



**PROPOSAL TUGAS AKHIR - MO 141326**

**ANALISIS KEKUATAN STRUKTUR GLOBAL *BUOY* PADA  
*SINGLE POINT MOORING* FSO ARCO ARDJUNA**

**Defi Rizki Mauliani**

**NRP. 4311 100 013**

**DOSEN PEMBIMBING :**

**Ir. Handayanu M.Sc., Ph.D**

**Ir. Mas Murtedjo M.Eng**

**JURUSAN TEKNIK KELAUTAN**

**Fakultas Teknologi Kelautan**

**Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

**Surabaya**

**2015**



**FINAL PROJECT - MO 091336**

**GLOBAL STRUCTURE STRENGTH ANALYSIS OF SINGLE  
POINT MOORING AT FSO ARCO ARDJUNA**

**Defi Rizki Mauliani**

**NRP. 4311 100 013**

**SUPERVISORS :**

**Ir. Handayanu M, Sc. Ph. D.**

**Ir. Mas Murtedjo, M.Eng.**

**DEPARTEMENT OF OCEAN ENGINEERING**

**Faculty of Marine Technology**

**Sepuluh Nopember Institute of Technologi**

**Surabaya 2014**

# ANALISIS KEKUATAN STRUKTUR GLOBAL BUOY 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

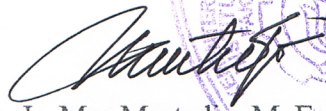
Oleh:

**DEFI RIZKI MAULIANI**

NRP. 4311 100 013

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir :

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

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

SURABAYA, AGUSTUS 2015

*(halaman ini sengaja di kosongkan)*



## ANALISIS KEKUATAN STRUKTUR GLOBAL BUOY PADA SINGLE POINT MOORING FSO ARCO ARDJUNA

Nama Mahasiswa : Defi Rizki Mauliani  
NRP : 4311100013  
Jurusan : Teknik Kelautan – FTK ITS  
Dosen Pembimbing : Ir. Handayanu M, Sc. Ph. D.  
Ir. Mas Murtedjo, M. Eng

### ABSTRAK

FSO Arco Ardjuna merupakan salah satu fasilitas lepas pantai yang beroperasi di Laut Jawa. Dalam beroperasi FSO Arco Ardjuna dilengkapi dengan sistem tambat yaitu Single Point Mooring (SPM) tipe CALM (*Catenary Anchored Leg Mooring*) buoy. Buoy merupakan bagian terpenting karena sangat berpengaruh besar terhadap kekuatan sistem tambat tersebut. Dengan memperhatikan geometri dan *displacement* dari struktur buoy, serta beban lingkungan maka akan menentukan kelayakan buoy tersebut untuk dioperasikan beberapa tahun kedepan dalam sistem tambat. Pada studi kasus ini, buoy pada sistem tambat FSO Arco Ardjuna telah memasuki umur operasi untuk mengestimasi diperlukan atau tidak diperlukannya modifikasi sehingga memerlukan adanya analisis ulang kekuatan global dari struktur buoy. Dengan mengetahui gerakan dari FSO dan *single point mooring*, maka dapat diketahui besar *tension hawser* dan rantai jangkar, sehingga dapat dianalisis pengaruhnya terhadap konstruksi buoy dan dianggap aman dalam beroperasi. Berdasarkan pemodelan yang dilakukan, diketahui bahwa gerak dominan pada saat *free floating* untuk SPM adalah *roll* sebesar  $8.0979^0$ , untuk FSO gerak osilasi terbesar ialah *roll* pada *light conditon* sebesar  $11.7823^0$ . Sedangkan gerakan dominan pada saat tertambat untuk SPM adalah *roll* sebesar  $0.5821^0$  pada saat FSO kondisi *light load*, untuk untuk FSO gerak osilasi terbesar ialah *roll* pada *light conditon* sebesar  $2.0912^0$ . Berdasarkan simulasi yang dilakukan untuk mendapatkan *tension* maksimum, didapatkan *tension* terbesar *hawser* pada kondisi FSO *light load* sebesar 2181.762 kN pada sudut pembebanan  $180^0$  dengan *safety factor* 1.88. *Safety factor* tersebut lebih besar dari yang disyaratkan oleh ABS, yaitu 1.82. Dengan demikian, struktur ini dapat dikatakan masih aman beroperasi. Hasil *tension* terbesar yang didapatkan dari simulasi sebelumnya digunakan sebagai pembebanan pada pemodelan struktur global. Hasil *von Mises stress* terbesar ialah 178.61 MPa dengan deformasi maksimum sebesar 2.49 mm. Hasil tersebut masih lebih kecil dari tegangan ijin sebesar 225 MPa, sehingga struktur dinyatakan aman untuk beroperasi.

