks koefisien massa tambah dan redaman
- C_{jk} = koefisien-koefisien gaya hidrostatis pengembali
- F_j = amplitudo gaya eksitasi dalam besaran kompleks

$F_1, F_2,$ dan F_3 adalah amplitudo gaya-gaya eksitasi yang mengakibatkan *surge, sway,* dan *heave,* sedangkan $F_4, F_5,$ dan F_6 adalah amplitudo momen eksitasi untuk *roll, pitch,* dan *yaw.*

2.2.13 *Response Amplitude Operator (RAO)*

Response Amplitude Operator (RAO) merupakan alat untuk mentransfer beban luar dalam hal ini gelombang dalam rentang frekuensi menjadi bentuk respon yang diterima pada suatu struktur. Sehingga umumnya RAO juga dikenal sebagai *transfer function* (Chakrabarty, 1987). Selain itu RAO

juga bisa diartikan sebagai hubungan antara amplitudo respon terhadap amplitudo gelombang ($\zeta_{\text{respon}}/\zeta_{\text{gelombang}}$). Amplitudo respon bisa berupa gerakan, tegangan, maupun getaran.

RAO untuk gerakan translasi (*surge, sway, heave*) merupakan perbandingan langsung antara amplitudo gerakan struktur dibanding dengan amplitudo gelombang insiden (keduanya dalam satuan elevasi panjang) (Djarmiko, 2012). Persamaan RAO untuk gerakan translasi sebagai berikut :

$$RAO_{(\omega)} = \frac{X_{(\omega)}; Y_{(\omega)}; Z_{(\omega)}}{\zeta_{0(\omega)}} \text{ (m/m) } \dots\dots\dots(50)$$

dimana:

$X_{(\omega)}; Y_{(\omega)}; Z_{(\omega)}$: Amplitudo gerakan translasi struktur bangunan apung pada sumbu x, y, z (m)

ζ_0 : Amplitudo gelombang (m)

Sedangkan RAO untuk gerakan rotasi (*roll, pitch, yaw*) merupakan perbandingan antara amplitudo gerakan rotasi (dalam radian) dengan kemiringan gelombang, yakni yang merupakan perkalian antara gelombang ($k_w = \omega^2/g$) dengan amplitudo gelombang insiden (Djarmiko, 2012):

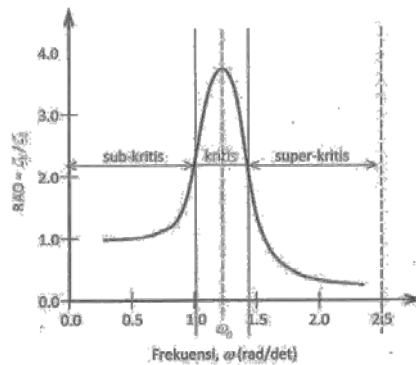
$$RAO_{(\omega)} = \frac{\phi_{(\omega)}; \theta_{(\omega)}; \Phi_{(\omega)}}{\zeta_{0(\omega)}} \text{ (rad/m) } \dots\dots\dots(51)$$

dengan:

$\phi_{(\omega)}; \theta_{(\omega)}; \Phi_{(\omega)}$: amplitudo gerakan rotasi struktur bangunan apung pada sumbu x, y, z (rad)

ζ_0 : Amplitudo gelombang (m)

Bentuk umum grafik respon bangunan apung dapat dilihat dalam Gambar 2.18:



Gambar 2.18 Bentuk umum grafik respons gerakan bangunan apung
(Sumber: Djatmiko, 2012)

Mengacu pada Gambar 2.18, kurva respons gerakan bangunan apung pada dasarnya dapat dibagi menjadi tiga bagian:

- a. Pertama adalah bagian frekuensi rendah, atau gelombang (dengan periode) panjang, yang disebut daerah sub-kritis. Pada daerah ini bangunan laut akan bergerak mengikuti pola atau kontur elevasi gelombang yang panjang sehingga amplitudo gerakan kurang lebih akan ekuivalen dengan amplitudo gelombang, atau disebut sebagai *contouring*. Dalam korelasi persamaan hidrodinamis, di daerah frekuensi rendah, atau ω^2 kurang dari $k/(m+a)$, gerakan akan didominasi oleh faktor kekakuan.
- b. Kedua adalah daerah kritis, meliputi pertengahan lengan kurva di sisi frekuensi rendah sampai dengan puncak kurva dan diteruskan ke pertengahan lengan kurva di sisi frekuensi tinggi. Puncak kurva berada pada frekuensi alami, yang merupakan daerah resonansi, sehingga respons gerakan mengalami magnifikasi, atau amplitudo gerakan akan beberapa kali lebih besar daripada amplitudo gelombang, gerakan akan didominasi oleh faktor redaman.
- c. Ketiga adalah daerah super kritis, yaitu daerah frekuensi tinggi, atau gelombang-gelombang (dengan periode) pendek. Pada daerah ini respons gerakan akan mengecil. Semakin tinggi frekuensi, atau semakin rapat antara puncak-puncak gelombang yang berurutan, maka akan memberikan efek seperti bangunan laut bergerak di atas air yang relatif

datar. Dalam hal korelasi hidrodinamis, gerakan di daerah frekuensi tinggi ini, dimana ω^2 kurang dari k/a , gerakan akan didominasi oleh faktor massa (Djarmiko, 2012).

2.2.14 Spektrum Gelombang

Pemilihan spektrum energi gelombang untuk memperoleh respon spektra suatu struktur terapung didasarkan pada kondisi *real* lingkungan laut yang ditinjau. Bila tidak ada, maka dapat digunakan model spektrum yang dikeluarkan oleh berbagai institusi dengan mempertimbangkan kesamaan fisik lingkungan.

Persamaan spektrum JONSWAP merupakan modifikasi dari persamaan spektrum Pierson-Morkowitz untuk keadaan perairan tertutup di laut utara. Selain itu, spektrum JONSWAP juga dapat diaplikasikan di lingkungan perairan yang kondisi *fetch*-nya terbatas dan *shallow water*.

Dari penjelasan di atas, maka spektrum JONSWAP cocok diaplikasikan di Indonesia karena karakteristik perairan Indonesia yang tertutup/kepulauan, namun harus menyesuaikan kondisi lingkungan perairan tempat di mana struktur terapung tersebut beroperasi.

Pada DNV RP C205 juga dijelaskan bahwa spektrum JONSWAP diaplikasikan pada perairan dengan :

$$3.6 < T_p / (H_s)^{1/2} < 5$$

Dimana:

T_p = Periode Puncak Gelombang (s)

H_s = Tinggi Gelombang Signifikan (s)

Untuk perairan Laut Jawa, nilai $T_p / (H_s)^{1/2} = 9/(3.6)^{1/2} = 4.74$

Untuk memperoleh nilai γ nya menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\gamma = \exp(5.75 - 1.15 T_p / (H_s)^{1/2})$$

Berikut persamaan dari spektrum JONSWAP:

$$S(\omega) = a g^2 \omega^{-5} \exp \left[-1.25 \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right) \right] \gamma^{\exp \left[\frac{-(\omega - \omega_0)^2}{2 \tau^2 \omega_0^2} \right]} \dots \dots \dots (52)$$

Dimana:

- $S(\omega)$ = spektrum gelombang
- γ = parameter puncak (*peakedness parameter*) bervariasi antara 1,0 sampai dengan 7,0. Untuk Laut Utara mempunyai harga 3,3
- τ = parameter bentuk (*shape parameter*) untuk $\omega \leq \omega_0 = 0.07$ dan $\omega \geq \omega_0 = 0.9$
- A = $0.0076 (X_0) - 0.22$, untuk X_0 tidak diketahui $a = 0.0081$

2.2.15 Spektrum Respon

Spektrum respon didefinisikan sebagai respon energi dari struktur akibat energi gelombang. Pada sistem linier, respon spektra didapat dengan mengkuadratkan *RAO* yang kemudian dikalikan dengan spektra gelombang, yang secara persamaan matematis dapat ditulis dengan:

$$S_R(\omega) = [RAO(\omega)]^2 \times S(\omega) \dots \dots \dots (54)$$

Dimana :

- $S_R(\omega)$ = spektrum respon ($m^2 - sec$)
- $S(\omega)$ = spektrum gelombang ($m^2 - sec$)
- RAO* = *response amplitude operator*
- ω = frekuensi gelombang (rad/sec)

2.2.16 Konsep Pembebanan

Suatu sistem *mooring* dianalisa berdasarkan desain kriteria yang diformulasikan dalam 3 batasan yang telah ditetapkan, yaitu (DNV-OS-E301) :

1. *Ultimate Limit State (ULS)*, untuk memastikan bahwa sebuah *mooring line* cukup kuat untuk bertahan terhadap efek beban

yang ditimbulkan oleh beban lingkungan pada kondisi ekstrem.

2. *Accidental Limit State* (ALS), untuk memastikan bahwa suatu sistem *mooring* memiliki kapasitas yang cukup untuk bertahan pada 29 kegagalan sebuah *mooring line* yang dimana penyebab dari terjadinya kegagalan tidak diketahui.
3. *Fatigue Limit State* (FLS), untuk memastikan bahwa sebuah *mooring lines* memiliki kapasitas yang cukup untuk bertahan pada beban yang bersifat *cyclic*.

2.2.17 Jenis *Mooring Line*

Menurut *API-RP2SK 3rd edition* (2005), tipe *mooring line* yang digunakan pada *floating structure* dibagi menjadi 3 kategori, yaitu:

1. Semua *mooring line* terbuat dari tali kabel (*wire rope*).

Wire rope lebih ringan daripada rantai. Karena itu, pada umumnya *wire rope* memiliki *restoring force* yang lebih di perairan laut dalam dan memerlukan tegangan awal (*pretension*) yang rendah dari pada rantai. Bagaimanapun juga, untuk menghindari terangkatnya *anchor* dari dasar laut maka diperlukan *wire rope* yang sangat panjang. Rusak yang disebabkan oleh abrasi antara *wire rope* dengan dasar laut yang keras terkadang dapat menjadi suatu masalah. Terlebih lagi *wire rope* memerlukan perawatan yang sangat hati-hati. Korosi yang diakibatkan oleh kurangnya pelumasan atau kerusakan mekanik pada *wire rope* dapat menyebabkan lebih banyak kegagalan.

2. Semua *mooring line* terbuat dari *chain*.

Chain telah menunjukkan keunggulannya pada *offshore operations*. *Chain* juga memiliki daya tahan yang lebih terhadap abrasi dasar laut dan memiliki kontribusi terhadap daya cengkram *anchor* yang sangat signifikan. Akan tetapi, karena *chain* memiliki berat yang besar maka rantai tidak terlalu di gunakan pada kondisi operasi perairan laut dalam.

3. Kombinasi antara *chain* dan *wire rope*.

Dengan pemilihan panjang yang tepat dari gabungan antara *wire rope* dan *chain*, maka akan diperoleh sistem *mooring* yang menguntungkan, yaitu: *pretension* yang rendah, *restoring force* yang tinggi dan *holding anchor* yang lebih besar dan daya tahan terhadap abrasi dasar laut yang bagus menyebabkan sistem ini yang paling cocok untuk operasi laut dalam.

2.2.18 Anchor Chain (Rantai Jangkar)

Rantai jangkar terdiri atas potongan-potongan antara satu segel (*shackle*) dengan segel yang lainnya yang setiap potongan, panjangnya masing-masing 15 fathoms. Jumlah panjang rantai jangkar yang besar berkisar antara 240-330 fathoms. Menurut Lloyd register, satu segel panjangnya 15 fathom, atau sekitar 27.5 m. Sedang menurut Germanischer Lloyd 1 segel = 15 fathom atau 25 m.

Yang dimaksud dengan tebal atau diameter rantai adalah : tebalnya bahan untuk membuat mata rantai biasa (*original link*). Mata rantai merupakan bagian dari rantai jangkar yang berbentuk lonjong, mata rantai itu di tengah-tengahnya diberi "dam" kecuali mata rantai yang berada pada ujung-ujung dari setiap panjang 15 fathoms sebelah kiri dan kanan dari segel. Dam-dam tersebut gunanya untuk menjaga agar rantai tidak berputar. Mata rantai yang tidak memakai dam ukurannya lebih besar dari mata rantai biasa.

Setiap segel jumlah mata rantainya selalu ganjil supaya sambungan segel harus pada kedudukan rata pada waktu mata spil jangkar. Segel-segel biasa (*normal connecting shackle*) yang menghubungkan setiap 15 fathoms panjang rantainya harus dipasang dengan lengkung menghadap ke arah jangkarnya, agar supaya pada waktu lego jangkar dapat licin dan tidak merusakkan mata spil jangkar.

Komposisi dan konstruksi dari rantai jangkar terdiri atas :

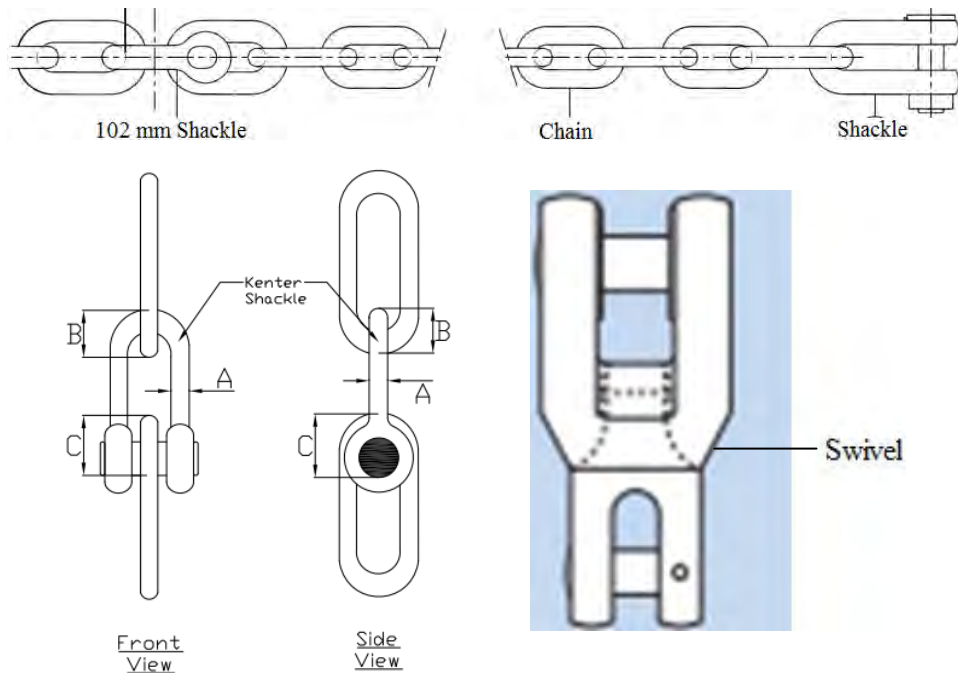
- *Ordinary link*
- *Large link* (rantai antara *End link* dan *Ordinary link*)
- *End link* (rantai setelah *Connecting shackle*)
- *Connecting shackle* (sambungan rantai tiap 15 fathoms)
- *Swivel*

Swivel adalah perangkat mata rantai yang memungkinkan jangkar berputar, tanpa mengakibatkan rantai yang dipasang sebelum atau di belakang perangkat tersebut terpuntir.

- *Kanter shackle* (segel tiap 15 fathoms)

Kanter shackle adalah mata rantai untuk penyambung yang mempunyai ukuran yang sama dengan mata rantai yang akan disambung, konstruksi mata rantai ini setengah bagian dapat digeserkan melintang untuk memasukkan mata rantai yang akan disambung.

Berikut pada gambar 2.19 adalah komponen dan konstruksi dari rantai jangkar:



Gambar 2.19 Komponen dan konstruksi rantai jangkar

2.2.19 Tension pada Mooring Line

Struktur mengalami *offset* sebagai respon energi yang diakibat oleh energi gelombang (spektrum respon), sehingga menyebabkan adanya tarikan (*tension*) pada *mooring line*. Secara persamaan matematis mengacu kepada API RP 2P dapat ditulis dengan:

$$X_{rms} = \sqrt{\Delta\omega \times S_R(\omega)_{rata-rata}} \dots\dots\dots(55)$$

$$X_{1/3} = 2 (X_{rms}) \dots\dots\dots(56)$$

$$X_{max} = 1,86 \times (X_{1/3}) \dots\dots\dots(57)$$

Dimana :

- $\Delta\omega$ = selisih frekuensi gelombang (rad/sec)
- $S_R(\omega)_{rata-rata}$ = spektrum respon rata-rata (m² – sec)
- X_{rms} = *mean offset* (m)
- $X_{1/3}$ = *offset signifikan* (m)
- X_{max} = *offset maksimum* (m)

Secara matematis gaya tarik atau *tension* dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$T = k.x \dots\dots\dots(58)$$

Dimana:

- T = *tension* (N)
- k = kekakuan (N/m)
- x = *offset* (m)

Tension yang terjadi pada *mooring line* dapat dibedakan menjadi 2, yaitu:

1. *Mean Tension.*
Tension pada *mooring line* yang berkaitan dengan *mean offset* pada *vessel*.
2. *Maximum Tension.*
Mean Tension yang mendapat pengaruh dari kombinasi frekuensi gelombang dan *low frequency tension*.

Menurut API RP 2SK 2nd edition, tarikan maksimum (*maximum tension*) dapat ditentukan dengan prosedur dibawah ini :

a. Jika $T_{lfmax} > T_{wfmax}$, maka :

$$T_{max} = T_{mean} + T_{lfmax} + T_{wfsig} \dots\dots\dots(59)$$

b. Jika $T_{lfmax} < T_{wfmax}$, maka :

$$T_{max} = T_{mean} + T_{wfmax} + T_{lfsig} \dots\dots\dots(60)$$

dengan :

- 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*

Untuk mengetahui desain sistem tambat aman atau tidak, harus dilakukan pengecekan. Salah satunya pengecekan dapat dilakukan pada nilai *tension* pada masing-masing rantai jangkar. *Tension* pada rantai jangkar harus sesuai dengan kriteria *safety factor* yang terdapat pada *rule*. Pada tugas akhir ini *rule* yang dipakai sebagai acuan adalah ABS. ABS (2004) telah menetapkan *safety factor* untuk *mooring line* harus lebih besar dari 1,67.

Persamaan *safety factor* adalah:

$$Safety\ Factor = \frac{Minimum\ Breaking\ Load}{Maximum\ Tension} \dots\dots\dots(61)$$

2.2.20 Tegangan Aksial

Tegangan aksial adalah tegangan normal yang bekerja tegak lurus penampang struktur. Tegangan aksial dapat dihasilkan dari gaya tarik atau gaya tekan. Ilustrasi tegangan aksial dapat dilihat pada Gambar 2.20. Persamaan tegangan aksial adalah sebagai berikut (Popov, 1996) :

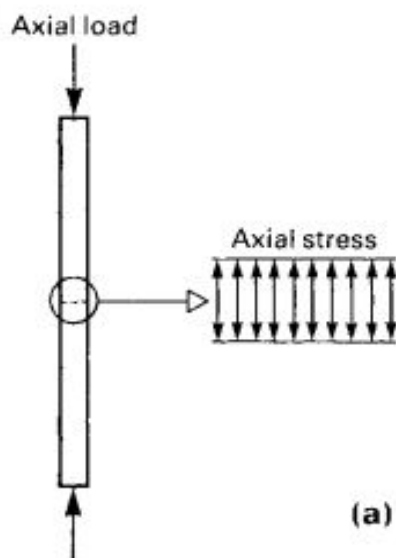
$$\tau = \frac{F}{A} \dots\dots\dots(62)$$

dengan:

F : gaya yang bekerja pada arah tegak lurus terhadap penampang (N)

A : luas penampang (m²)

τ : tegangan aksial (Pa)



Gambar 2.20 Ilustrasi tegangan normal akibat gaya aksial

2.2.21 Bending Stress

Bending *stress* atau tegangan lentur merupakan resultan dari momen luar dan momen dalam yang terjadi pada struktur. Ilustrasi *bending stress* dapat dilihat pada Gambar 2.21.

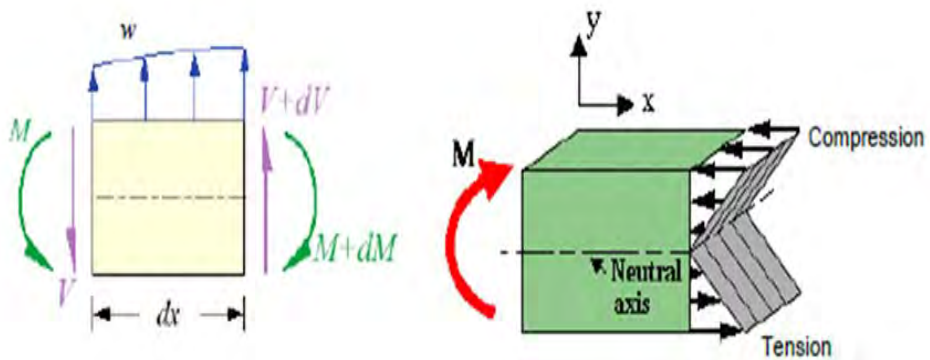
$$M = \int_A f \cdot dA \cdot y = \int_A \left(-\frac{y}{c} f_{\max} \right) dA \cdot y = -\frac{f_{\max}}{c} \int_A y^2 dA \quad \dots\dots (63)$$

$\int_A y^2 \cdot dA = I$ adalah momen inersia terhadap titik berat penampang. Jadi persamaan tegangan lentur menjadi:

$$M = -\frac{f_{\max}}{c} I \quad \text{atau} \quad f_{\max} = -\frac{M c}{I} \quad \dots\dots\dots(64)$$

Tegangan lentur pada sembarang titik yang berjarak y dari garis netral:

$$f = -\frac{M y}{I} \quad \dots\dots\dots(65)$$



Gambar 2.21 Bending stress pada suatu penampang
(Sumber: Ronney, 2014)

2.2.22 Tegangan *Von Mises*

Pada elemen tiga dimensi, bekerja tegangan-tegangan searah sumbu x , y , dan z . Tegangan maksimum yang terjadi pada struktur didapatkan dari penggabungan tegangan yang terjadi pada masing-masing arah (Gambar 2.22). Persamaan tegangan gabungan dapat dinyatakan sebagai persamaan tegangan *Von Mises* :

$$\sigma_{eq} = \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \quad \dots(66)$$

dengan:

σ_{eq} = tegangan ekuivalen (*von mises stress*) (Pa)

σ_x = tegangan normal sumbu x (Pa)

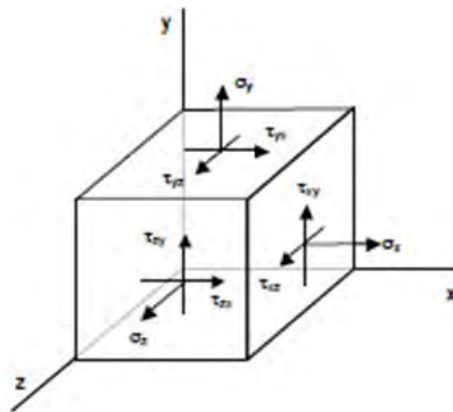
σ_y = tegangan normal sumbu y (Pa)

σ_z = tegangan normal sumbu z (Pa)

τ_{xy} = tegangan geser bidang yz (Pa)

τ_{yz} = tegangan geser bidang zx (Pa)

τ_{zx} = tegangan geser bidang xy (Pa)

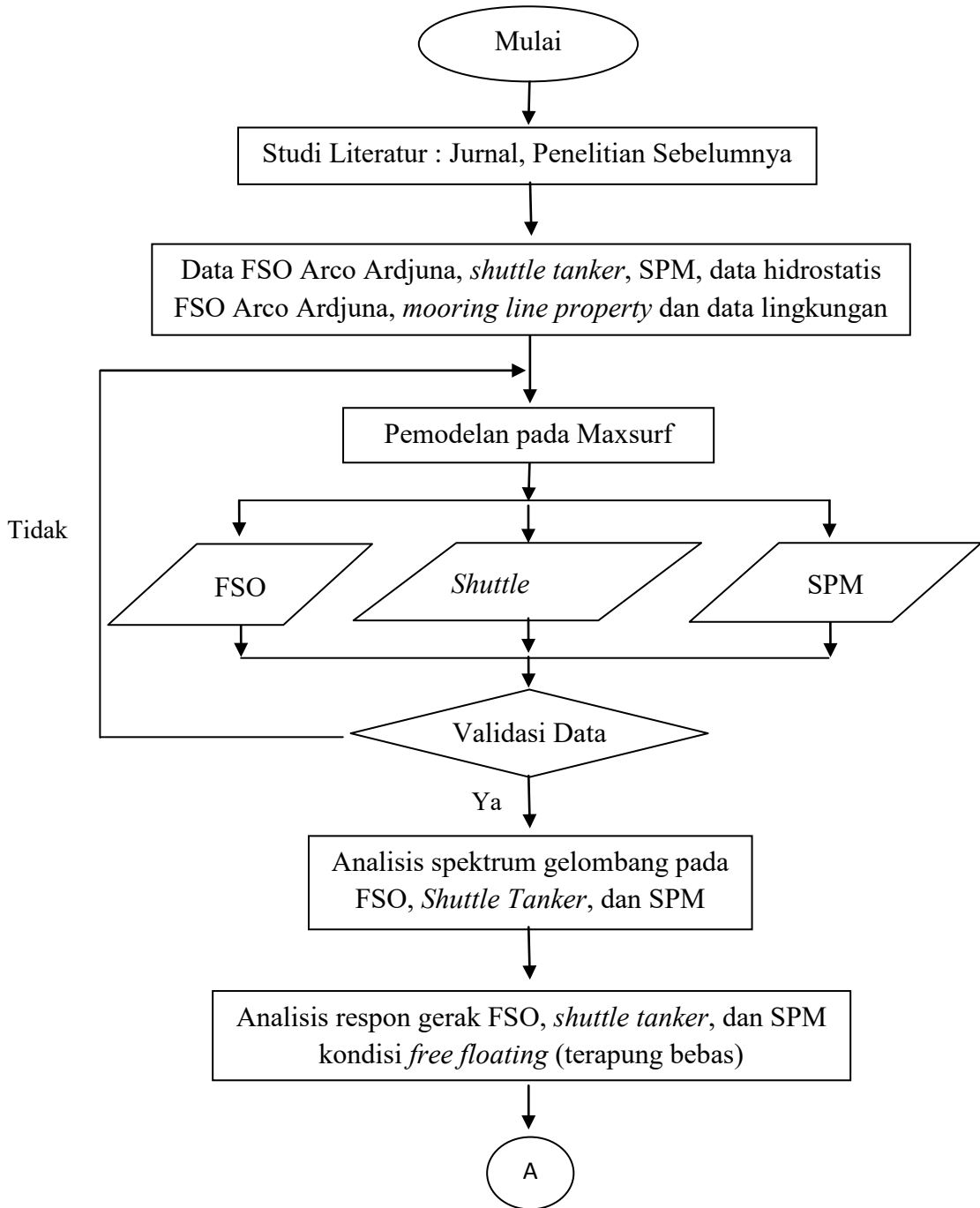


Gambar 2.22 Von Mises stress pada suatu penampang
(Sumber: Ronney 2014)

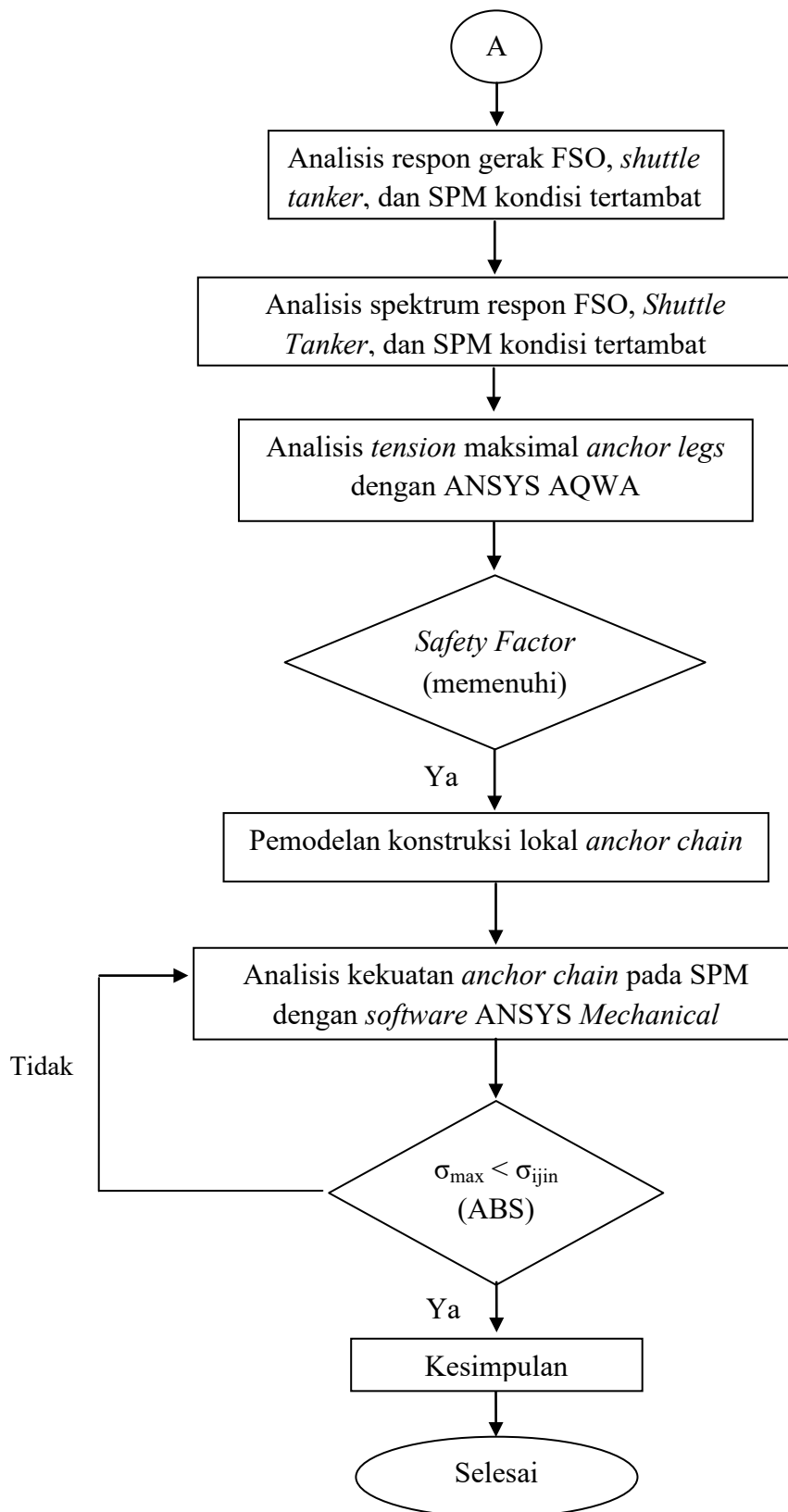
BAB III
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir

Prosedur penelitian dapat disajikan dalam diagram alir dibawah :



Gambar 3.1 Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir



Gambar 3.1 Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir (lanjutan)

3.2 Prosedur Penelitian

Adapun langkah-langkah penelitian dalam diagram alir pada Metodologi Penelitian dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Informasi dan penelitian-penelitian yang telah dilakukan mengenai FSO, *shuttle tanker*, SPM dan konstruksi *anchor chain* didapatkan dengan penelusuran literatur. Pada tugas akhir ini, studi literatur diambil dari berbagai sumber seperti buku, materi perkuliahan, jurnal dan penelitian sebelumnya termasuk laporan tugas akhir terdahulu yang memiliki keterkaitan topik serupa untuk mencari dasar teori yang digunakan dan *rules* atau *codes* yang relevan yang dibutuhkan selama pengerjaan tugas akhir ini.

2. Pengumpulan Data

Pengumpulan data struktur FSO, *shuttle tanker*, SPM, dan data lingkungan didapatkan dari PT. Pertamina Hulu Energi ONWJ dan PT. Citra Mas.

3. Pemodelan Struktur

Pemodelan s truktur FSO, *shuttle tanker*, dan SPM saat kondisi terapung bebas, dalam Tugas Akhir ini dilakukan dengan bantuan *software* Maxsurf dan ANSYS AQWA. FSO, *shuttle tanker*, beserta SPM dimodelkan berdasarkan data-data yang telah didapatkan.

4. Validasi Model

Validasi dilakukan dengan membandingkan data hidrostatis keluaran Maxsurf dari kapal yang dimodelkan dengan data hidrostatis yang telah ada.

5. Analisa Spektrum Gelombang pada FSO, Shuttle Tanker, dan SPM

Spektrum Gelombang yang digunakan pada analisis karakteristik gerakan struktur FSO, *Shuttle Tanker*, dan SPM adalah Spektrum Jonswap, karena karakteristik perairan Indonesia yang tertutup/kepulauan sehingga cocok dengan karakter spektrum JONSWAP.

6. Analisis Respon Gerak FSO, *shuttle tanker*, dan SPM Kondisi *Free Floating*

Menganalisis respon gerakan pada struktur FSO, *shuttle tanker*, maupun struktur SPM untuk mengetahui karakteristik gerakan pada masing-masing

struktur dalam kondisi terapung bebas dan juga didapatkan data RAO pada masing-masing struktur.

7. Analisis Respon Gerak FSO, *shuttle tanker*, dan SPM Kondisi Tertambat

Pada tahap ini akan dilakukan analisa FSO, *shuttle tanker*, dan SPM saat kondisi tertambat. Analisis dinamis dilakukan dengan bantuan *software* ANSYS AQWA.

8. Analisis Spektrum Respon FSO, *shuttle tanker*, dan SPM Kondisi Tertambat

Pada tahapan ini akan dilakukan perhitungan respon spektra pada FSO Arco Ardjuna, *shuttle tanker*, dan SPM dengan kedalaman laut 45 m.

9. Analisis *Tension* Maksimal Pada *Anchor Legs*

Analisis *tension anchor legs* dilakukan dengan bantuan *software* ANSYS AQWA. Input yang dibutuhkan adalah data struktur, data rantai jangkar, dan data lingkungan. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui *tension* maksimal pada rantai jangkar dengan *safety factor* mengacu pada ABS. Analisis ini berbasis *time domain* selama 3 jam.

10. Pemodelan Konstruksi Lokal *Anchor Chain*

Anchor chain pada SPM didesain sesuai data yang ada. Desain *anchor chain* dilakukan untuk menentukan ukuran dan konfigurasi sudut yang sesuai.

11. Analisis Kekuatan *Anchor Chain*

Analisis kekuatan *anchor chain* dilakukan dengan bantuan *software* ANSYS AQWA. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui kekuatan tiap-tiap *anchor chain* pada CALM *buoy*. Sehingga memenuhi aturan dan standar yang ditetapkan oleh *codes* atau *class* yang berlaku.

12. Pengambilan kesimpulan dari hasil penelitian.

3.3 Pengumpulan Data

3.3.1 Data *FSO Arco Ardjuna*

Berikut ini adalah data FSO Arco Ardjuna yang terangkum pada Tabel 3.1 dan Gambar 3.2:

Tabel 3.1 Ukuran Utama FSO Arco Ardjuna

Designation	Units	Minimum Operating Draft	Maximum Operating Draft
Length, Loa	m	142.6	
Breadth, B	m	48.2	
Depth, D	m	26.5	
Displacement	tonne	15,529	153,202
Draft to Baseline	m	2.5	24
WSA	m ²	6,681	12,813
Max. Cross sect. area	m ²	114.34	1,150.63
Waterplane area	m ²	6239	6,239
Cp		0.91	0.91
Cb		0.87	0.9
Cm		0.959	0.99
Cwp		0.91	0.91
LCB from zero pt.	m	-2.69	-2.78
LCF from zero pt.	m	-2.79	-2.79
KB	m	1.26	12.02
KMt	m	78	19.73
KMI	m	590.8	71.3

(Sumber: PT. Pertamina Hulu Energi ONWJ / PT. Citra Mas)

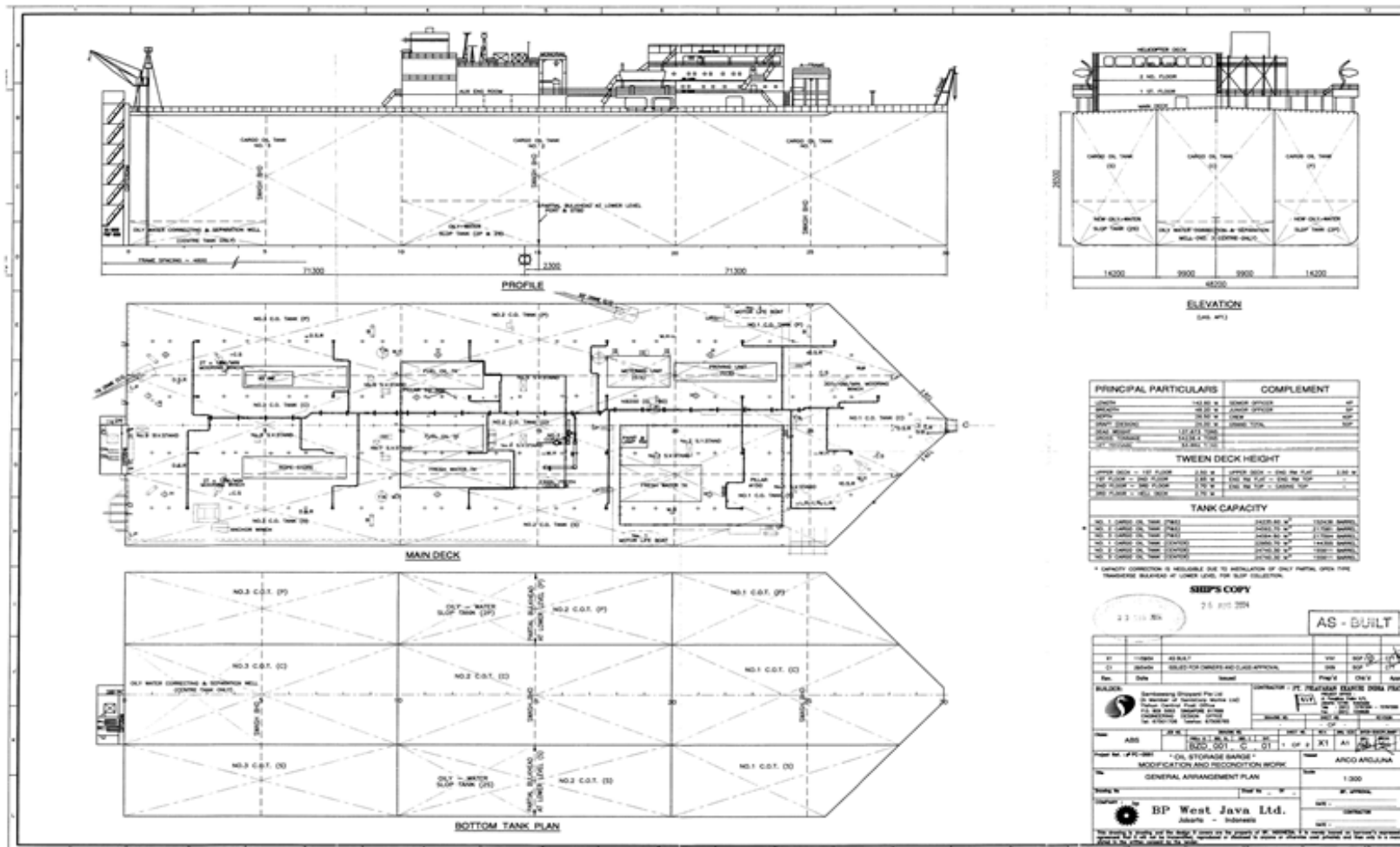
3.3.2 Data *Single Point Mooring*

Berikut pada Tabel 3.2 ini adalah data ukuran utama SPM :

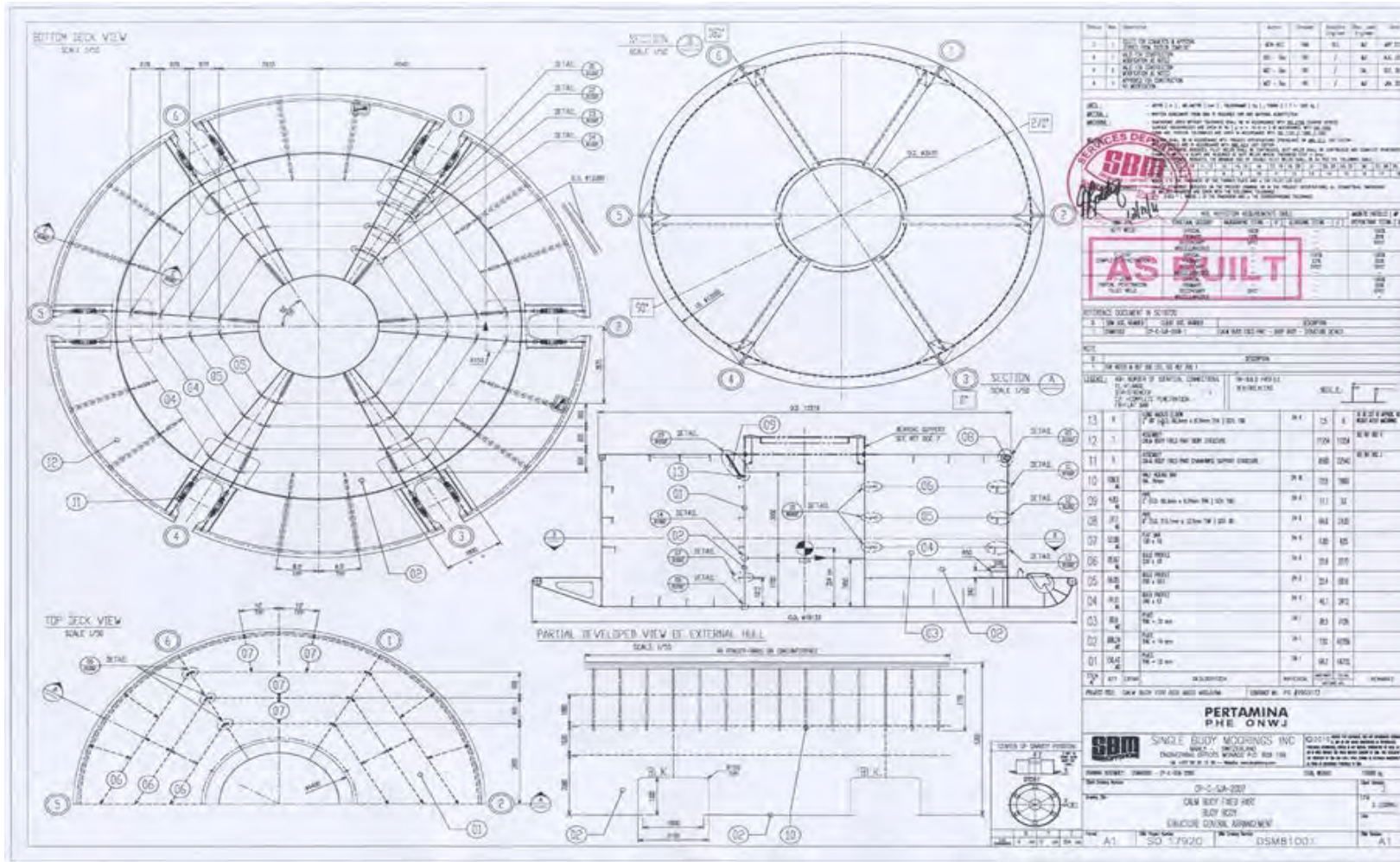
Tabel 3.2 Main dimension CALM buoy

Designation	Unit	Data
<i>Shell Outer Diameter</i>	m	12
<i>Centre Well Diameter</i>	m	3.57
<i>Skirt Outer Diameter</i>	m	16.26
<i>Buoy Body Height</i>	m	5.3
<i>Skirt Thickness</i>	mm	12
<i>Skirt Height/ Baseline</i>	m	1
<i>Buoy Installed Draft</i>	m	2.38
<i>Centre of Gravity (KG)</i>	m	3.42

(Sumber: PT. Pertamina Hulu Energi ONWJ)



Gambar 3.2: Structural General Arrangement Plan of Arco Ardjuna



Gambar 3.3: Structural General Arrangement of Buoy Body

3.3.3 Data *Anchor Legs*

Berikut ini adalah data karakteristik *anchor legs* yang terangkum pada Tabel 3.3:

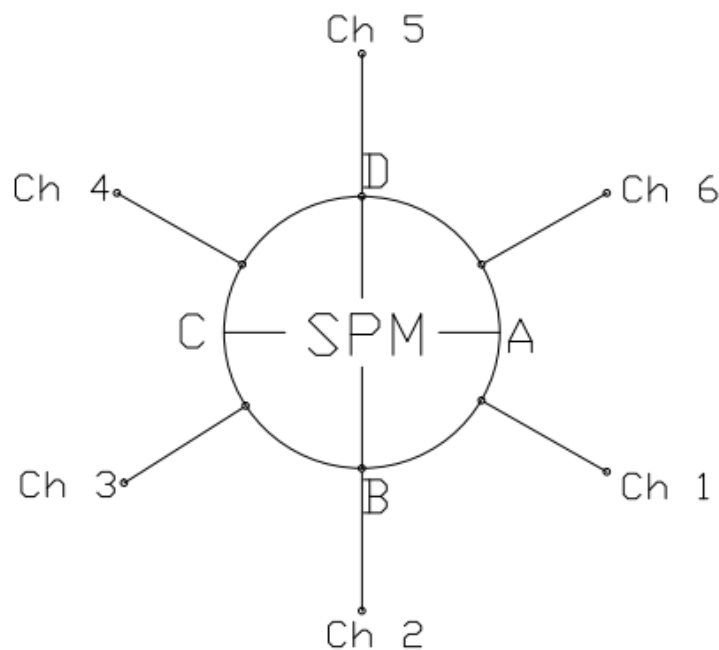
Tabel 3.3 Karakteristik *anchor legs*

<i>Number of Legs</i>	6
<i>Anchoring Pattern</i>	Even Spacing (60°)
<i>Paid out length</i>	350 m
<i>Pretension</i>	262.17 kN
<i>Pretension angle (w/horizontal)</i>	45.26°
<i>Number of segment</i>	1
<i>Chain diameter</i>	102 mm
<i>Chain type</i>	R3
<i>Minimum breaking load</i>	8315 kN
<i>Minimum breaking load after corrosion</i>	7051 kN
<i>Unit weight in Air</i>	210.16 kg/m
<i>Unit weight in Water</i>	182.72 kg/m
<i>Stiffness EA</i>	868 MN
<i>Anchoring radius</i>	337.5 m

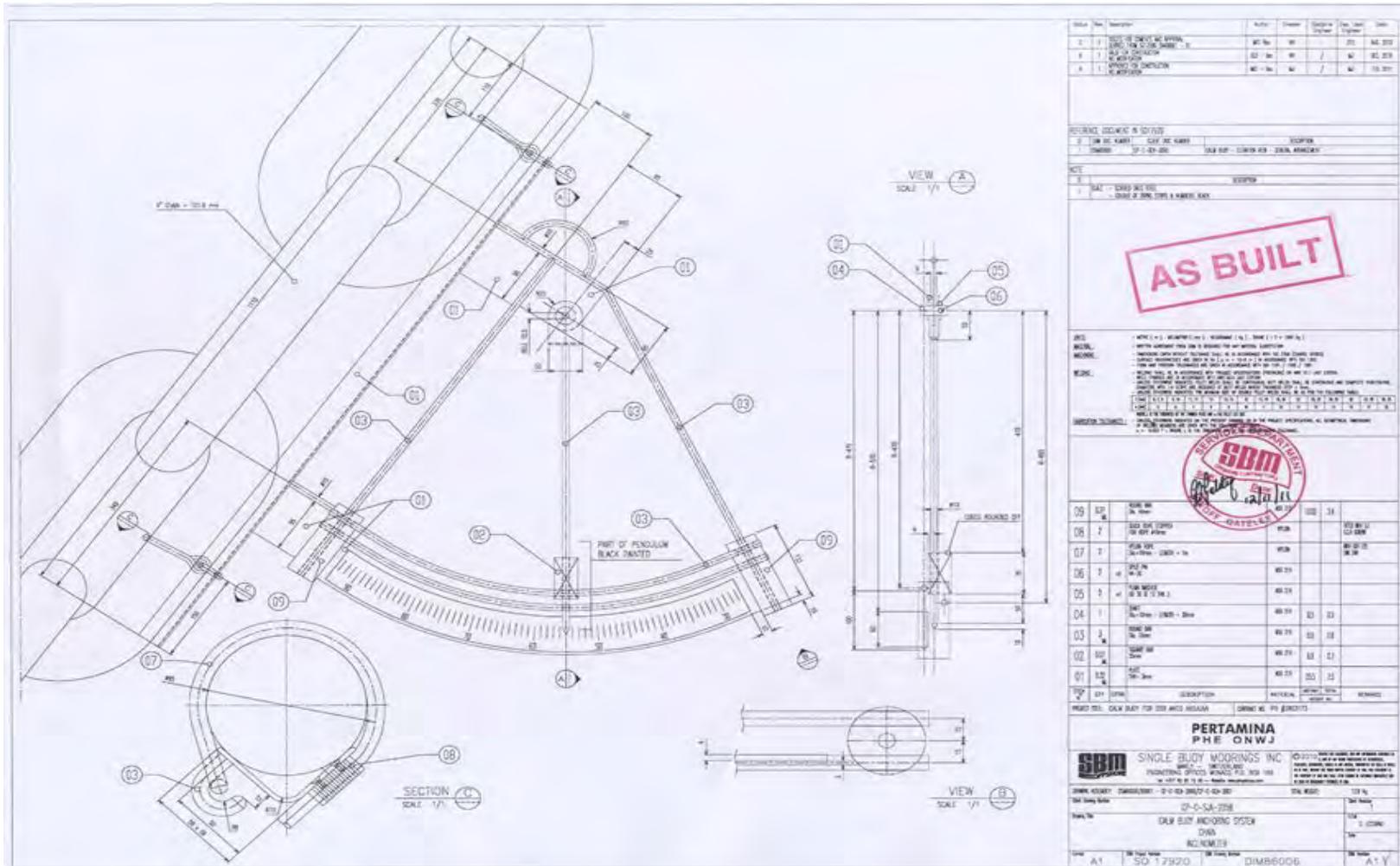
(Sumber: PT. Pertamina Hulu Energi ONWJ)