**Kata Kunci:** buoy, estimasi modifikasi, tegangan global, von-Mises stress

*(halaman ini sengaja di kosongkan)*

## **GLOBAL STRUCTURE STRENGTH ANALYSIS OF SINGLE POINT MOORING AT FSO ARCO ARDJUNA**

**Name** : Defi Rizki Mauliani  
**NRP** : 4311100013  
**Department** : Ocean Engineering – FTK ITS  
**Supervisors** : Ir. Handayanu M, Sc. Ph. D.  
Ir. Mas Murtedjo, M.Eng

### **ABSTRACT**

FSO Ardjuna Arco is one of the offshore facilities operating in the Java Sea. In operates FSO Arco Ardjuna equipped with mooring system is Single Point Mooring (SPM) type CALM (Catenary Anchored Leg Mooring) buoy. Buoy is an important part because the very big influence on the strength of the mooring system. By paying attention to geometry and displasment from the buoy structure, also environmental load will determine the feasibility of the buoy to be operated a few years in the mooring system. In this case study, buoy mooring system FSO Ardjuna Arco has entered the age of the operation to estimate the need for modification is necessary or not to require the re-analysis of the global strength of the buoy structure. By knowing the movement of the FSO and single point mooring, it can be seen much hawser tension and anchor chain tension, so that it can be analyzed influence on the construction of the buoy and is considered safe in operation. Based on the modeling, it is known that the dominant movement when free floating for SPM is a roll of  $8.0979^{\circ}$ , for the FSO's largest oscillatory motion is roll on light conditon of  $11.7823^{\circ}$ . While the dominant movement when moored to SPM is the roll at  $0.5821^{\circ}$  at the time of FSO light load conditions, for most of FSO oscillatory motion is roll on light conditon at  $2.0912^{\circ}$ . Based on the simulations carried out to obtain the maximum tension, obtained the biggest tension hawser on FSO light load conditions at 2181.762 kN at an angle  $180^{\circ}$  with a safety factor loading 1.88. The safety factor greater than that required by ABS, which is 1.82. Thus, this structure can be said to be safe to operate. The biggest tension results obtained from previous simulations used as a loading on the global structure modeling. Results von Mises stress is the most deformation 178.61 MPa with a maximum of 2.49 mm. The result was smaller than the allowable stress of 225 MPa, so that the structure was declared safe to operate.

Keywords: buoy, global stress, estimated modification, von-Mises stress

*(halaman ini sengaja di kosongkan)*

## Kata Pengantar

Puji syukur penulis ucapkan kepada Allah SWT yang telah memberikan segala rahmat dan hidayah sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul, “*Analisis Kekuatan Struktur Global Buoy pada Single Point Mooring FSO Arco Ardjuna*” ini dengan tepat waktu dan tanpa halangan yang berarti.

Tugas Akhir ini disusun sebagai syarat untuk mendapatkan gelar sarjana (S-1) di Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Tugas Akhir ini berisi tentang analisis gerakan pada FSO Arco Ardjuna dan SPM, kemudian dicari *tension hawser* yang menghubungkan antara FSO dengan SPM dan *tension* rantai jangkar terbesar yang menghubungkan antara SPM dengan jangkar dipakai sebagai pembebanan pada pemodelan lokal struktur sehingga didapatkan hasil tegangan maksimum untuk mengetahui apakah struktur masih aman untuk beroperasi dengan beban lingkungan 100 tahunan selama umur operasi.

Penulis mengharapkan saran dan kritik dari para pembaca demi perbaikan dan kesempurnaan penyusunan dan penulisan berikutnya. Semoga Tugas Akhir ini bermanfaat bagi perkembangan teknologi di bidang rekayasa kelautan, bagi pembaca pada umumnya dan bagi penulis sendiri pada khususnya..

Surabaya, Agustus 2015

Penulis

*(halaman ini sengaja di kosongkan)*

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL.....</b>	<b>i</b>
<b>COVER.....</b>	<b>ii</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN.....</b>	<b>iii</b>
<b>ABSTRAK.....</b>	<b>v</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>vii</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>ix</b>
<b>UCAPAN TERIMA KASIH.....</b>	<b>xi</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xvii</b>
<b>DAFTAR TABEL.....</b>	<b>xxiii</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN.....</b>	<b>xxv</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1. Latar Belakang Masalah.....	1
1.2. Perumusan Masalah.....	3
1.3. Tujuan.....	3
1.4. Manfaat.....	3
1.5. Batasan Masalah.....	4
1.6. Sistematika Penulisan.....	4
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....</b>	<b>7</b>
2.1. Tinjauan Pustaka.....	7
2.2 . Dasar Teori.....	8
2.2.1. <i>Floating Storage and Offloading System (FSO)</i> .....	8
2.2.2. <i>SPM (Single Point Mooring)</i> .....	9
2.2.3. <i>Mooring Line</i> .....	10
2.2.4. Analisis Dinamis.....	11
2.2.5. Teori Gerak Bangunan Apung.....	12
2.2.6. Gerakan <i>Surge</i> Murni.....	13
2.2.7. Gerakan <i>Sway</i> Murni.....	14
2.2.8. Gerakan <i>Heave</i> Murni.....	14
2.2.9. Gerakan <i>Roll</i> Murni.....	14
2.2.10. Gerakan <i>Pitch</i> Murni.....	15

2.2.11. Gerakan <i>Yaw Murni</i> .....	15
2.2.12. Gerakan <i>Couple Six Degree of Freedom</i> .....	16
2.2.13 Perilaku Bangunan Apung pada Gelombang Reguler.....	16
2.2.13.1 Teori Gelombang Reguler.....	16
2.2.13.2 <i>Response Amplitude Operator (RAO)</i> .....	17
2.2.13.3 Beban Gelombang <i>Second Order</i> .....	19
2.2.14 Perilaku Bangunan Apung pada Gelombang Acak.....	19
2.2.14.1 Respon Bangunan Apung pada Gelombang Acak.....	19
2.2.14.2. Spektrum Gelombang.....	20
2.2.15 Konsep Pembebanan.....	22
2.2.15.1 Beban Angin.....	23
2.2.15.2 Beban Arus.....	24
2.2.15.3 Beban Gelombang.....	25
2.2.15.4 <i>Wave Drift Forces</i> .....	25
2.2.16 <i>Excursion</i> .....	26
2.2.17 Penentuan Panjang <i>Mooring Line</i> .....	27
2.2.18 <i>Tension</i> pada <i>Mooring Line</i> .....	28
2.2.19 Tegangan Aksial.....	31
2.2.20 Bending Stress.....	31
2.2.21 Tegangan Geser.....	32
2.2.22 Tegangan Von Misses.....	32
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....</b>	<b>35</b>
3.1. Metodologi Penelitian.....	35
3.2. Prosedur Penelitian.....	37
3.2. Pengumpulan Data.....	38
<b>BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>41</b>
4.1. Pemodelan Struktur.....	41
4.1.1 FSO.....	41
4.1.2 <i>Single Point Mooring</i> .....	41
4.2. Hidrostatik.....	42
4.2.1 FSO.....	42
4.2.2 <i>Single Point Mooring</i> .....	44