3.3.4 Data *Anchor System Pattern (Top View)*

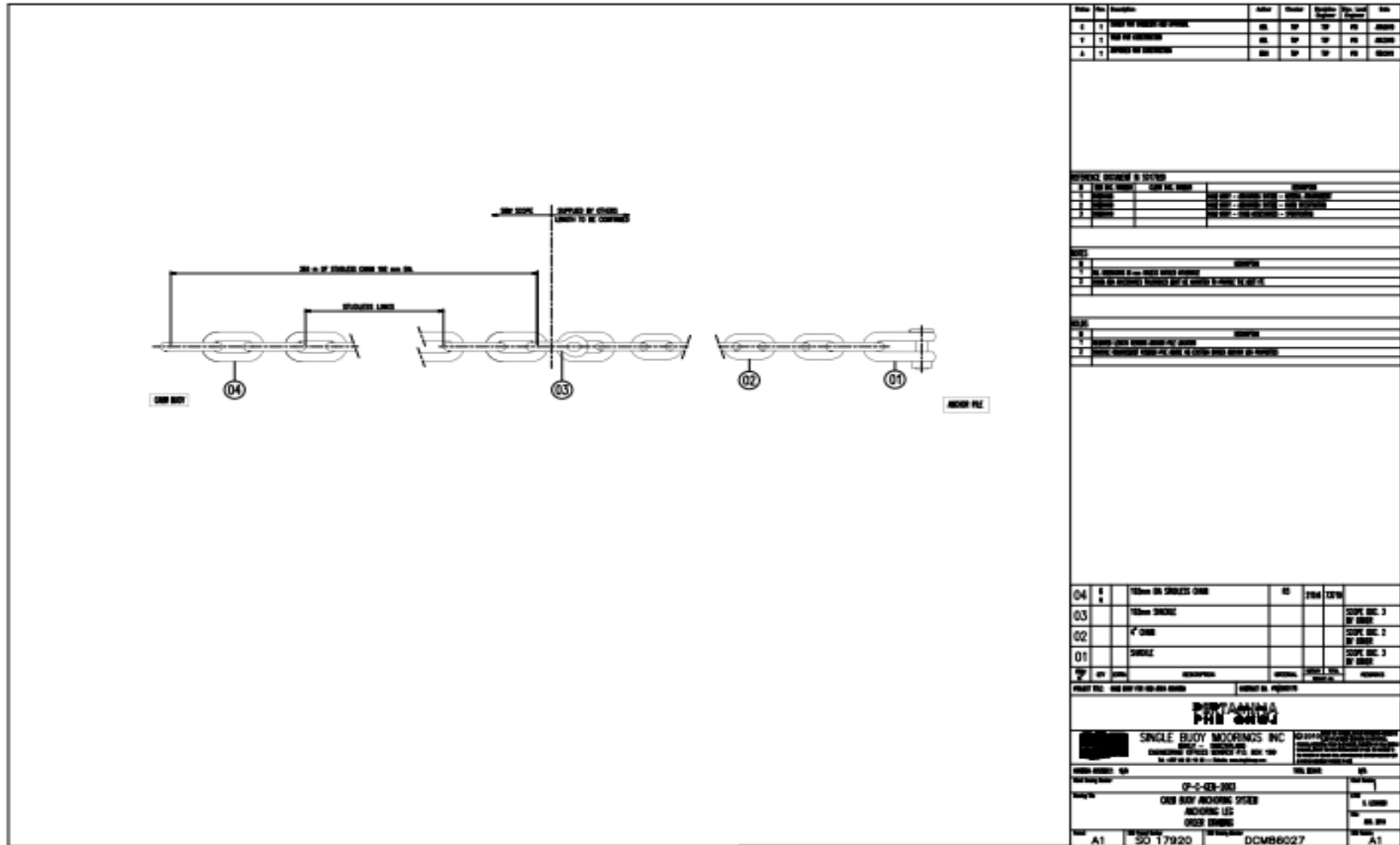
Untuk konfigurasi dan gambar bentuk detail *anchor legs* disajikan pada gambar 3.3, 3.4, dan 3.5:



Gambar 3.4 *Anchoring system pattern*



Gambar 3.5: Anchoring System Chain



Rev	Rev Description	Author	Checker	Quantity	Rev. Level	Rev. Date
1	ISSUE FOR MANUFACTURE	MS	MS	MS	MS	JAN2007
2	ISSUE FOR MANUFACTURE	MS	MS	MS	MS	JAN2007
3	ISSUE FOR MANUFACTURE	MS	MS	MS	MS	JAN2007

REFERENCE DOCUMENTS TO BE REVIEWED	
1	ASME Y14.5-2003 DIMENSIONING AND TOLERANCING MANUAL
2	ASME Y14.7-2003 SURFACE TEXTURE SYMBOLS
3	ASME Y14.18-2002 GEOMETRIC DIMENSIONS AND TOLERANCING

MATERIALS	
1	304 STAINLESS STEEL
2	304 STAINLESS STEEL
3	304 STAINLESS STEEL

FINISHES	
1	RA 1.6
2	RA 3.2
3	RA 6.3

Callout	Description	Material	Quantity	Rev. Level	Rev. Date
04	ROLLER	304 STAINLESS STEEL	1	MS	JAN2007
03	ROLLER	304 STAINLESS STEEL	1	MS	JAN2007
02	ROLLER	304 STAINLESS STEEL	1	MS	JAN2007
01	ANCHOR LEG	304 STAINLESS STEEL	1	MS	JAN2007

PART TITLE: ANCHORING LEG		DRAWN BY: MS	
PURKAYASTHA PUNJ SANGI			
SINGLE BODY MOORINGS INC. 10000 W. 10TH AVE. SUITE 100 DENVER, CO 80231		303.440.1111 303.440.1112 303.440.1113	
ORDER NUMBER: 07-0-028-001 ORDER DATE: 1/2007	ORDER NUMBER: DCM86027 ORDER DATE: 1/2007	PART NUMBER: A1	REV. LEVEL: A1

Gambar 3.6: Anchoring Leg

3.3.5 Data *Mooring Hawser*

Berikut ini adalah data *mooring hawser* yang terangkum pada Tabel 3.4 :

Tabel 3.4 Karakteristik *mooring hawser*

<i>Number of Lines</i>	<i>Twin Line</i>
<i>Material</i>	Nylon
<i>Length</i>	220 ft
<i>Design Mooring Force</i>	400 tonnes
<i>New Dry Breaking Strength per Hawser</i>	4094 kN

(Sumber: PT. Pertamina Hulu Energi ONWJ)

3.3.6 Data *Shuttle Tanker*

Berikut pada Tabel 3.5 ini adalah data ukuran utama *Shuttle Tanker* :

Tabel 3.5 *Principle dimension Shuttle Tanker*

Data	Unit
Displacement	94118.1 T
LWL	218.786 m
B	38.289 m
T	13.281 m
Cb	0.825
LWT + 10%	10510.35 T
Depth	19.6 m

(Sumber: PT. Citra Mas, 2013)

3.3.7 Data Lingkungan

Berikut adalah data lingkungan perairan laut Jawa disajikan pada Tabel 3.6:

Tabel 3.6 Data Lingkungan Perairan Laut Jawa

Parameter	Unit	1-years return period	10-years return period	100-years return period
Kedalaman	m	45	45	45
Tinggi Gelombang Maksimum/Hm	m	3,2	-	6,4
Periode Gelombang Maksimum /Tm	s	6,6	-	9,4
Tinggi Gelombang Signifikan/Hs	m	1,8	-	3,6
Periode Gelombang Signifikan/Ts	s	6,3	-	8,3
Periode Puncak Gelombang (Tp)	s	6,3	-	9
Kecapatan Angin	m/s	12,3	-	25,7
Spektrum		Jonswap		
Kecepatan Arus pada 0% Kedalaman	m/s	0,72	0,94	1,15
Kecepatan Arus pada 10% Kedalaman	m/s	0,62	0,78	0,93
Kecepatan Arus pada 20% Kedalaman	m/s	0,54	0,66	0,77
Kecepatan Arus pada 30% Kedalaman	m/s	0,48	0,57	0,65
Kecepatan Arus pada 40% Kedalaman	m/s	0,44	0,50	0,56
Kecepatan Arus pada 50% Kedalaman	m/s	0,41	0,46	0,50
Kecepatan Arus pada 60% Kedalaman	m/s	0,39	0,42	0,45
Kecepatan Arus pada 70% Kedalaman	m/s	0,37	0,40	0,42
Kecepatan Arus pada 80% Kedalaman	m/s	0,36	0,38	0,39
Kecepatan Arus pada 90% Kedalaman	m/s	0,35	0,37	0,38
Kecepatan Arus pada 100% Kedalaman	m/s	0,34	0,35	0,36

(Sumber: PT. Pertamina Hulu Energi ONWJ)

BAB IV

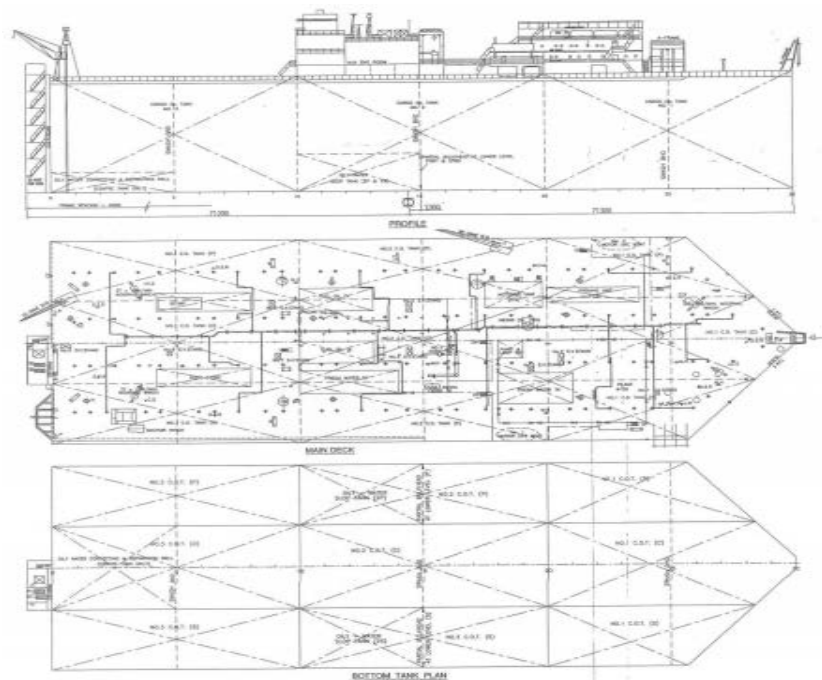
ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Pemodelan Struktur

4.1.1 FSO Arco Ardjuna

Pada pemodelan ini menggunakan kapal FSO Arco Ardjuna yang beroperasi di Laut Jawa. Pemodelan pada FSO Arco Ardjuna menggunakan *software* Maxsurf dengan acuan pada *General Arrangement* dan *principal dimension* sebagai berikut:

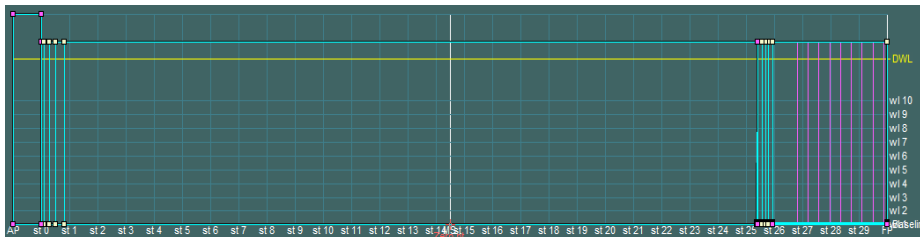
<i>Length</i>	(Loa) : 142,6 m
<i>Breadth</i>	(B) : 48,2 m
<i>Depth</i>	(H) : 26,5 m
<i>Draft</i>	(T) : 24,00 m
<i>Displacement</i>	(Δ) : 153,202 Ton



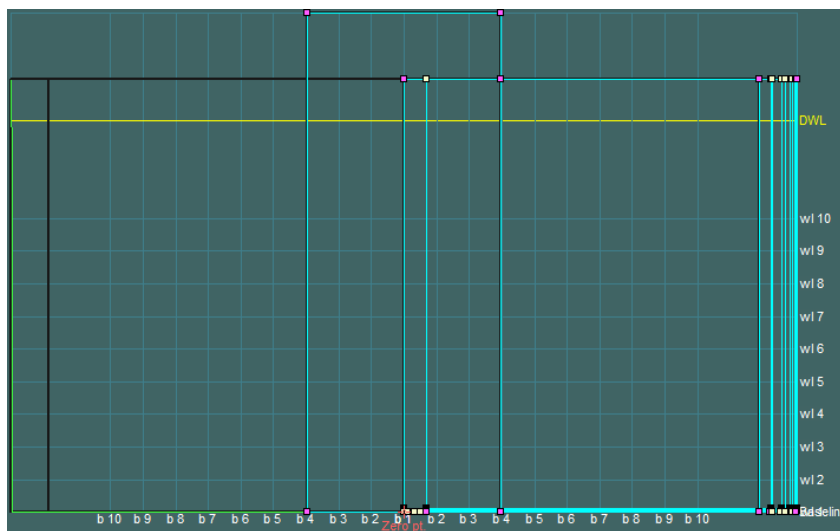
Gambar 4.1 *General Arrangement* FSO Arco Ardjuna

(Sumber: Pertamina PHE ONWJ)

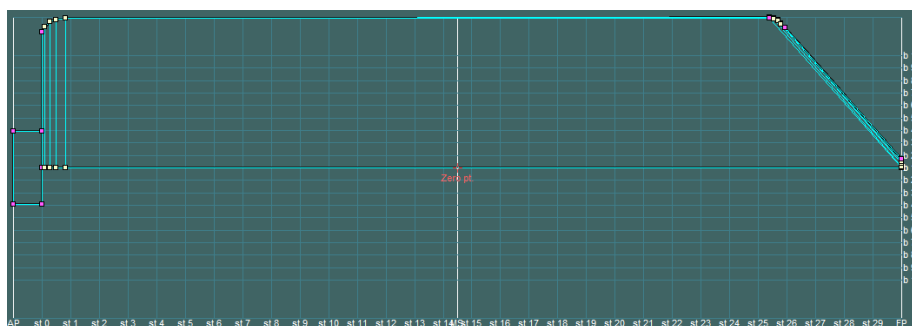
Selanjutnya untuk hasil dari pemodelan FSO Arco Ardjuna dengan menggunakan *software* Maxsurf dapat dilihat pada Gambar 4.2 sampai Gambar 4.5



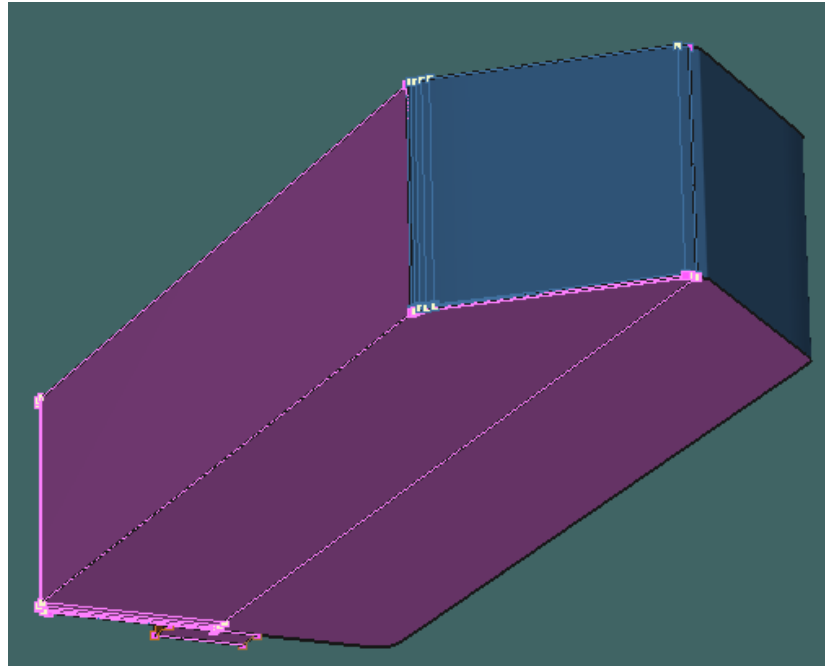
Gambar 4.2 Hasil pemodelan FSO Arco Ardjuna pada Maxsurf tampak samping (sheer plan)



Gambar 4.3 Hasil pemodelan FSO Arco Ardjuna pada Maxsurf tampak depan (body plan)



Gambar 4.4 Hasil pemodelan FSO Arco Ardjuna pada Maxsurf tampak atas



Gambar 4.5 Hasil pemodelan FSO Arco Ardjuna pada Maxsurf tampak isometri

4.1.2 Single Point Mooring

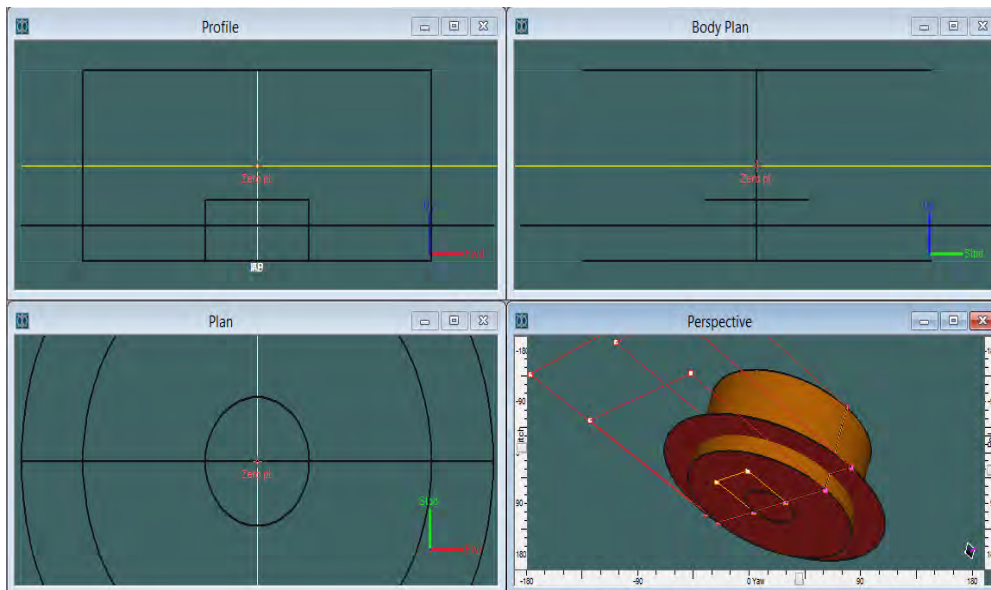
Single Point Mooring yang digunakan adalah tipe *CALM buoy*. Model *CALM buoy* ditambah dengan 6 jumlah tali tambat pada sudut 60° . Berikut adalah data utama (*principal dimension*) *Single Point Mooring CALM buoy*:

Tabel 4.1 Main dimension *CALM buoy*

Designation	Unit	Data
<i>Shell Outer Diameter</i>	m	12
<i>Centre Well Diameter</i>	m	3.57
<i>Skirt Outer Diameter</i>	m	16.26
<i>Buoy Body Height</i>	m	5.3
<i>Skirt Thickness</i>	mm	12
<i>Skirt Height/ Baseline</i>	m	1
<i>Buoy Installed Draft</i>	m	2.38
<i>Centre of Gravity (KG)</i>	m	3.42

(Sumber: Pertamina PHE ONWJ)

Selanjutnya hasil pemodelan badan SPM menggunakan *software* Maxsurf dapat dilihat seperti terlihat pada Gambar 4.6



Gambar 4.6 Hasil pemodelan *Single Point Mooring* pada Maxsurf

4.1.3 Shuttle Tanker

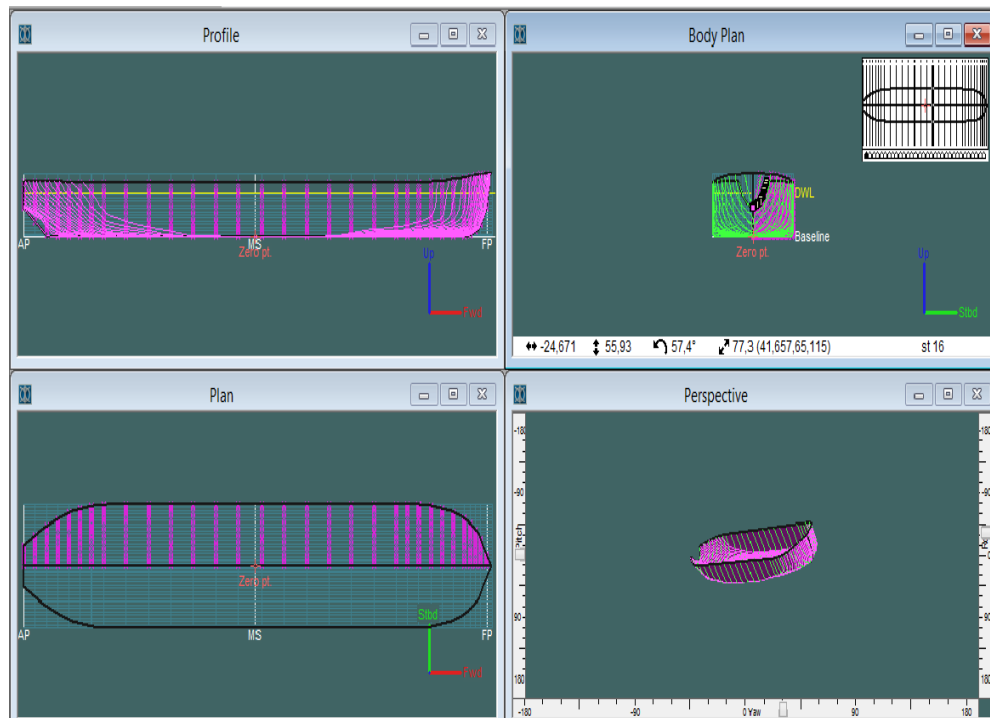
Untuk pemodelan *shuttle tanker* 85000 DWT menggunakan acuan ukuran dari Aframax yaitu sebagai berikut :

Tabel 4.2 Ukuran utama(*principal dimention*) *shuttle tanker*

Data	Unit
Displacement	94118.1 T
LWL	218.786 m
B	38.289 m
T	13.281 m
Cb	0.825
LWT + 10%	10510.35 T
Depth	19.6 m

(Sumber: Pertamina PHE ONWJ)

Berikut pada Gambar 4.7 adalah hasil pemodelan *shuttle tanker* dengan menggunakan *software* Maxsurf :



Gambar 4.7 Hasil pemodelan *shuttle tanker* dengan menggunakan *software* Maxsurf

4.2 Validasi Hidrostatik

Validasi hidrostatik dilakukan dengan membandingkan data hidrostatik struktur terapung yang dikeluarkan Maxsurf dengan data hidrostatik yang didapatkan dari perusahaan. Tujuan dari validasi ini adalah untuk mendapatkan hasil pemodelan struktur terapung yang akurat, sehingga *motion* yang dipakai pada studi kasus ini sama dengan *motion* yang sebenarnya, setelah *motion*-nya sama, *motion* tersebut dipakai untuk menghitung spektra respon maupun *tension*.

4.2.1 FSO

Untuk FSO Arco Ardjuna, validasi model dilakukan pada kondisi *full load* dan *light load*. Untuk kondisi *light load* didesain dengan keadaan muatan telah dipindahkan sebagian ke *shuttle tanker*, sehingga *displacement* FSO Arco Ardjuna kondisi *light load* yaitu sebesar 68.202 t.

Berikut adalah perhitungan muatan FSO untuk kondisi *light load*:

$$\begin{array}{r}
\text{Displacement FSO Arco Ardjuna saat kondisi } \textit{full load} & = 153.202 \text{ t} \\
\text{Displacement FSO Arco Ardjuna saat kondisi } \textit{lightship} & = 15.529 \text{ t} \\
\text{DWT FSO Arco Ardjuna saat kondisi } \textit{full load} & = \underline{137.673 \text{ t}}
\end{array}$$

$$\begin{array}{r}
\text{DWT FSO Arco Ardjuna saat kondisi } \textit{full load} & = 137.673 \text{ t} \\
\text{DWT } \textit{Shuttle Tanker} \text{ saat kondisi } \textit{full load} & = 85.000 \text{ t} \\
\text{DWT FSO Arco Ardjuna saat kondisi } \textit{light load} & = \underline{52.673 \text{ t}}
\end{array}$$

$$\begin{array}{r}
\text{DWT FSO Arco Ardjuna saat kondisi } \textit{light load} & = 52.673 \text{ t} \\
\text{Displacement FSO Arco Ardjuna saat kondisi } \textit{lightship} & = 15.529 \text{ t} \\
\text{Displacement FSO Arco Ardjuna saat kondisi } \textit{light load} & = \underline{68.202 \text{ t}}
\end{array}$$

Dari perhitungan tersebut kemudian dilakukan pemodelan pada *software* Maxsurf untuk mendapatkan data hidrostatik pada FSO Arco Ardjuna saat kondisi *light load* dan selanjutnya dilakukan validasi model.

Besaran-besaran hidrostatik FSO yang dibandingkan terdapat pada Tabel 4.3 dan Tabel 4.4 di bawah ini. Kriteria validasi data hidrostatik yang diperoleh antara data hidrostatik Maxsurf dengan data hidrostatik struktur yang sebenarnya diberikan toleransi atau faktor *error* kurang dari 2%, mengacu pada ketentuan ABS MODU (2012).

Tabel 4.3 Koreksi hidrostatik data dengan model Maxsurf pada kondisi *full load*

No	Data	Unit	FSO	Maxsurf Modeler	Koreksi	Status
1	<i>Displacement</i>	tonne	153026	153412	-0,25%	Memenuhi
2	<i>Volume</i>	m ³	149293,659	149669,41	-0,25%	Memenuhi
3	<i>Draft to Baseline</i>	m	24	24	0,00%	Memenuhi
4	<i>Immersed depth</i>	m	24	24	0,00%	Memenuhi
5	Lwl	m	142,6	142,6	0,00%	Memenuhi
6	<i>Beam Lwl</i>	m	48,2	48,182	0,04%	Memenuhi
7	WSA	m ²	12813	12832,178	-0,15%	Memenuhi
8	<i>Max. Cross sect. area</i>	m ²	1150,63	1154,665	-0,35%	Memenuhi
9	<i>Waterplane area</i>	m ²	6239	6240,245	-0,02%	Memenuhi
10	Cp		0,908	0,909	-0,11%	Memenuhi
11	Cb		0,904	0,908	-0,44%	Memenuhi
12	Cm		0,996	0,999	-0,30%	Memenuhi
13	Cwp		0,908	0,908	0,00%	Memenuhi
14	LCB from <i>midship</i>	m	-2,78	-2,79	-0,43%	Memenuhi
15	LCF from <i>midship</i>	m	-2,79	-2,78	0,25%	Memenuhi
16	KB	m	12,02	12,003	0,14%	Memenuhi
17	KMt	m	19,73	19,643	0,44%	Memenuhi
18	KML	m	71,3	71,316	0,02%	Memenuhi

Tabel 4.4 Koreksi hidrostatik data dengan model Maxsurf pada kondisi *light load*

No	Data	Unit	FSO	Maxsurf Modeler	Koreksi	Status
1	<i>Displacement</i>	tonne	68202	68055	0,22%	Memenuhi
2	Lwl	m	142,6	142,6	0,00%	Memenuhi
3	<i>Beam Lwl</i>	m	48,2	47,999	0,42%	Memenuhi
4	<i>Waterplane area</i>	m ²	6239	6194,582	0,71%	Memenuhi

4.2.2 Single Point Mooring

Untuk model SPM juga dilakukan hal yang sama yaitu melakukan validasi hidrostatik antara model Maxsurf dan data sebenarnya. Untuk koreksi hidrostatik data dengan hidrostatik model SPM pada Maxsurf disajikan kedalam tabel 4.5 :

Tabel 4.5 Koreksi hidrostatik data dengan hidrostatik model *Single Point Mooring* pada Maxsurf

Designation	Unit	Data	Maxsurf	Koreksi	Status
<i>Shell Outer Diameter</i>	M	12	12		Memenuhi
<i>Centre Well Diameter</i>	M	3.57	3.57		Memenuhi
<i>Skirt Outer Diameter</i>	M	16.26	16.26		Memenuhi
<i>Buoy Body Height</i>	M	5.3	5.3		Memenuhi
<i>Skirt Thickness</i>	mm	12	12		Memenuhi
<i>Skirt Height/ Baseline</i>	M	1	1		Memenuhi
<i>Buoy Installed Draft</i>	M	2.38	2.38		Memenuhi
<i>Centre of Gravity (KG)</i>	M	3.42	3.42		Memenuhi
<i>Displacement</i>	ton	255.34	258.5	1.24%	Memenuhi

4.2.3 Shuttle Tanker 85000 DWT

Pada model *shuttle tanker* dengan muatan sebesar 85000 DWT juga harus dilakukan validasi data hidrostatik antara data hidrostatik dari model kapal sebenarnya dan model pada Maxsurf. Besaran-besaran hidrostatik yang dibandingkan meliputi panjang garis air pada kapal memanjang, lebar kapal, tinggi kapal, sarat kapal, *coefficient block*, dan *displacement* pada sarat *full condition* yaitu 13.28 m. Sedangkan untuk kondisi kapal pada saat *light condition* tidak diketahui pada data. Perlu dilakukan pemodelan kapal pada Maxsurf dengan acuan berat total *light condition* yaitu sebesar 10510.35 t (LWT + 10% *Bunker*) untuk menentukan sarat kapal pada saat *light load condition*, dari pemodelan yang telah dilakukan maka didapatkan sarat *shuttle tanker* pada kondisi *light load* yaitu 1.99 meter.

Berikut pada Tabel 4.6 dan Tabel 4.7 adalah koreksi hidrostatik data *shuttle tanker* dengan hidrostatik model pada maksurf pada saat kondisi *full load* dan *light load*:

Tabel 4.6 Koreksi hidrostatik data dengan model Maxsurf pada *shuttle tanker* saat kondisi *full load*

No	Data	Unit	<i>Shuttle Tanker</i>	Maxsurf Modeler	Koreksi
1	<i>Displacement</i>	tonne	94118	93979	0,15%
2	LWL	m	218,79	219,64	0,39%
3	B	m	38,29	38,29	0,00%
4	<i>Depth</i>	m	19,6	19,6	0,00%
5	T	m	13,28	13,28	0,00%
6	Cb		0,825	0,821	0,48%

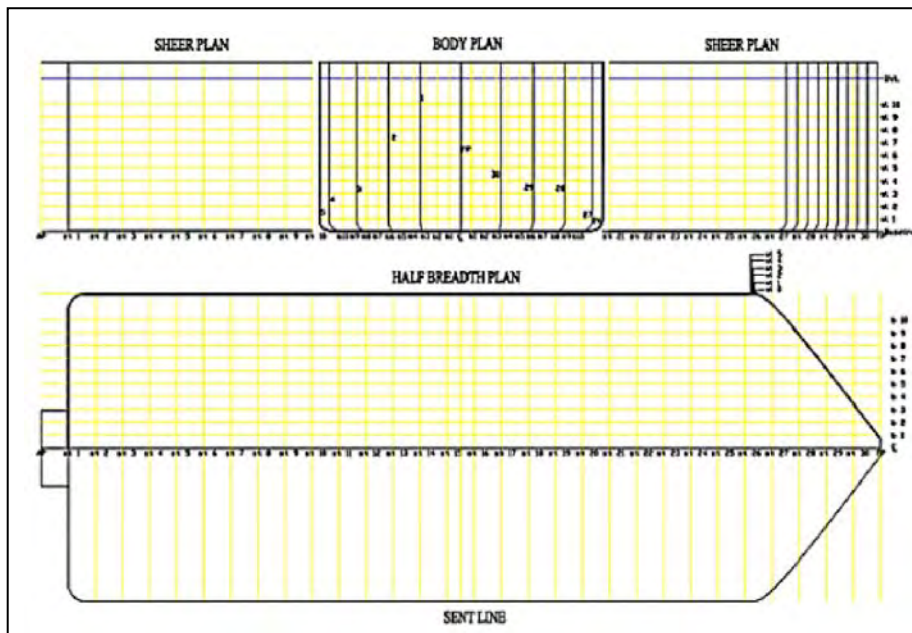
Tabel 4.7 Koreksi hidrostatik data dengan model Maxsurf pada *shuttle tanker* saat kondisi *light load*

No	Data	Unit	<i>Shuttle Tanker</i>	Maxsurf Modeler	Koreksi
1	<i>Displacement</i>	tonne	10510,35	10510	0,00%
2	B	m	38,29	38,135	0,40%
3	<i>Depth</i>	m	19,6	19,6	0,00%

4.3 Lines Plan

4.3.1 FSO

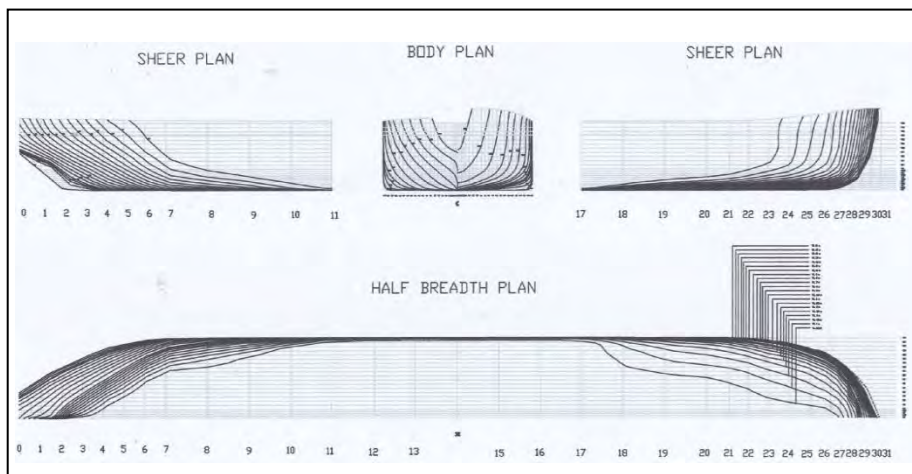
Setelah validasi model sebenarnya dan model Maxsurf memenuhi, maka dapat dilakukan analisis selanjutnya. Langkah selanjutnya yang harus dilakukan adalah membuat perancangan rencana garis atau *lines plan*. *Lines plan* dibuat dari data *offset* model yang sudah valid pada Maxsurf. Berikut pada Gambar 4.8 adalah *lines plan* dari FSO Arco Ardjuna.



Gambar 4.8 Lines plan Arco Ardjuna

4.3.2 Shuttle Tanker 85000 DWT

Pada model *shuttle tanker* juga dibuat gambar *lines plan* yang dibuat dari data *offset* model yang sudah valid pada Maxsurf. Berikut pada Gambar 4.9 merupakan gambar *lines plan* dari *shuttle tanker* 85000 DWT.



Gambar 4.9 Lines plan shuttle tanker 85000 DWT

4.4 Spektrum Gelombang

Spektrum Gelombang yang digunakan pada analisis karakteristik gerakan struktur *Single Point Mooring*, FSO Arco Ardjuna, dan *Shuttle Tanker* adalah Spektrum JONSWAP. Pemilihan spektrum JONSWAP ini didasarkan karena karakteristik perairan Indonesia yang tertutup/kepulauan sehingga cocok dengan karakter spektrum JONSWAP. Selain itu, pada DNV RP C205 juga dijelaskan bahwa spektrum JONSWAP diaplikasikan pada perairan dengan :

$$3.6 < T_p / (H_s)^{1/2} < 5$$

Untuk perairan Laut Jawa, nilai $T_p / (H_s)^{1/2} = 9/(3.6)^{1/2} = 4.74$

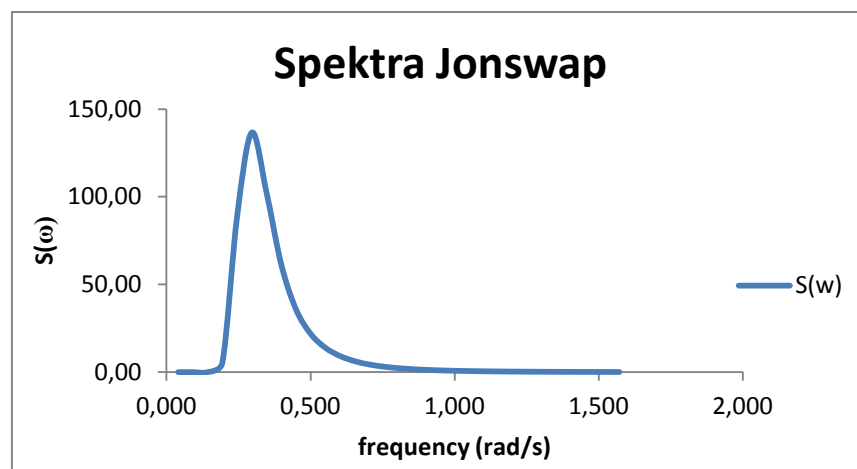
Untuk memperoleh nilai gammanya menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\gamma = \exp(5.75 - 1.15 T_p / (H_s)^{1/2})$$

Sehingga:

$$\gamma = \exp(5.75 - 1.15 \times 9 / (3.6)^{1/2}) = 1.343$$

Gambar 4.10 di bawah ini menunjukkan grafik spektrum gelombang untuk perairan Laut Jawa tempat SPM, FSO Arco Ardjuna, dan *Shuttle Tanker* beroperasi.



Gambar 4.10 Spektrum Jonswap Perairan Laut Jawa dengan $H_s = 3,6$ m, $T_p = 9$ s

4.5 Analisis Gerakan Kapal

4.5.1 FSO

Pada analisis gerakan dilakukan dengan bantuan *software* Ansys Aqwa. Data-data yang diperlukan untuk analisis gerakan menggunakan Ansys Aqwa adalah data *offset* kapal yang digunakan program untuk mengidentifikasi badan kapal, untuk menghitung luas, *volume* dan *displacement*, sehingga proses tersebut dapat digunakan sebagai salah satu validasi Ansys Aqwa. Besar titik berat dan *radius gyration* dapat dilihat pada Tabel 4.8 sebagai berikut :

Tabel 4.8 Data titik berat, *displacement*, dan *radius gyration* pada FSO

	FSO <i>Full Load Condition</i>	FSO <i>Light Load Condition</i>
<i>Displacemet</i> (ton)	153026	68202
LCG (x) m	2,17	1,29
TCG (y) m	0,00	0,00
VCG / KG (z) m	13,44	14,04
Kxx (m)	16,388	16,388
Kyy (m)	35.65	35.65
Kzz (m)	37,076	37,076

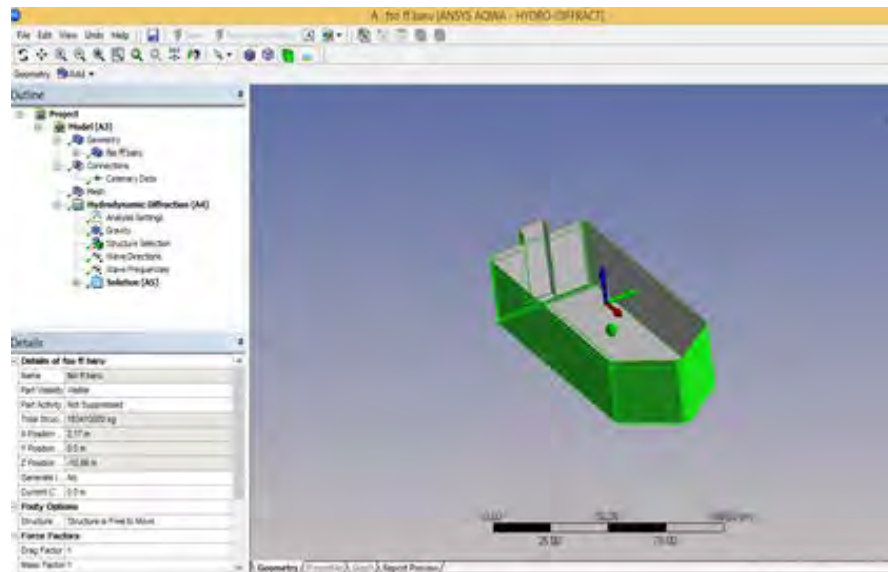
Kemudian itu dibutuhkan data lingkungan untuk dapat melakukan analisis gerakan pada FSO. Data lingkungan diambil dari jalur pelayaran Arco Ardjuna di Laut Jawa pada kondisi *extreme* 100 tahunan. Data lingkungan tersebut pada Tabel 4.9 meliputi:

Tabel 4.9 Data lingkungan

Parameter	<i>100-years return period</i>
Kedalaman	45 m
Tinggi Gelombang Signifikan/Hs	3.6 m
Periode Gelombang Signifikan/Ts	8.3 s

(Sumber: Pertamina PHE ONWJ)

Berikut pada Gambar 4.11 adalah model FSO yang dikeluarkan dari Ansys AQWA berdasarkan data yang diinputkan:



Gambar 4.11 Model FSO Arco Ardjuna pada Ansys

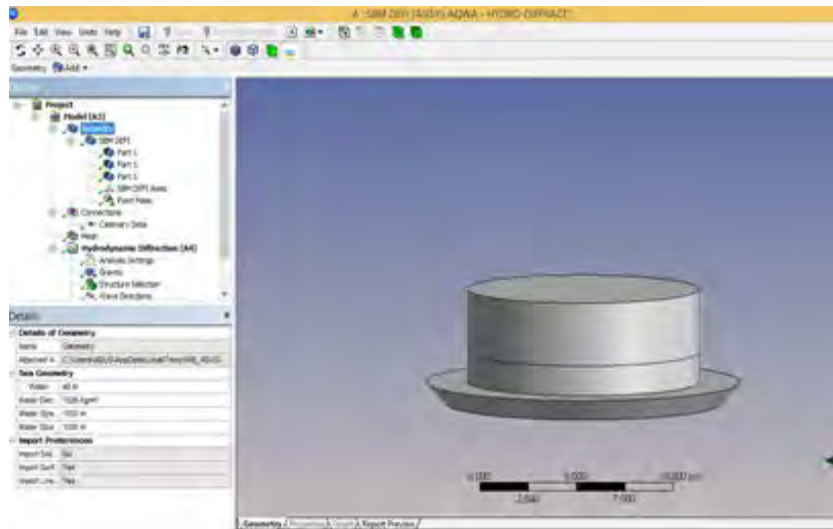
4.5.2 *Single Point Mooring*

Untuk analisis gerakan SPM sama dengan FSO dilakukan dengan bantuan *software* Ansys AQWA. Pembuatan model SPM pada Ansys AQWA membutuhkan data titik berat, *displacement* dan *radius gyration*. Data lingkungan yang dibutuhkan sama dengan FSO, dan setelah data diinputkan semuanya, selanjutnya dilaksanakan analisis berikutnya. Besar titik berat dan *radius gyration* dapat dilihat pada Tabel 4.10 sebagai berikut :

Tabel 4.10 Data titik berat, *displacement*, dan *radius gyration* pada SPM

	SPM
<i>Displacemet</i> (ton)	258,5
LCG (x) m	0,00
TCG (y) m	0,00
VCG / KG (z) m	3,42
Kxx (m)	7,63
Kyy (m)	7,63
Kzz (m)	10,61

Berikut ini pada Gambar 4.12 adalah model SPM pada Ansys AQWA berdasarkan data yang diinputkan:



Gambar 4.12 Model SPM pada Ansys

4.5.3 Shuttle Tanker 85000 DWT

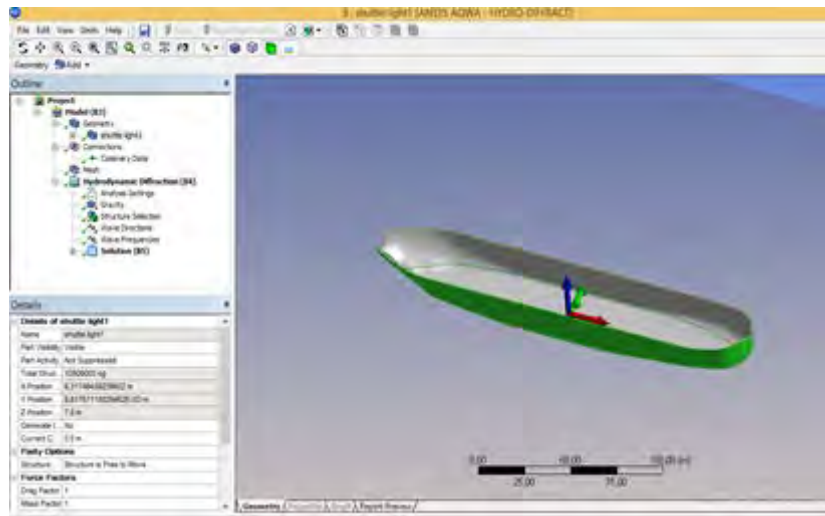
Untuk analisis gerakan *Shuttle Tanker* dilakukan dengan bantuan *software* Ansys AQWA. Dalam menggunakan *software* Ansys AQWA diperlukan model dari *maxsurf*. Untuk data lingkungan yang dibutuhkan sama dengan FSO dan SPM.

Pembuatan model *Shuttle Tanker* pada Ansys AQWA membutuhkan data titik berat, displacement dan *radius gyration*. Besar titik berat dan *radius gyration* dapat dilihat pada Tabel 4.11 sebagai berikut :

Tabel 4.11 Data titik berat dan *radius gyration* pada *Shuttle Tanker*

	<i>Shuttle Tanker Full Load Condition</i>	<i>Shuttle Tanker Light Load Condition</i>
<i>Displacemet (ton)</i>	93979	10510
LCG (x) m	1,67	1,04
TCG (y) m	0,00	0,00
VCG / KG (z) m	9,64	9,8
Kxx (m)	3,13	3,13
Kyy (m)	35,12	35,12
Kzz (m)	35,06	35,06

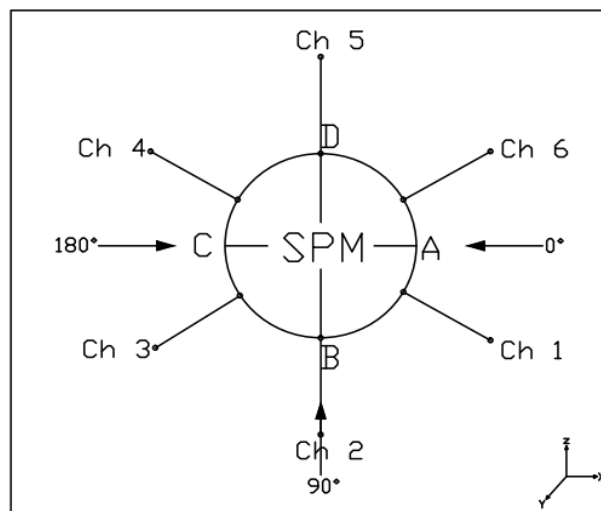
Berikut pada Gambar 4.13 adalah hasil pemodelan *Shuttle Tanker* pada Ansys AQWA berdasarkan data yang diinputkan:



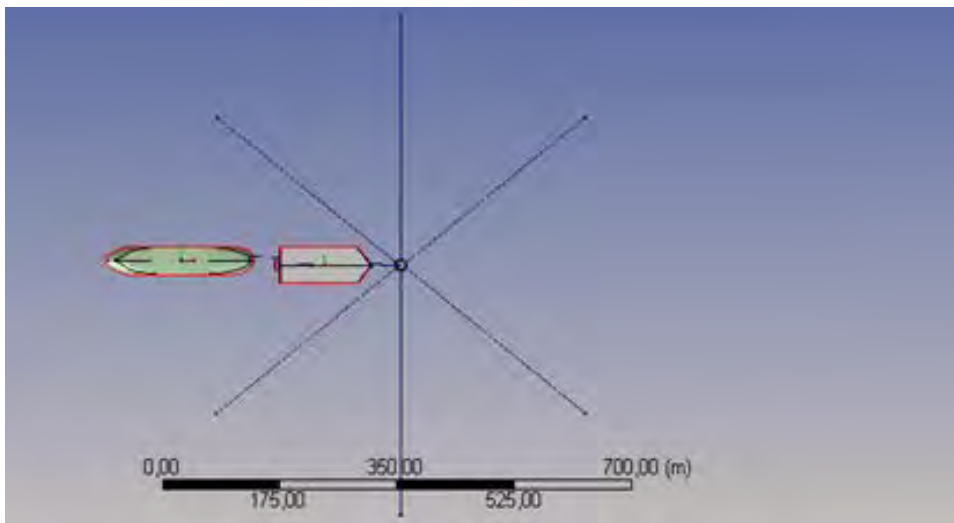
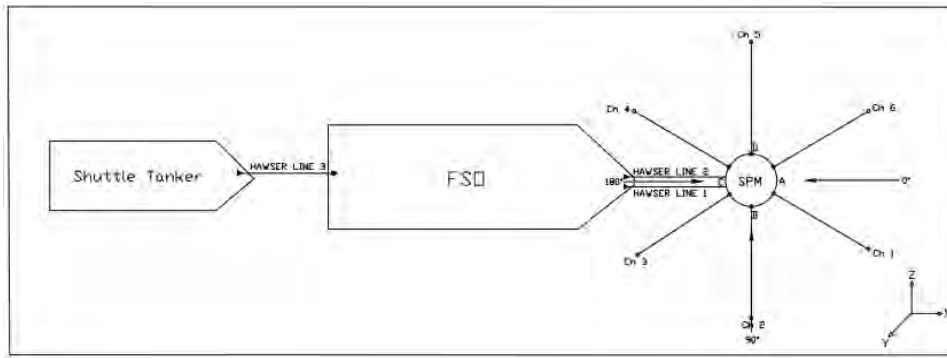
Gambar 4.13 Model *Shuttle Tanker* pada Ansys

4.6 Konfigurasi Arah Pembebanan Gelombang

SPM dirancang dengan tali tambat sejumlah 6 buah yang dipasang secara menyebar dan simetris. FSO dirancang dengan tali tambat sejumlah 2 buah yang langsung menghubungkan ke SPM, dan 1 buah menghubungkan ke *shuttle tanker*. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 4.14 sampai 4.15 merupakan konfigurasi detail arah pembebanan gelombang dan konfigurasi sistem tandem *offloading* untuk analisa respon gerakan struktur apung SPM, FSO, dan *Shuttle Tanker* yang dilakukan pada *heading* 0° , 90° , dan 180° .



Gambar 4.14 Konfigurasi arah pembebanan gelombang pada SPM



Gambar 4.15 Konfigurasi sistem tandem *offloading* pada struktur SPM, FSO, dan *Shuttle Tanker*

4.7 *Response Amplitude Operator*

Untuk melakukan analisis respon gerak terhadap *Single Point Mooring* FSO, dan *Shuttle Tanker* dilakukan dengan mendapatkan *Response Amplitude Operator* (RAO) dengan bantuan *software* Ansys AQWA. Perhitungan RAO dilakukan dengan *heading* pembebanan 0° , 90° , 180° dalam gerak *surge*, *sway*, *heave*, *roll*, *pitch*, dan *yaw*.

Grafik RAO pada FSO Arco Ardjuna, *Single Point Mooring*, dan *Shuttle Tanker* dimulai dari frekuensi gelombang (ω) 0.01 rad/sec sebagai acuan dengan skenario isi muatan dan skenario pembebanan yang akan dikenakan pada FSO dan *Shuttle Tanker* yaitu:

Skenario muatan FSO dan *Shuttle Tanker* terdiri dari :

- Kondisi 1: FSO *full load* - *shuttle tanker light load*
- Kondisi 2: FSO *light load* (muatan -50%) - *shuttle tanker full load*

Skenario pembebanan pada FSO dan *Shuttle Tanker*:

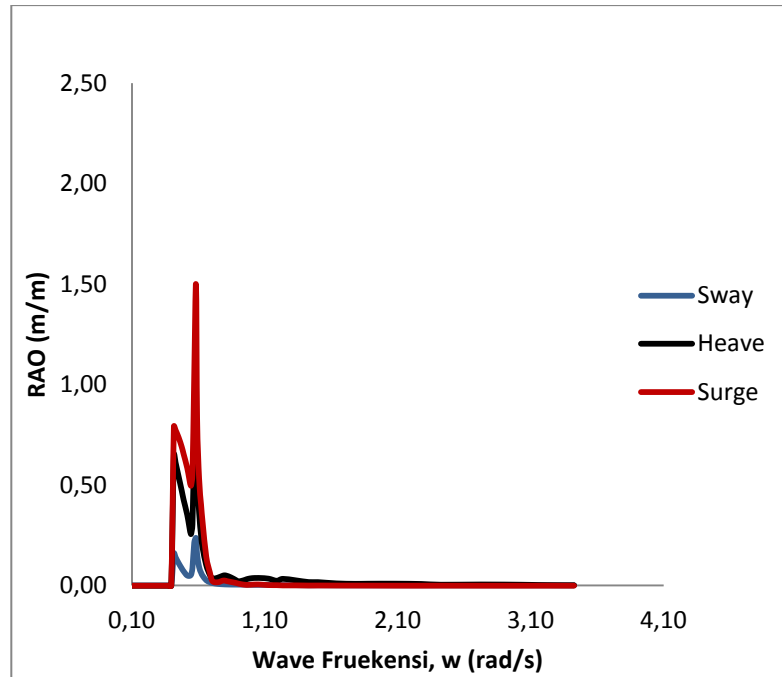
- a. FSO dan *Shuttle Tanker* dikenai beban arah 0°
- b. FSO dan *Shuttle Tanker* dikenai beban arah 90°
- c. FSO dan *Shuttle Tanker* dikenai beban arah 180°

Analisis respon ini memperhitungkan RAO pada saat kondisi SPM, FSO, dan *Shuttle Tanker* terapung bebas maupun yang tertambat. Berikut adalah hasil analisis RAO pada SPM, FSO, dan *Shuttle Tanker* untuk kondisi tertambat. Sedangkan hasil analisis RAO SPM, FSO, dan *Shuttle Tanker* untuk kondisi terapung bebas dapat dilihat pada lampiran.

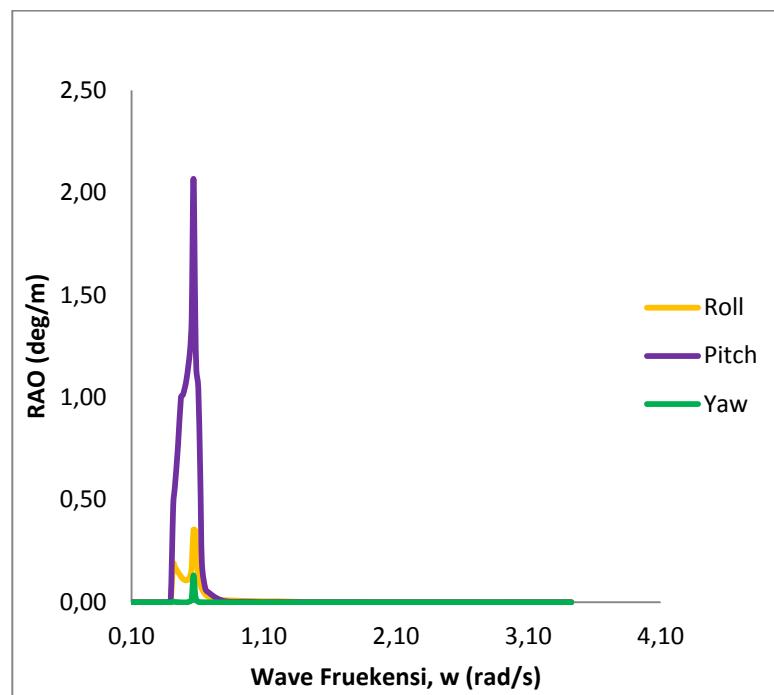
4.7.1 FSO Arco Ardjuna kondisi *mooring*

Perhitungan karakteristik gerakan FSO Arco Ardjuna saat kondisi *mooring* dilakukan pada kondisi *light load* dan *full load*. Pada kondisi *light load* dilakukan pada sarat 10,84 m, sedangkan pada kondisi *full load* dilakukan pada sarat 24 m, dengan kedalaman laut 45 m. Berikut pada Gambar 4.16 sampai Gambar 4.27 adalah grafik RAO pada kondisi *light load* maupun *full load* untuk gerakan *surge*, *sway*, *heave*, *roll*, *pitch*, dan *yaw* dengan *heading* pembebanan 0° , 90° , 180° .

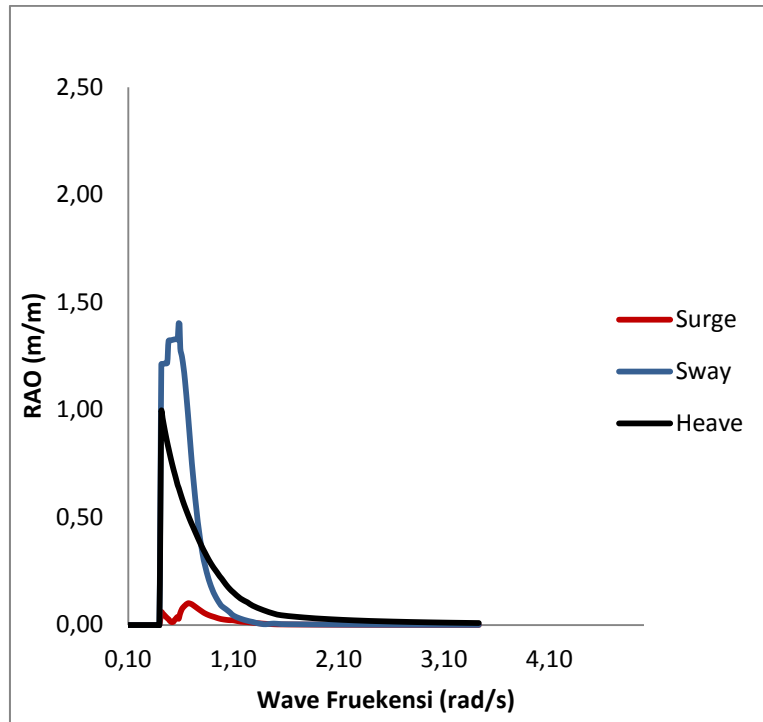
4.7.1.1 Light Load – Mooring



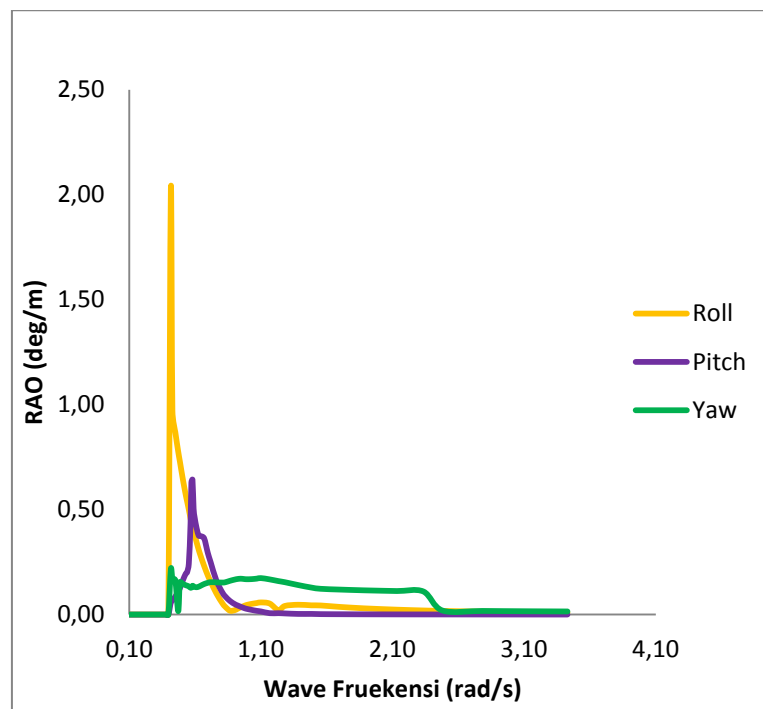
Gambar 4.16 Grafik RAO gerakan translasi pada FSO Arco Ardjuna kondisi *light load* saat *mooring* dengan *heading* pembebanan 0 derajat



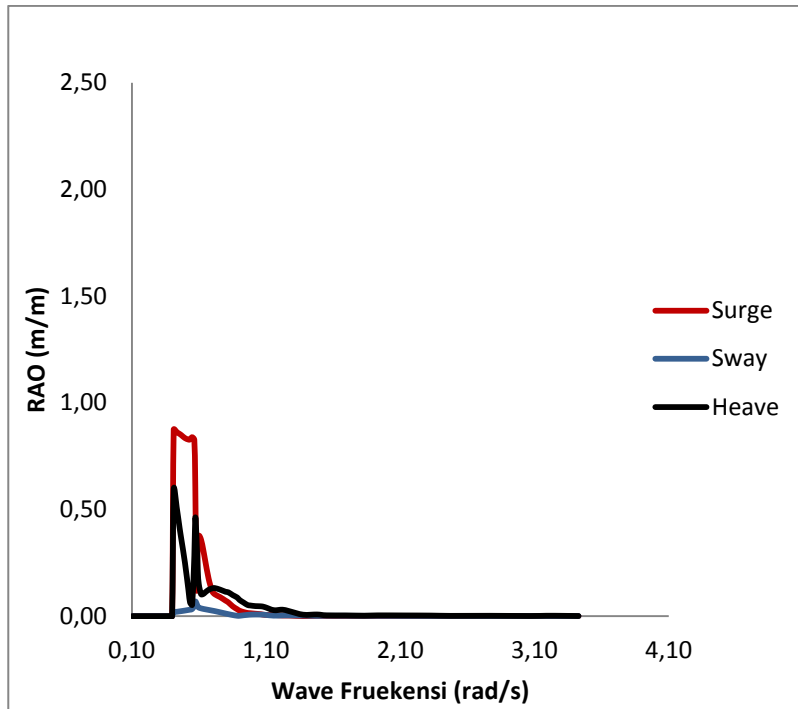
Gambar 4.17 Grafik RAO gerakan rotasi pada FSO Arco Ardjuna kondisi *light load* saat *mooring* dengan *heading* pembebanan 0 derajat



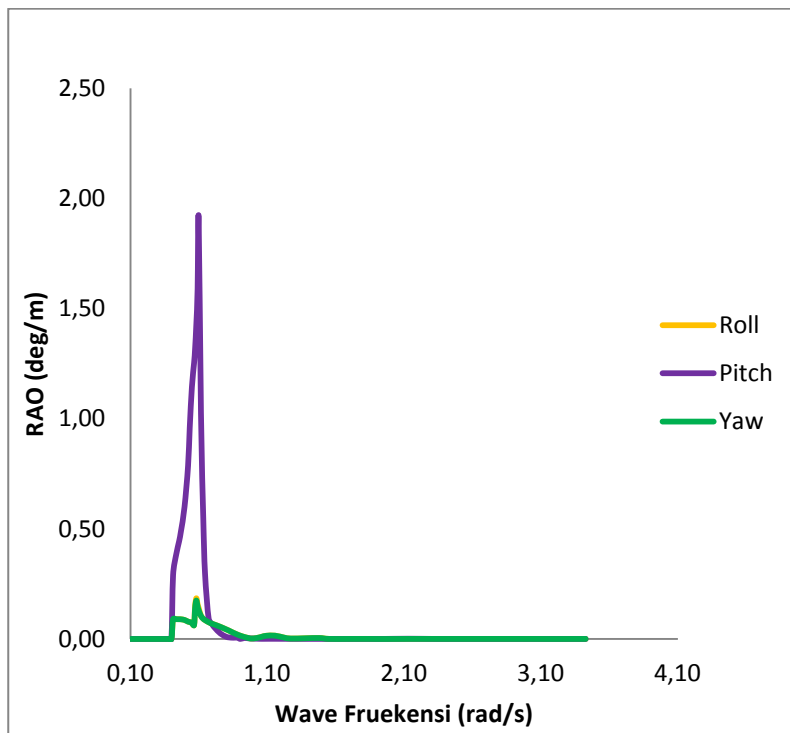
Gambar 4.18 Grafik RAO gerakan translasi pada FSO Arco Ardjuna kondisi *light load* saat *mooring* dengan *heading* pembebanan 90 derajat



Gambar 4.19 Grafik RAO gerakan rotasi pada FSO Arco Ardjuna kondisi *light load* saat *mooring* dengan *heading* pembebanan 90 derajat



Gambar 4.20 Grafik RAO gerakan translasi pada FSO Arco Ardjuna kondisi *light load* saat *mooring* dengan *heading* pembebanan 180 derajat



Gambar 4.21 Grafik RAO gerakan rotasi pada FSO Arco Ardjuna kondisi *light load* saat *mooring* dengan *heading* pembebanan 180 derajat

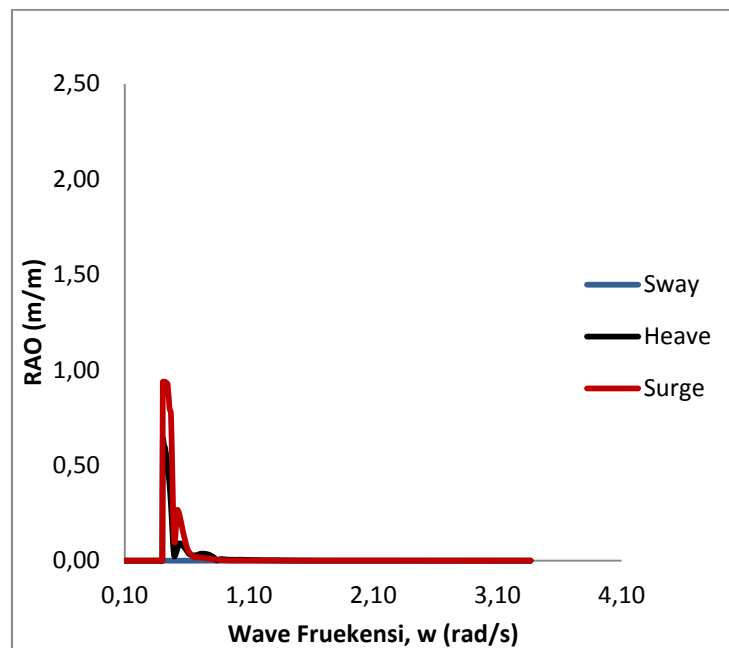
Berikut adalah nilai maksimum RAO FSO Arco Ardjuna *light condition* disajikan pada Tabel 4.12 :

Tabel 4.12 Nilai maksimum RAO FSO Arco Ardjuna *light condition*

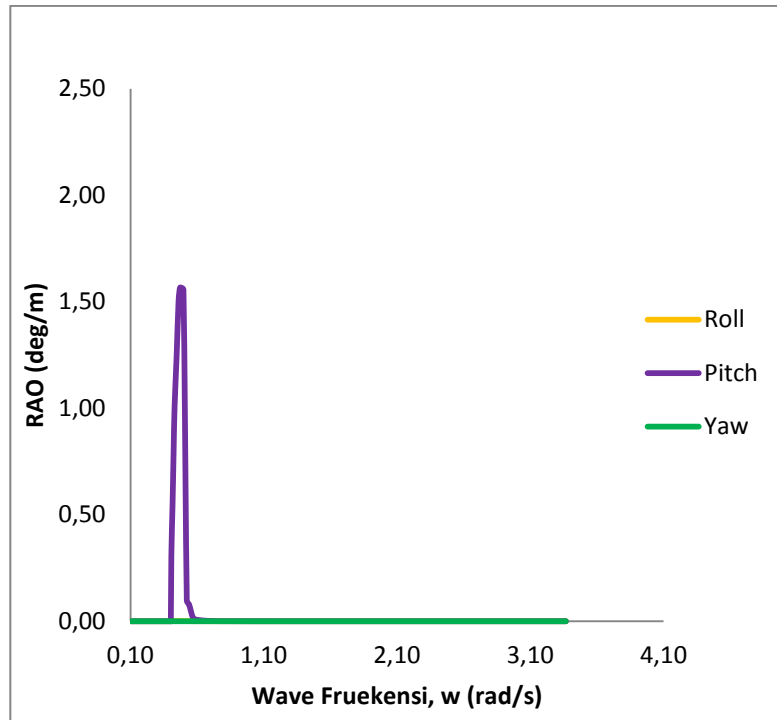
Heading (deg)	Kondisi Muatan	Surge	Sway	Heave	Roll	Pitch	Yaw
0	Light Load	1,498	0,236	0,804	0,353	2,067	0,132
90		0,101	1,403	0,996	2,027	0,642	0,218
180		0,875	0,069	0,594	0,186	1,910	0,176
RAO Maksimum		1,498	1,403	0,996	2,027	2,067	0,218

Berdasarkan grafik dan tabel di atas dapat dilihat bahwa *surge* tertinggi ialah sebesar 1,498 (m/m) yaitu pada *heading* 0°, *sway* tertinggi pada *heading* 90° sebesar 1,403 (m/m), dan *heave* tertinggi sebesar 0,996 (m/m) pada *heading* 90°. Untuk gerak osilasi rotasional *roll* maksimum pada *heading* 90° sebesar 2,027 (deg/m), *pitch* maksimum sebesar 2,067 (deg/m) pada *heading* 0°, dan *yaw* maksimum sebesar 0.218 (deg/m) pada *heading* 90°.

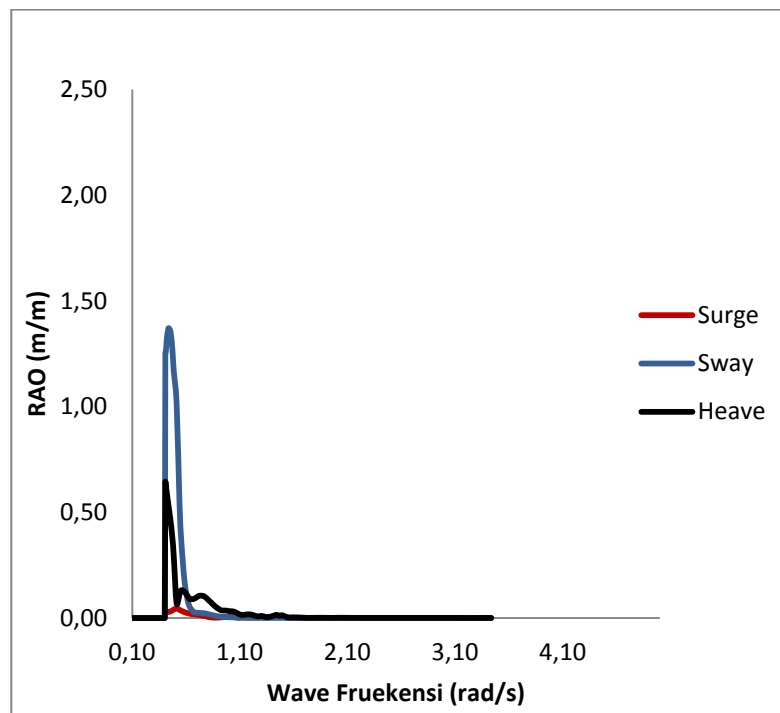
4.7.1.2 Full Load – Mooring



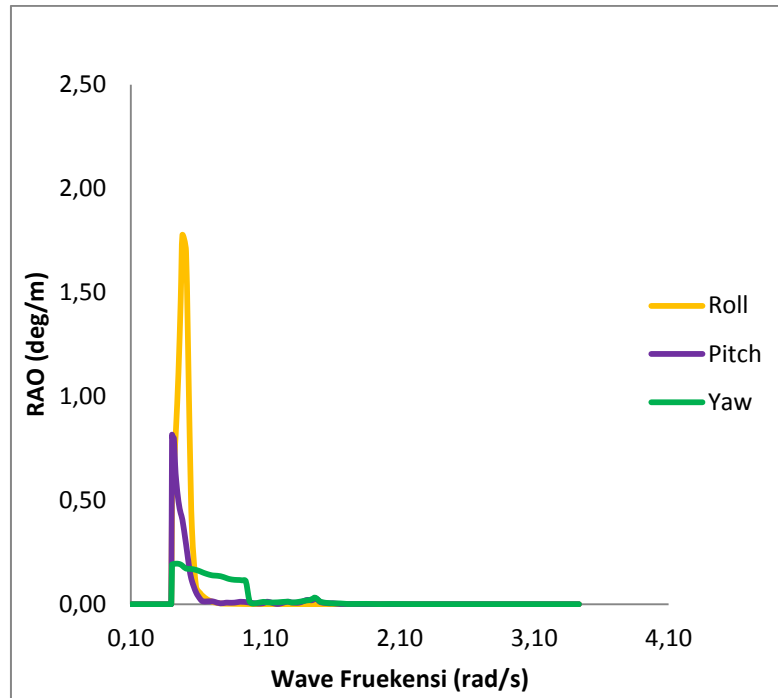
Gambar 4.22 Grafik RAO gerakan translasi pada FSO Arco Ardjuna kondisi *full load* saat *mooring* dengan *heading* pembebanan 0 derajat



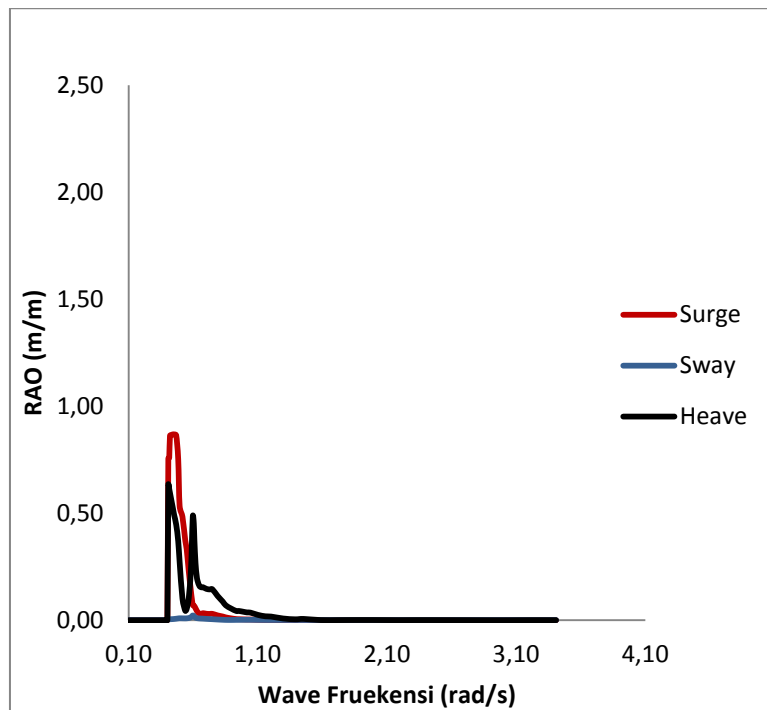
Gambar 4.23 Grafik RAO gerakan rotasi pada FSO Arco Ardjuna kondisi *full load* saat *mooring* dengan *heading* pembebanan 0 derajat



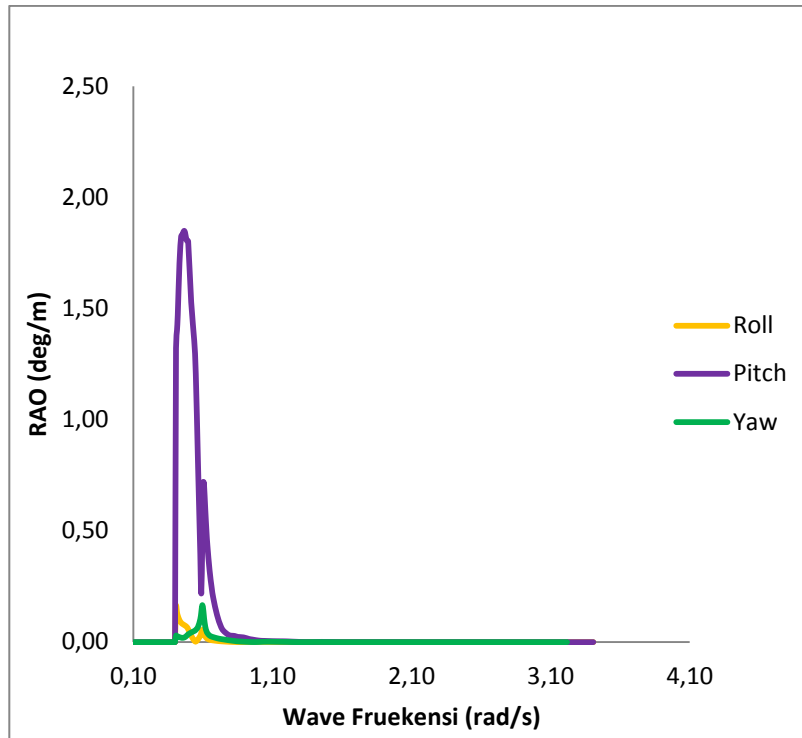
Gambar 4.24 Grafik RAO gerakan translasi pada FSO Arco Ardjuna kondisi *full load* saat *mooring* dengan *heading* pembebanan 90 derajat



Gambar 4.25 Grafik RAO gerakan rotasi pada FSO Arco Ardjuna kondisi *full load* saat *mooring* dengan *heading* pembebanan 90 derajat



Gambar 4.26 Grafik RAO gerakan translasi pada FSO Arco Ardjuna kondisi *full load* saat *mooring* dengan *heading* pembebanan 180 derajat



Gambar 4.27 Grafik RAO gerakan rotasi pada FSO Arco Ardjuna kondisi *full load* saat *mooring* dengan *heading* pembebanan 180 derajat

Berikut adalah nilai maksimum RAO FSO Arco Ardjuna *full condition* disajikan pada Tabel 4.13 :

Tabel 4.13 Nilai maksimum RAO FSO Arco Ardjuna *full condition*

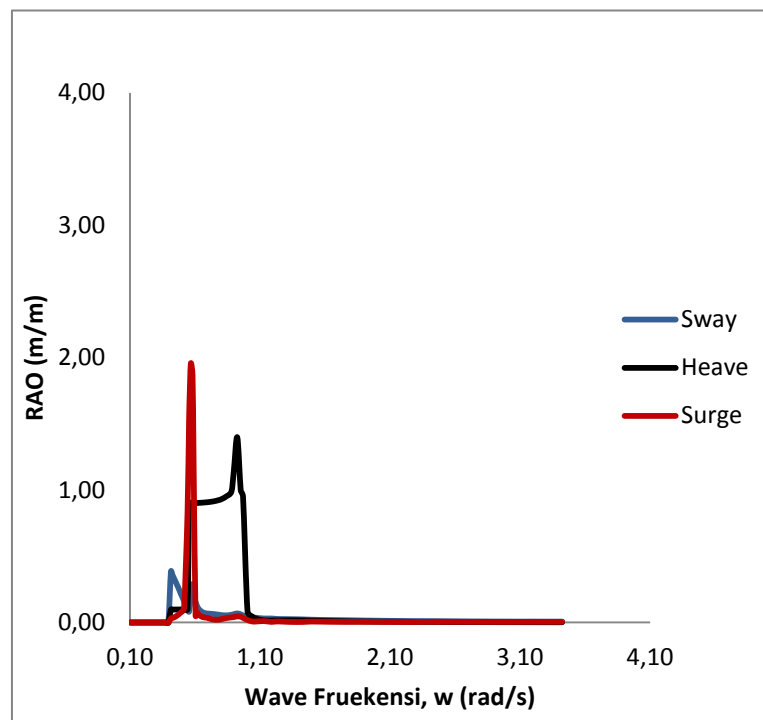
<i>Heading</i> (deg)	Kondisi Muatan	Surge	Sway	Heave	Roll	Pitch	Yaw
0	<i>Full Laod</i>	0,939	0,000	0,639	0,001	1,567	0,000
90		0,046	1,371	0,645	1,777	0,816	0,196
180		0,868	0,022	0,635	0,161	1,849	0,166
RAO Maksimum		0,939	1,371	0,645	1,777	1,849	0,196

Berdasarkan grafik dan tabel di atas dapat dilihat bahwa *surge* tertinggi ialah sebesar 0,939 (m/m) yaitu pada *heading* 0°, *sway* tertinggi pada *heading* 90° sebesar 1,371 (m/m), dan *heave* tertinggi sebesar 0,645 (m/m) pada *heading* 90°. Untuk gerak osilasi rotasional *roll* maksimum pada *heading* 90° sebesar 1,777 (deg/m), *pitch* maksimum sebesar 1,849 (deg/m) pada *heading* 180°, dan *yaw* maksimum sebesar 0.196 (deg/m) pada *heading* 90°.

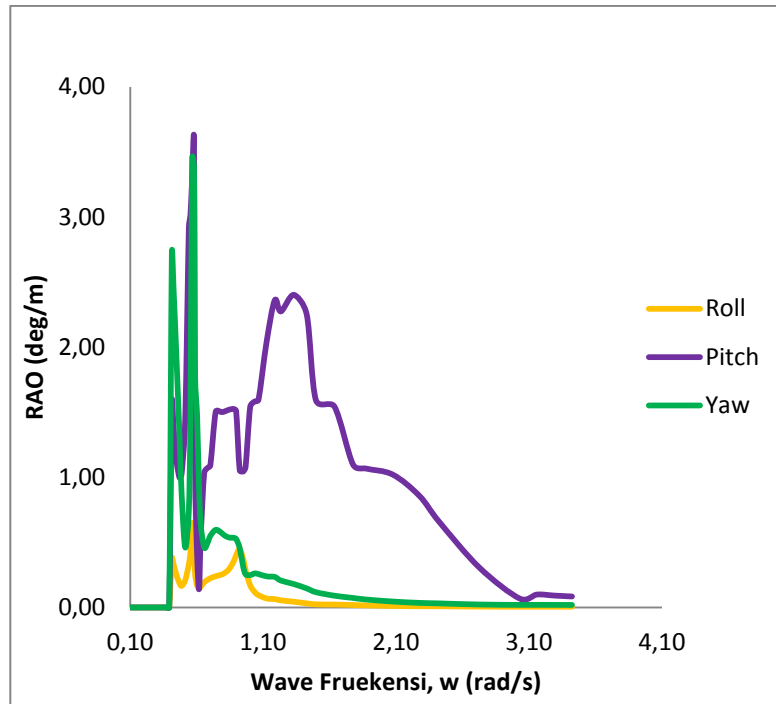
4.7.2 *Single Point Mooring* kondisi *mooring*

Perhitungan RAO pada *Single Point Mooring* saat kondisi *mooring* dilakukan pada sarat 2.38 m, dengan kedalaman laut 45 m. Grafik RAO pada SPM dilakukan untuk gerakan *surge*, *sway*, *heave*, *roll*, *pitch*, dan *yaw*. *Heading* pembebanan untuk mencari RAO *Single Point Mooring* saat kondisi tertambat adalah 0° , 90° , 180° . Berikut pada Gambar 4.28 sampai Gambar 4.39 adalah RAO SPM yang tertambat dirancang untuk dua kondisi sesuai dengan muatan FSO, yaitu pada saat kondisi *full load* dan *light load*.

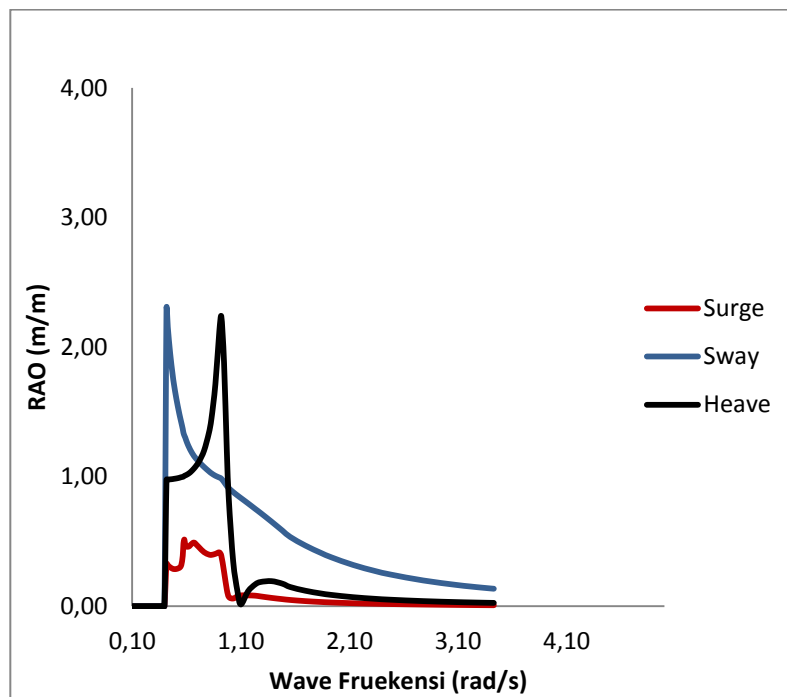
4.7.2.1 *Single Point Mooring* kondisi *mooring* dengan FSO Arco Ardjuna kondisi *light load*



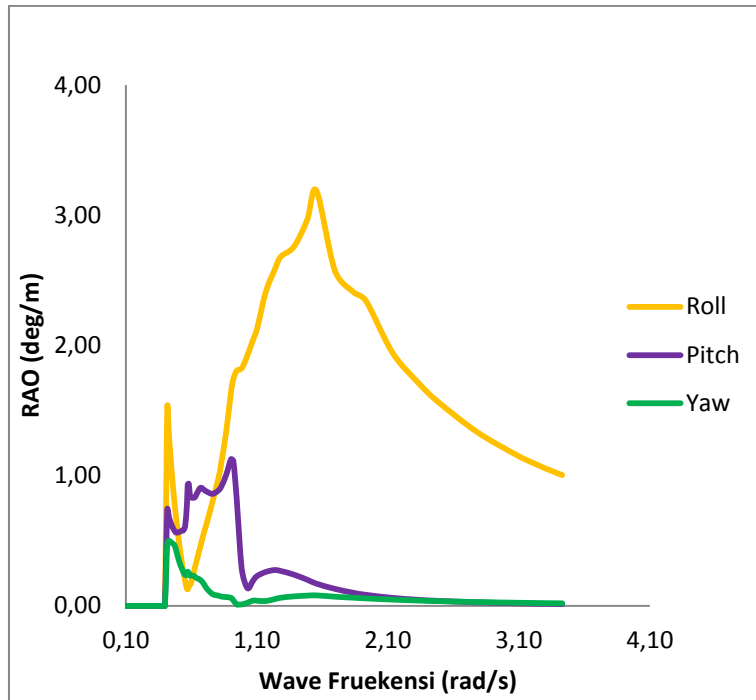
Gambar 4.28 Grafik RAO gerakan translasi pada SPM saat *mooring* dengan FSO Arco Ardjuna kondisi *light load* dengan *heading* pembebanan 0 derajat



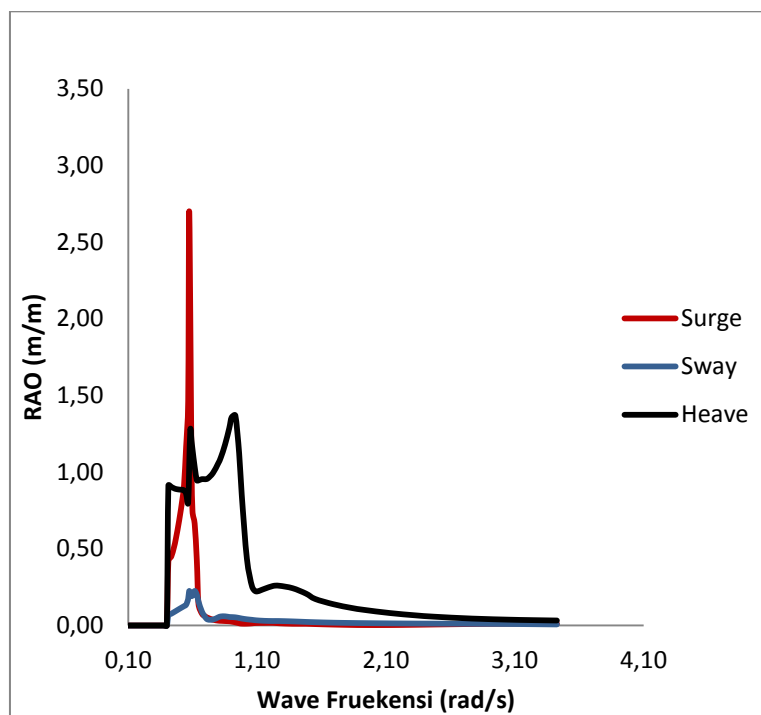
Gambar 4.29 Grafik RAO gerakan rotasi pada SPM saat *mooring* dengan FSO Arco Ardjuna kondisi *light load* dengan *heading* pembebanan 0 derajat



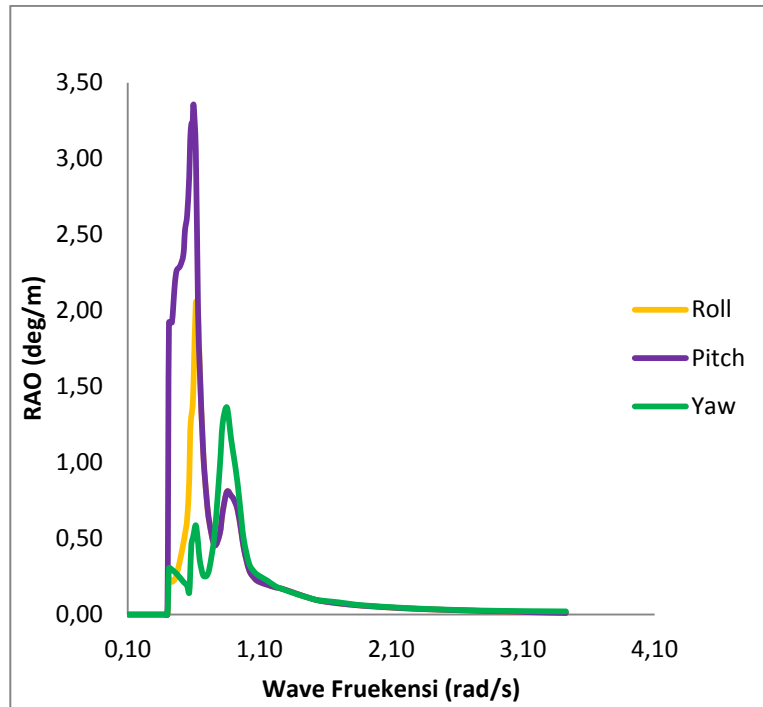
Gambar 4.30 Grafik RAO gerakan translasi pada SPM saat *mooring* dengan FSO Arco Ardjuna kondisi *light load* dengan *heading* pembebanan 90 derajat



Gambar 4.31 Grafik RAO gerakan rotasi pada SPM saat *mooring* dengan FSO Arco Ardjuna kondisi *light load* dengan *heading* pembebanan 90 derajat



Gambar 4.32 Grafik RAO gerakan translasi pada SPM saat *mooring* dengan FSO Arco Ardjuna kondisi *light load* dengan *heading* pembebanan 180 derajat



Gambar 4.33 Grafik RAO gerakan rotasi pada SPM saat *mooring* dengan FSO Arco Ardjuna kondisi *light load* dengan *heading* pembebanan 180 derajat

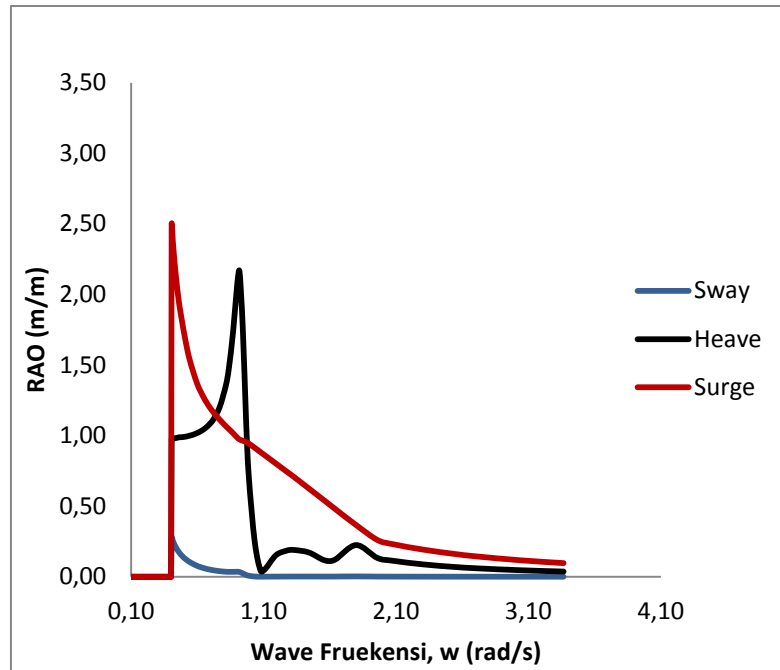
Berikut adalah nilai maksimum SPM tertambat dengan FSO Arco Ardjuna *light condition* pada Tabel 4.14 :

Tabel 4.14 Nilai maksimum RAO SPM tertambat dengan FSO Arco Ardjuna *light condition*

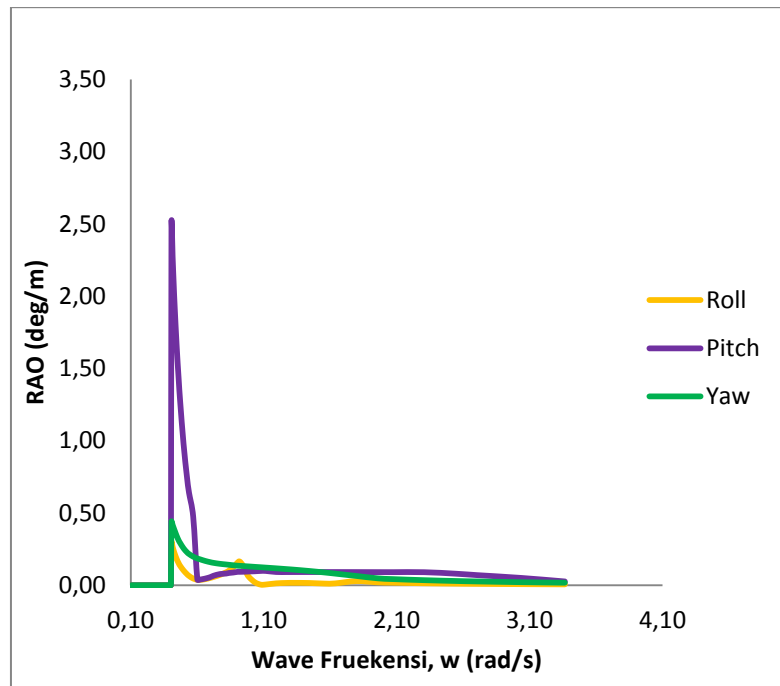
Heading (deg)	Kondisi Muatan	Surge	Sway	Heave	Roll	Pitch	Yaw
0	<i>FSO</i>	1,956	0,387	1,399	0,650	2,601	2,519
90	<i>Light</i>	0,515	2,296	2,135	2,919	1,126	0,501
180	<i>Load</i>	2,490	0,226	1,369	2,053	2,524	1,363
RAO Maksimum		2,490	2,296	2,235	3,188	2,601	2,519

Berdasarkan grafik dan tabel di atas dapat dilihat bahwa *surge* tertinggi ialah sebesar 2,690 (m/m) yaitu pada *heading* 180°, *sway* tertinggi pada *heading* 90° sebesar 2,296 (m/m), dan *heave* tertinggi sebesar 2,135 (m/m) pada *heading* 90°. Untuk gerak osilasi rotasional *roll* maksimum pada *heading* 90° sebesar 2.919 (deg/m), *pitch* maksimum sebesar 2,601 (deg/m) pada *heading* 0°, dan *yaw* maksimum sebesar 2,519 (deg/m) pada *heading* 0°.

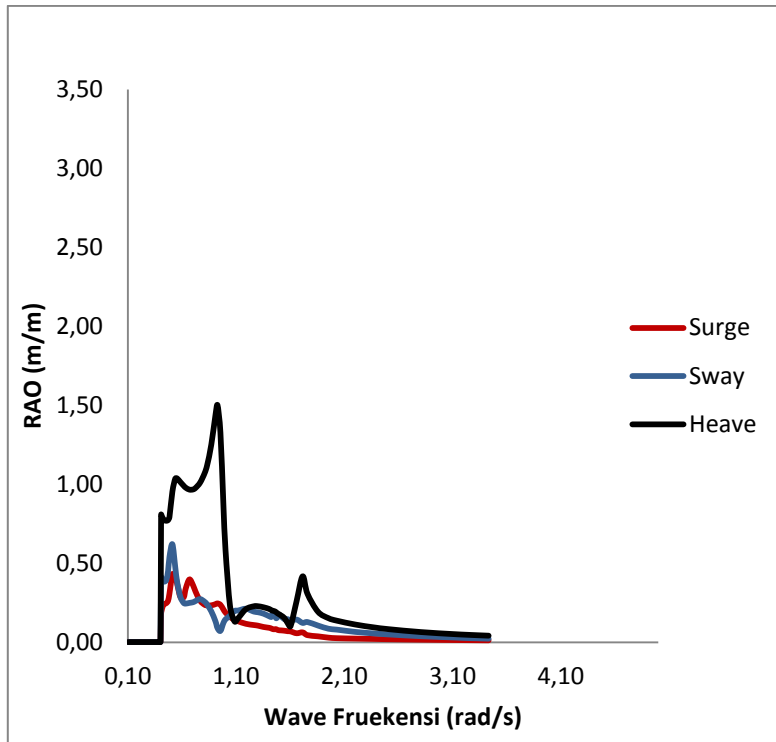
**4.7.2.2 Single Point Mooring kondisi mooring dengan FSO Arco
Ardjuna kondisi full load**



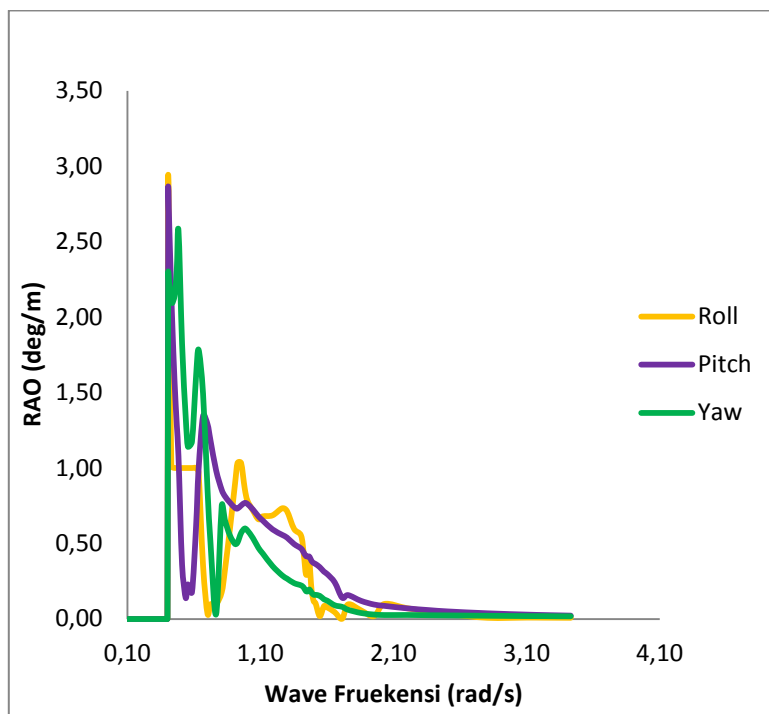
Gambar 4.34 Grafik RAO gerakan translasi pada SPM saat *mooring* dengan FSO Arco Ardjuna kondisi *full load* dengan *heading* pembebanan 0 derajat



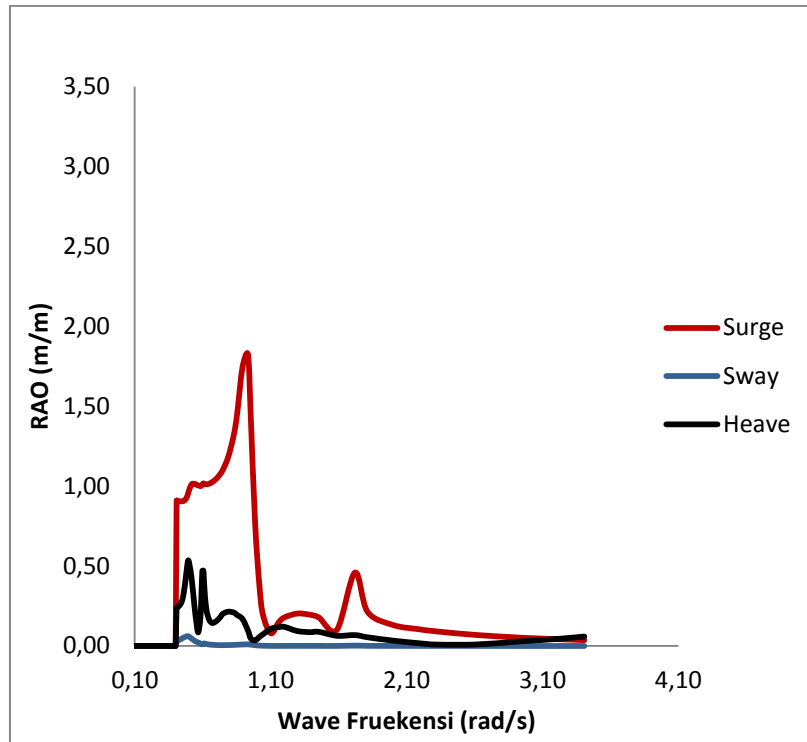
Gambar 4.35 Grafik RAO gerakan rotasi pada SPM saat *mooring* dengan FSO Arco Ardjuna kondisi *full load* dengan *heading* pembebanan 0 derajat



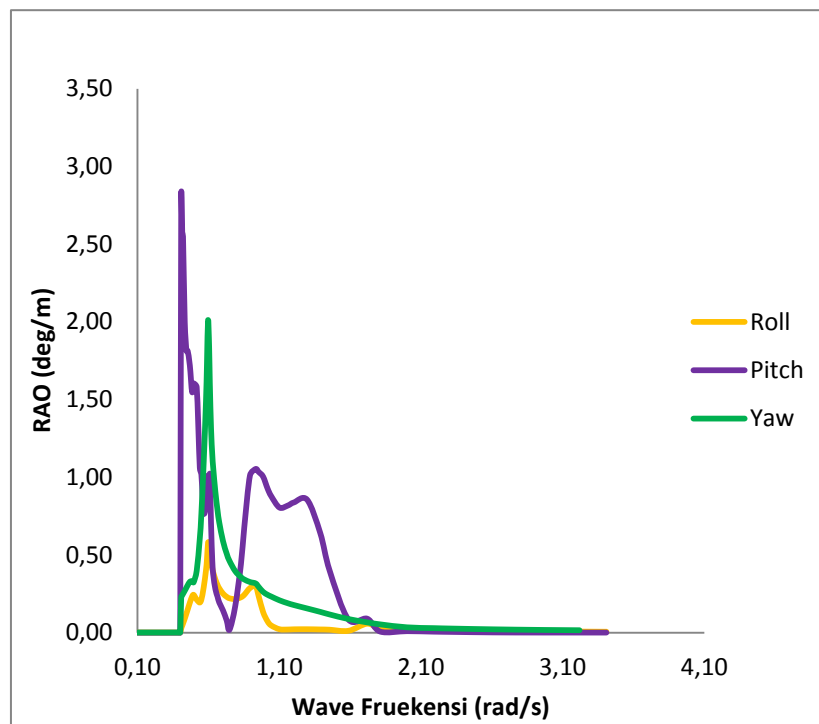
Gambar 4.36 Grafik RAO gerakan translasi pada SPM saat *mooring* dengan FSO Arco Ardjuna kondisi *full load* dengan *heading* pembebanan 90 derajat



Gambar 4.37 Grafik RAO gerakan rotasi pada SPM saat *mooring* dengan FSO Arco Ardjuna kondisi *full load* dengan *heading* pembebanan 90 derajat



Gambar 4.38 Grafik RAO gerakan translasi pada SPM saat *mooring* dengan FSO Arco Ardjuna kondisi *full load* dengan *heading* pembebanan 180 derajat



Gambar 4.39 Grafik RAO gerakan rotasi pada SPM saat *mooring* dengan FSO Arco Ardjuna kondisi *full load* dengan *heading* pembebanan 180 derajat

Berikut adalah nilai RAO maksimum SPM tertambat dengan FSO Arco Ardjuna *full condition* terangkum pada Tabel 4.15 :

Tabel 4.15 Nilai maksimum RAO SPM tertambat dengan FSO Arco Ardjuna *full condition*

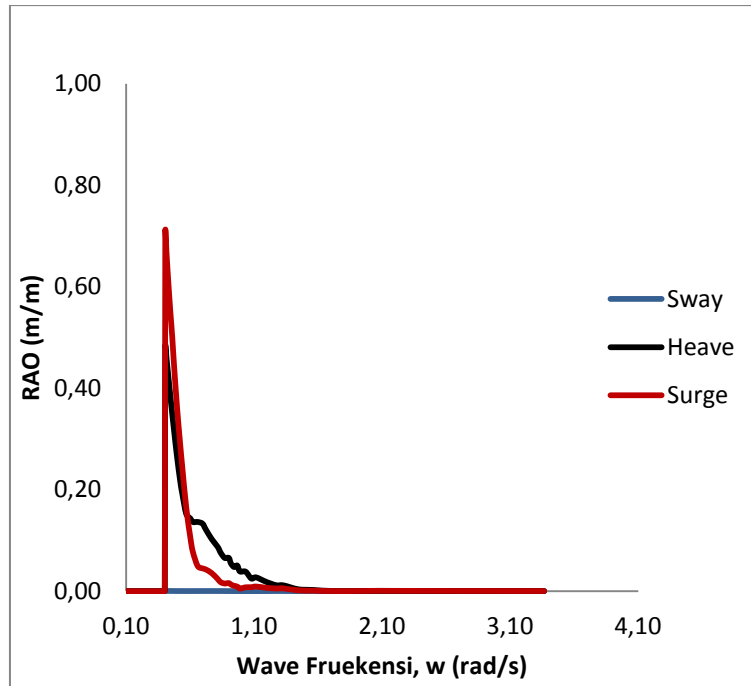
Heading (deg)	Kondisi Muatan	Surge	Sway	Heave	Roll	Pitch	Yaw
0	<i>FSO</i>	2,493	0,279	2,163	0,298	2,503	0,440
90	<i>Full</i>	0,430	0,621	1,501	2,944	2,807	2,573
180	<i>Laod</i>	1,824	0,061	0,535	0,582	2,816	2,013
RAO Maksimum		2,493	0,621	2,163	2,944	2,816	2,573

Berdasarkan grafik dan tabel di atas dapat dilihat bahwa *surge* tertinggi ialah sebesar 2,493 (m/m) yaitu pada *heading* 0°, *sway* tertinggi pada *heading* 90° sebesar 0,621 (m/m), dan *heave* tertinggi sebesar 2,163 (m/m) pada *heading* 0°. Untuk gerak osilasi rotasional *roll* maksimum pada *heading* 90° sebesar 2,944 (deg/m), *pitch* maksimum sebesar 2,816 (deg/m) pada *heading* 180°, dan *yaw* maksimum sebesar 2,573 (deg/m) pada *heading* 90°.