4.3 <i>Lines Plan</i> .....	44
4.3.1 FSO.....	44
4.4 Analisis Gerakan Kapal.....	45
4.4.1 FSO.....	45
4.4.2 <i>Single Point Mooring</i> .....	46
4.5 Konfigurasi Tali Tambat.....	47
4.6 <i>Response Amplitude Operator (RAO)</i> .....	48
4.6.1 <i>Response Amplitude Operator (RAO) FSO</i> Kondisi Terapung Bebas.....	49
4.6.2 <i>Response Amplitude Operator (RAO) Single Point Mooring</i> Kondisi Terapung Bebas.....	56
4.6.3 <i>Response Amplitude Operator (RAO) FSO</i> Kondisi Tertambat....	60
4.6.4 <i>Response Amplitude Operator (RAO) Single Point Mooring</i> Kondisi Tertambat.....	65
4.7 Analisis Spektra Gelombang.....	73
4.7.1 Analisis Perilaku Gerak FSO Pada Gelombang Acak Kondisi <i>Free Floating</i> (Terapung Bebas).....	74
4.7.2 Analisis Perilaku Gerak SPM Pada Gelombang Acak Kondisi <i>Free Floating</i> (Terapung Bebas).....	79
4.7.3 Analisis Perilaku Gerak FSO Pada Gelombang Acak Kondisi Tertambat.....	82
4.7.4 Analisis Perilaku Gerak SPM Pada Gelombang Acak Kondisi Tertambat.....	87
4.8 Distribusi <i>Tension</i> Pada Tali Tambat.....	91
4.8.1 Analisis <i>Tension</i> Tali Tambat Untuk FSO dan SPM pada Kondisi ULS.....	92
4.9 Konstruksi <i>Single Point Mooring</i> .....	94
4.10 Analisis Distribusi Tegangan Global.....	95
4.11 Pembebanan Pada Analisis Global.....	97
4.12 <i>Meshing</i> dan <i>Sensitivity Analysis</i> .....	98
4.13 Analisis Tegangan Global Konstruksi SPM.....	100

<b>BAB V PENUTUP.....</b>	<b>103</b>
5.1. Kesimpulan.....	103
5.2. Saran.....	104
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>105</b>
<b>LAMPIRAN</b>	
<b>BIODATA PENULIS</b>	

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1.</b> Amplitudo dan tinggi gelombang pada spektrum.....	20
<b>Tabel 2.2.</b> Kriteria <i>tension limit</i> dan faktor keamanan <i>mooring</i> .....	30
<b>Tabel 3.1</b> <i>Principle dimension</i> FSO Arco Ardjuna.....	38
<b>Tabel 3.2</b> <i>Main dimension CALM buoy</i> .....	38
<b>Tabel 3.3</b> Karakteristik <i>mooring hawser</i> .....	39
<b>Tabel 3.4</b> Karakteristik <i>anchor legs</i> .....	39
<b>Tabel 3.5</b> Data lingkungan.....	40
<b>Tabel 4.1</b> Ukuran utama( <i>principal dimention</i> ) <i>Single Point Mooring</i> .....	41
<b>Tabel 4.2</b> Koreksi hidrostatik data dengan hidrostatik model Maxsurf pada kondisi <i>full load</i> .....	43
<b>Tabel 4.3</b> Koreksi hidrostatik data dengan hidrostatik model Maxsurf pada kondisi <i>light load</i> .....	43
<b>Tabel 4.4</b> Koreksi hidrostatik data dengan hidrostatik model <i>Single Point Mooring pada Ansys AQWA</i> .....	44
<b>Tabel 4.5</b> Data titik berat dan <i>radius gyration</i> pada FSO.....	45
<b>Tabel 4.6</b> Data lingkungan.....	46
<b>Tabel 4.7</b> Data titik berat, displacement dan <i>radius gyration</i> pada SPM.....	47
<b>Tabel 4.8</b> Resume nilai amplitudo struktur tertinggi untuk kedua kondisi muatan FSO dan SPM kondisi terapung bebas ( <i>free floating</i> ).....	72
<b>Tabel 4.9</b> Resume nilai amplitudo struktur tertinggi untuk kedua kondisi muatan FSO dan SPM kondisi tertambat.....	72
<b>Tabel 4.10</b> Hasil Tekanan Hidrostatik dan Percepatan Struktur pada kondisi FSO <i>Light Load</i> dengan arah pembebanan $0^{\circ}$ .....	96
<b>Tabel 4.11</b> Hasil perhitungan beban pada konstruksi SPM.....	98
<b>Tabel 4.12</b> Tabulasi hasil <i>Maximum von MisesStress</i> untuk variasi kerapatan <i>meshing</i> .....	99