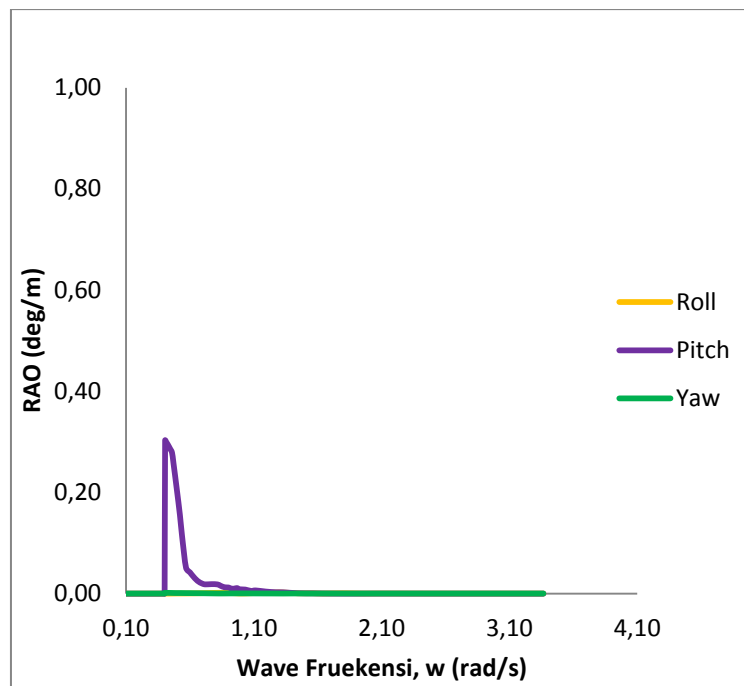
4.7.3 Shuttle Tanker 85.000 DWT kondisi mooring

Perhitungan karakteristik gerakan *Shuttle Tanker* saat kondisi *mooring* dilakukan pada kondisi *light load* dan *full load*. Pada kondisi *light load* dilakukan pada sarat 1,99 m, sedangkan pada kondisi *full load* dilakukan pada sarat 13,28 m, dengan kedalaman laut 45 m. Berikut pada Gambar 4.40 sampai Gambar 4.51 adalah grafik RAO pada kondisi *light load* maupun *full load* untuk gerakan *surge*, *sway*, *heave*, *roll*, *pitch*, dan *yaw* dengan *heading* pembebanan 0°, 90°, 180°.

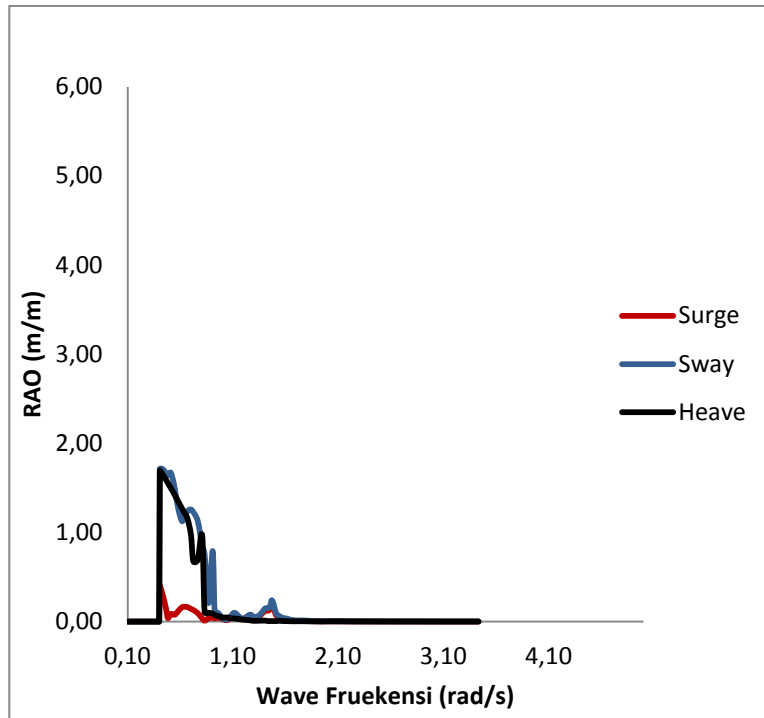
4.7.3.1 Light Load – Mooring



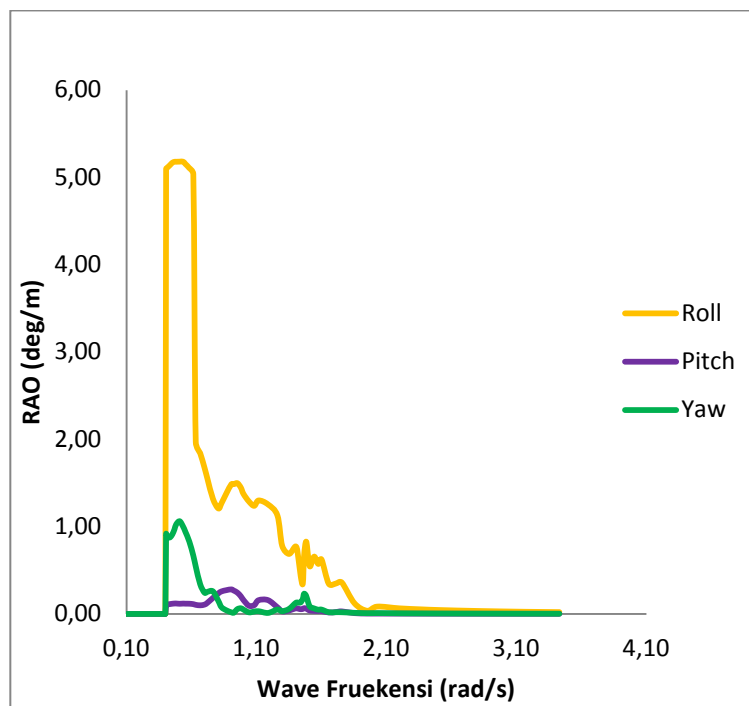
Gambar 4.40 Grafik RAO gerakan translasi pada *Shuttle Tanker* kondisi *light load* saat *mooring* dengan *heading* pembebanan 0 derajat



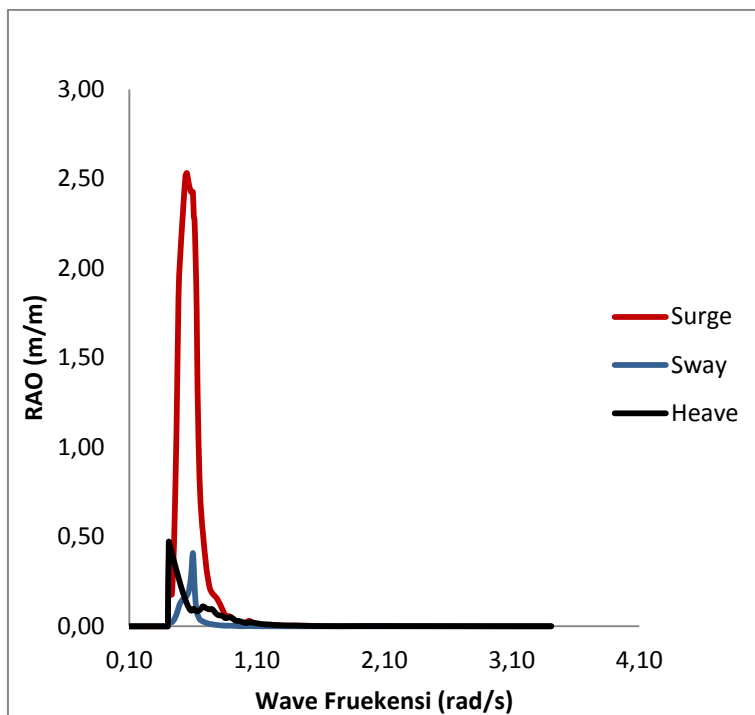
Gambar 4.41 Grafik RAO gerakan rotasi pada *Shuttle Tanker* kondisi *light load* saat *mooring* dengan *heading* pembebanan 0 derajat



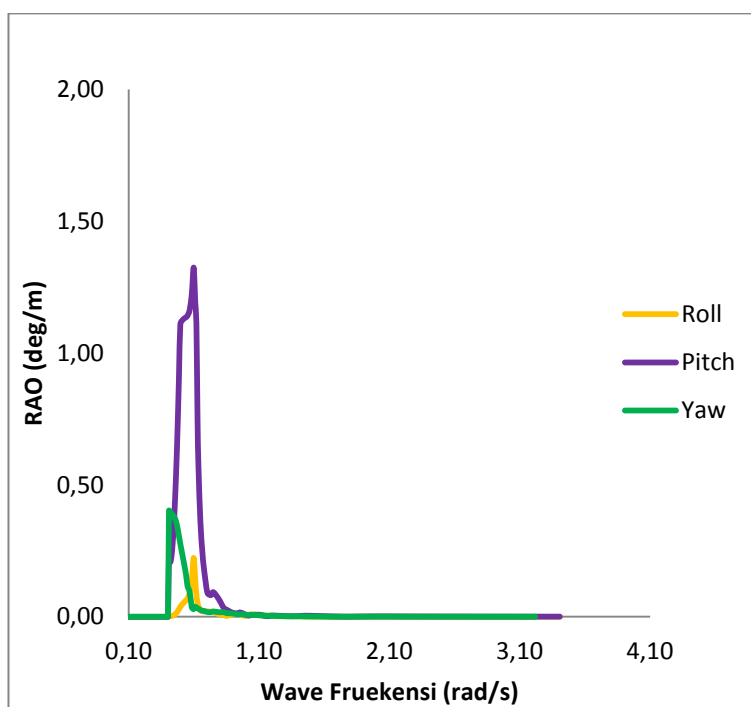
Gambar 4.42 Grafik RAO gerakan translasi pada *Shuttle Tanker* kondisi *light load* saat *mooring* dengan *heading* pembebanan 90 derajat



Gambar 4.43 Grafik RAO gerakan rotasi pada *Shuttle Tanker* kondisi *light load* saat *mooring* dengan *heading* pembebanan 90 derajat



Gambar 4.44 Grafik RAO gerakan translasi pada *Shuttle Tanker* kondisi *light load* saat *mooring* dengan *heading* pembebanan 180 derajat



Gambar 4.45 Grafik RAO gerakan rotasi pada *Shuttle Tanker* kondisi *light load* saat *mooring* dengan *heading* pembebanan 180 derajat

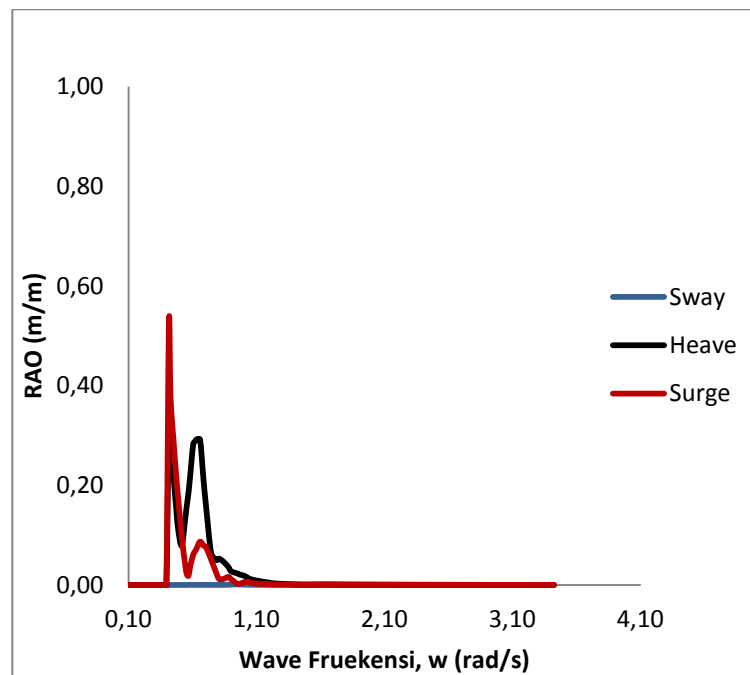
Berikut adalah nilai RAO maksimum *Shuttle Tanker light condition* terangkum pada Tabel 4.16 :

Tabel 4.16 Nilai maksimum RAO *Shuttle Tanker light condition*

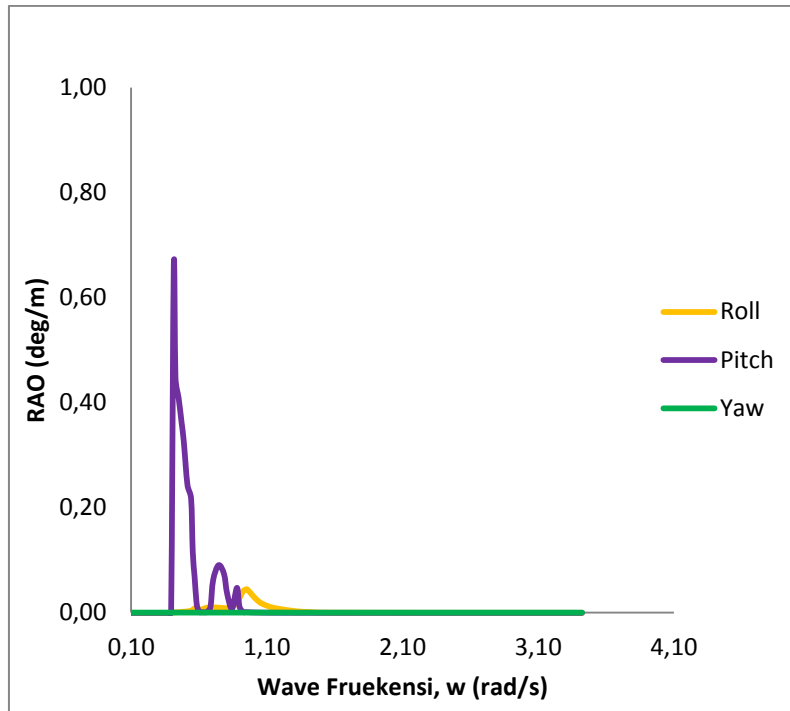
Heading (deg)	Kondisi Muatan	Surge	Sway	Heave	Roll	Pitch	Yaw
0	Light Load	0,709	0,000	0,483	0,002	0,303	0,001
90		0,410	1,717	1,699	5,181	0,281	1,062
180		2,534	0,409	0,474	0,224	1,325	0,403
RAO Maksimum		2,534	1,717	1,699	5,181	1,325	1,062

Berdasarkan grafik dan tabel di atas dapat dilihat bahwa *surge* tertinggi ialah sebesar 2,534 (m/m) yaitu pada *heading* 180°, *sway* tertinggi pada *heading* 90° sebesar 1,717 (m/m), dan *heave* tertinggi sebesar 1,699 (m/m) pada *heading* 90°. Untuk gerak osilasi rotasional *roll* maksimum pada *heading* 90° sebesar 5,181 (deg/m), *pitch* maksimum sebesar 1,325 (deg/m) pada *heading* 180°, dan *yaw* maksimum sebesar 1,062 (deg/m) pada *heading* 90°.

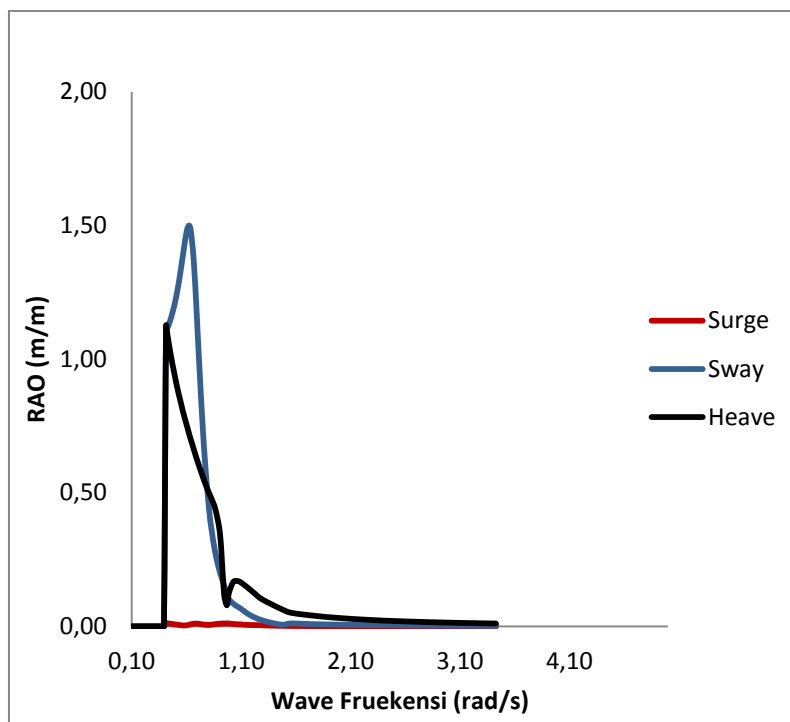
4.7.1.2 Full Load – Mooring



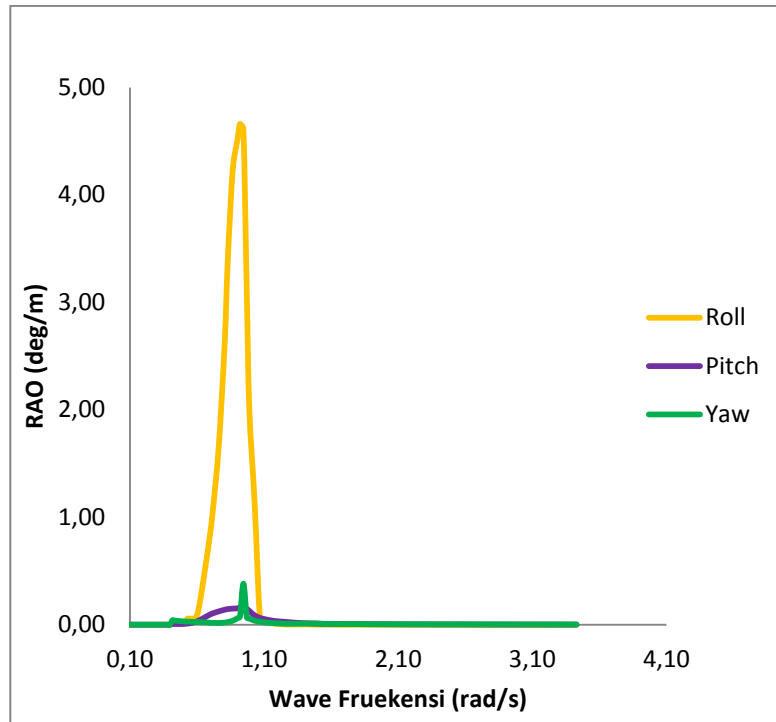
Gambar 4.46 Grafik RAO gerakan translasi pada *Shuttle Tanker* kondisi *full load* saat *mooring* dengan *heading* pembebanan 0 derajat



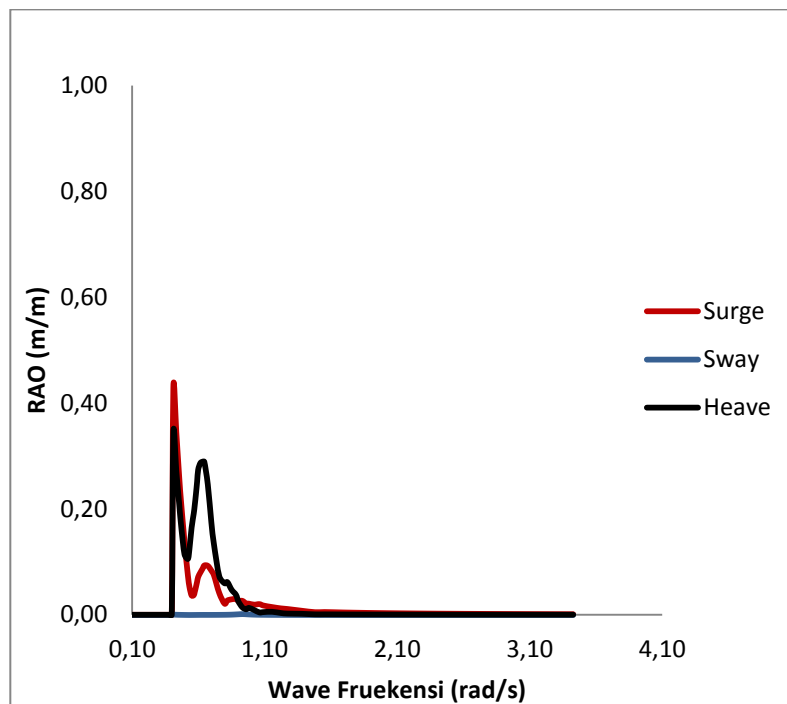
Gambar 4.47 Grafik RAO gerakan rotasi pada *Shuttle Tanker* kondisi *full load* saat *mooring* dengan *heading* pembebanan 0 derajat



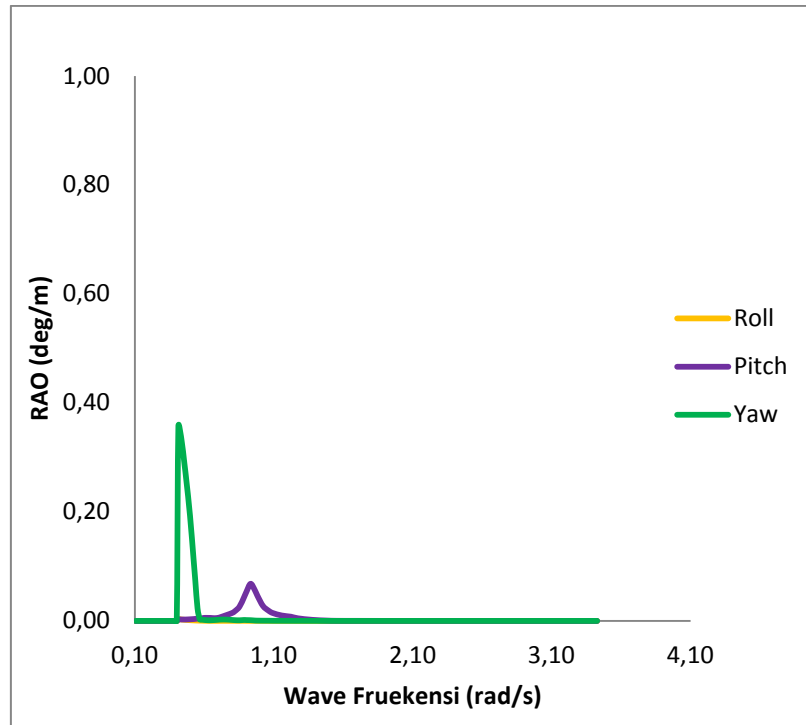
Gambar 4.48 Grafik RAO gerakan translasi pada *Shuttle Tanker* kondisi *full load* saat *mooring* dengan *heading* pembebanan 90 derajat



Gambar 4.49 Grafik RAO gerakan rotasi pada *Shuttle Tanker* kondisi *full load* saat *mooring* dengan *heading* pembebanan 90 derajat



Gambar 4.50 Grafik RAO gerakan translasi pada *Shuttle Tanker* kondisi *full load* saat *mooring* dengan *heading* pembebanan 180 derajat



Gambar 4.51 Grafik RAO gerakan rotasi pada *Shuttle Tanker* kondisi *full load* saat *mooring* dengan *heading* pembebanan 180 derajat

Berikut adalah nilai RAO maksimum *Shuttle Tanker* untuk *full condition* terangkum pada Tabel 4.17

Tabel 4.17 Nilai maksimum RAO *Shuttle Tanker full condition*

Heading (deg)	Kondisi Muatan	Surge	Sway	Heave	Roll	Pitch	Yaw
0	<i>Full Laod</i>	0,526	0,001	0,332	0,045	0,661	0,000
90		0,012	1,499	1,124	4,661	0,168	0,382
180		0,429	0,002	0,344	0,003	0,068	0,357
RAO Maksimum		0,526	1,499	1,124	4,661	0,661	0,382

Berdasarkan grafik dan tabel di atas dapat dilihat bahwa *surge* tertinggi ialah sebesar 0,526 (m/m) yaitu pada *heading* 0°, *sway* tertinggi pada *heading* 90° sebesar 1,499 (m/m), dan *heave* tertinggi sebesar 1,124 (m/m) pada *heading* 90°. Untuk gerak osilasi rotasional *roll* maksimum pada *heading* 90° sebesar 4,661 (deg/m), *pitch* maksimum sebesar 0,661 (deg/m) pada *heading* 0°, dan *yaw* maksimum sebesar 0,382 (deg/m) pada *heading* 90°.

4.8 Respon Spektra

Pada analisis ini akan ditentukan respon struktur dari SPM, FSO, dan *Shuttle Tanker* sebagai respon kerapatan energi pada struktur akibat gelombang. Spektra respons didapatkan dengan cara mengkalikan harga spektra gelombang dengan RAO kuadrat. Maka grafik respon struktur pada enam derajat kebebasan yang dihasilkan adalah sebagai berikut :

$$\text{RAO}^2 \times S(\omega) = S_r(\omega)$$

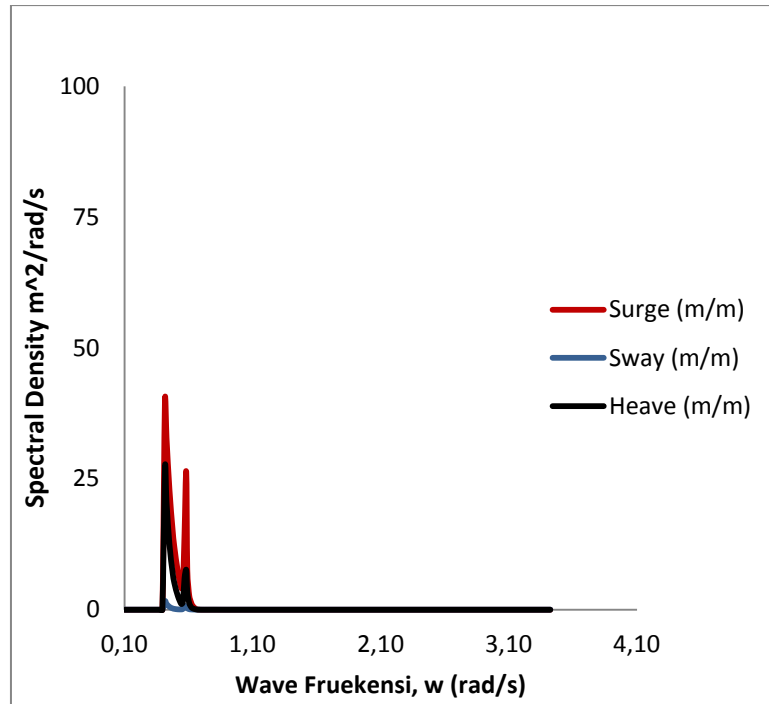
Sama halnya dengan penjelasan analisis perilaku gerak di gelombang regular (RAO) pada bahasan sebelumnya, penjelasan hasil analisis perilaku gerak di gelombang acak juga akan dijabarkan sesuai dengan kondisi muatan yang ditinjau.

Berikut adalah penjelasan lebih lengkap mengenai respon spektra pada SPM, FSO, dan *Shuttle Tanker* untuk kondisi tertambat, sedangkan untuk kondisi terapung bebas dapat dilihat pada lampiran.

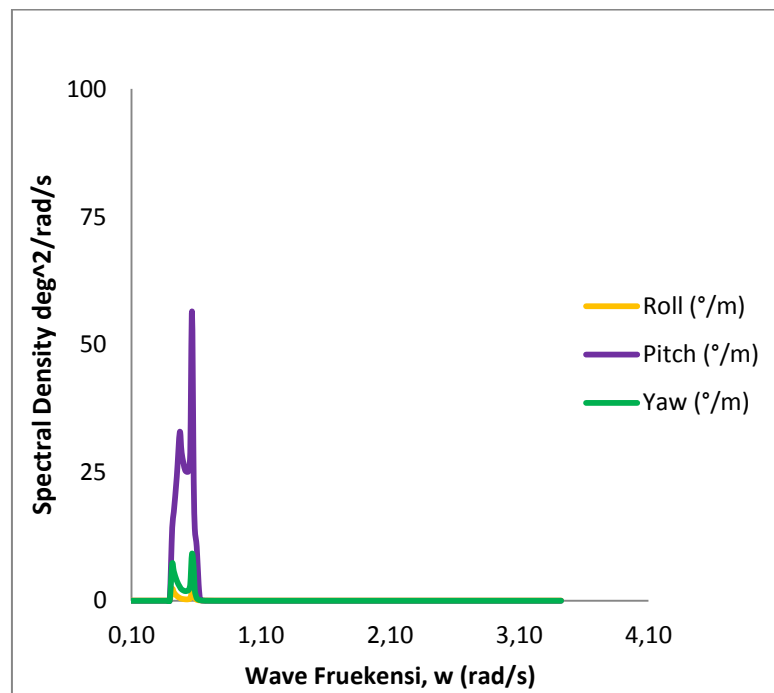
4.8.1 Respon Spektra FSO Arco Ardjuna saat kondisi tertambat

Perhitungan respon spektra pada FSO Arco Ardjuna dilakukan pada kondisi *Light Load* maupun *Full Load* dengan kedalaman laut 45 m. Grafik respon spektra pada FSO dilakukan untuk gerakan *surge*, *sway*, *heave*, *roll* dan *pitch*. Berikut pada Gambar 4.52 sampai Gambar 4.63 adalah grafik respon spektra pada FSO Arco Ardjuna dengan *heading* pembebanan 0° , 90° , 180° .

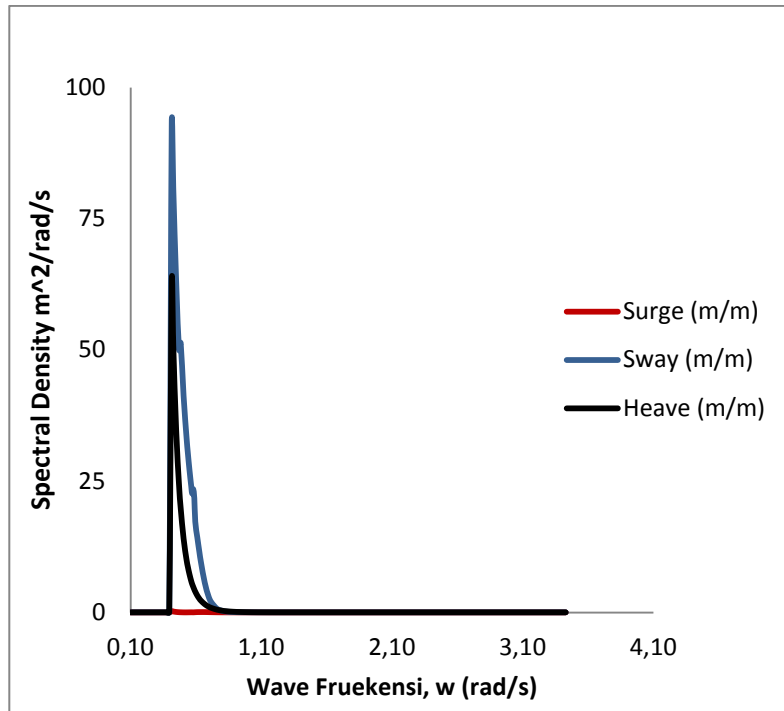
4.8.1.1 Respon Spektra FSO Arco Ardjuna – *light load*



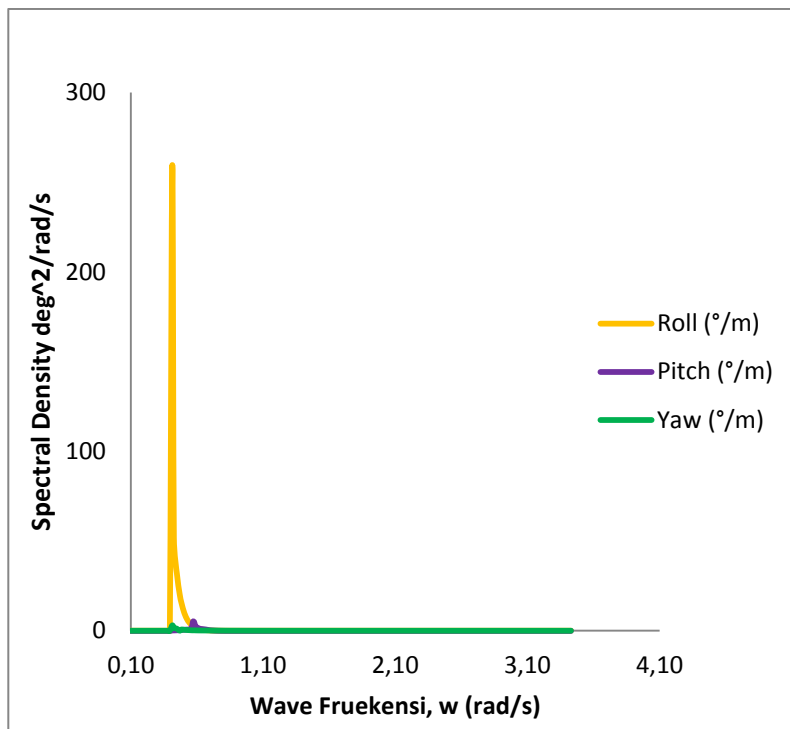
Gambar 4.52 Grafik respon spektra gerakan translasi pada FSO Arco Ardjuna saat kondisi *light load* tertambat SPM dengan heading pembebanan 0 derajat



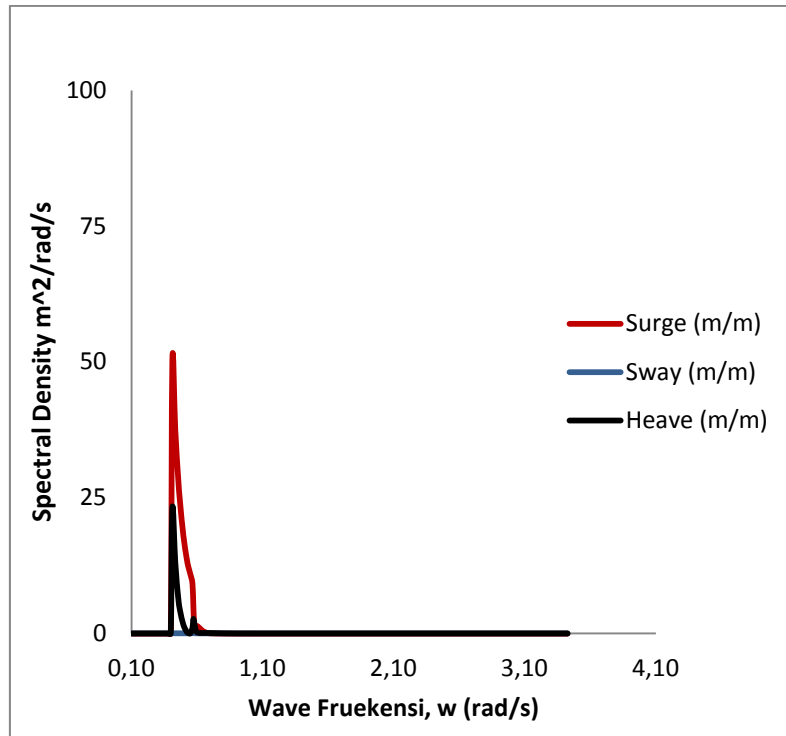
Gambar 4.53 Grafik respon spektra gerakan rotasi pada FSO Arco Ardjuna saat kondisi *light load* tertambat SPM dengan *heading* pembebanan 0 derajat



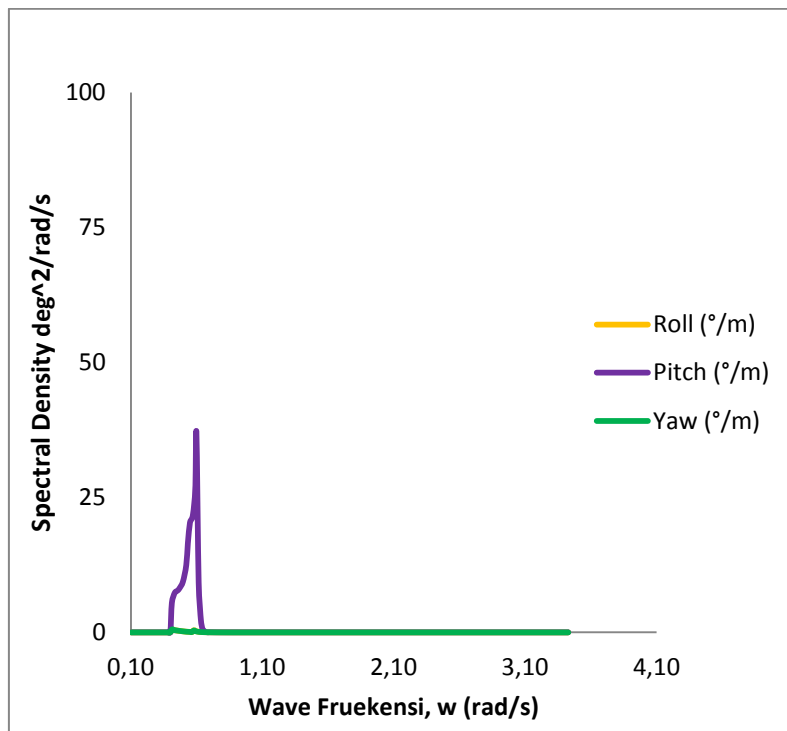
Gambar 4.54 Grafik respon spektra gerakan translasi pada FSO Arco Ardjuna saat kondisi *light load* tertambat SPM dengan *heading* pembebanan 90 derajat



Gambar 4.55 Grafik respon spektra gerakan rotasi pada FSO Arco Ardjuna saat kondisi *light load* tertambat SPM dengan *heading* pembebanan 90 derajat

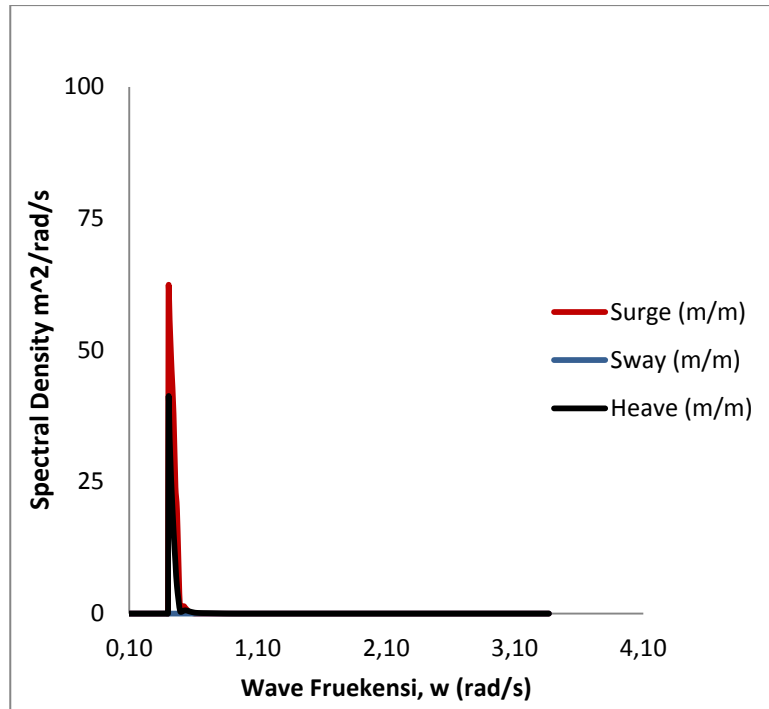


Gambar 4.56 Grafik respon spektra gerakan translasi pada FSO Arco Ardjuna saat kondisi *light load* tertambat SPM dengan *heading* pembebanan 180 derajat

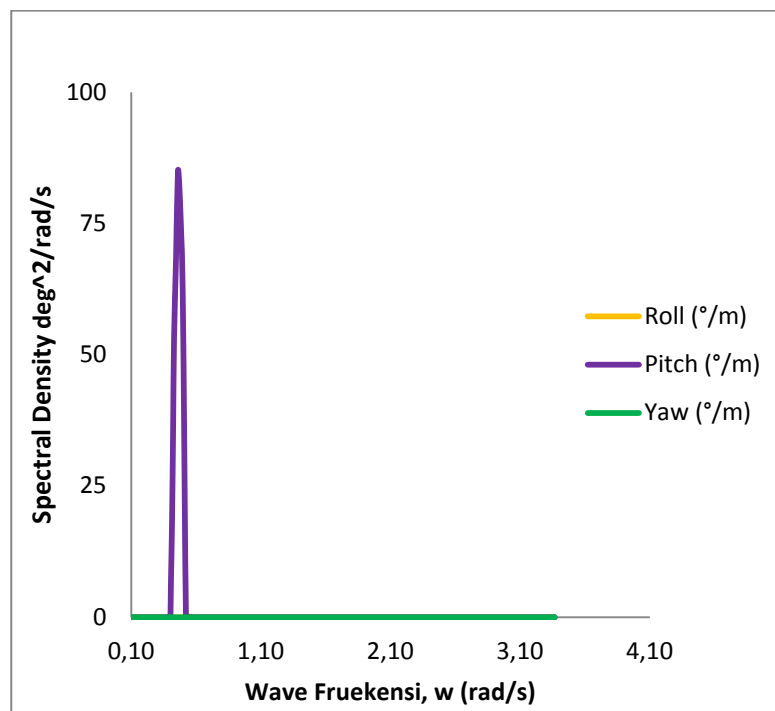


Gambar 4.57 Grafik respon spektra gerakan rotasi pada FSO Arco Ardjuna saat kondisi *light load* tertambat SPM dengan *heading* pembebanan 180 derajat

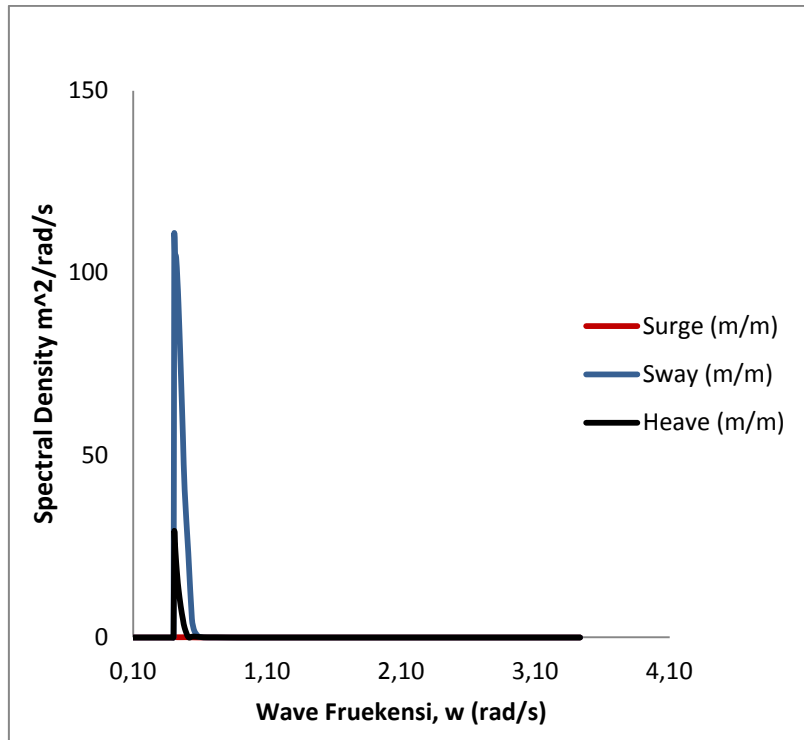
4.8.1.2 Respon Spektra FSO Arco Ardjuna – full load



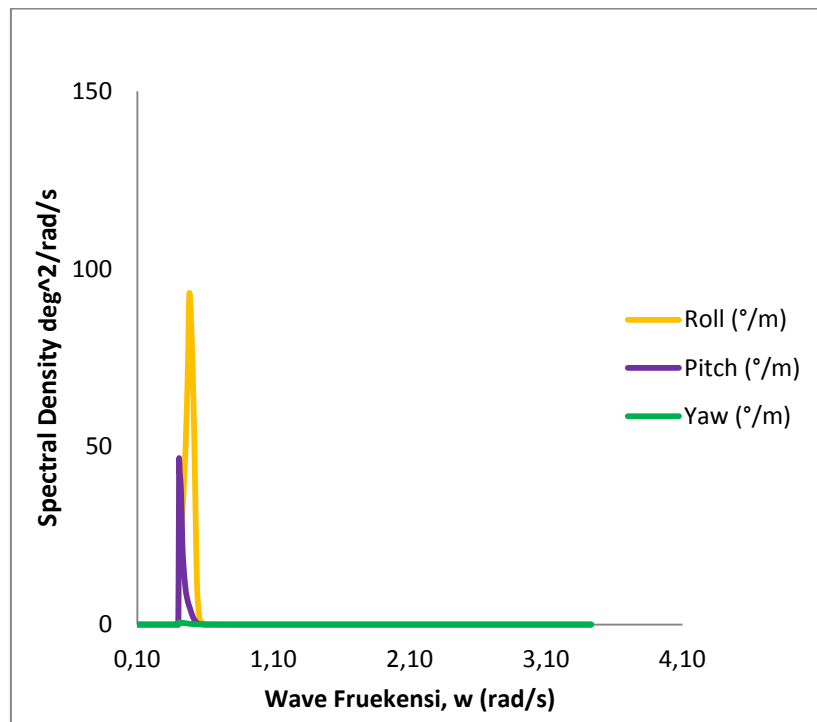
Gambar 4.58 Grafik respon spektra gerakan translasi pada FSO Arco Ardjuna saat kondisi *full load* tertambat SPM dengan *heading* pembebanan 0 derajat



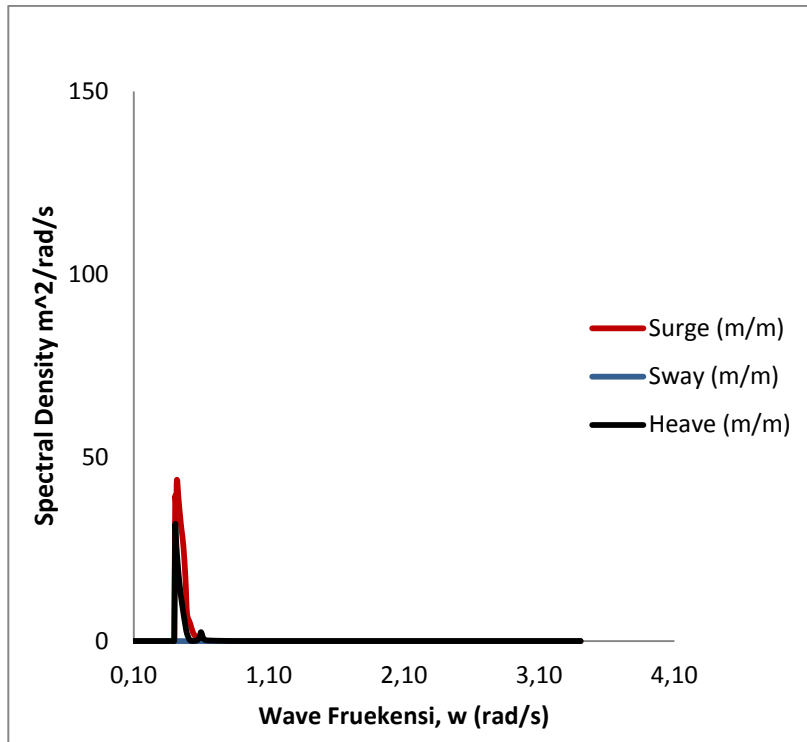
Gambar 4.59 Grafik respon spektra gerakan rotasi pada FSO Arco Ardjuna saat kondisi *full load* tertambat SPM dengan *heading* pembebanan 0 derajat



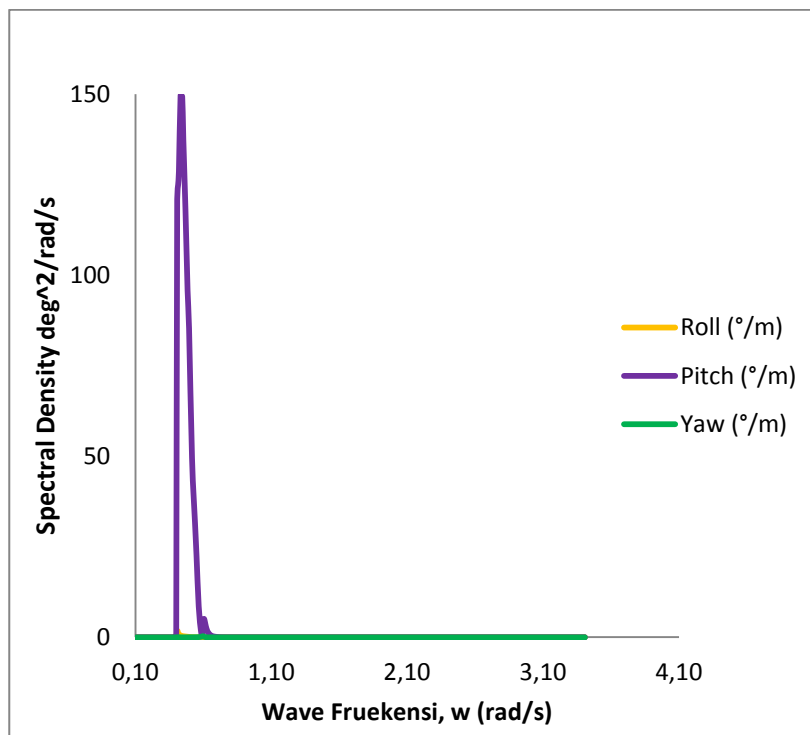
Gambar 4.60 Grafik respon spektra gerakan translasi pada FSO Arco Ardjuna saat kondisi *full load* tertambat SPM dengan *heading* pembebanan 90 derajat



Gambar 4.61 Grafik respon spektra gerakan rotasi pada FSO Arco Ardjuna saat kondisi *full load* tertambat SPM dengan *heading* pembebanan 90 derajat



Gambar 4.62 Grafik respon spektra gerakan translasi pada FSO Arco Ardjuna saat kondisi *full load* tertambat SPM dengan *heading* pembebanan 180 derajat

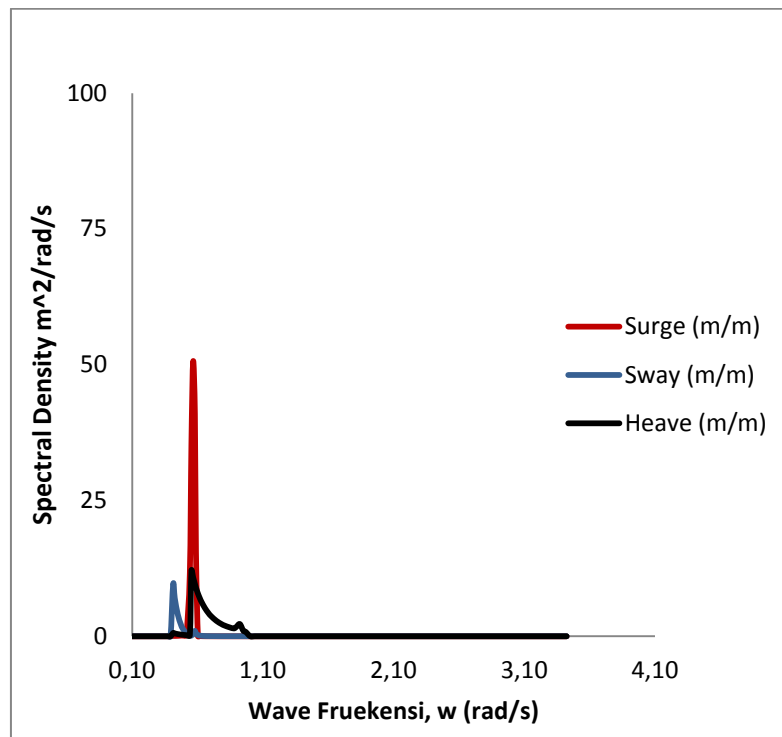


Gambar 4.63 Grafik respon spektra gerakan rotasi pada FSO Arco Ardjuna saat kondisi *full load* tertambat SPM dengan *heading* pembebanan 180 derajat

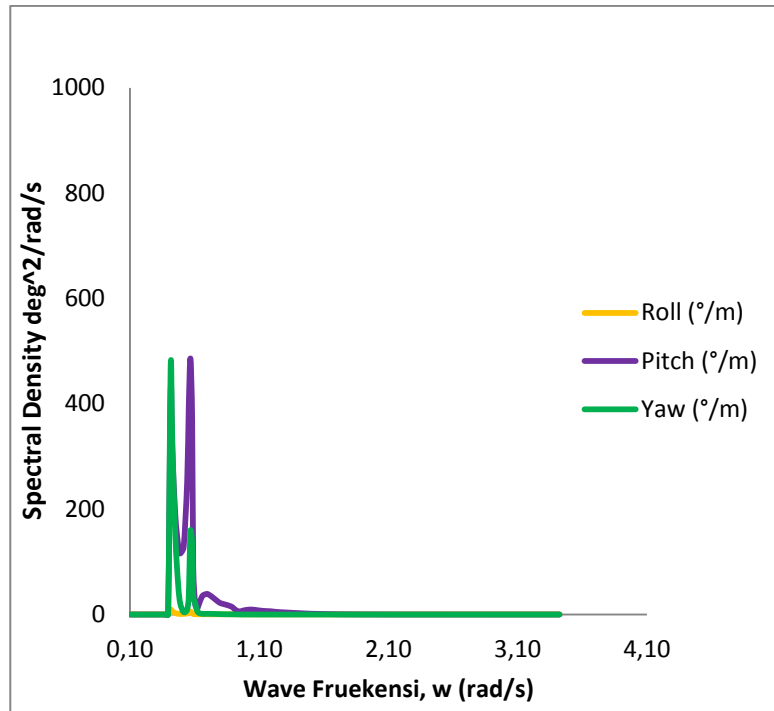
4.8.2 Respon Spektra *Single Point Mooring* saat kondisi tertambat

Perhitungan respon spektra pada *Single Point Mooring* dilakukan saat tertambat dengan FSO Arco Ardjuna kondisi *light load* dan *full load* pada sarat $t = 2,38$ m dengan kedalaman laut 45 m. Grafik respon spektra pada SPM dilakukan untuk gerakan *surge*, *sway*, *heave*, *roll* dan *pitch*. Berikut pada Gambar 4.64 sampai Gambar 4.75 adalah grafik respon spektra pada *Single Point Mooring* dengan *heading* pembebanan 0° , 90° , 180° .

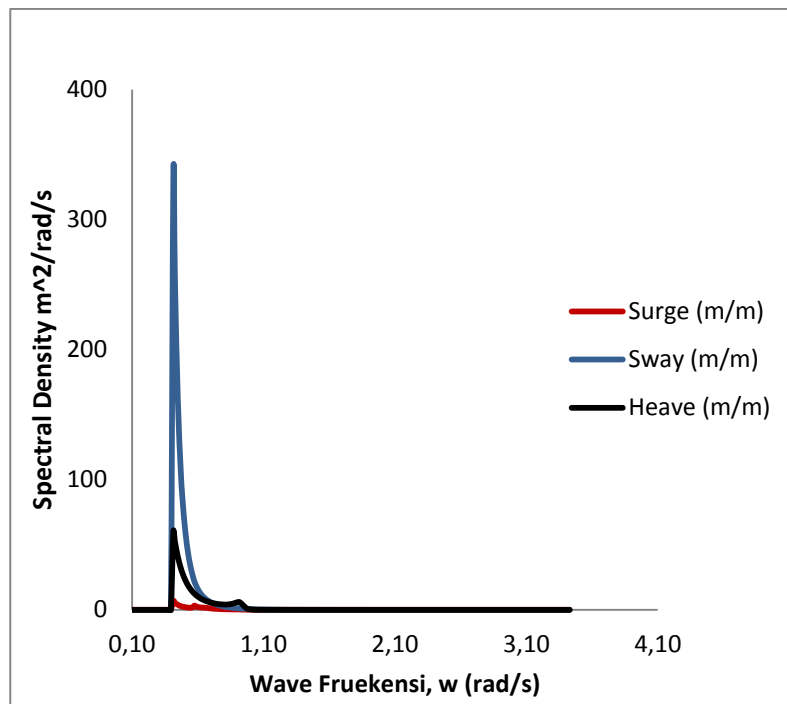
4.8.2.1 Respon Spektra *Single Point Mooring* tertambat dengan FSO Arco Ardjuna kondisi *light load*



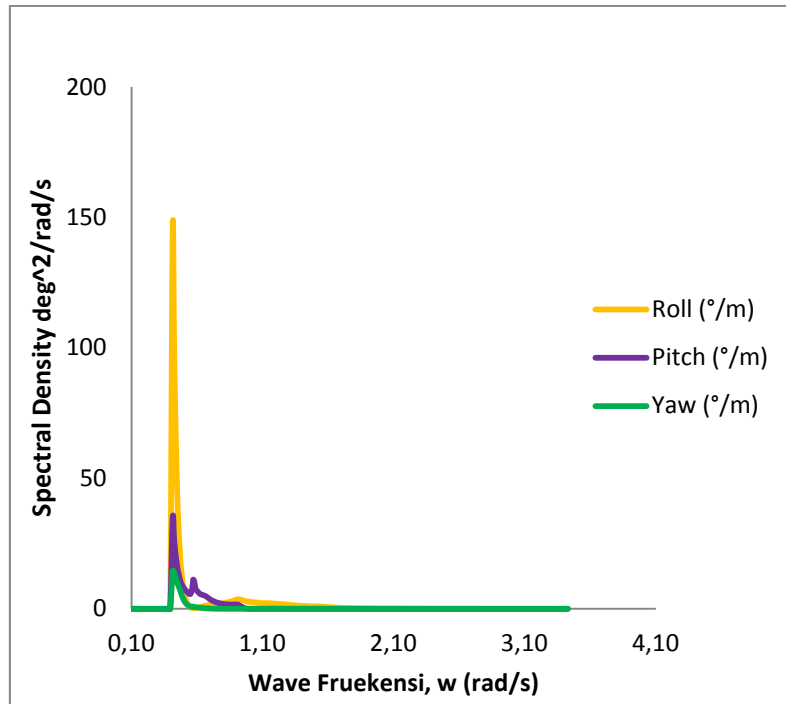
Gambar 4.64 Grafik respon spektra gerakan translasi pada *Single Point Mooring* tertambat dengan FSO Arco Ardjuna kondisi *light load* dengan *heading* pembebanan 0 derajat



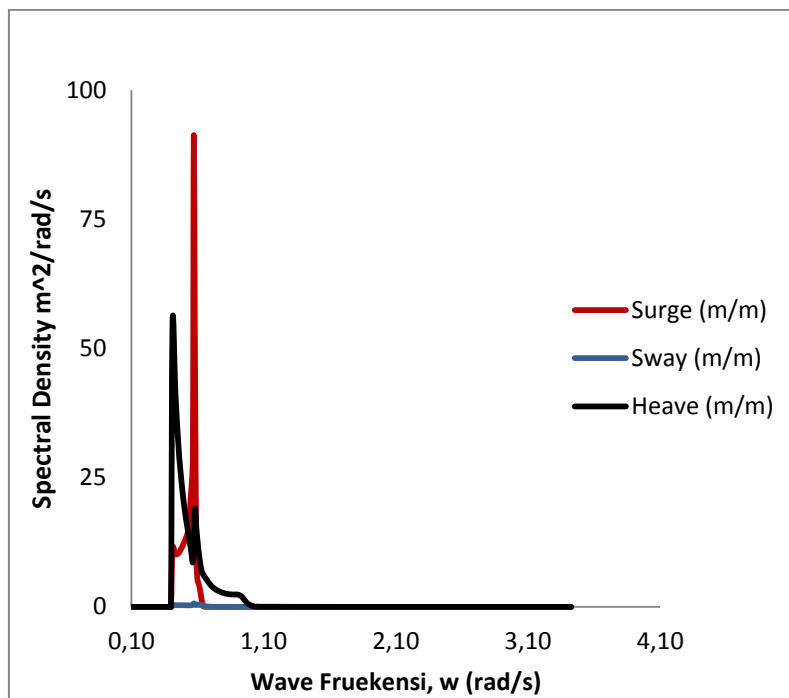
Gambar 4.65 Grafik respon spektra gerakan rotasi pada *Single Point Mooring* tertambat dengan FSO Arco Ardjuna kondisi *light load* dengan *heading* pembebanan 0 derajat



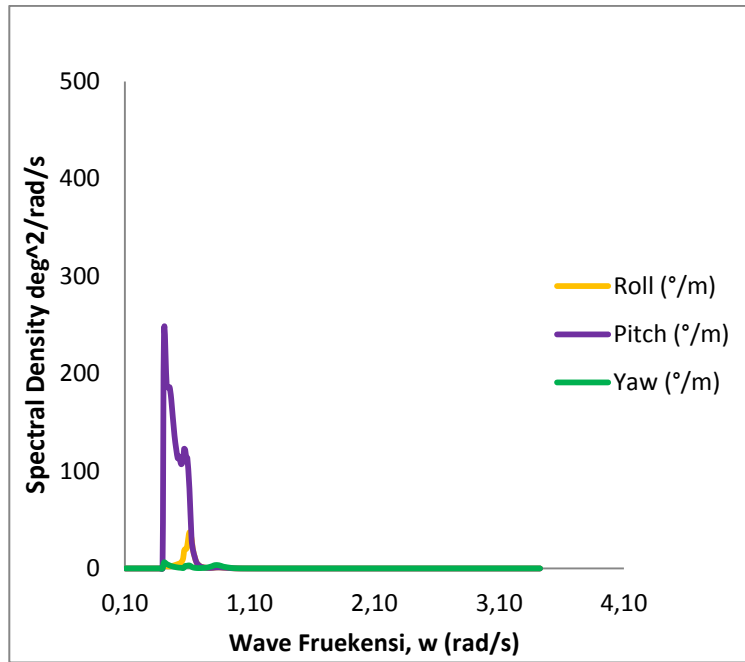
Gambar 4.66 Grafik respon spektra gerakan translasi pada *Single Point Mooring* tertambat dengan FSO Arco Ardjuna kondisi *light load* dengan *heading* pembebanan 90 derajat



Gambar 4.67 Grafik respon spektra gerakan rotasi pada *Single Point Mooring* tertambat dengan FSO Arco Ardjuna kondisi *light load* dengan *heading* pembebanan 90 derajat

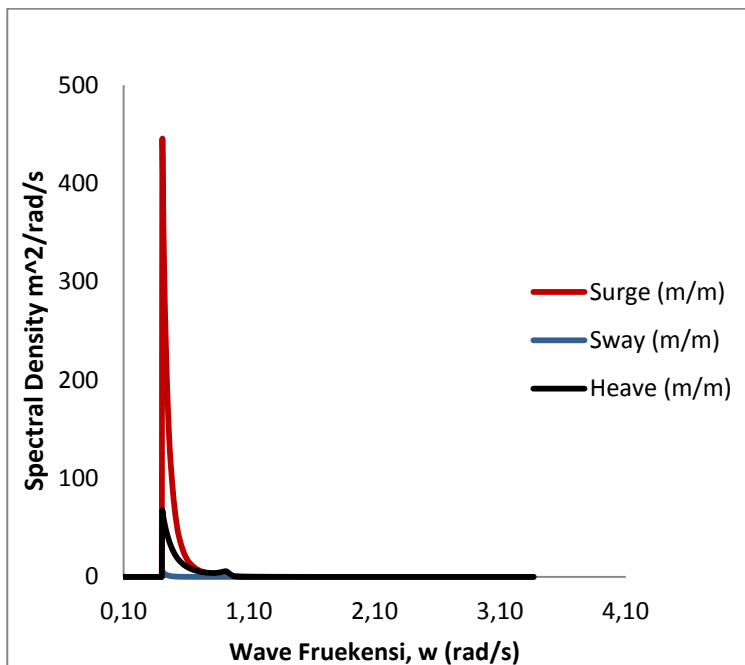


Gambar 4.68 Grafik respon spektra gerakan translasi pada *Single Point Mooring* tertambat dengan FSO Arco Ardjuna kondisi *light load* dengan *heading* pembebanan 180 derajat

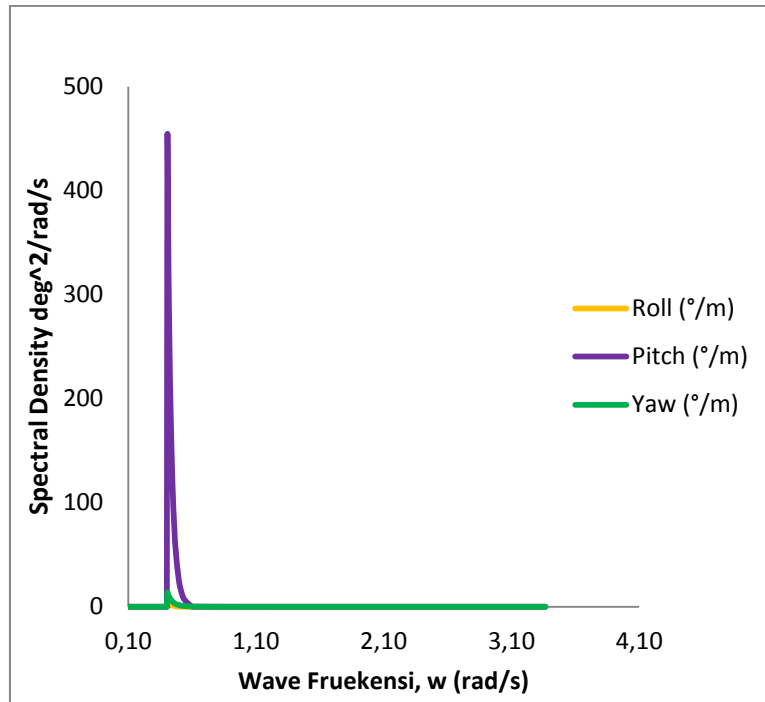


Gambar 4.69 Grafik respon spektra gerakan rotasi pada *Single Point Mooring* tertambat dengan FSO Arco Ardjuna kondisi *light load* dengan *heading* pembebanan 180 derajat

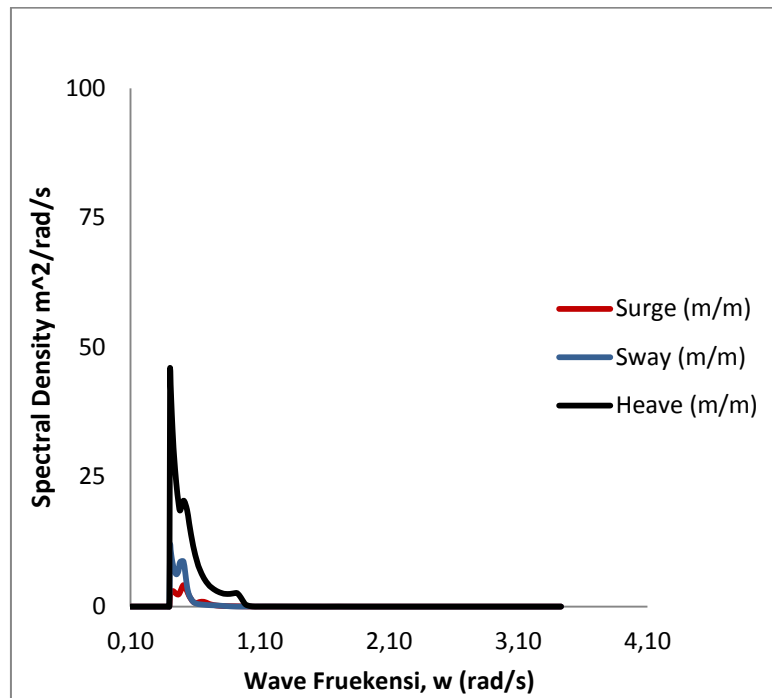
4.8.2.2 Respon Spektra *Single Point Mooring* tertambat dengan FSO Arco Ardjuna kondisi *full load*



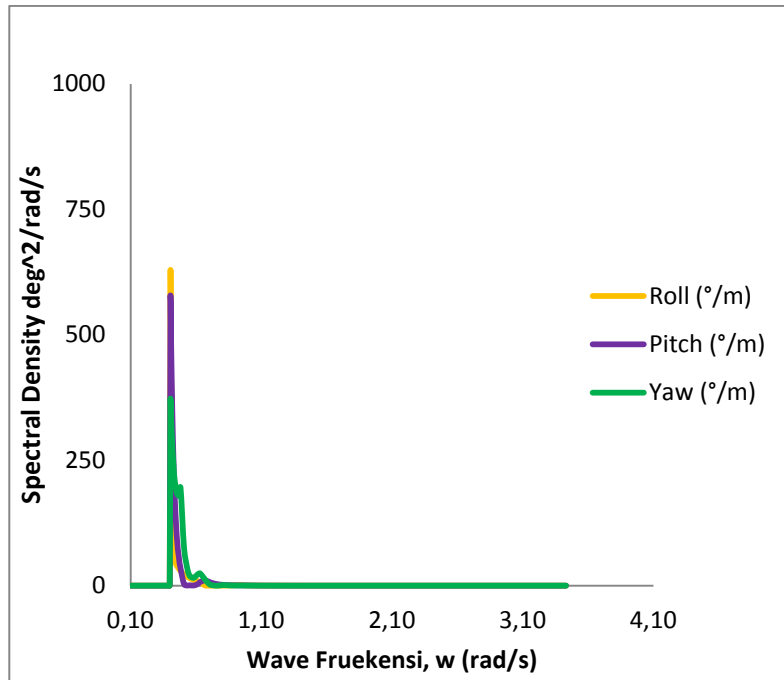
Gambar 4.70 Grafik respon spektra gerakan translasi pada *Single Point Mooring* tertambat dengan FSO Arco Ardjuna kondisi *full load* dengan *heading* pembebanan 0 derajat



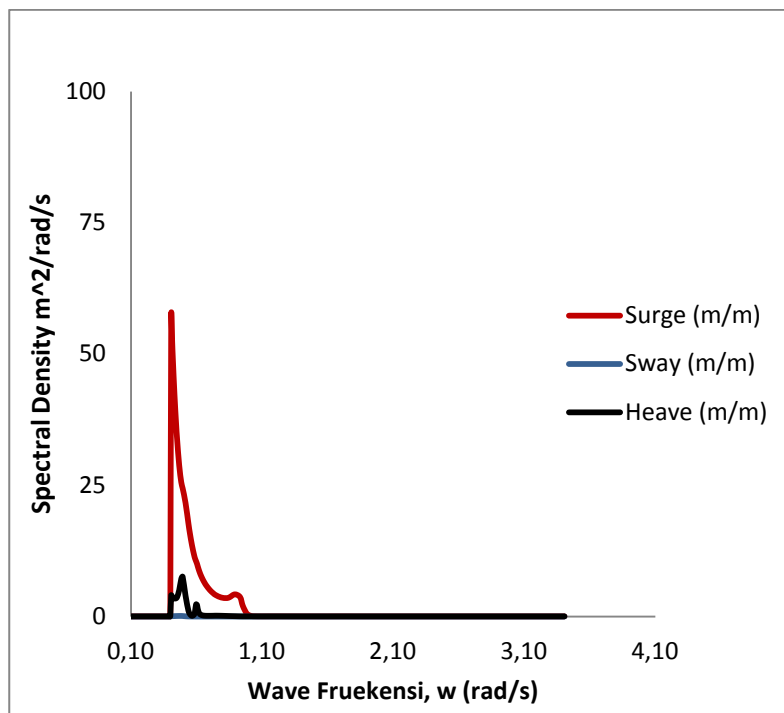
Gambar 4.71 Grafik respon spektra gerakan rotasi pada *Single Point Mooring* tertambat dengan FSO Arco Ardjuna kondisi *full load* dengan *heading* pembebanan 0 derajat



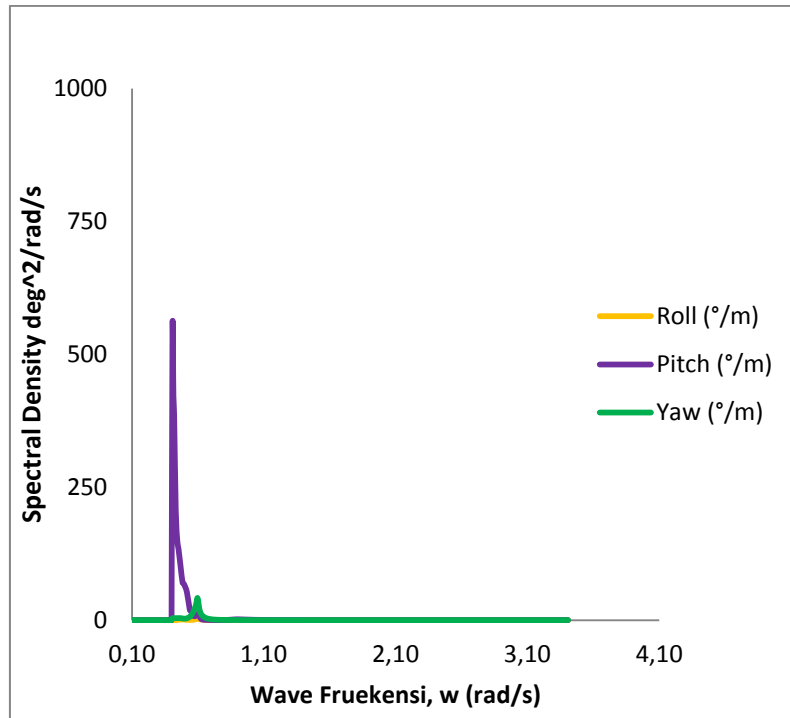
Gambar 4.72 Grafik respon spektra gerakan translasi pada *Single Point Mooring* tertambat dengan FSO Arco Ardjuna kondisi *full load* dengan *heading* pembebanan 90 derajat



Gambar 4.73 Grafik respon spektra gerakan rotasi pada *Single Point Mooring* tertambat dengan FSO Arco Ardjuna kondisi *full load* dengan *heading* pembebanan 90 derajat



Gambar 4.74 Grafik respon spektra gerakan translasi pada *Single Point Mooring* tertambat dengan FSO Arco Ardjuna kondisi *full load* dengan *heading* pembebanan 180 derajat



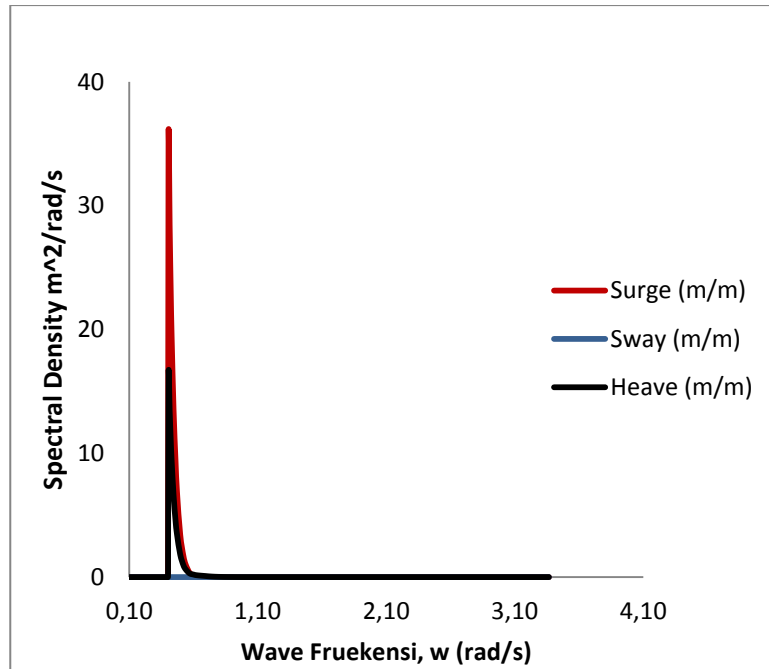
Gambar 4.75 Grafik respon spektra gerakan rotasi pada *Single Point Mooring* tertambat dengan FSO Arco Ardjuna kondisi *full load* dengan *heading* pembebanan 180 derajat

4.8.3 Respon Spektra *Shuttle Tanker* kondisi tertambat

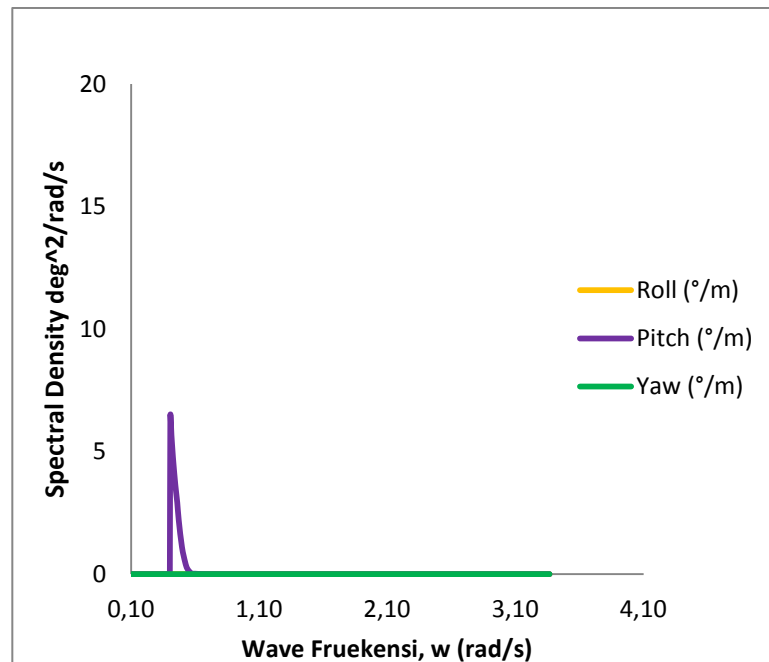
Perhitungan respon spektra pada *Shuttle Tanker* dilakukan saat tertambat dengan SPM dan FSO Arco Ardjuna kondisi *light load* pada sarat $t = 1,99$ m dan *full load* pada sarat $t = 13,28$ m dengan kedalaman laut 45 m.

Grafik respon spektra pada *Shuttle Tanker* dilakukan untuk gerakan *surge*, *sway*, *heave*, *roll* dan *pitch*. Berikut pada Gambar 4.76 s ampai Gambar 4.87 adalah grafik respon spektra pada *Shuttle Tanker* dengan *heading* pembebanan 0° , 90° , 180° .

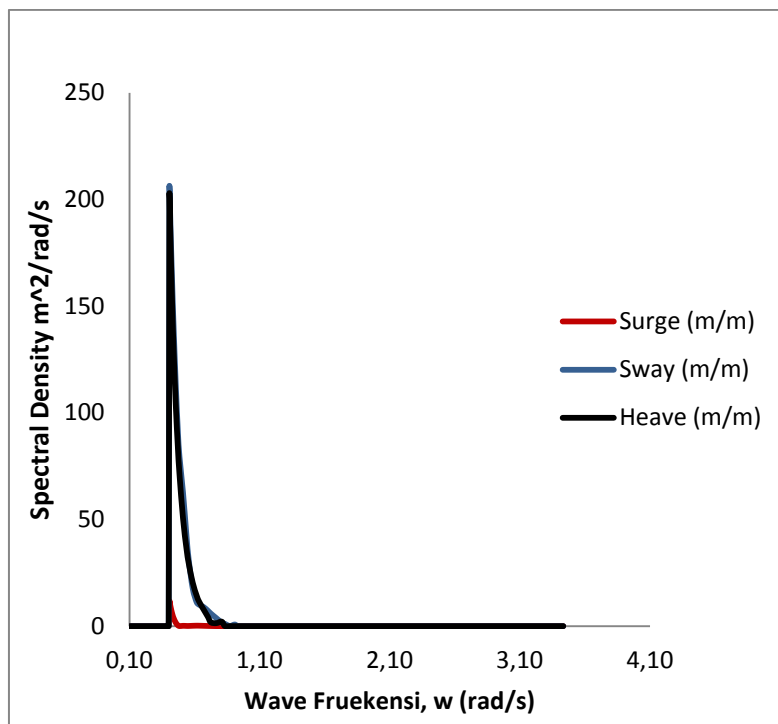
4.83.1 Respon Spektra *Shuttle Tanker* – *light load*



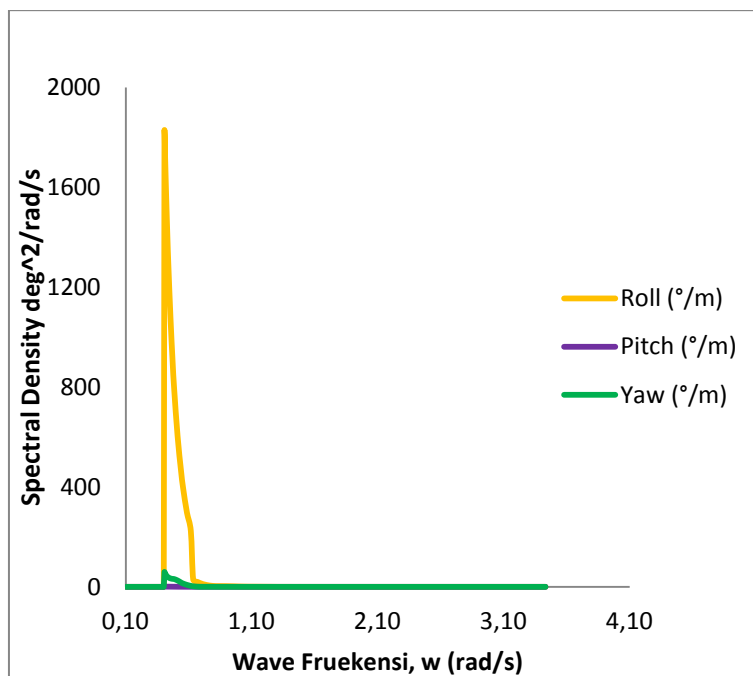
Gambar 4.76 Grafik respon spektra gerakan translasi pada *Shuttle Tanker* saat kondisi *light load* tertambat dengan SPM dan FSO dengan *heading* pembebanan 0 derajat



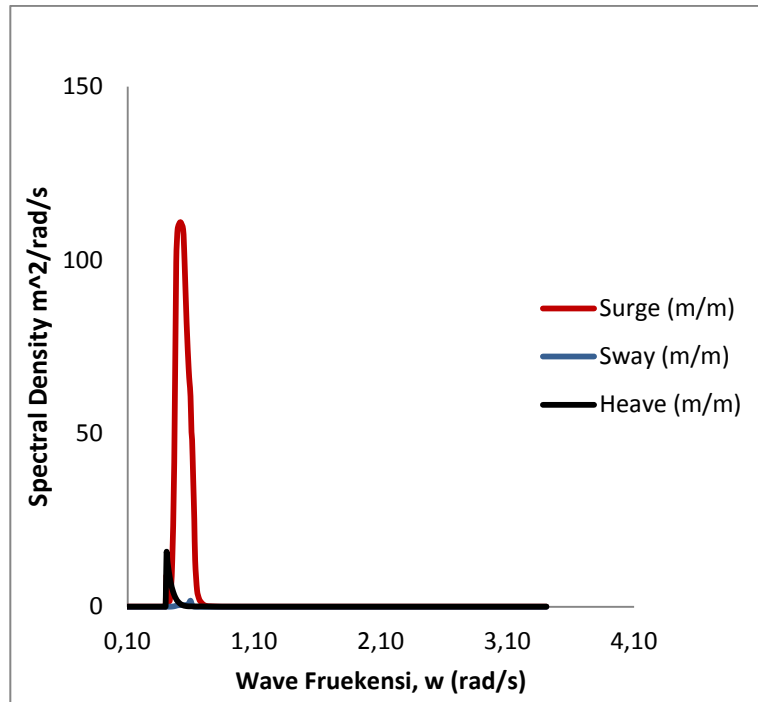
Gambar 4.77 Grafik respon spektra gerakan rotasi pada *Shuttle Tanker* saat kondisi *light load* tertambat dengan SPM dan FSO dengan *heading* pembebanan 0 derajat



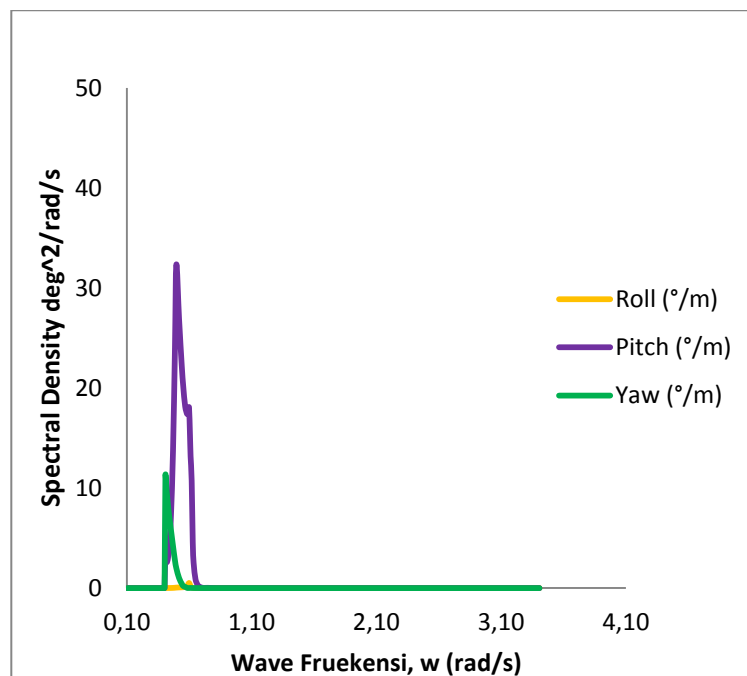
Gambar 4.78 Grafik respon spektra gerakan translasi pada *Shuttle Tanker* saat kondisi *light load* tertambat dengan SPM dan FSO dengan *heading* pembebanan 90 derajat



Gambar 4.79 Grafik respon spektra gerakan rotasi pada *Shuttle Tanker* saat kondisi *light load* tertambat dengan SPM dan FSO dengan *heading* pembebanan 90 derajat

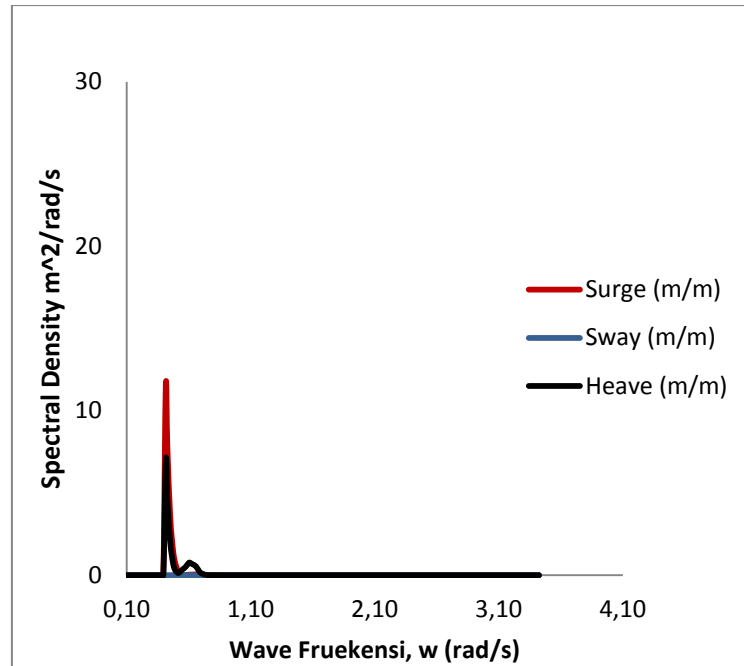


Gambar 4.80 Grafik respon spektra gerakan translasi pada *Shuttle Tanker* saat kondisi *light load* tertambat dengan SPM dan FSO dengan *heading* pembebanan 180 derajat

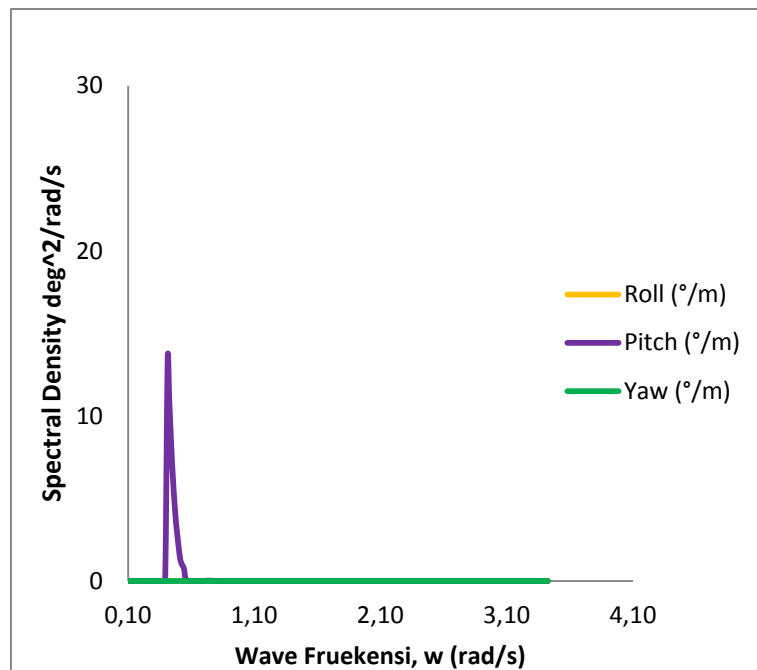


Gambar 4.81 Grafik respon spektra gerakan rotasi pada *Shuttle Tanker* saat kondisi *light load* tertambat dengan SPM dan FSO dengan *heading* pembebanan 180 derajat

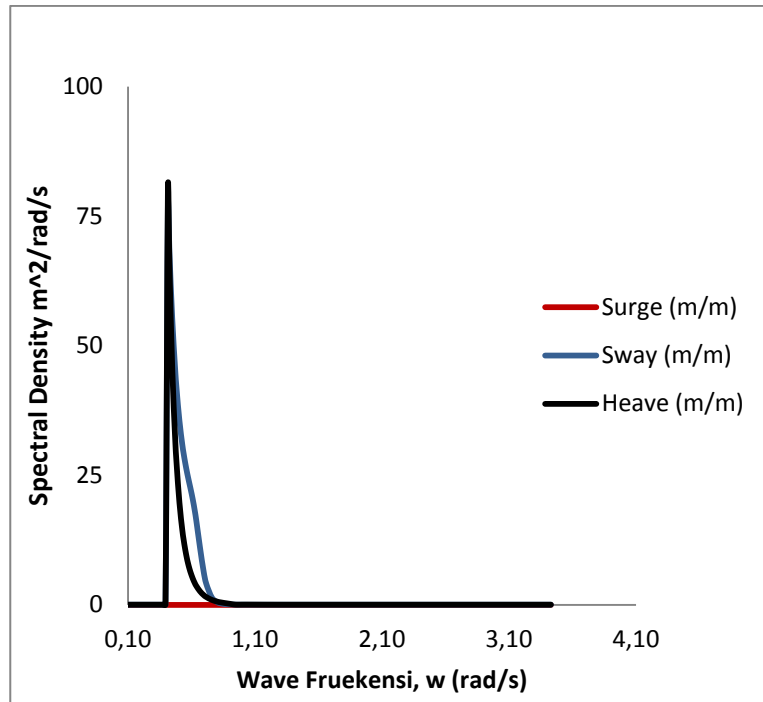
4.8.3.2 Respon Spektra *Shuttle Tanker* – full load



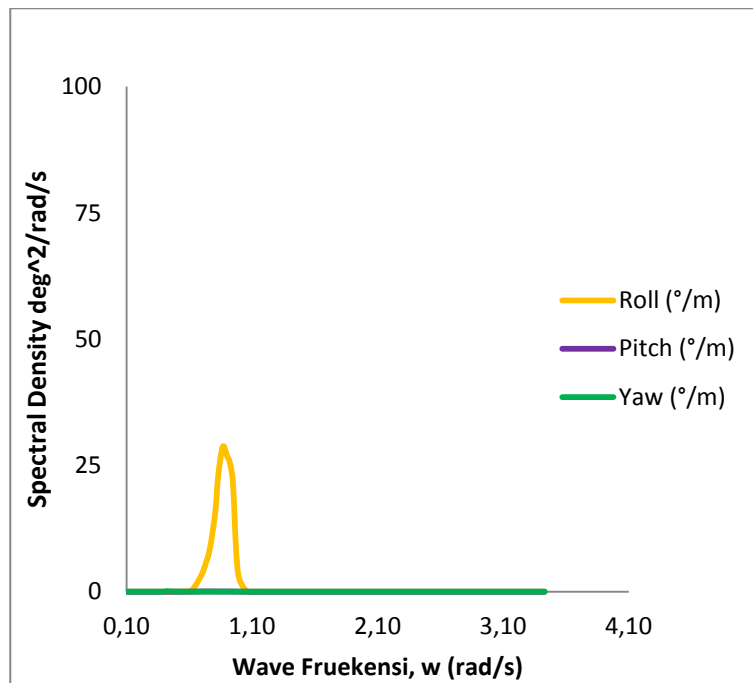
Gambar 4.82 Grafik respon spektra gerakan translasi pada *Shuttle Tanker* saat kondisi *full load* tertambat dengan SPM dan FSO dengan *heading* pembebanan 0 derajat



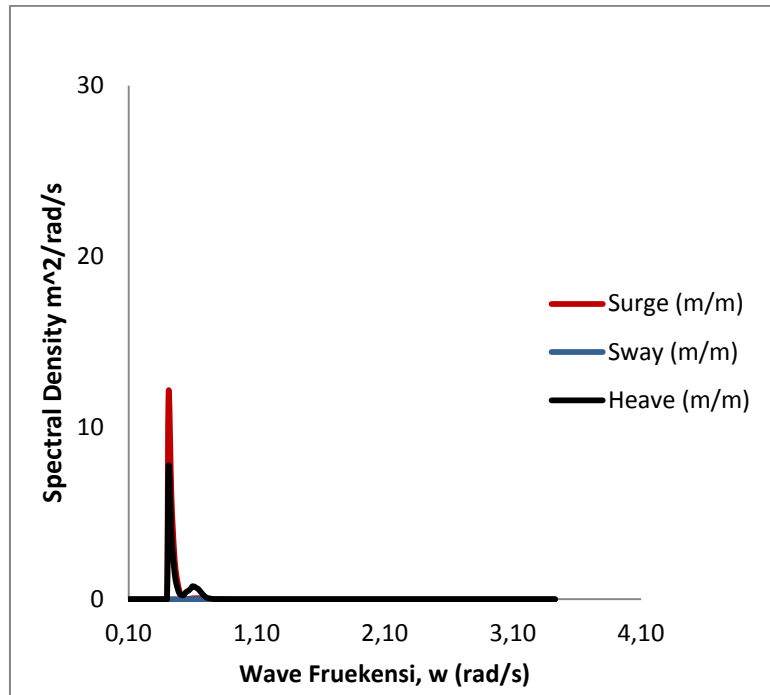
Gambar 4.83 Grafik respon spektra gerakan rotasi pada *Shuttle Tanker* saat kondisi *full load* tertambat dengan SPM dan FSO dengan *heading* pembebanan 0 derajat



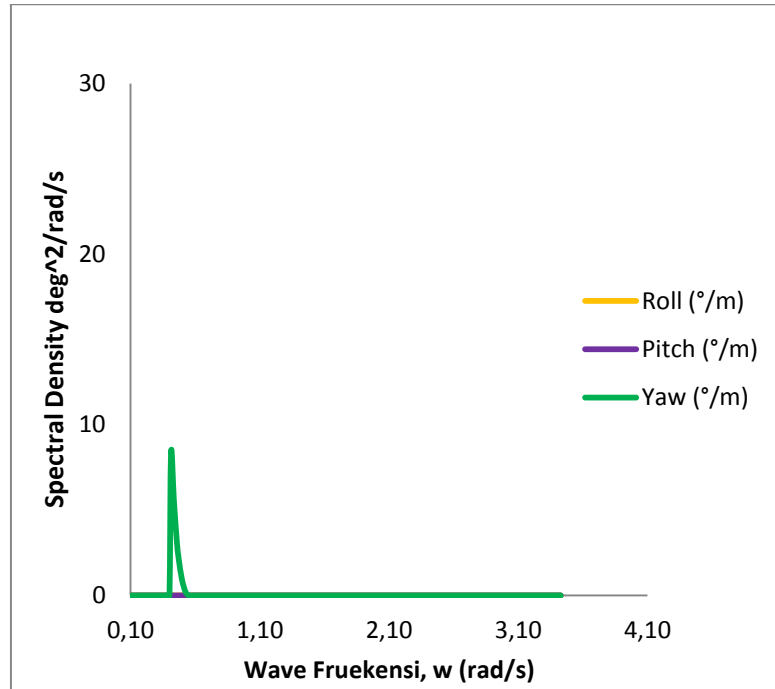
Gambar 4.84 Grafik respon spektra gerakan translasi pada *Shuttle Tanker* saat kondisi *full load* tertambat dengan SPM dan FSO dengan *heading* pembebanan 90 derajat



Gambar 4.85 Grafik respon spektra gerakan rotasi pada *Shuttle Tanker* saat kondisi *full load* tertambat dengan SPM dan FSO dengan *heading* pembebanan 90 derajat



Gambar 4.86 Grafik respon spektra gerakan translasi pada *Shuttle Tanker* saat kondisi *full load* tertambat dengan SPM dan FSO dengan *heading* pembebanan 180 derajat



Gambar 4.87 Grafik respon spektra gerakan rotasi pada *Shuttle Tanker* saat kondisi *full load* tertambat dengan SPM dan FSO dengan *heading* pembebanan 180 derajat

4.9 Distribusi *Tension* Pada Tali Tambat

Tali tambat yang menerima *tension* maksimum memiliki *safety factor* minimal. Besar *tension* yang didapatkan pada analisis ini akan dicocokkan atau dikoreksi dengan suatu kriteria *safety factor* berdasarkan *American Bureau of Shipping* (ABS)

Perlu diketahui bersama bahwa semakin besar nilai *tension* yang terjadi dibandingkan dengan nilai batas kapasitas tegangan (breaking strength) tali tambat yang diterima, maka akan semakin rentan tali tersebut untuk putus. Oleh sebab itu sebelum menganalisis *tension* pada tali tambat terlebih dahulu dilakukan perhitungan secara mendetail tentang desain panjang tali tambat.

Berbasis pada *time-domain*, analisis dilakukan selama 3 jam. Dan kondisi pembebanan dilakukan pada kondisi *Ultimate Limit State* (ULS). Kondisi ULS adalah pembebanan yang terjadi pada kondisi operasi, dimana tali tambat yang bekerja sebagai *mooring system* pada FSO bekerja optimum, utuh tanpa ada tali tambat dari yang diputus.

4.9.1 Analisis *Tension* Tali Tambat Untuk SPM, FSO, dan *Shuttle Tanker* pada Kondisi ULS

Sebelumnya perlu dihitung terlebih dahulu berapa nilai *tension* maksimum yang diijinkan oleh *American Bureau of Shipping* (ABS). Perhitungannya adalah sebagai berikut:

□ Untuk *Chain*

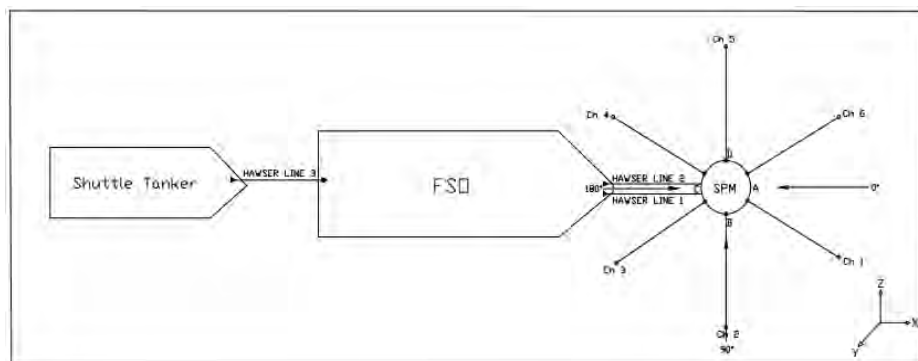
$$\text{Safety Factor} = \frac{\text{Minimum Breaking Load}}{\text{Maximum Tension}}$$

$$1.67 = \frac{7051000 \text{ N}}{\text{Maximum Tension}}$$

$$\text{Maximum Tension} = 4222155.69 \text{ N}$$

Dari perhitungan kriteria tersebut maka dapat disimpulkan bahwa nilai *tension* maksimum tali tambat yang dihasilkan pada kondisi ULS untuk material *chain* tidak boleh melebihi 4222155.69 N.

Berdasarkan hasil analisis menggunakan *software* Ansys Aqwa 16.0 selama 3 jam, maka didapat nilai *tension* untuk *anchor legs* yang dirangkum pada Tabel 4.18 untuk kondisi FSO Full Load dan *Shuttle Tanker* 10% *Bunker* dan Tabel 4.19 untuk kondisi FSO *Light Load* dan *Shuttle Tanker Full Load* yang dilengkapi dengan gambar konfigurasi sistem tandem adalah pada Gambar 4.88 berikut:



Gambar 4.88 Konfigurasi sistem tandem *offloading*

Tabel 4.18 Nilai tension pada *anchor legs* untuk kondisi FSO Full Load dan *Shuttle Tanker 10% Bunker*

Time (s)	Heading (deg)	Anchor Legs	Tension (kN)	SF Max
9077,5	0	<i>Anchor Leg.1</i>	1362,70	5,17
		<i>Anchor Leg.2</i>	222,85	
		<i>Anchor Leg.3</i>	209,27	
		<i>Anchor Leg.4</i>	209,94	
		<i>Anchor Leg.5</i>	222,39	
		<i>Anchor Leg.6</i>	1361,51	
1797,75	90	<i>Anchor Leg.1</i>	1420,87	4,24
		<i>Anchor Leg.2</i>	1662,35	
		<i>Anchor Leg.3</i>	1429,48	
		<i>Anchor Leg.4</i>	201,85	
		<i>Anchor Leg.5</i>	224,31	
		<i>Anchor Leg.6</i>	201,82	
1836,25	180	<i>Anchor Leg.1</i>	208,84	5,49
		<i>Anchor Leg.2</i>	217,96	
		<i>Anchor Leg.3</i>	1284,13	
		<i>Anchor Leg.4</i>	1283,65	
		<i>Anchor Leg.5</i>	217,35	
		<i>Anchor Leg.6</i>	208,47	

Tabel 4.19 Nilai tension pada *anchor legs* untuk kondisi FSO *Light Load* dan *Shuttle Tanker Full Load*

Time (s)	Heading (deg)	Anchor Legs	Tension (kN)	SF Max
9077,25	0	Anchor Leg.1	1361,98	5,17
		Anchor Leg.2	221,15	
		Anchor Leg.3	209,68	
		Anchor Leg.4	209,84	
		Anchor Leg.5	222,62	
		Anchor Leg.6	1361,94	
1797,5	90	Anchor Leg.1	1421,58	4,24
		Anchor Leg.2	1661,80	
		Anchor Leg.3	1429,77	
		Anchor Leg.4	202,07	
		Anchor Leg.5	224,31	
		Anchor Leg.6	202,06	
1836	180	Anchor Leg.1	209,67	5,49
		Anchor Leg.2	218,17	
		Anchor Leg.3	1284,13	
		Anchor Leg.4	1283,83	
		Anchor Leg.5	217,35	
		Anchor Leg.6	209,10	

Berdasarkan tabel diatas, tegangan yang terjadi pada rantai jangkar untuk semua kondisi pembebanan masih memenuhi standar keamanan yang berdasarkan oleh ABS. Hasil *tension* pada kondisi *full load* lebih besar dibandingkan dengan saat kondisi *light load*. Nilai *tension* ini menunjukkan bahwa *anchor legs* aman untuk beroperasi.

Tension anchor leg terbesar untuk kondisi muatan *full load* terjadi pada arah pembebanan 90^0 untuk *leg 2* (Tabel 4.18), begitu juga untuk kondisi muatan *light load* nilai *tension* terbesar terjadi pada arah pembebanan 90^0 untuk *leg 2* (Tabel 4.19). Nilai *tension* maksimum yang akan digunakan untuk pembebanan pada pemodelan ANSYS Mechanical adalah *tension* pada *leg 2* untuk kondisi muatan *full load* dengan nilai *tension* sebesar 1662,24 kN.

4.10 Analisa Kekuatan *Anchor chain*

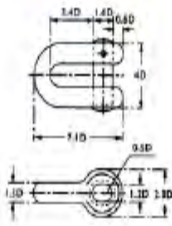
Tahapan awal dalam analisa kekuatan *anchor chain* pada ANSYS *Mechanical* adalah dengan melakukan pemodelan yang sebisa mungkin dapat mewakili keadaan strukturnya. Analisa lokal dilakukan pada *anchor chain* dengan memodelkan bagian-bagian *anchor chain* yaitu *shackle* dan *chain*. Secara melintang, *anchor chain* bagian ini memiliki panjang 2,56 m terletak pada bagian atas dari *anchor chain* dekat dengan SPM. Berikut pada Tabel 4.20 adalah dimensi *anchor leg* yang didapatkan dari data ukuran asli *Calm Buoy*.

Tabel 4.20 Data *anchor leg*

<i>Number of Legs</i>	6
<i>Anchoring Pattern</i>	Even Spacing (60°)
<i>Paid out length</i>	350 m
<i>Pretension</i>	262.17 kN
<i>Pretension angle (w/horizontal)</i>	45.26°
<i>Number of segment</i>	1
<i>Chain diameter</i>	102 mm
<i>Chain type</i>	R3
<i>Minimum breaking load</i>	8315 kN
<i>Minimum breaking load after corrosion</i>	7051 kN
<i>Unit weight in Air</i>	210.16 kg/m
<i>Unit weight in Water</i>	182.72 kg/m
<i>Stiffness EA</i>	868 MN
<i>Anchoring radius</i>	337.5 m

Data tersebut kemudian digunakan untuk melakukan permodelan konstruksi lokal *anchor chain* mengacu kepada kriteria perancangan ABS *Certification of Mooring Chain* disajikan pada Gambar 2.89 berikut ini.

Joining Shackles



Joining shackles have an oval pin and are available in a wide range of sizes. They are generally supplied in a "black/self colour" finish.

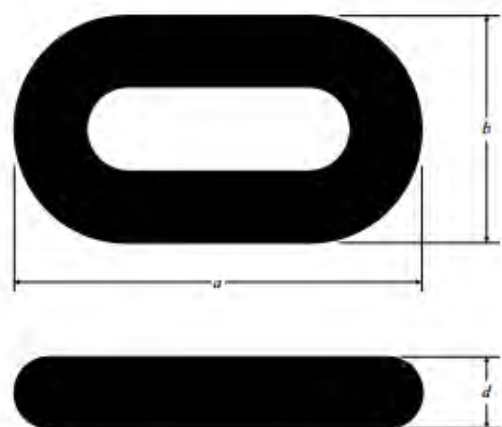
Please check with Wesco Industries for sizes available.



(a)

Proportions, Dimensions and Tolerances of Studless Common Link

The internal link radii (R) and external radii should be uniform.



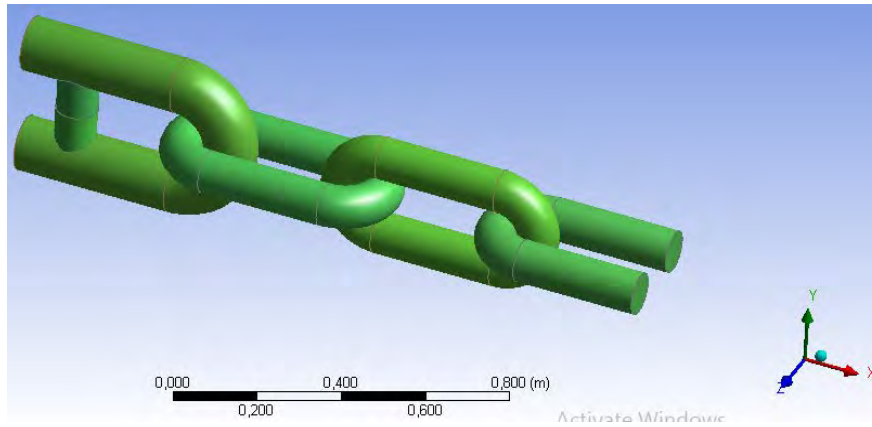
Designation ⁽¹⁾	Description	Nominal Dimension of the Link	Minus Tolerance	Plus Tolerance
<i>a</i>	Link Length	$6d$	$0.15d$	$0.15d$
<i>b</i>	Link Width	$3.35d$	$0.09d$	$0.09d$
<i>R</i>	Inner Radius	$0.65d$	0	-----

- Notes:
- 1 Dimension designation is shown in above figure.
d = nominal diameter of chain
 - 2 Other dimension ratios are subject to special approval.

(b)

Gambar 4.89 Kriteria perancangan konstruksi lokal berdasarkan ABS (a) *Joining Shackles*; (b) *Studless Link*

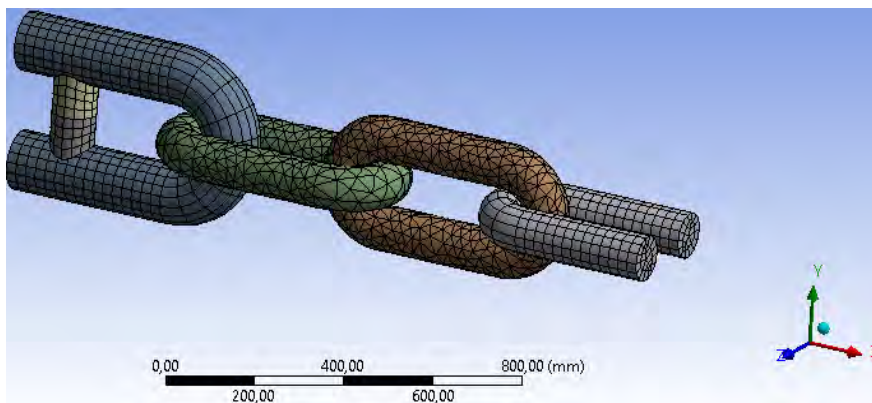
Berikut pada Gambar 4.90 adalah hasil pemodelan *anchor chain* yang telah dikonversi dari SolidWork ke ANSYS *Mechanical*.



Gambar 4.90 Hasil Permodelan *Anchor Chain* pada *Ansys Mechanical*

Gambar diatas adalah model konstruksi lokal *anchor chain* yang telah dikonversi dari SolidWork ke ANSYS *Mechanical*. Pemodelan pada ANSYS *Mechanical* dibuat berdasarkan dimensi yang didapatkan dari data ukuran asli milik PT. Pertamina Hulu Energi *Offshore North West Java*.

Setelah pemodelan selesai dilakukan, kemudian tiap-tiap bagian pada struktur diberi ketebalan sesuai dengan data. Selanjutnya dilakukan *meshing* terhadap model yang telah dibuat. Adapaun hasil *meshing* dari model *anchor chain* adalah pada Gambar 4.91 berikut:

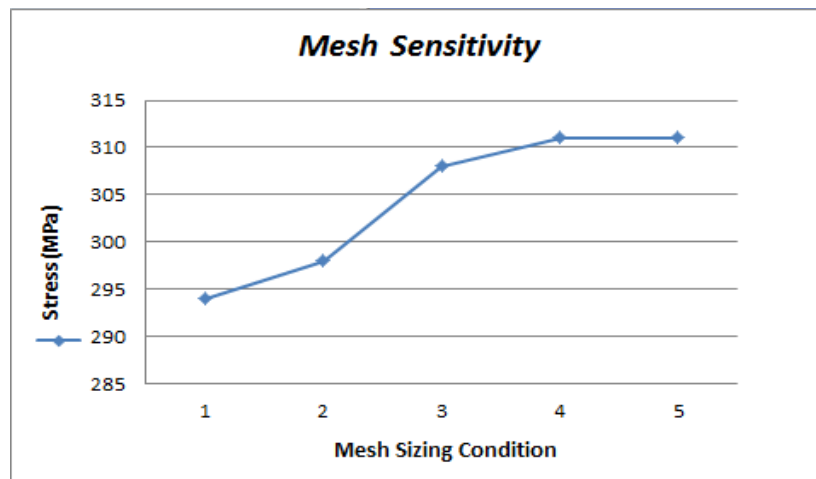


Gambar 4.91 Hasil *meshing chain* pada ANSYS *Mechanical*

Hasil *meshing* harus diperiksa kualitasnya apakah sesuai dengan yang diisyaratkan oleh ANSYS, maka perlu dilakukan analisa sensitifitas *meshing* (*meshing sensitivity*) setelah pemberian *meshing* dan pembebanan pada *chain*. *Mesh sensitivity* adalah variasi penentuan ukuran kerapatan *meshing* untuk memperoleh nilai tegangan yang konstan dengan input beban yang nilainya sama. Berdasarkan variasi kerapatan *meshing* tersebut akan didapatkan hasil *equivalent stress* atau yang lebih dikenal dengan *Von Mises Stress*. Dari beberapa hasil tegangan yang dihasilkan dianalisis hingga didapat perbedaan hasil yang kurang dari 5%. Berikut merupakan hasil *mesh sensitivity* dengan lima macam ukuran *meshing* disajikan dalam Tabel 4.21 dan grafik pada Gambar 4.92:

Tabel 4.21 *Mesh sensitivity*

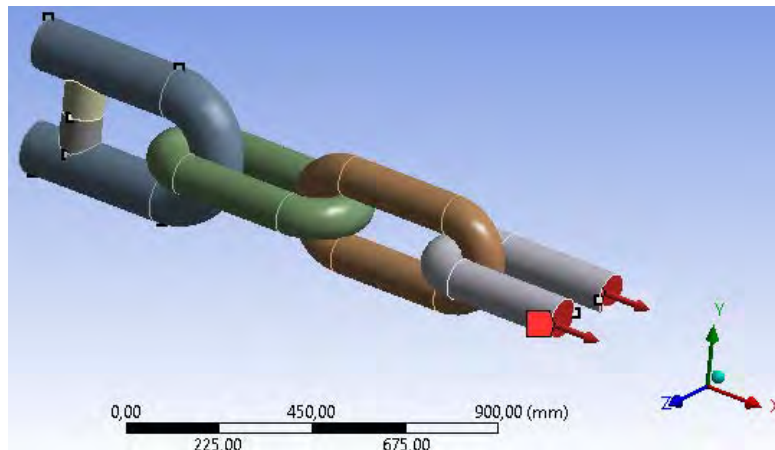
Kondisi	Ukuran (mm)	Nodes	Tegangan (Mpa)	Koreksi (%)
1	52	5264	294	
2	40	8831	296	0,013
3	35	9606	303	0,017
4	25	21134	311	0,026
5	15	102544	311	0,000



Gambar 4.92 Grafik *mesh sensitivity*

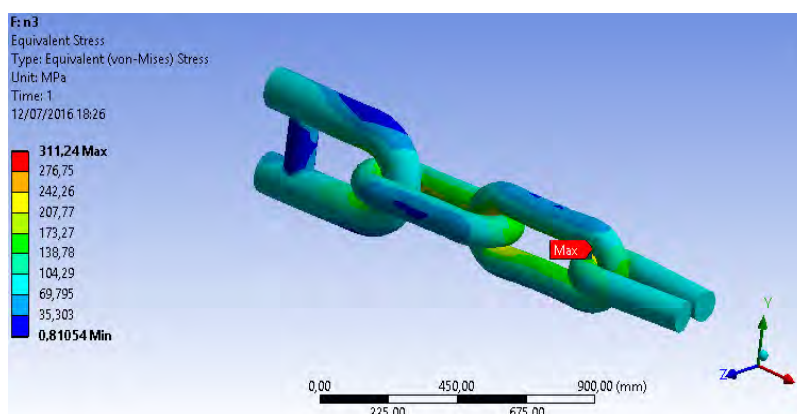
Berdasarkan tabel dan grafik dapat diketahui bahwa pada tugas akhir ini menggunakan hasil *meshing* dengan jumlah *node* 102544, karena pada jumlah *node* ini besarnya tegangan sudah mulai konstan.

Setelah *meshing* dilakukan, selanjutnya diberikan gaya yang bekerja pada struktur. Sesuai dengan pembebanan pada *anchor legs*, tiap titik tangkap gaya mewakili mewakili beban yang ada. Beban yang diberikan pada model berupa beban *tension* yang didapat dari hasil *output* pada ANSYS AQWA. Pemberian gaya pada *anchor chain* disajikan dalam Gambar 4.93 berikut:



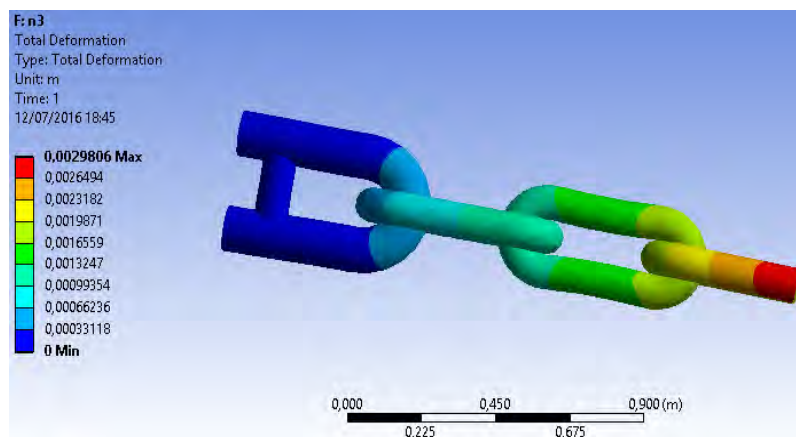
Gambar 4.93 Beban pada *anchor chain*

Langkah terakhir adalah proses *solving* atau *running* model untuk mengetahui besarnya tegangan von mises (*equivalent stress*) serta deformasi yang terjadi. Berikut pada Gambar 4.94 adalah hasil *solving* pemodelan untuk analisa tegangan von mises:



Gambar 4.94 *Solving* tegangan von mises

Berdasarkan gambar 4.94 hasil *solving*, diketahui bahwa nilai tegangan maksimum sebesar 311,24 Mpa. Selain timbul tegangan, beban yang mengenai *anchor chain* menimbulkan deformasi pada struktur tersebut. Deformasi adalah perubahan bentuk suatu struktur akibat beban yang bekerja pada struktur tersebut. Deformasi maksimum yaitu sebesar 0,0029 meter, terdapat pada bagian ujung *chain* yang diberikan beban sebesar nilai *tension* maksimum dari *anchor leg*. Berikut pada Gambar 4.95 adalah plot gambar untuk deformasi yang terjadi akibat beban yang bekerja pada *anchor chain*:



Gambar 4.95 *Solving* deformasi

Berdasarkan hasil *solving* ANSYS *Mechanical*, maka didapatkan nilai tegangan von mises serta deformasi maksimum yang terjadi pada *anchor chain* disajikan pada Tabel 4.22 berikut:

Tabel 4.22 Tegangan von mises dan deformasi maksimum pada *chain*

<i>Parameter</i>	<i>Unit</i>	<i>Quantity</i>
Tegangan Von Mises	Mpa	311,24
Deformasi	m	0,0029

Untuk menilai kemampuan struktur dalam menerima beban, maka perlu digunakan standarisasi atau *code*. Mengacu pada ABS '*Safehull Dynamic Loading Approach*' for Floating Production, Storage and Offloading (FPSO) Systems tahun 2001:

$$\text{Max. Allowable von mises Stress} \leq 0,9 \text{ Material's Yield Strength}$$

Diketahui bahwa material yang digunakan memiliki nilai *Yield Strength* sebesar 410 Mpa, sehingga:

$$311,24 \text{ MPa} \leq 0,9 \times 410 \text{ MPa}$$

$$311,24 \text{ MPa} \leq 369 \text{ MPa}$$

Maka dapat dikatakan bahwa kekuatan struktur dalam menerima beban berada pada kriteria yang aman atau kuat.

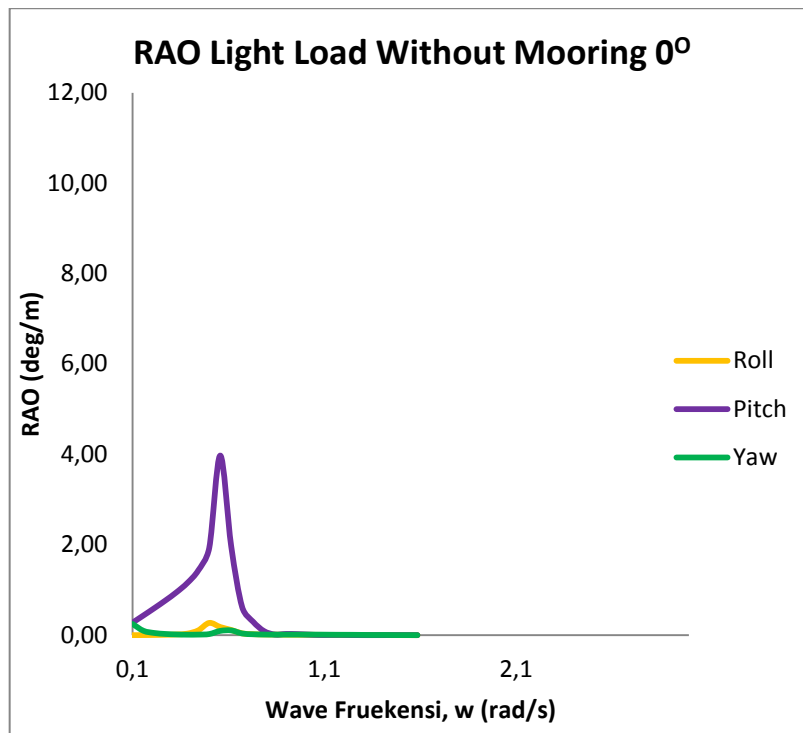
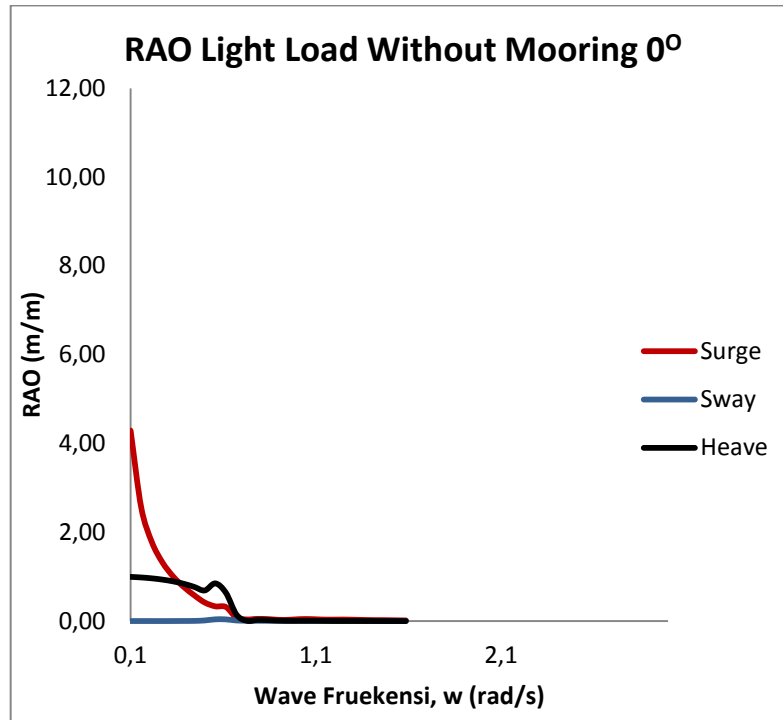
LAMPIRAN A

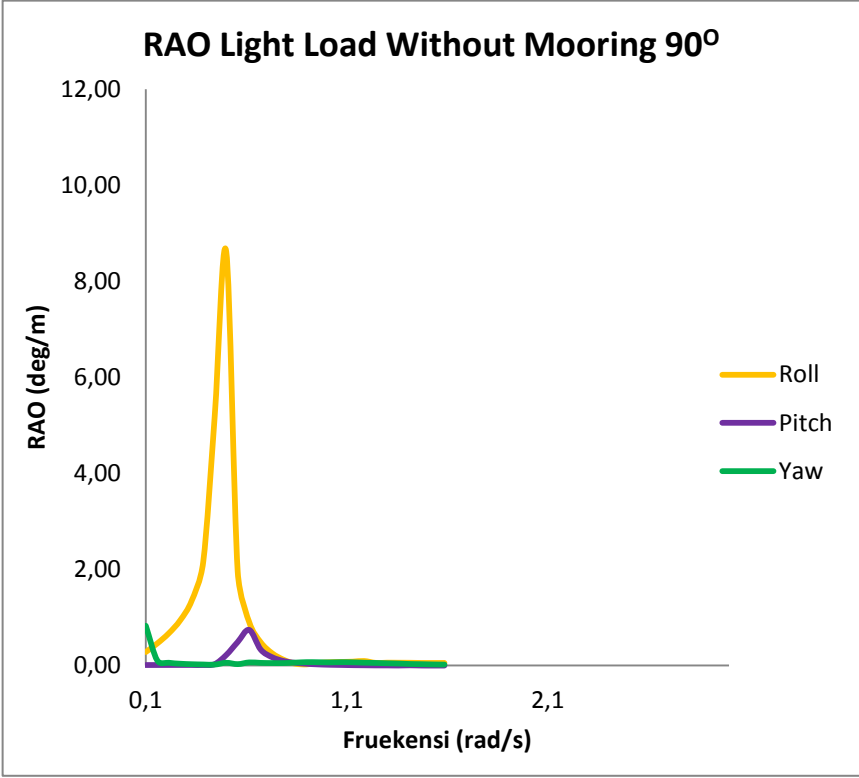
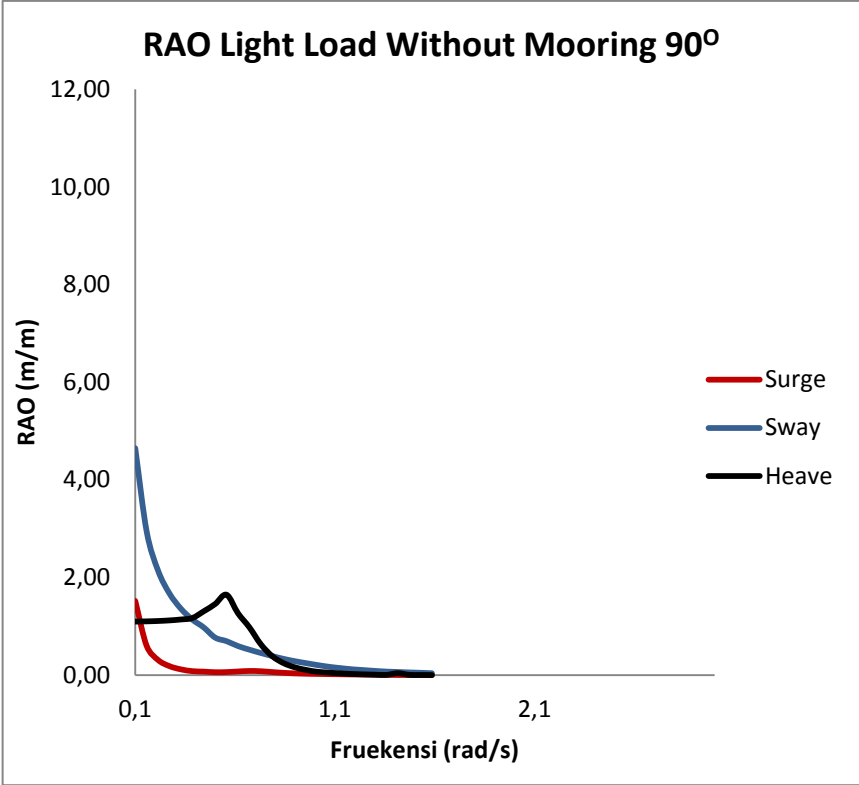
RESPON AMPLITUDO OPERATOR
STRUKTUR SAAT FREE FLOATING

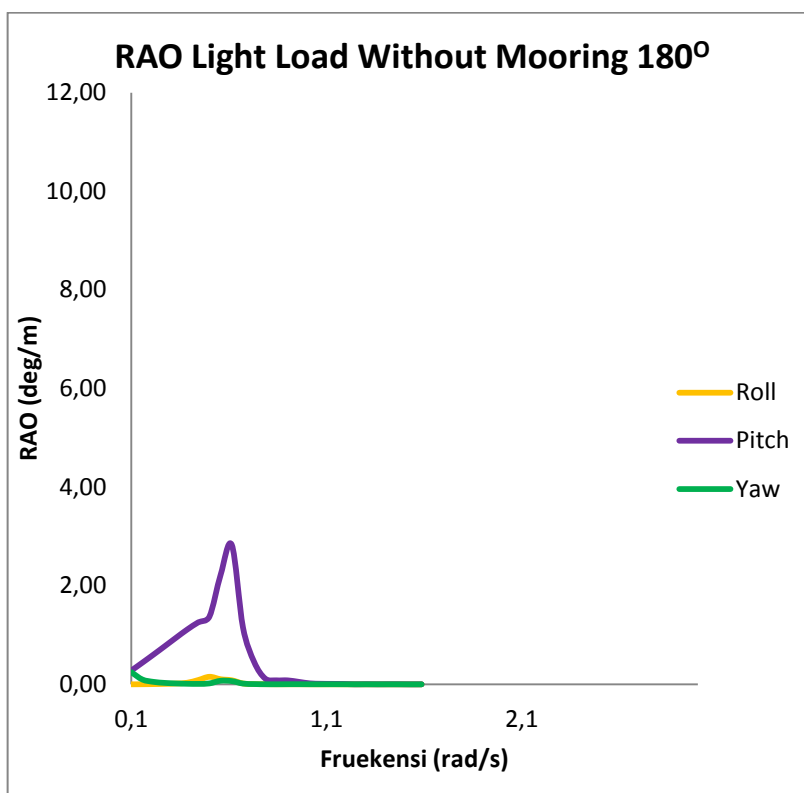
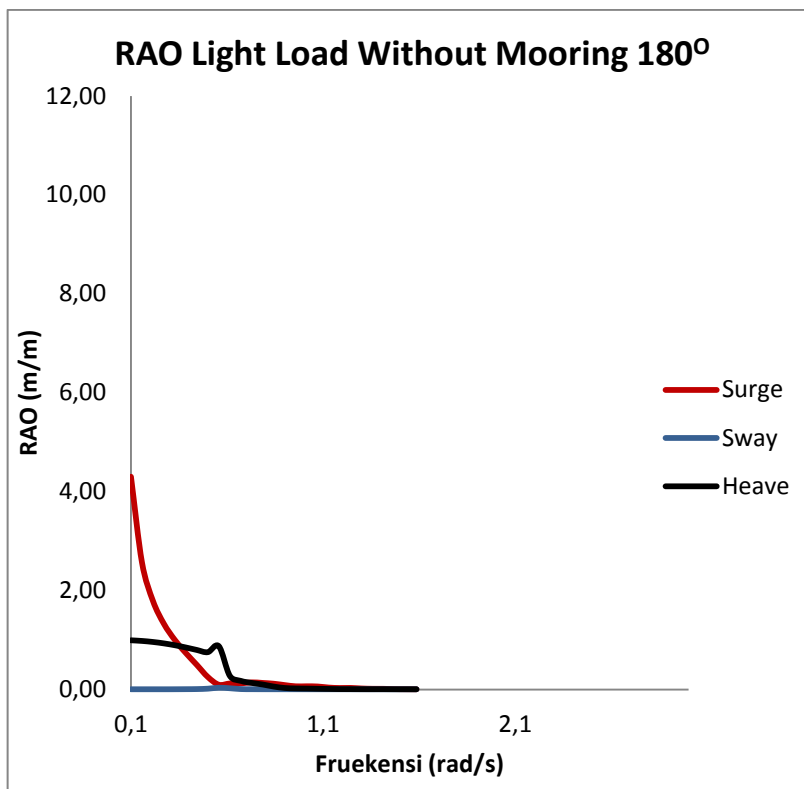
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

FSO Arco Ardjuna

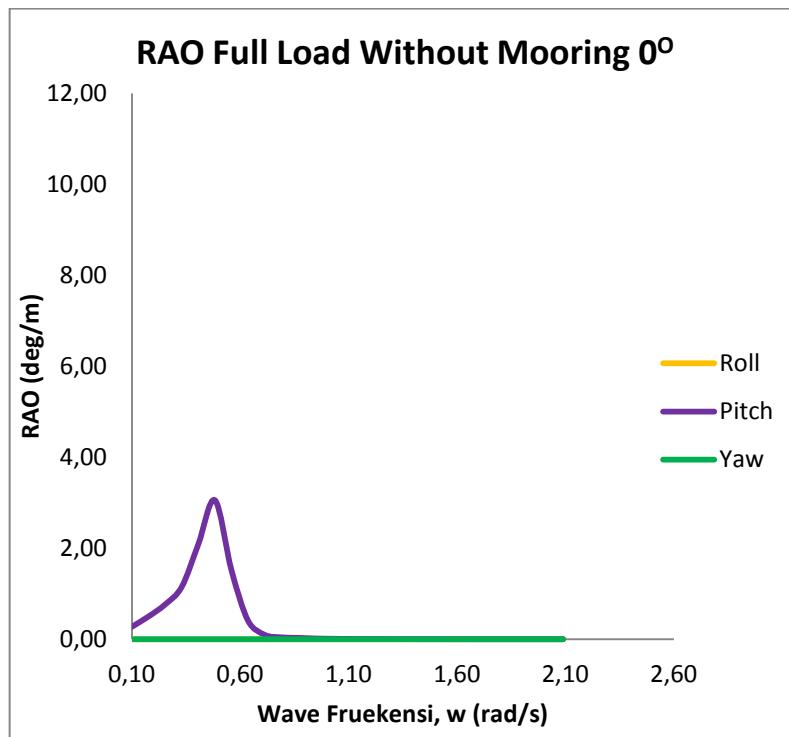
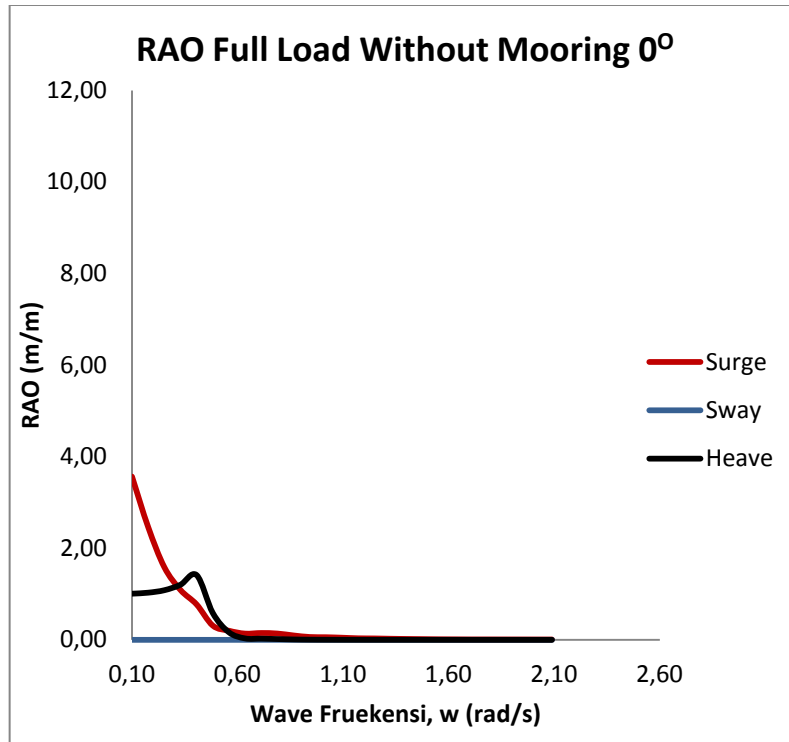
- *Light Load Condition*

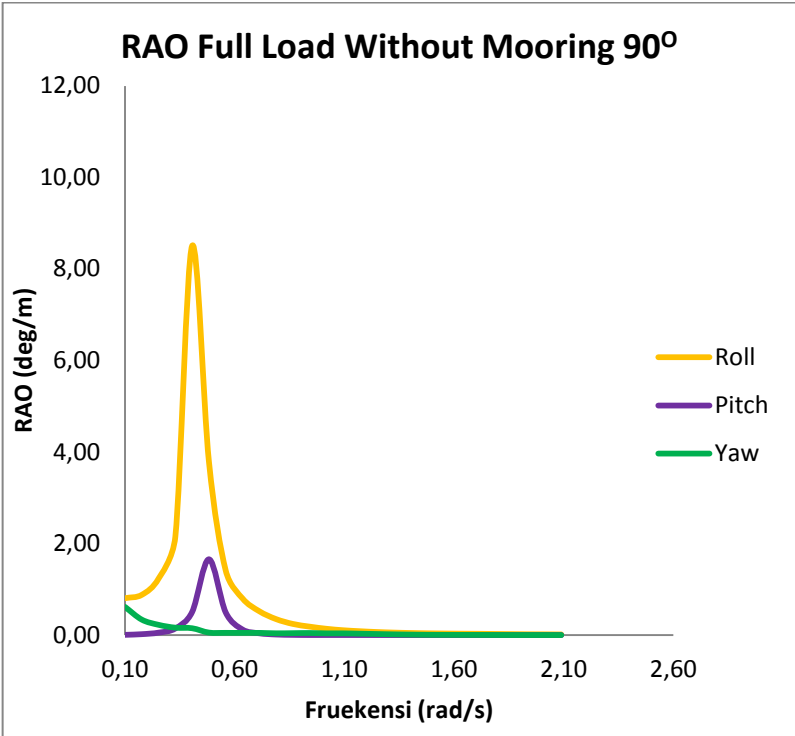
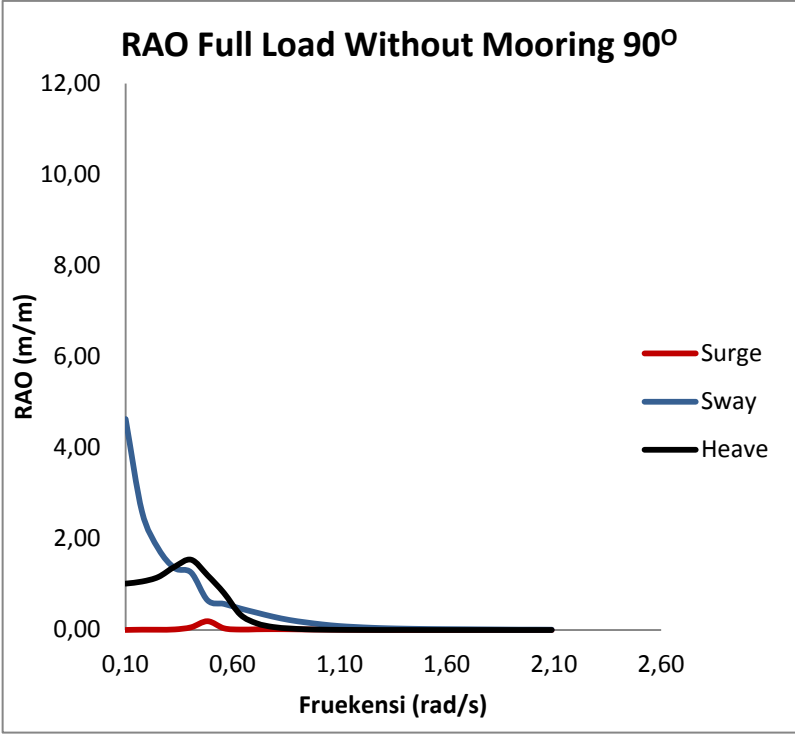


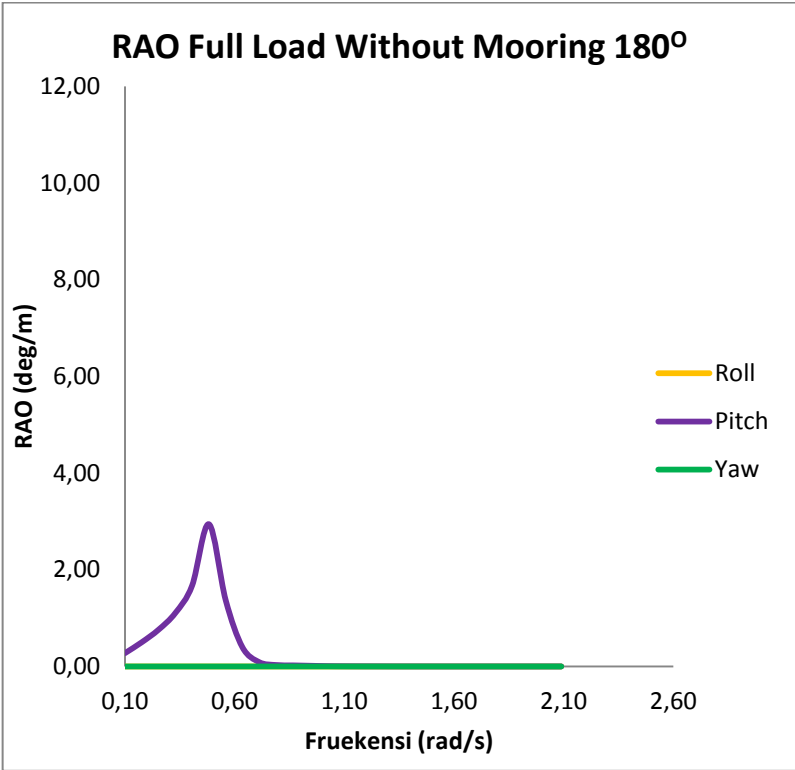
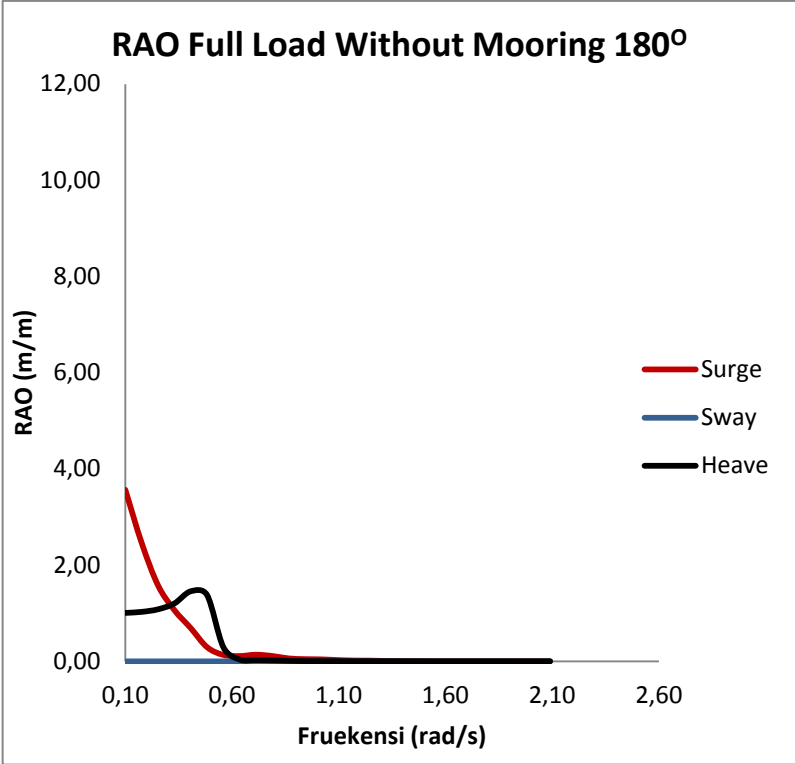




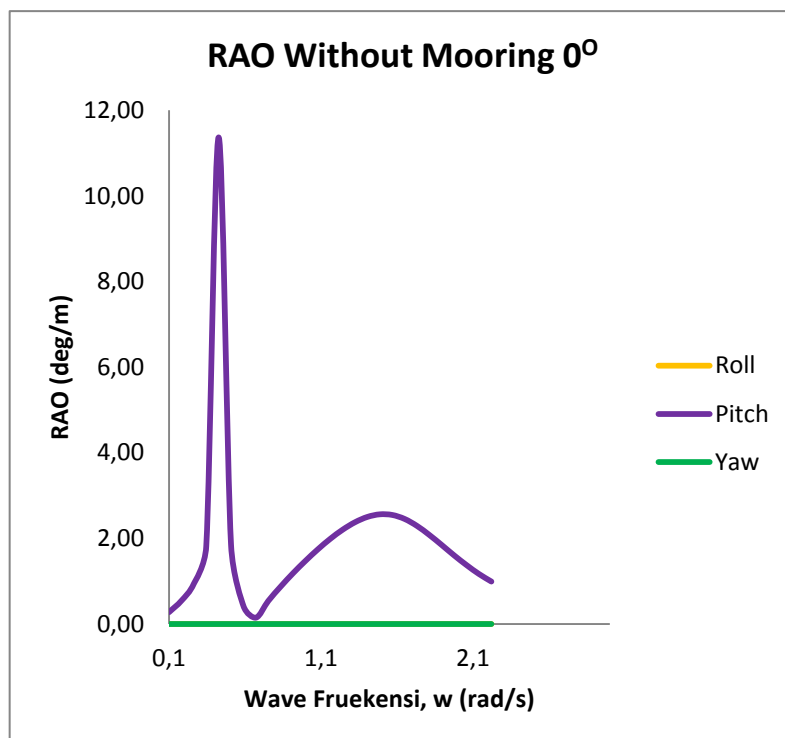
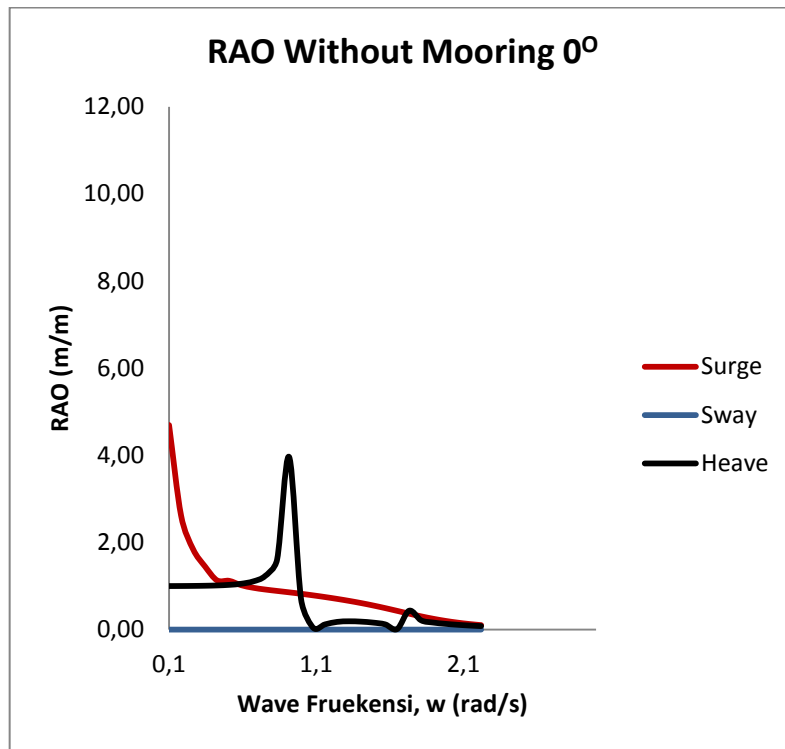
- *Full Load Condition*

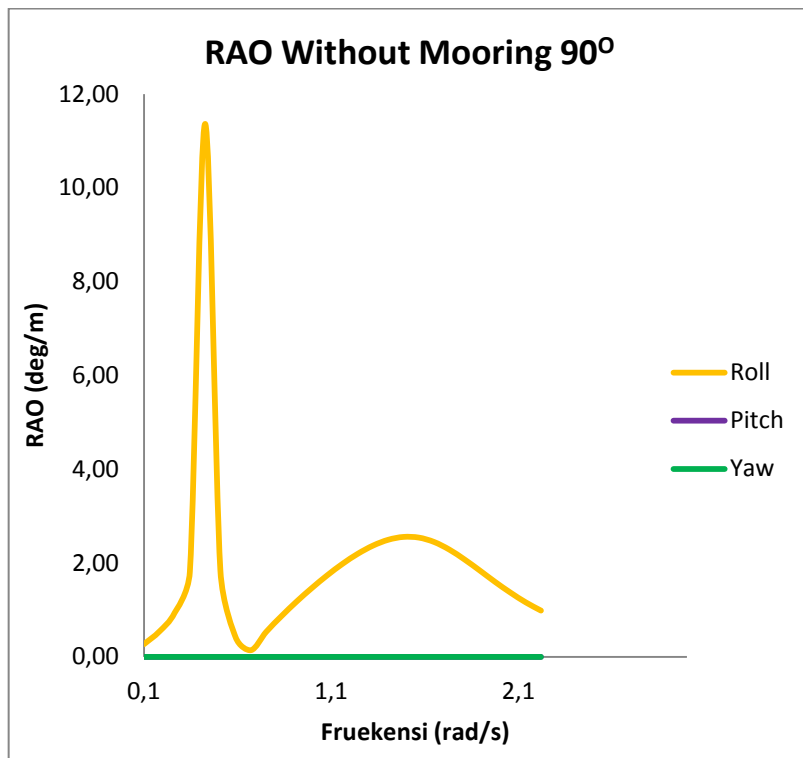
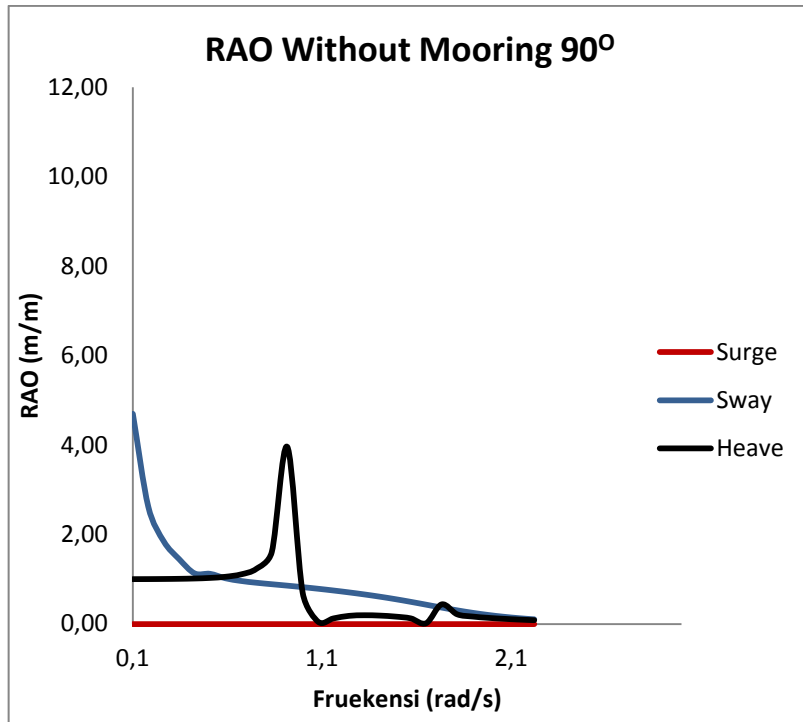


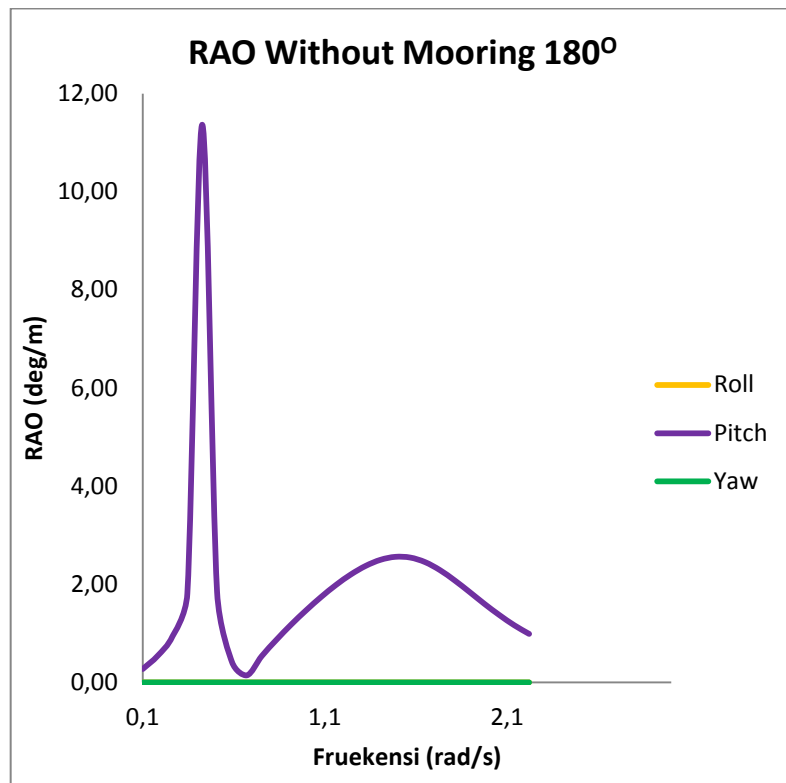
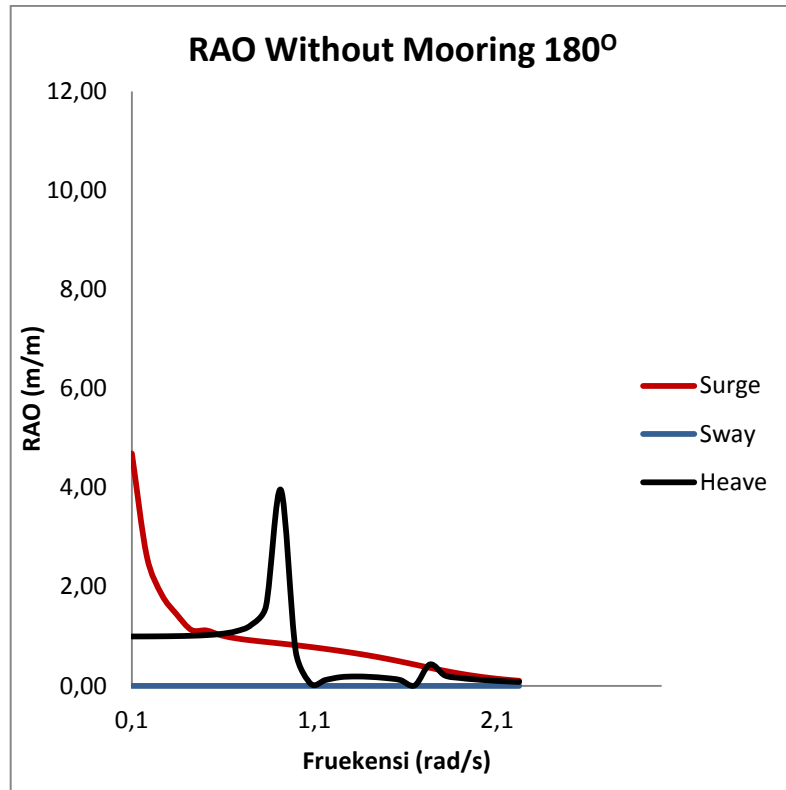




Single Point Mooring

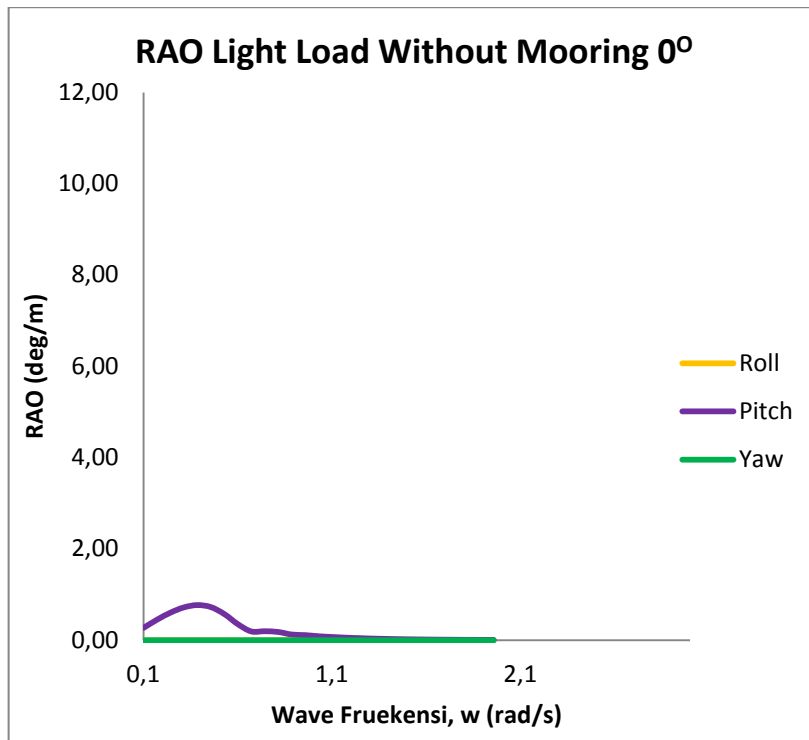
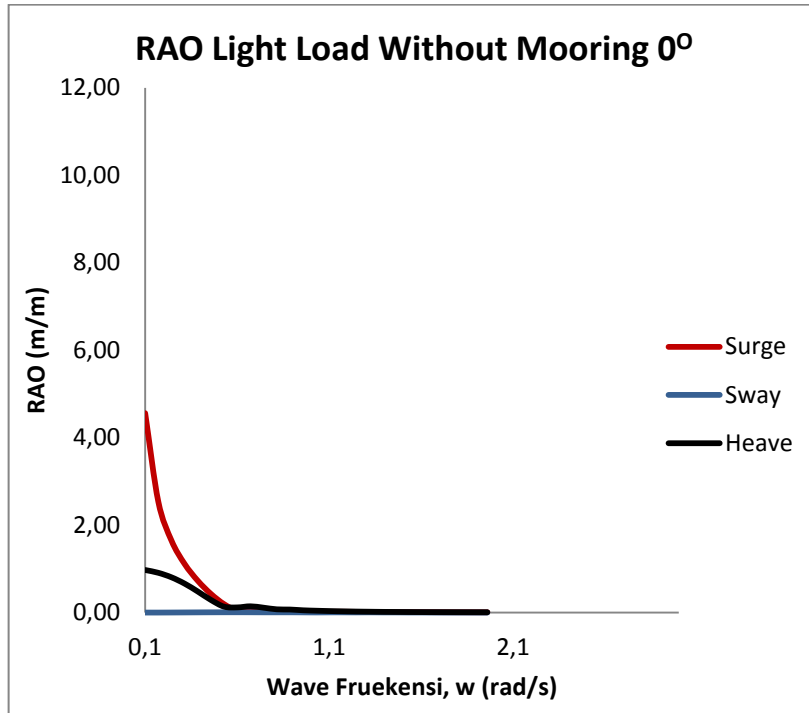


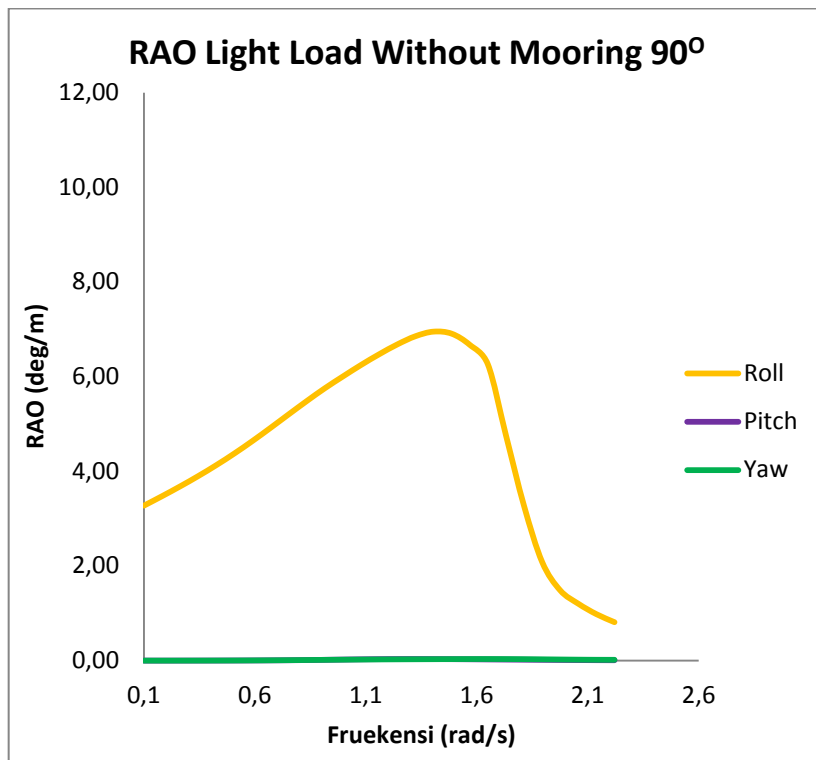
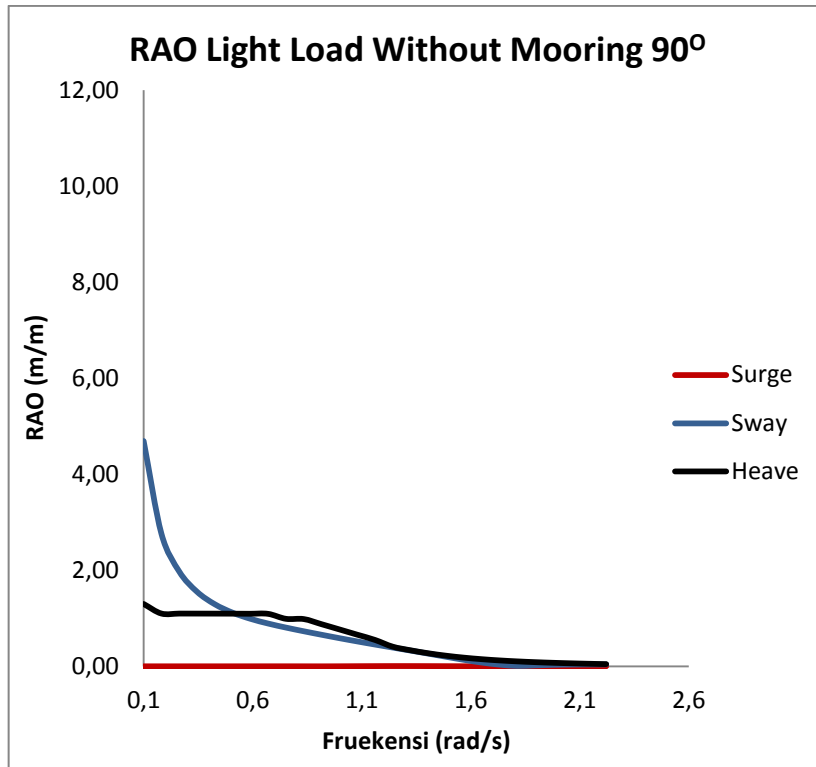


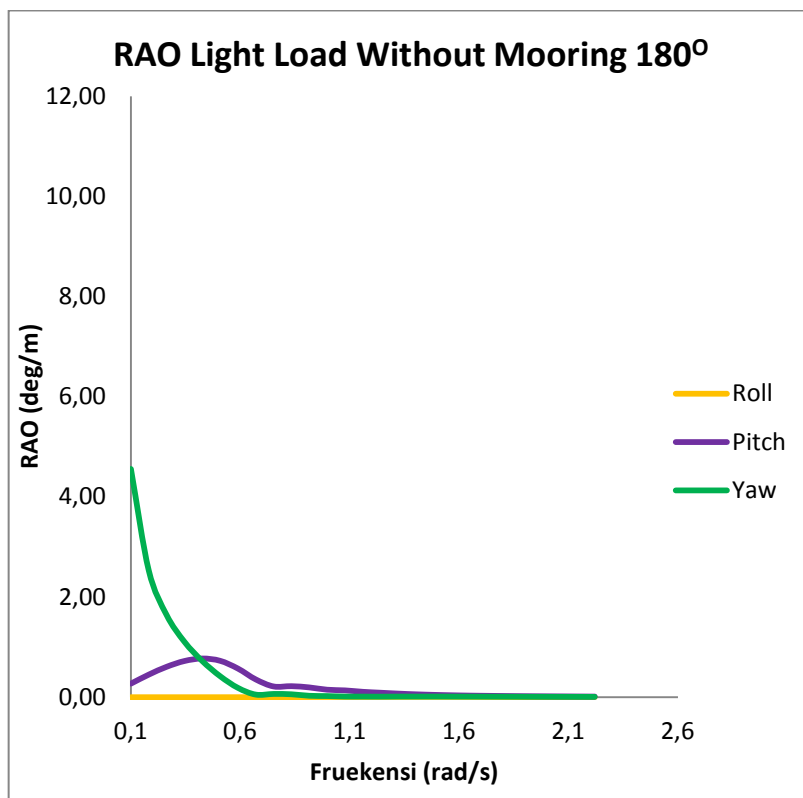
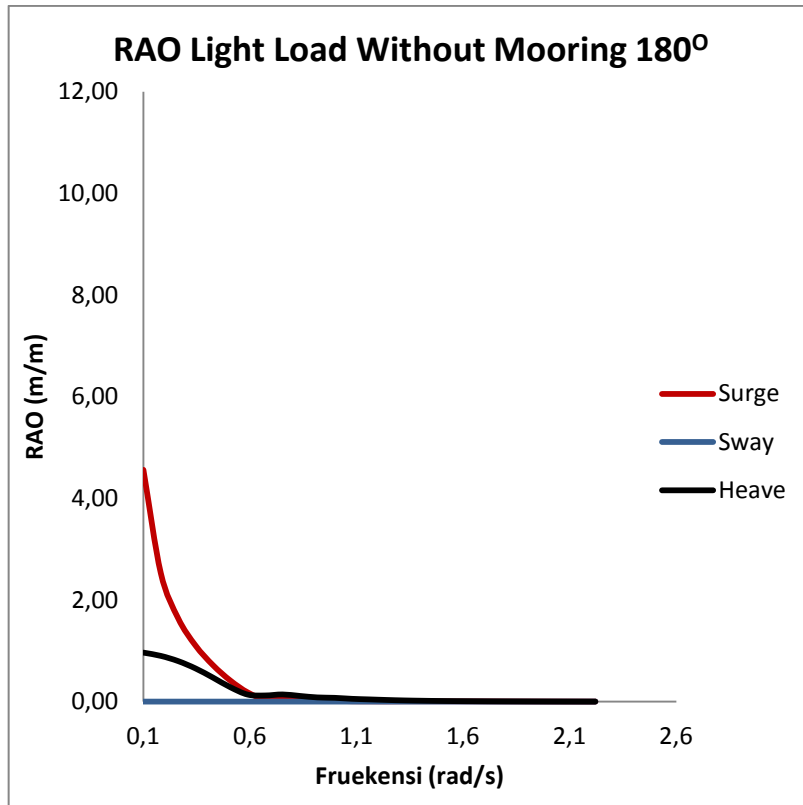


Shuttle Tanker

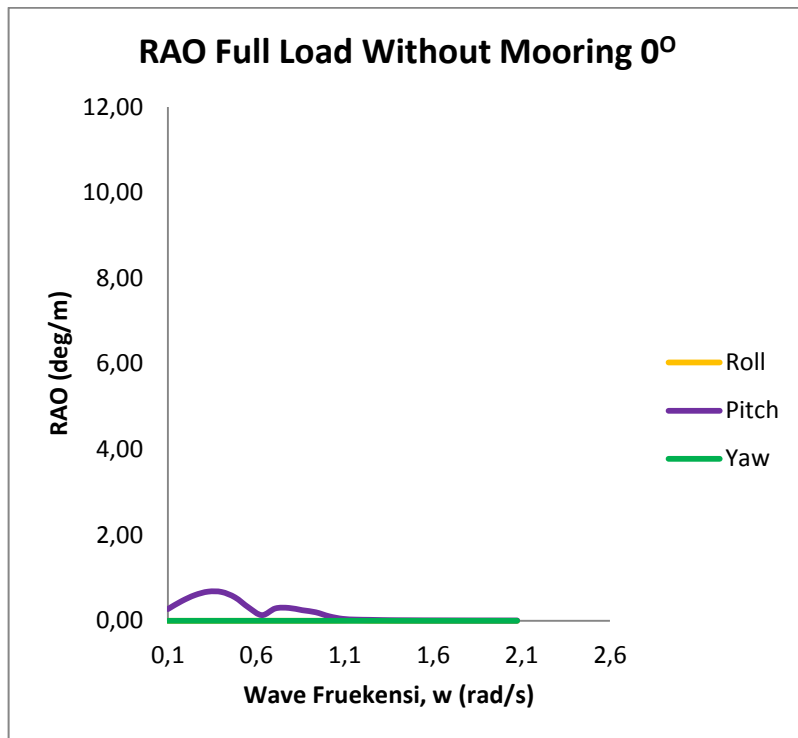
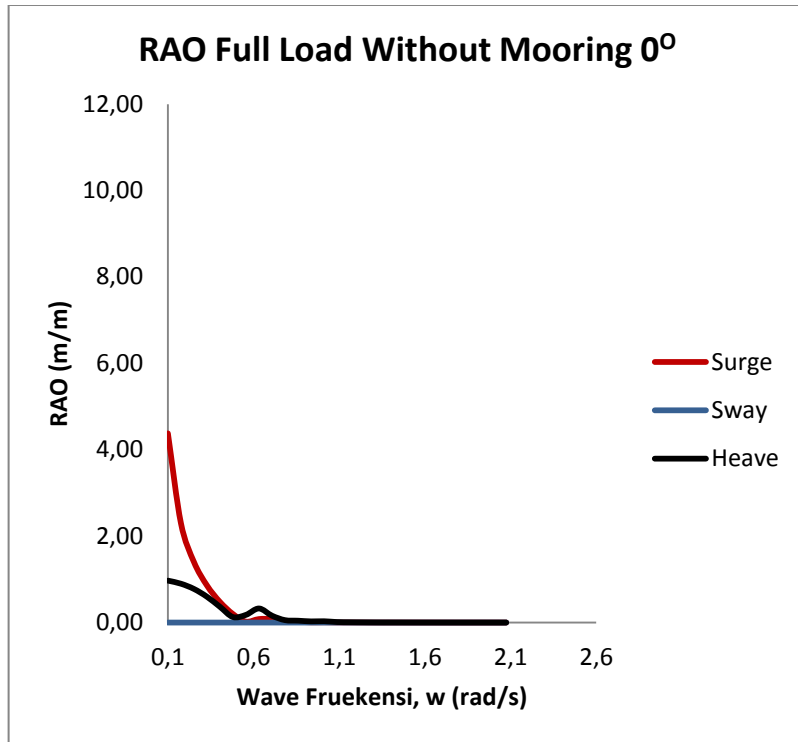
- *Light Load Condition*

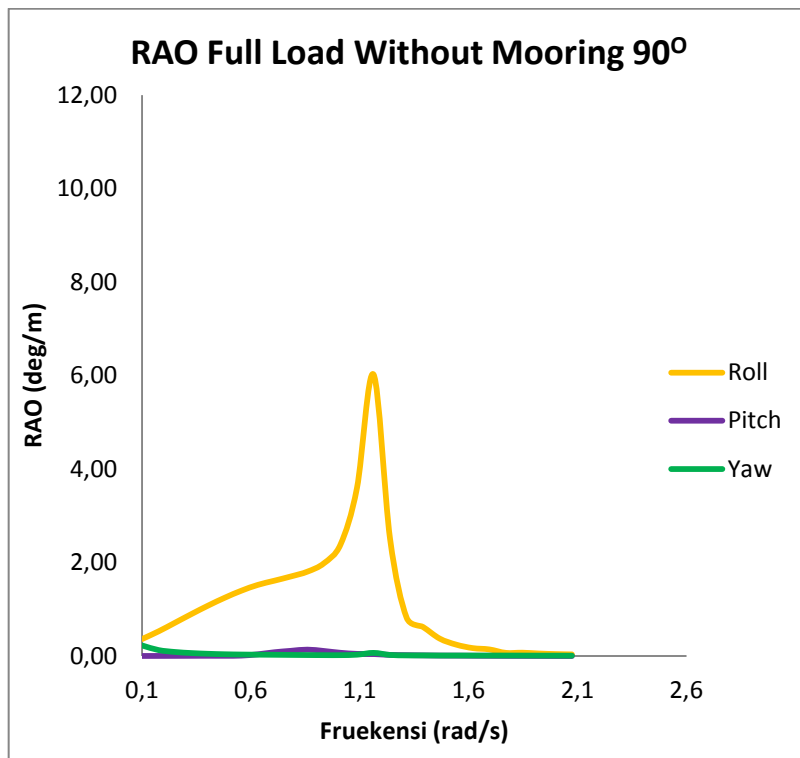
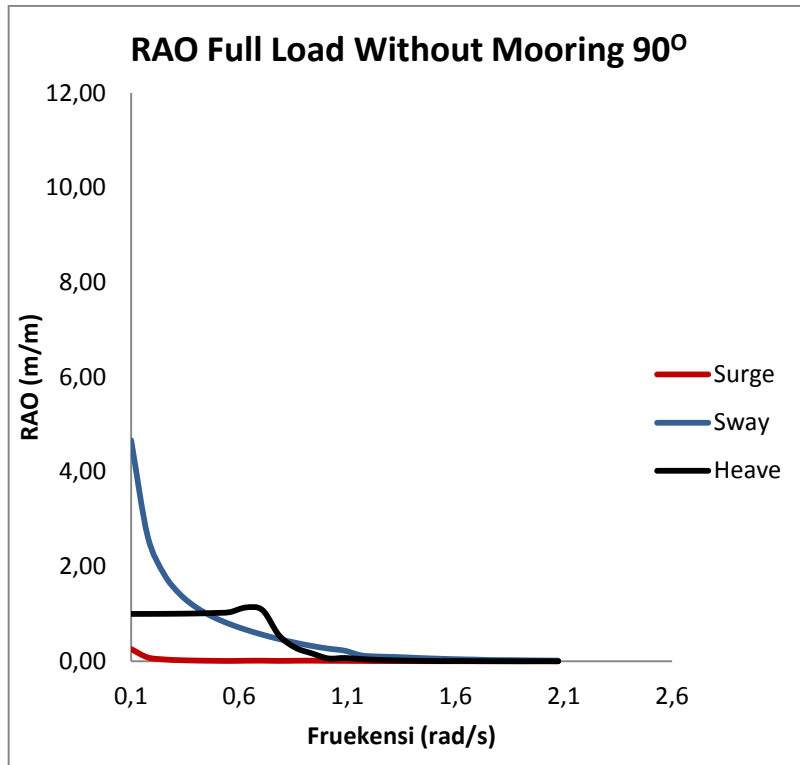


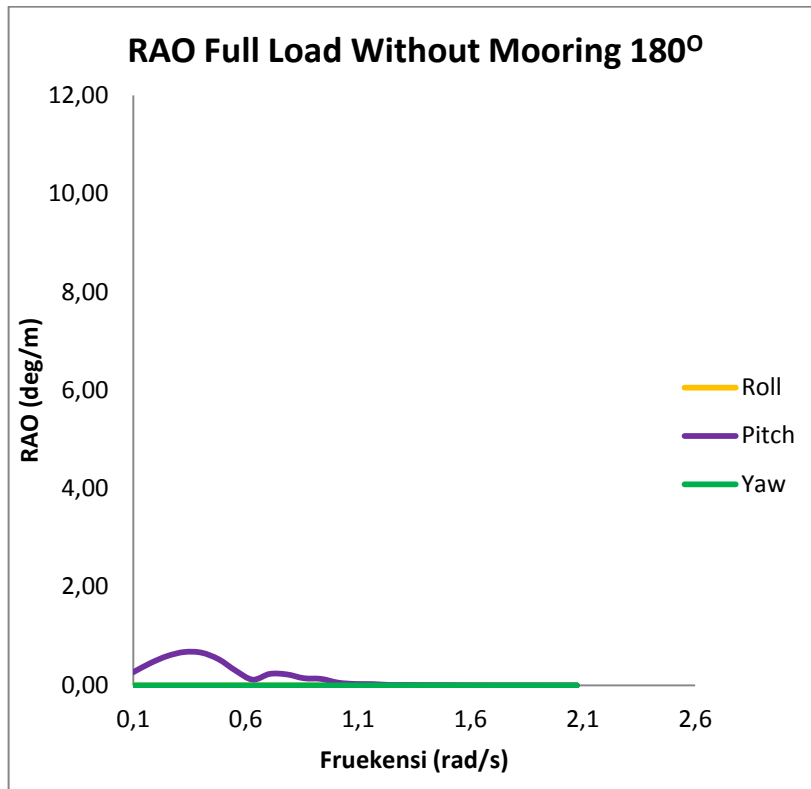
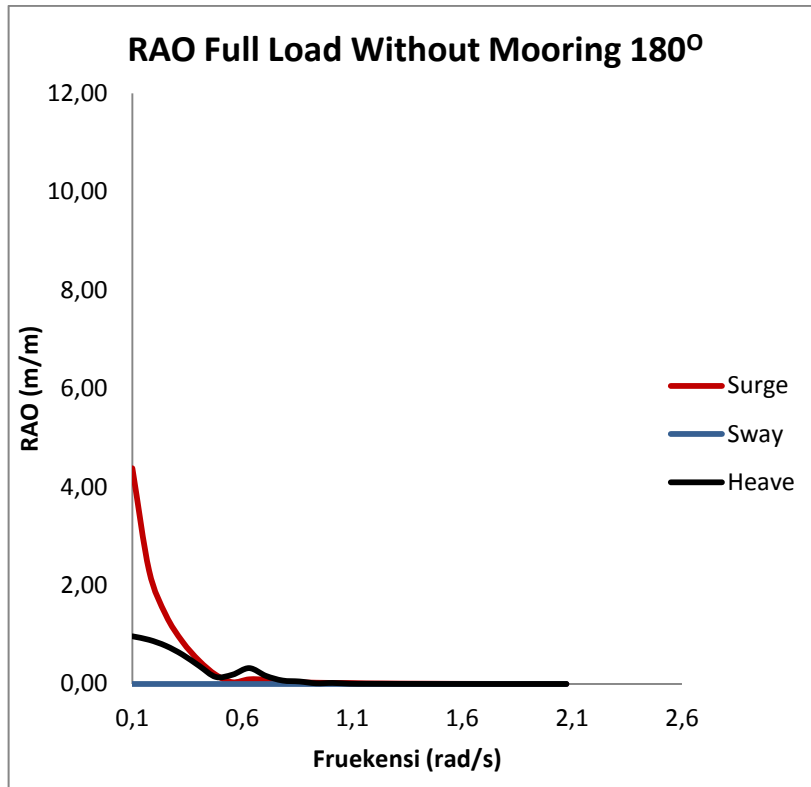




- *Full Load Condition*





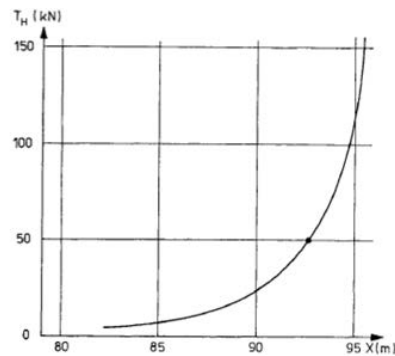


(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN B
PERHITUNGAN

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

Perhitungan Jarak Antara Jangkar Dengan SPM



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

$$l = 350 \text{ m} \quad T = 7051000 \text{ N} = 719001.9 \text{ kg}$$

$$h = 45 \text{ m} \quad w = 182.72 \text{ kg/m}$$

$$a = \frac{T}{w} = \frac{719001.9 \text{ kg}}{182.72 \text{ kg/m}} = 3934.993 \text{ m}$$

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

$$X = 350 - 45^2 \sqrt{\left(1 + 2 \frac{3934.993}{45}\right)} + 3934.993 \cosh^{-1}\left(1 + \frac{45}{3934.993}\right)$$

$$X = 304.43 \text{ m}$$

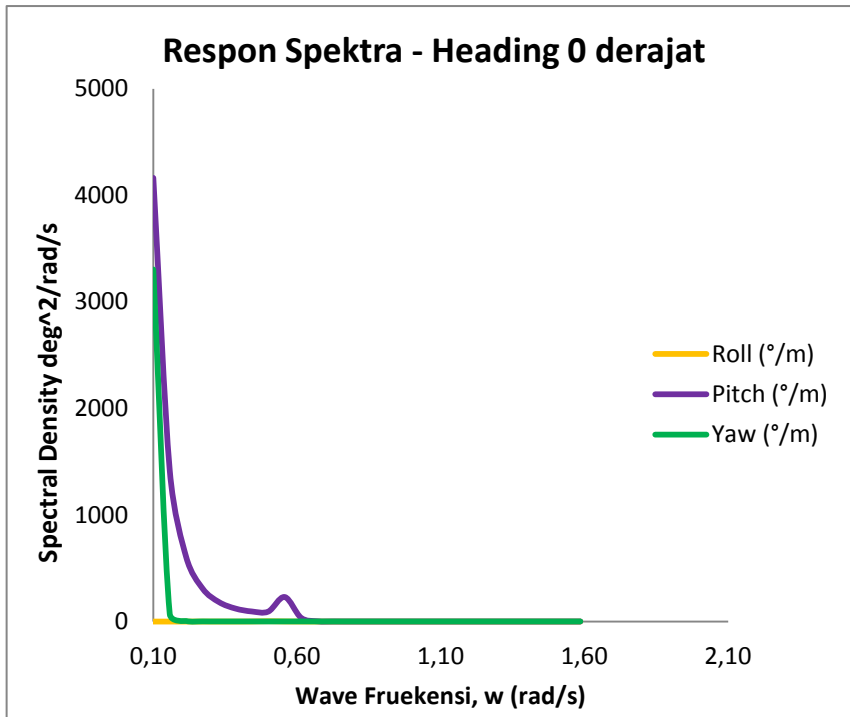
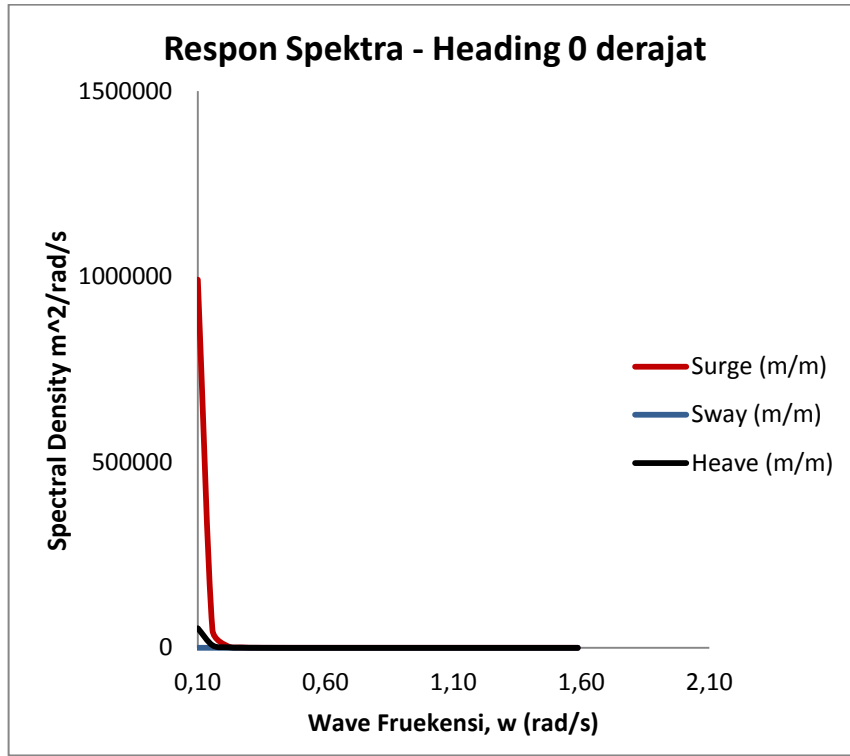
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

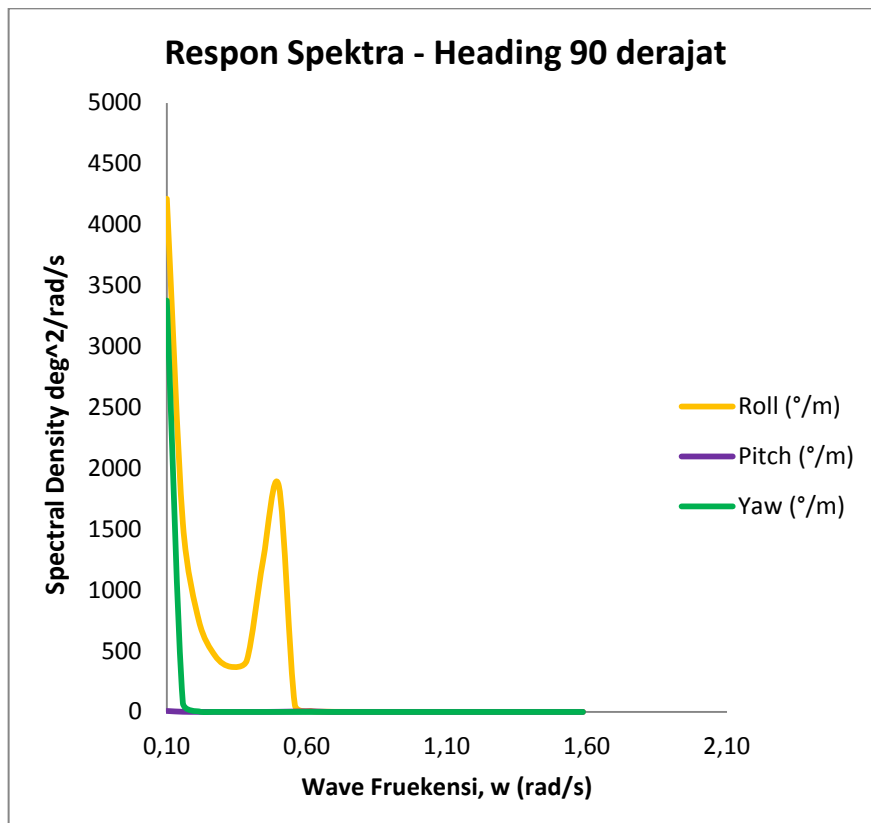
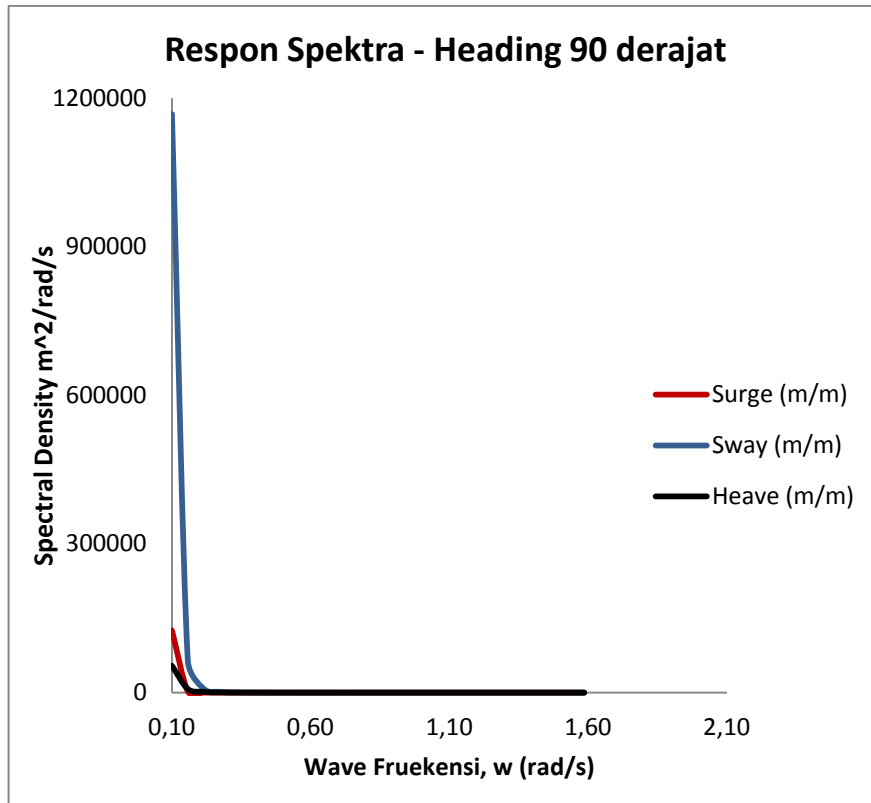
LAMPIRAN C
RESPON SPEKTRA STRUKTUR SAAT
FREE FLOATING

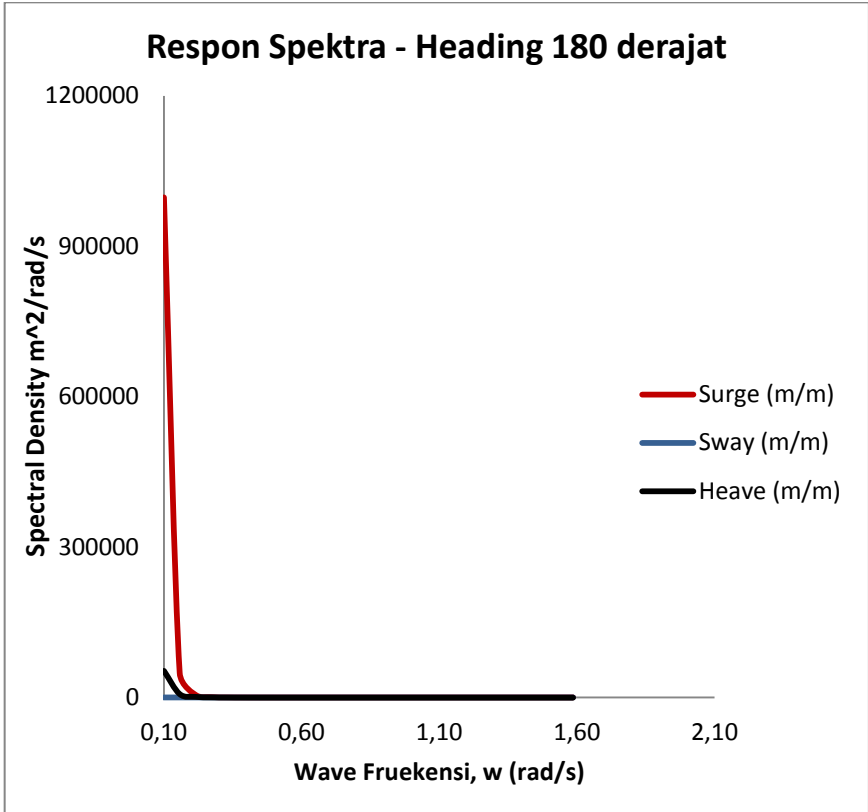
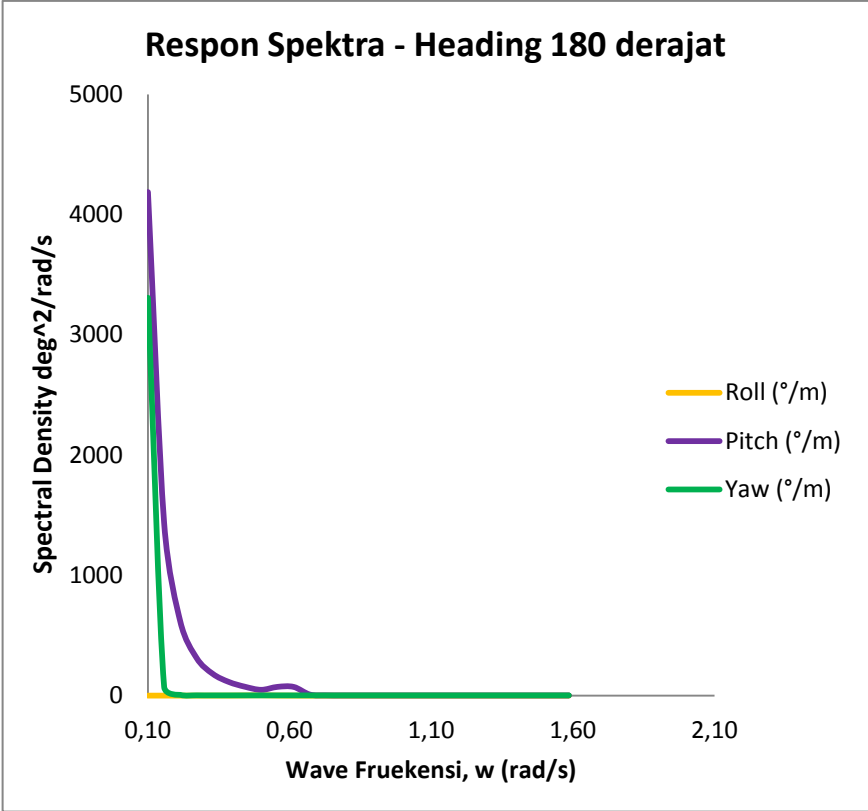
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

FSO Arco Ardjuna

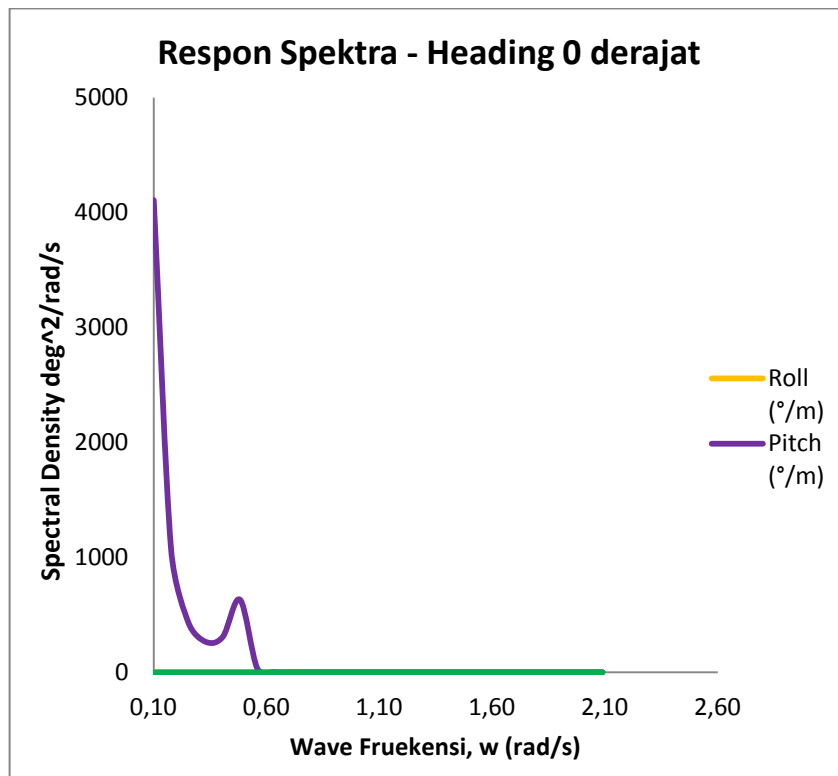
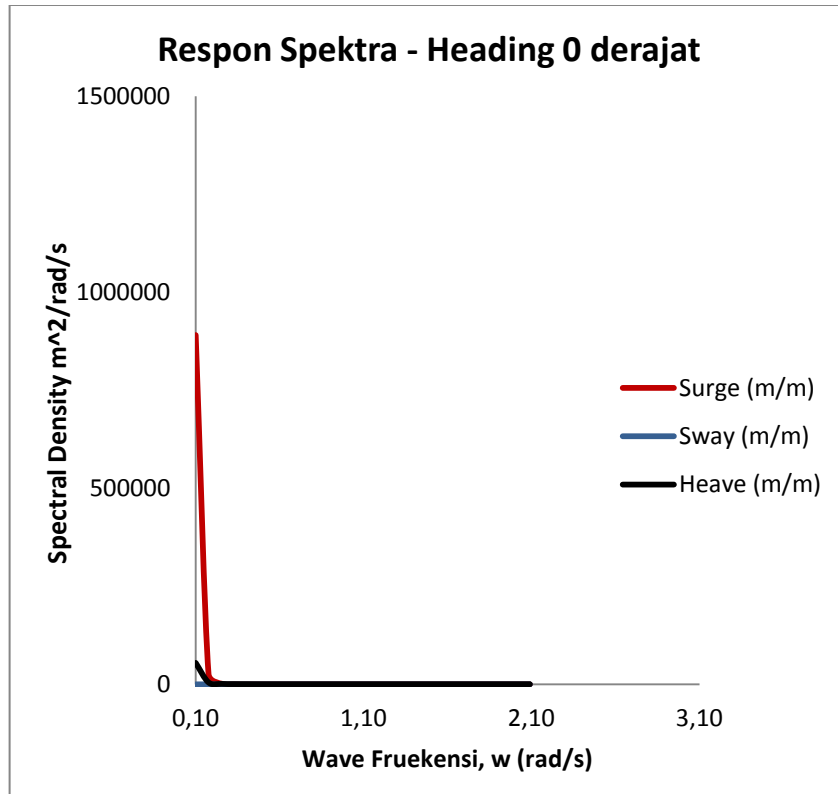
- *Light Load Condition*

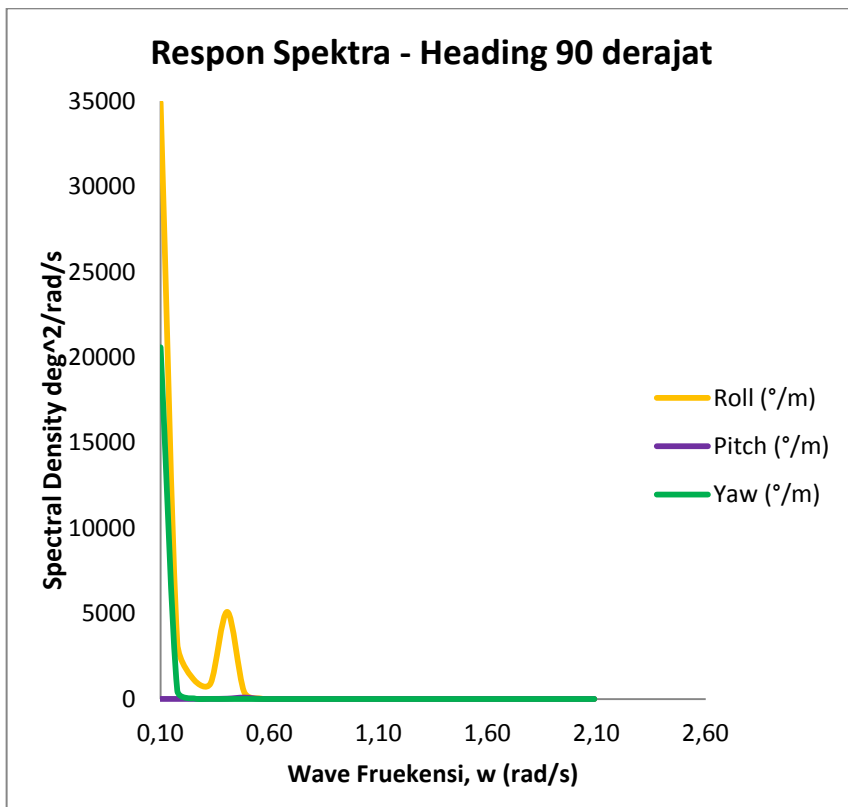
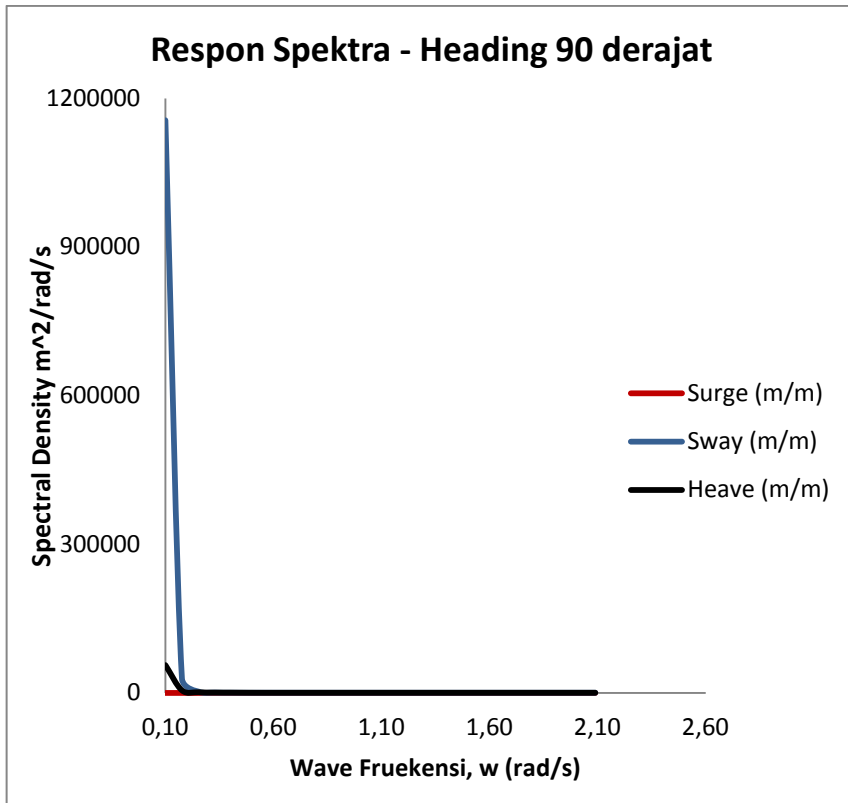


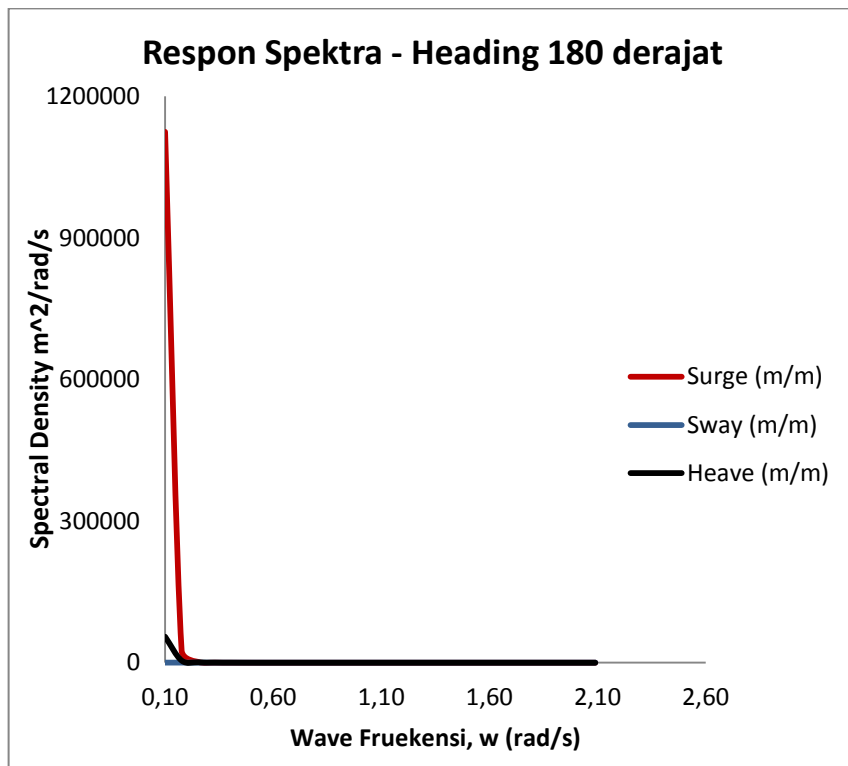
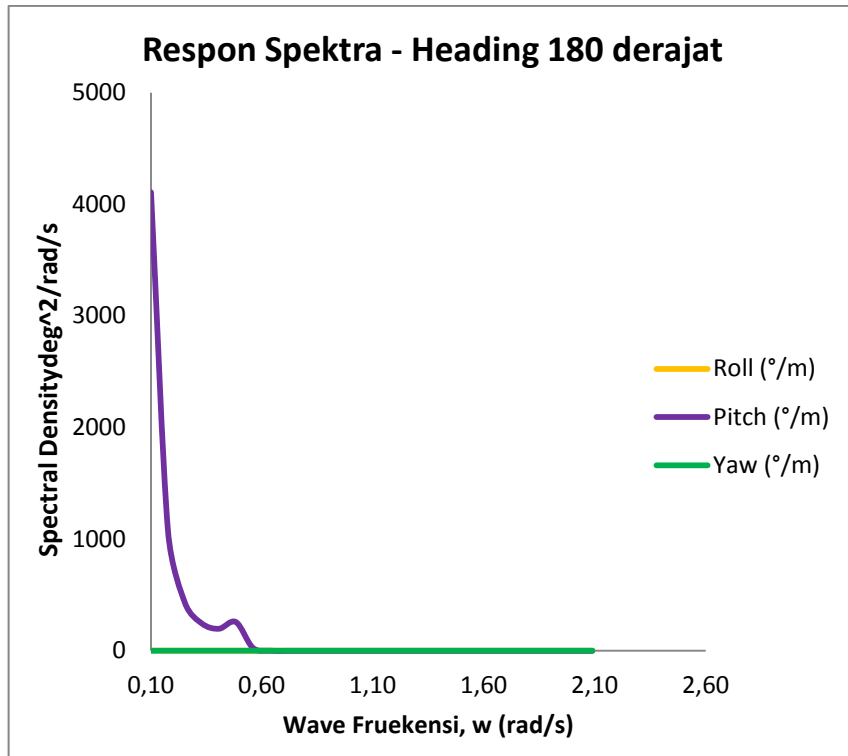




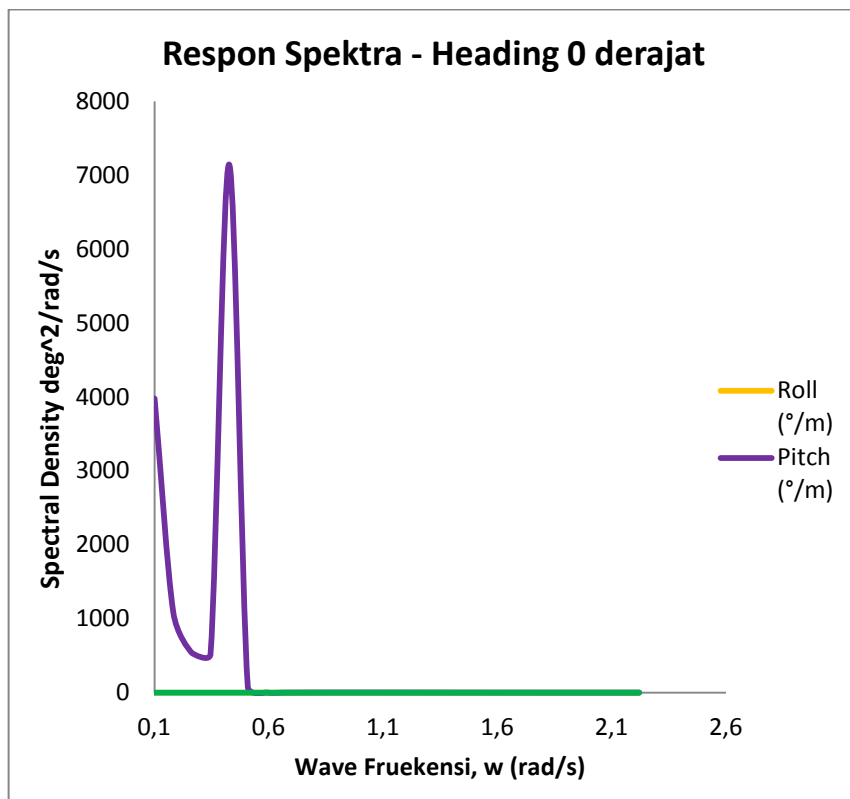
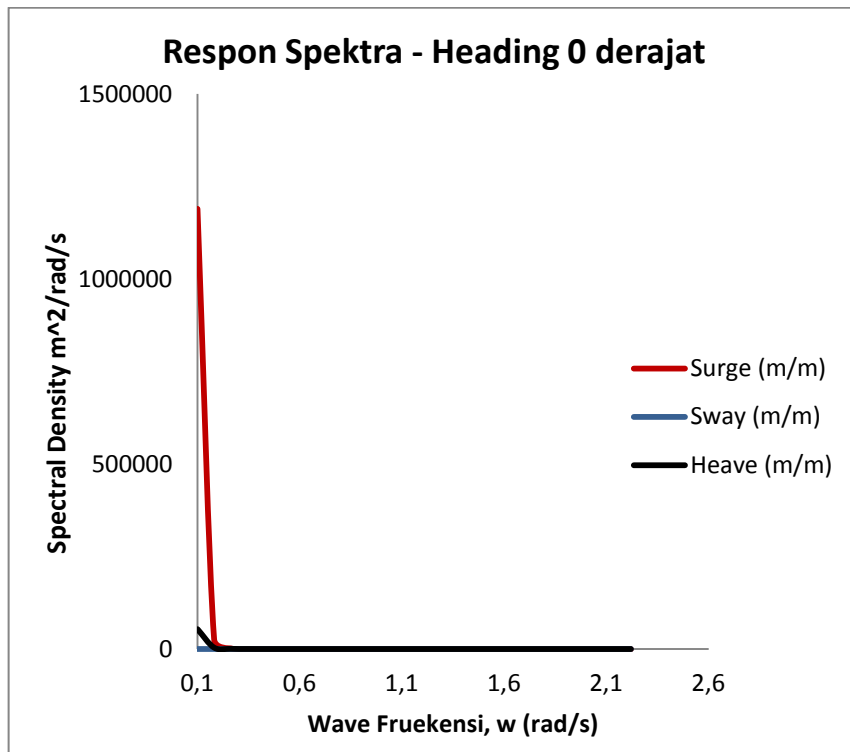
- *Full Load Condition*

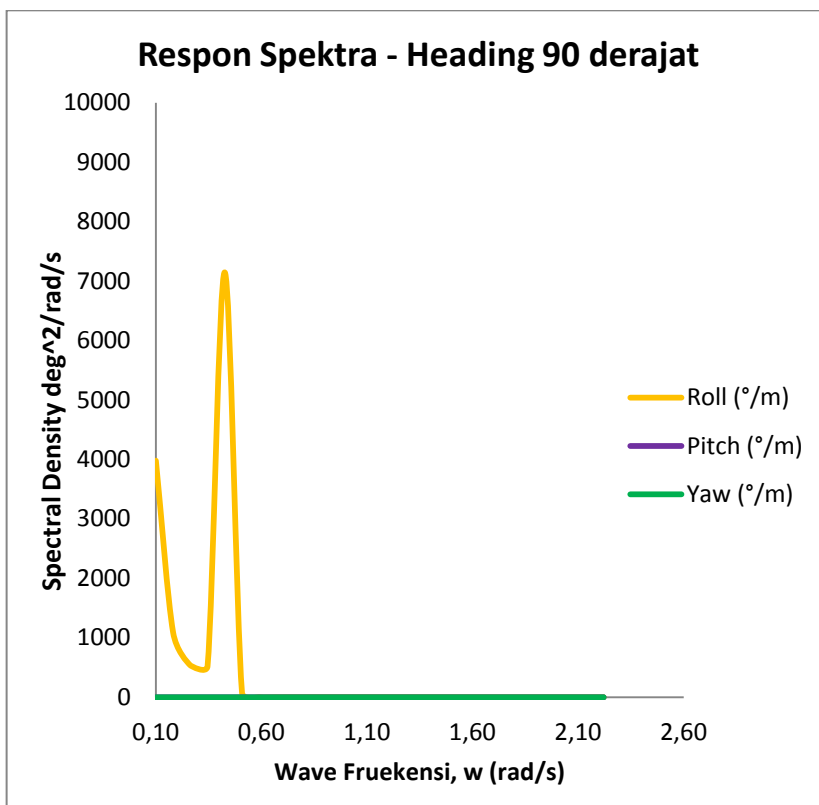
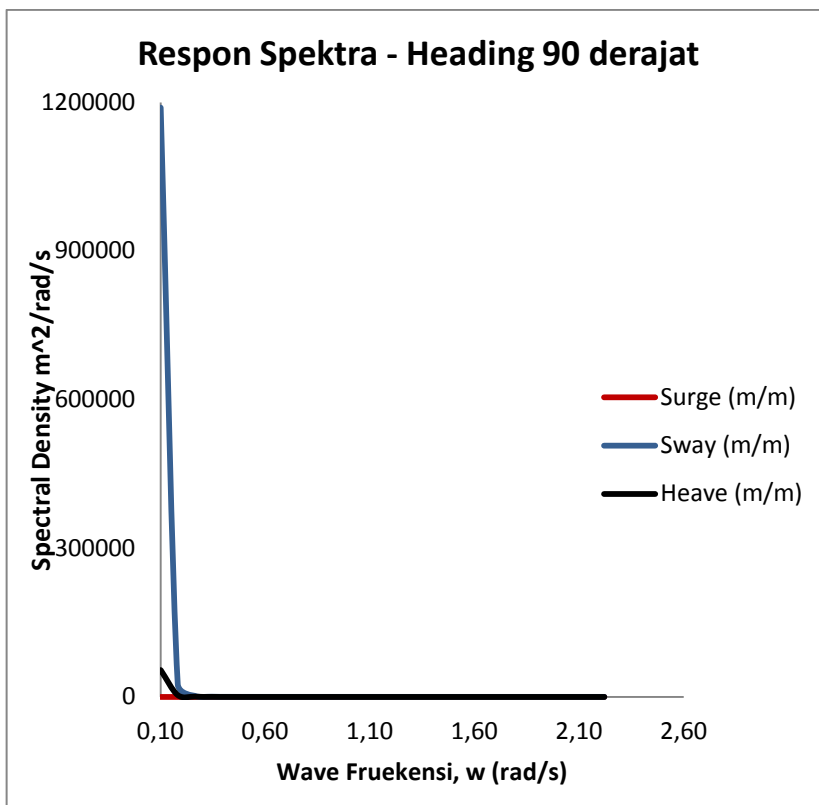


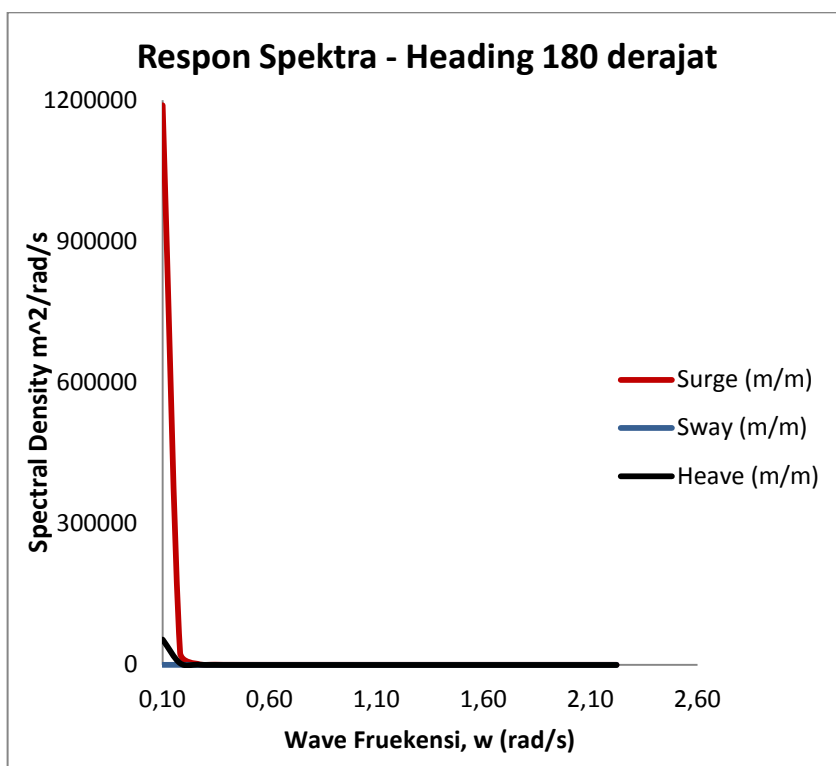
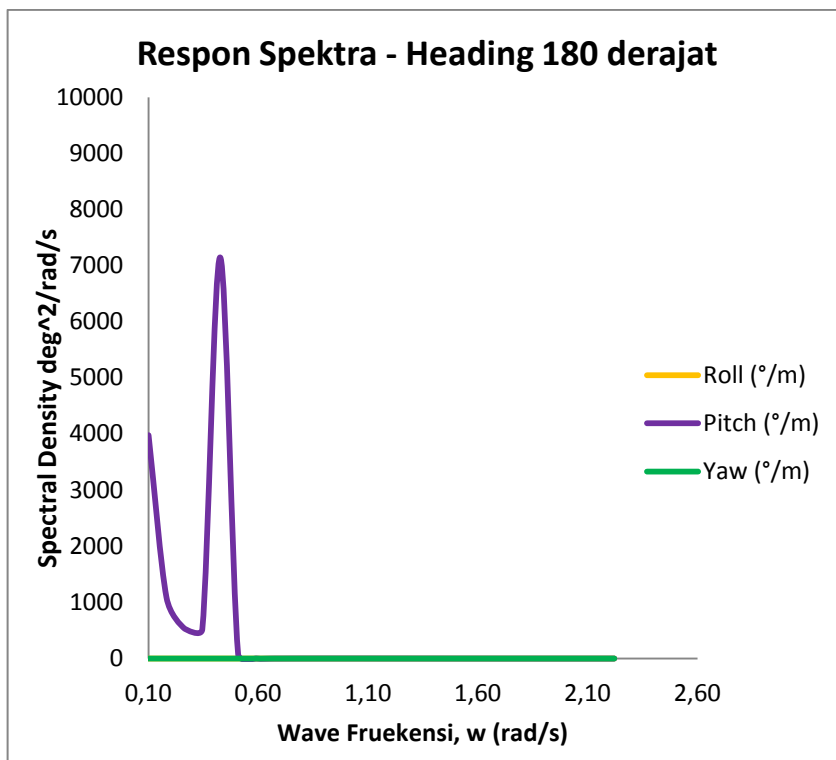




Single Point Mooring

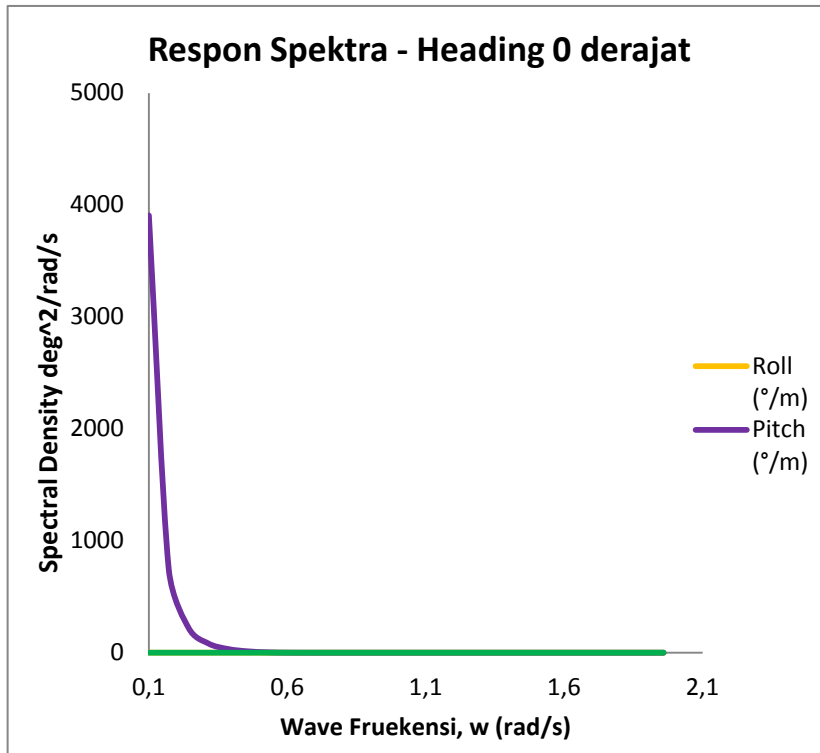
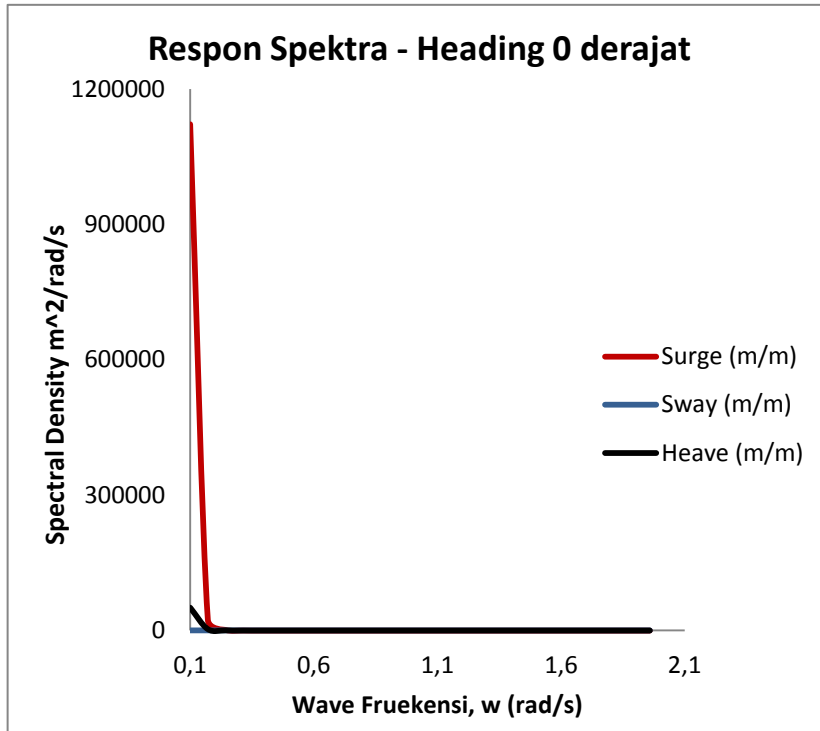


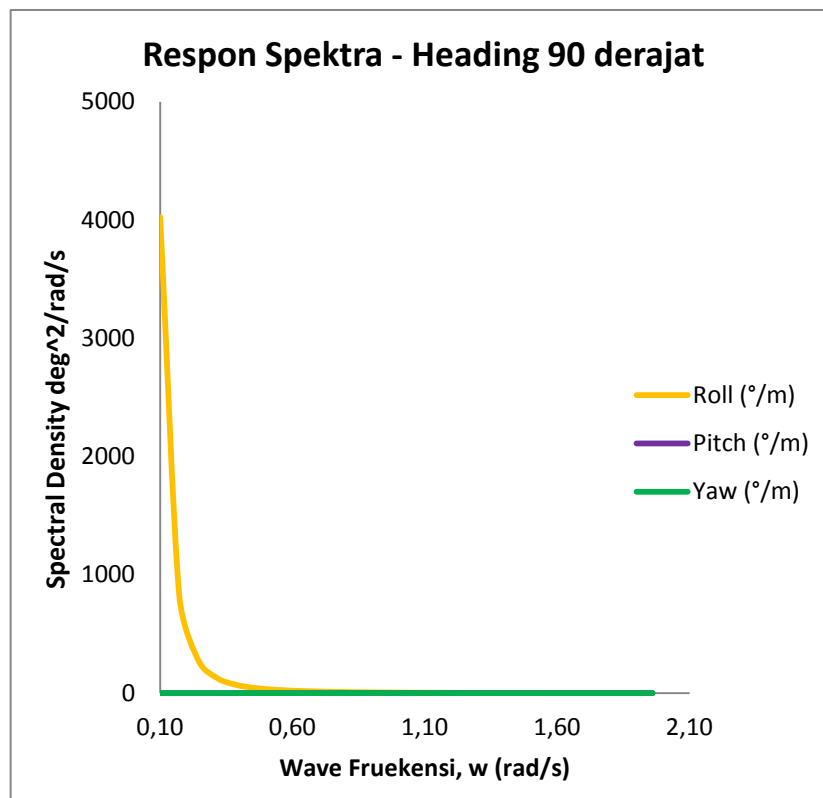
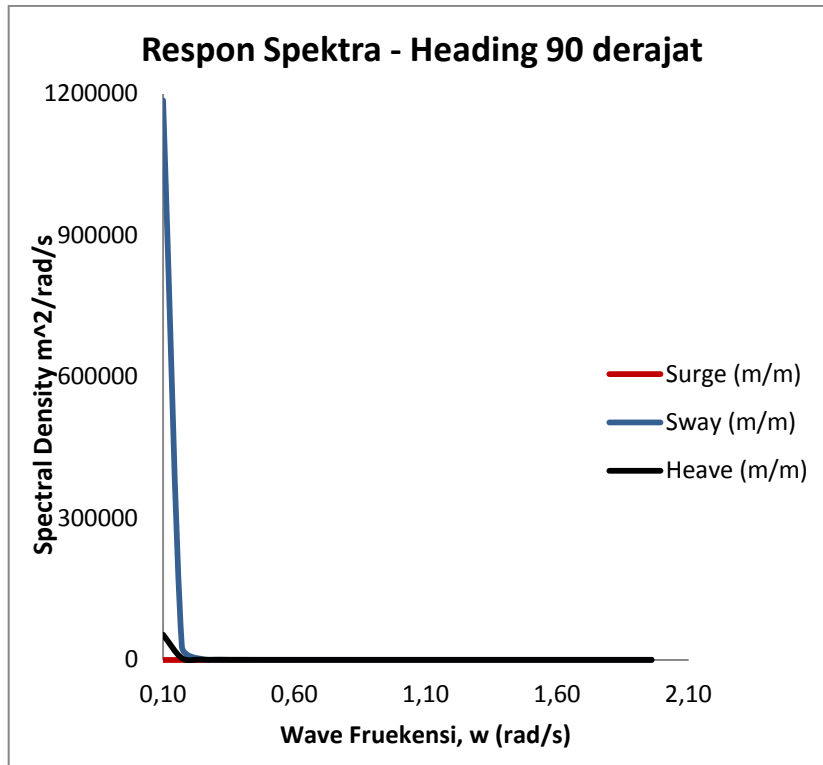


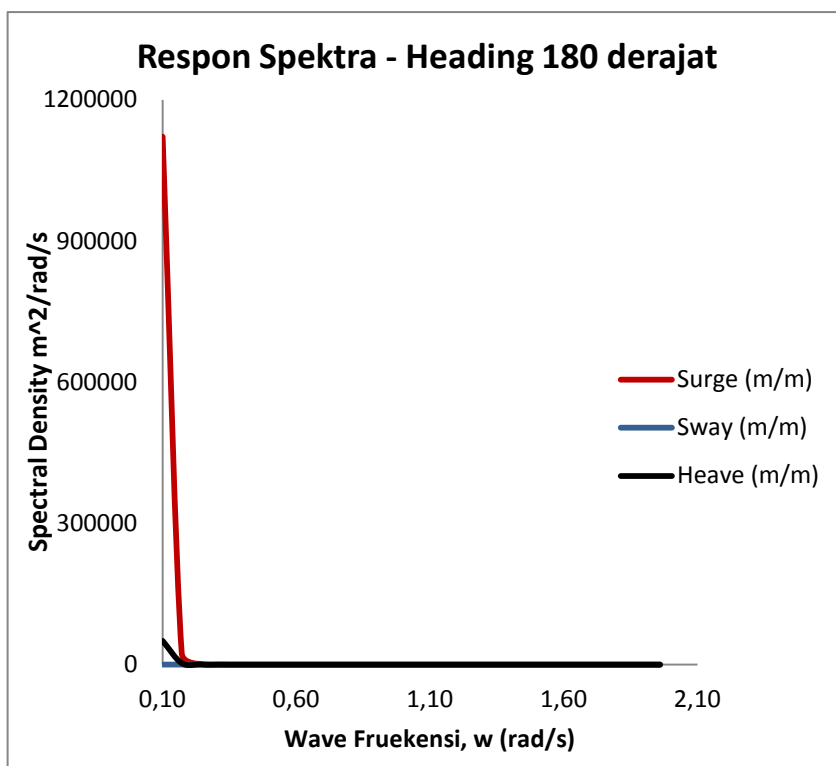
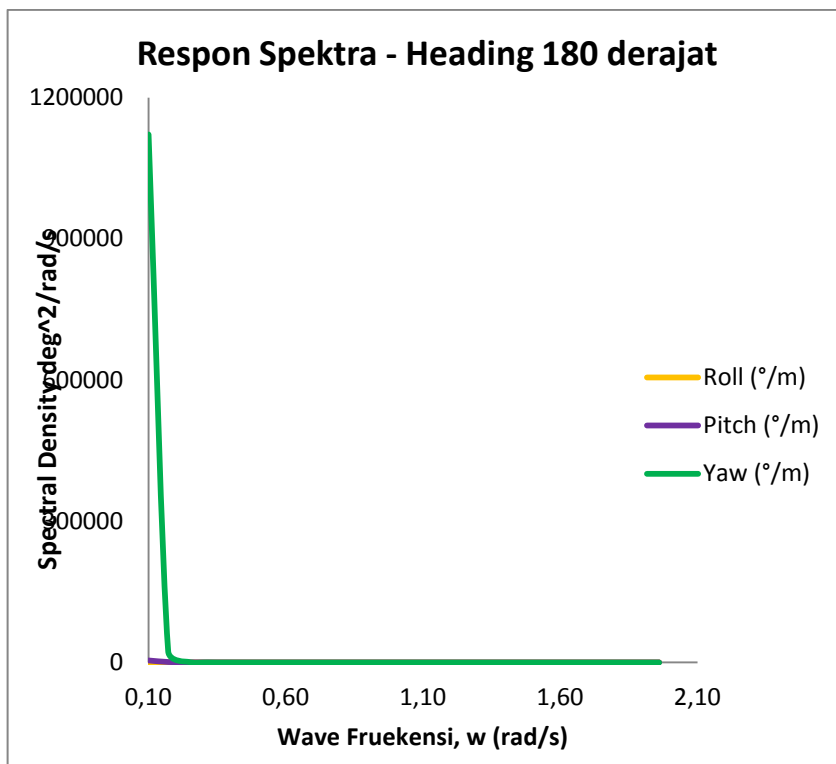


Shuttle Tanker

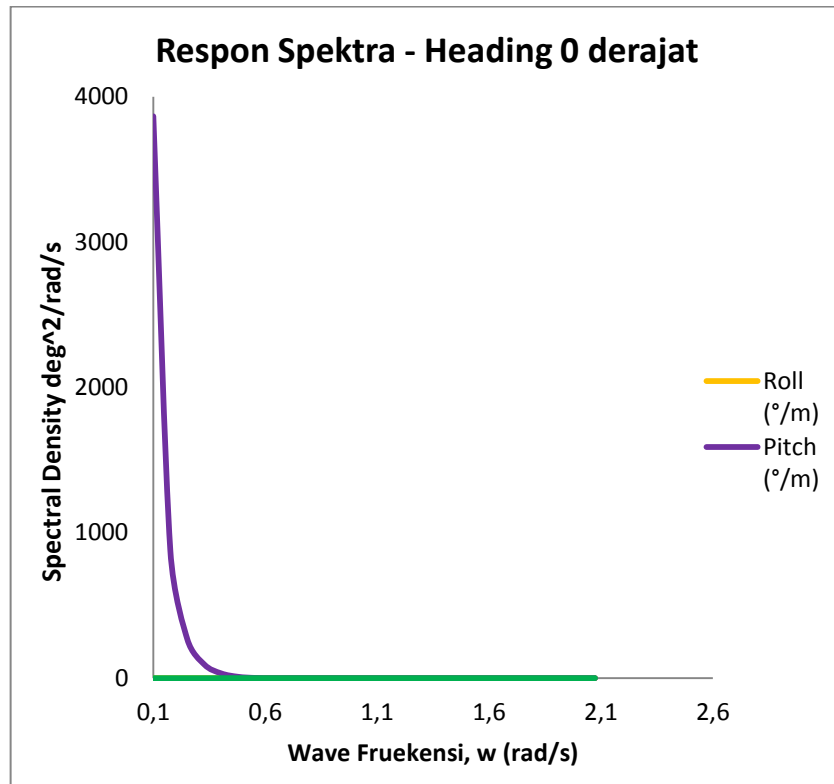
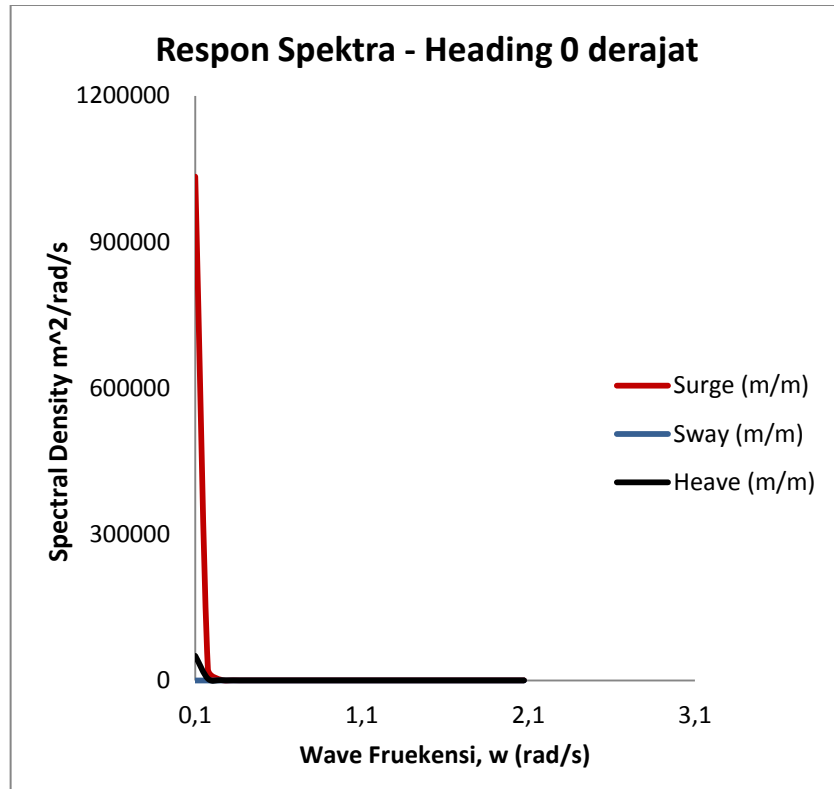
- *Light Load Condition*

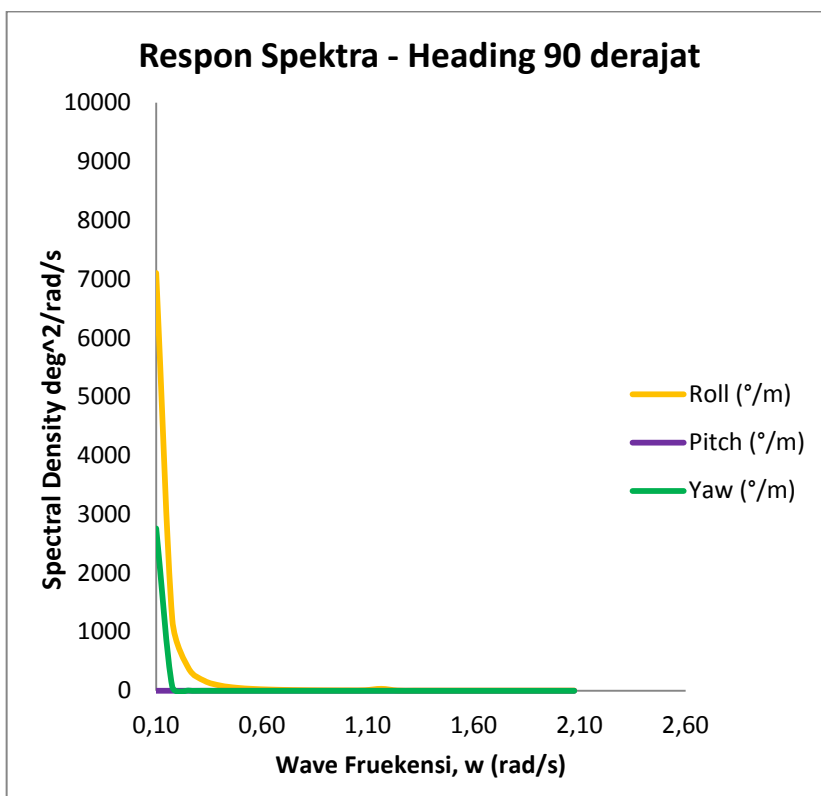
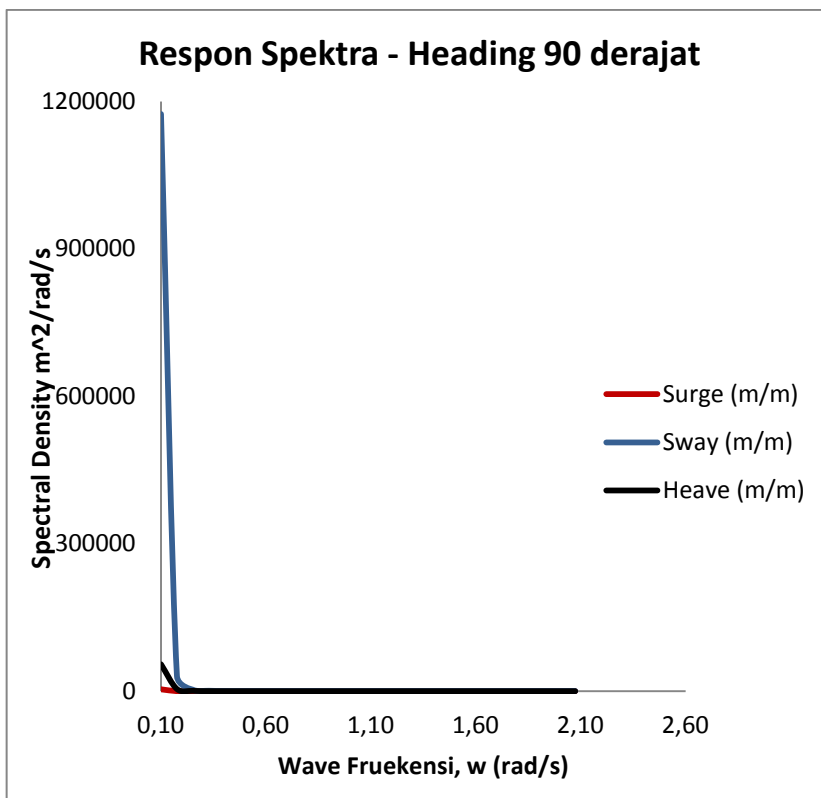


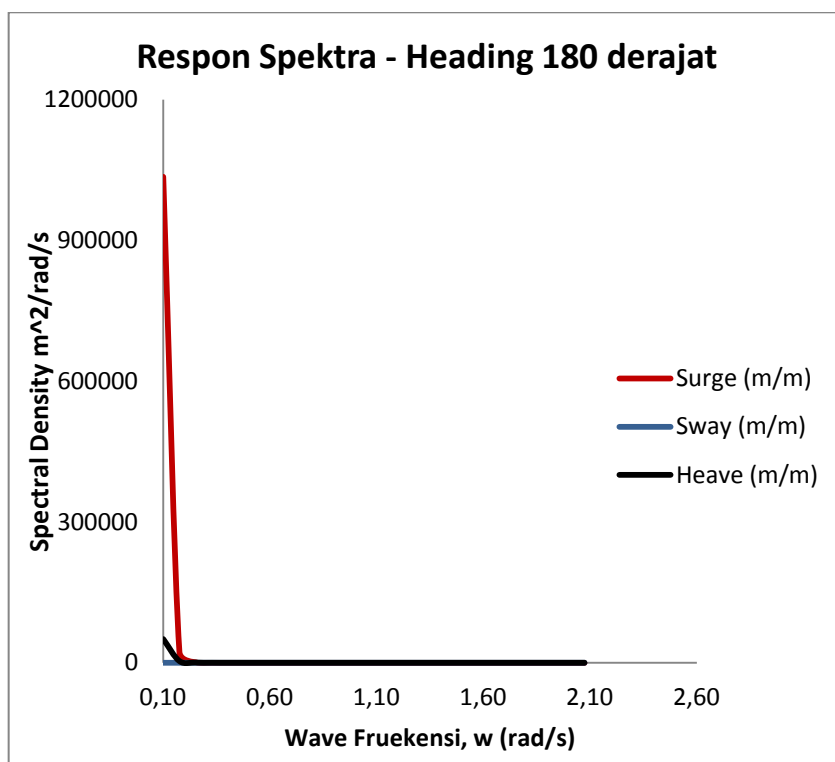
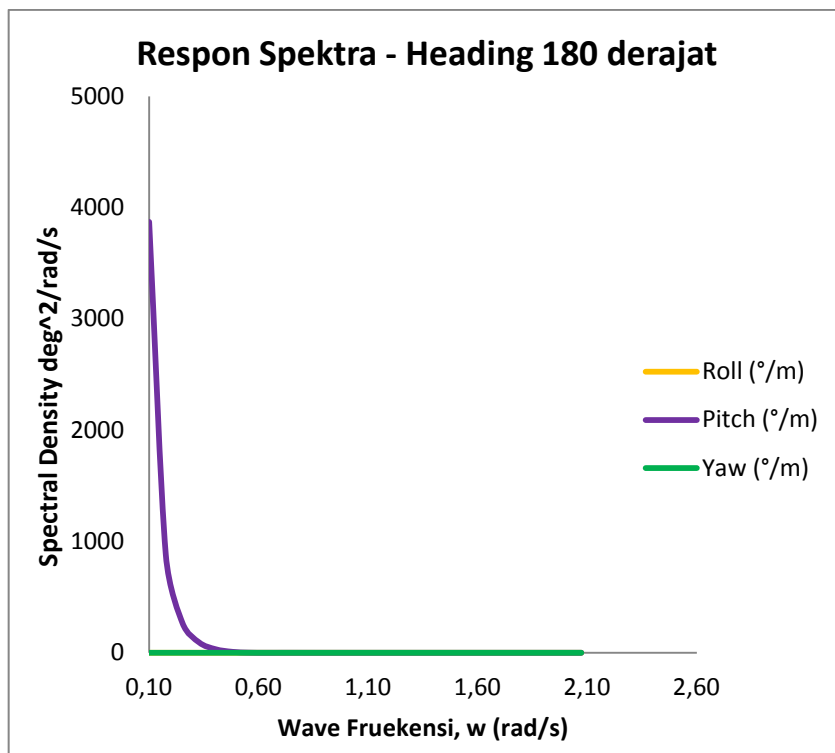




- **Full Load Condition**





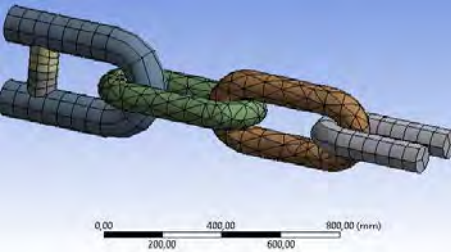
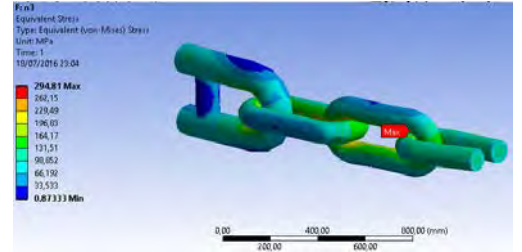
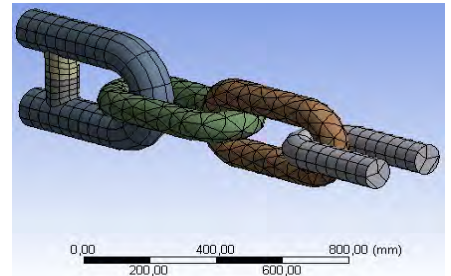
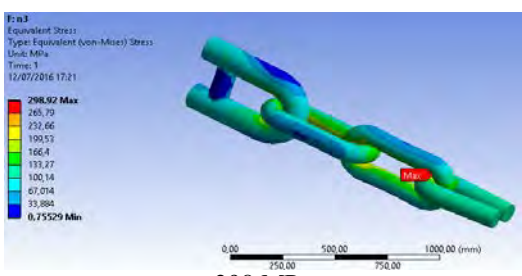
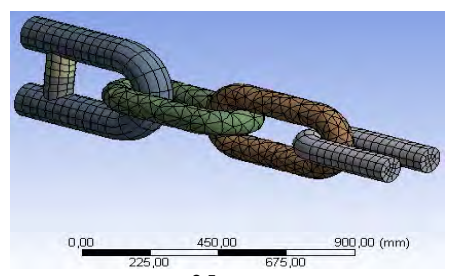
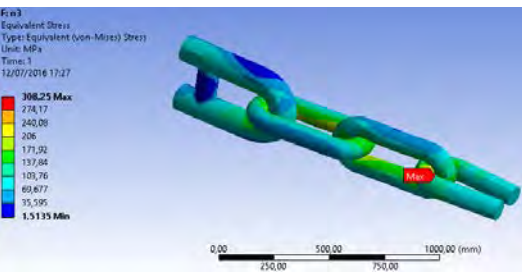
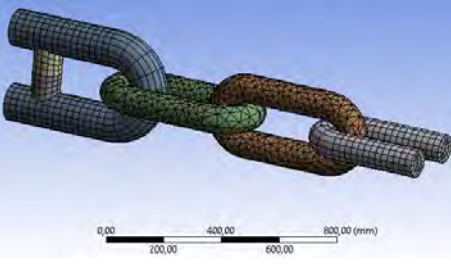
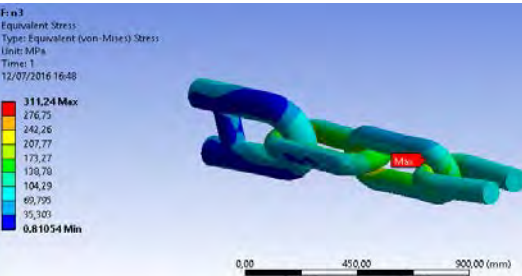
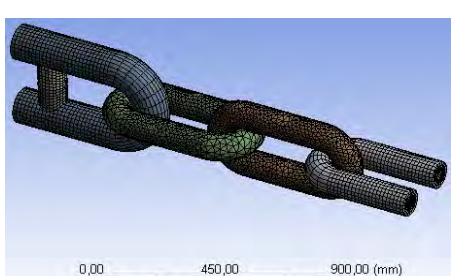
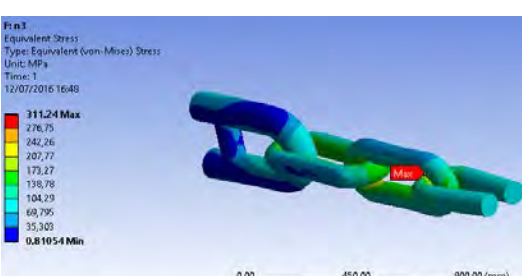


(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN D
MESH SENSITIVITY

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

MESH SENSITIVITY

No	Mesh	Stress
1	 <p style="text-align: center;">52 mm</p>	 <p style="text-align: center;">294 MPa</p>
2	 <p style="text-align: center;">40 mm</p>	 <p style="text-align: center;">298 MPa</p>
3	 <p style="text-align: center;">35 mm</p>	 <p style="text-align: center;">308 MPa</p>
4	 <p style="text-align: center;">25 mm</p>	 <p style="text-align: center;">311 MPa</p>
5	 <p style="text-align: center;">15 mm</p>	 <p style="text-align: center;">311 MPa</p>

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat dibuat berdasarkan pengerjaan Tugas Akhir ini adalah :

1. Respon struktur FSO Arco Ardjuna, SPM, dan *Shuttle Tanker* akibat beban gelombang pada saat tertambat, adalah sebagai berikut :
 - Amplitudo struktur FSO Arco Ardjuna pada kondisi tertambat, nilai terbesar terjadi pada kondisi *light* dengan *surge* terbesar 1,498 m, *sway* terbesar 1,403 m, *heave* terbesar 0.996 m, *roll* terbesar 2.027^0 , *pitch* terbesar $2,067^0$, *yaw* terbesar 0.218^0 .
 - Amplitudo struktur SPM pada kondisi tertambat, nilai terbesar terjadi pada kondisi FSO *full load* dengan *surge* terbesar 2,493 m, *sway* terbesar 0.621 m, *heave* terbesar 1,501 m, *roll* terbesar $2,944^0$, *pitch* terbesar $2,816^0$, *yaw* terbesar $2,573^0$.
 - Amplitudo struktur *Shuttle Tanker* pada kondisi tertambat, nilai terbesar terjadi pada kondisi *light* dengan *surge* terbesar 2,534 m, *sway* terbesar 1,717 m, *heave* terbesar 1,699 m, *roll* terbesar $5,181^0$, *pitch* terbesar $1,325^0$, *yaw* terbesar $1,062^0$.

2. Hasil *tension* rantai jangkar terbesar pada SPM sebesar 1662,35 kN dengan kondisi muatan FSO *full load* dan sudut pembebanan 90^0 . *Anchor leg* memiliki *Minimum Breaking Load* sebesar 7051 kN sehingga dengan *tension* yang didapatkan dari hasil simulasi, memiliki *safety factor* 4.24. *Safety factor chain* ini lebih besar dari *safety factor* yang dianjurkan oleh *American Bureau of Shipping* yaitu sebesar 1.67 untuk *chain*. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa *anchor leg* berada dalam kondisi aman selama proses operasi dengan beban lingkungan 100 tahunan.

3. Dari analisa kekuatan struktur *anchor chain* pada mooring sistem sesuai dengan kriteria ABS '*Safehull Dynamic Loading Approach*' for Floating Production, Storage and Offloading (FPSO) Systems tahun 2001, maka:

Max. Allowable von mises Stress $\leq 0,9$ Material's Yield Strength

$$311,24 \text{ MPa} \leq 0,9 \times 410 \text{ MPa}$$

$$311,24 \text{ MPa} \leq 369 \text{ MPa}$$

Jadi, kekuatan struktur dalam menerima beban berada pada kriteria yang aman atau kuat.

5.2 Saran

1. Perlu penelitian lebih lanjut untuk pemodelan *chain line mooring system* yang sesuai dengan *safety factor* ABS (*American Bureau of Shipping edition*) untuk kondisi *damage* (ALS).
2. Untuk analisa lebih spesifik dalam penentuan kekuatan lokal maksimum konstruksi *anchor chain*, perlu mempertimbangkan faktor kondisi lingkungan seperti korosi.
3. *Heading* pembebanan pada tugas akhir ini hanya dilakukan analisis dari arah 0°, 90°, dan 180°. Perlu dilakukan analisis dari *heading* pembebanan lain untuk hasil yang lebih akurat.

DAFTAR PUSTAKA

- ABS. 2001. *Safehull-Dynamic Loading Approach for Floating Production, Storage and Offloading (FPSO) Installations*. USA: American Bureau of Shipping ABS Plaza
- ABS. 2004. *Floating Production Installations*. USA: American Bureau Shipping.
- ABS. 2009. *Certification Of Offshore Mooring Chain*. USA: American Bureau Shipping
- ABS. 2012. *Mobile Offshore Drilling Units*. USA: American Bureau Shipping
- API RP 2P. 1987. *Recommended Practice for Analysis of Spread Mooring Systems for Floating Drilling Units*. Washington DC.
- API RP 2SK 3th edition. 2005. *Recommended Practice for Design and Analysis of Station Keeping Systems for Floating Structures*. Washington DC.
- Bhattacharyya. R. 1978. *Dynamic of Marine Vehicles*. New York: John Wiley & Sons Inc.
- Chakrabarti, S.K. 1987. *Hydrodynamics of Offshore Structures*, USA: Computational Mechanics Publications Southampton.
- Djarmiko, EB. 2003. *Seakeeping: Perilaku Bangunan Apung di Atas Gelombang*. ITS Press. Surabaya.
- Djarmiko, E.B. 2012. *Perilaku dan Operabilitas Bangunan Laut Di Atas Gelombang Acak*. ITS Press. Surabaya.
- DNV-OS-E301. 2004. *Positioning Mooring*. Norway: Det Norske Veritas.
- DNV RP C205. 2010. *Environmental Conditions and Environmental Loads*. Norway: Det Norske Veritas.
- Faltinsen, O.M.. 1990. *Sea Loads On Ships And Offshore Structures*, United Kingdom: Cambridge University Press.
- Helmidadang. 2012. Single Point Mooring, (Online), (<https://helmidadang.wordpress.com/2012/12/29/single-point-mooring/>, diakses 20 Februari 2016).
- Kusumawardhani, Henny Triastuti. 2011. *Analisa Resiko Pada Mooring Line SPM (Single Point Mooring) Akibat Beban Kelelahan*. Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan. ITS Surabaya.

- Mauliani, D. R. 2015. *Analisa Kekuatan Struktur Global Buoy pada Single Point Mooring FSO Arco Ardjuna*. Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan. ITS Surabaya.
- Murtedjo, Mas. 1999. *Handout Teori Bangunan Apung*. ITS Press. Surabaya
- Oil Companies International Marine Forum. 2009. *Tandem Mooring & Offloading Guidelines for Conventional Tankers at F(P)SO Facilities*. Witherby Seamanship International. United Kingdom.
- Paik J.K., Thayamballi A. K. 2007. *Ship-Shaped Offshore Installations*. Cambridge University Press.
- Popov, EP. 1996. *Mekanika Teknik*. Erlangga. Jakarta.
- Pratiwi, H. I. 2013. *Analisis Kekuatan Struktur Sistem Tambat FSO Arco Ardjuna pada saat Offloading dengan Shuttle Tanker 85000 DWT*. Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan. ITS Surabaya.
- PT. Citra Mas Surabaya. *Shuttle Tanker*. Surabaya.
- PT. Pertamina Hulu Energi Offshore North West Java. 2015. *FSO Arco Ardjuna, SPM 3, Anchor Legs, General Arrangement*. Jakarta.
- Ramadhan, Afrizal. 2010. *Analisa Kekuatan Memanjang Doble Hull CPO Barge Pengaruh Heaving Pitching couple dan Distribusi Beban*. Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan. ITS Surabaya.
- Ronney, P. D. 2014. *Basic of Mechanical Engineering*. California: University of Southern California.
- Setyawan, Wawan. 2012. *Analisa Kekuatan Chain Line Pada Mooring Sistem Akibat Konversi Motor Tanker Menjadi Mooring Storage Tanker*. Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan. ITS Surabaya

BIODATA PENULIS



Annisa Fitrah Ramialis dilahirkan di Kota Padang pada 12 Desember 1993. Penulis menempuh pendidikan di SD Kartika 1-10 Padang, SMPN 24 Padang, dan SMAN 1 Padang. Setelah itu, pada tahun 2012 penulis melanjutkan pendidikan di Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Selama kuliah, penulis sempat aktif menjadi *staff* Departemen Sosial Masyarakat HIMATEKLA 13/14.

Penulis juga aktif menjadi *staff* ahli Departemen Dalam Negeri BEM-FTK 14/15. Penulis juga pernah bekerja praktik di PT. Pertamina Hulu Energi *West Madura Offshore*. Bidang yang dipilih oleh penulis adalah hidrodinamika lepas pantai sehingga Tugas Akhir yang diambil berhubungan dengan kriteria Olah Gerak Bangunan Apung.

Contact Person:

Hp : 082257378087

Email : annisaramialis12@gmail.com