(Halaman sengaja dikosongkan)

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 1.1</b> FSO Arco Ardjuna tertambat SPM.....	2
<b>Gambar 2.1</b> <i>Buoy</i> pada SPM FSO Arco Ardjuna.....	8
<b>Gambar 2.2</b> <i>Floating Storage and Offloading System (FSO)</i> .....	9
<b>Gambar 2.3.</b> <i>Single Point Mooring</i> .....	9
<b>Gambar 2.4.</b> <i>Catenary Anchor Leg Mooring Buoy</i> .....	10
<b>Gambar 2.5</b> <i>Six Degree Of Freedom (SDOF)</i> pada FSO.....	13
<b>Gambar 2.6</b> Bentuk umum grafik respons gerakan bangunan apung.....	18
<b>Gambar 2.8</b> Transformasi spektra gelombang menjadi spektra respons.....	20
<b>Gambar 2.9</b> Panjang minimum <i>mooring line</i> .....	27
<b>Gambar 2.10</b> <i>Catenary definition sketch</i> .....	29
<b>Gambar 2.11</b> Ilustrasi tegangan normal akibat gaya aksial, (+) tarik dan (-) tekan.....	31
<b>Gambar 2.12</b> Tegangan lentur ( <i>bending</i> ) pada suatu penampang.....	32
<b>Gambar 2.13</b> Gaya yang bekerja dalam arah sejajar terhadap penampang.....	32
<b>Gambar 3.1</b> <i>Flowchart</i> penyelesaian Tugas Akhir.....	35
<b>Gambar 4.1</b> Pemodelan FSO Arco Ardjuna dengan menggunakan <i>software</i> Maxsurf.....	41
<b>Gambar 4.2</b> Pemodelan <i>Body Surface Single Point Mooring</i> dengan menggunakan <i>software</i> Autocad 3D.....	42
<b>Gambar 4.3</b> <i>Lines plan</i> Arco Ardjuna.....	45
<b>Gambar 4.4</b> Model FSO Arco Ardjuna pada Ansys.....	46
<b>Gambar 4.5</b> Model SPM pada Ansys.....	47
<b>Gambar 4.6</b> Konfigurasi Tali Tambat.....	48
<b>Gambar 4.7</b> Grafik RAO <i>surge</i> pada FSO <i>full load condition</i> .....	50
<b>Gambar 4.8</b> Grafik RAO <i>sway</i> pada FSO <i>full load condition</i> .....	50
<b>Gambar 4.9</b> Grafik RAO <i>heave</i> pada FSO <i>full load condition</i> .....	51
<b>Gambar 4.10</b> Grafik RAO <i>roll</i> pada FSO <i>full load condition</i> .....	51
<b>Gambar 4.11</b> Grafik RAO <i>pitch</i> pada FSO <i>full load condition</i> .....	52
<b>Gambar 4.12</b> Grafik RAO <i>yaw</i> pada FSO <i>full load condition</i> .....	52
<b>Gambar 4.13</b> Grafik RAO <i>surge</i> pada FSO <i>light load condition</i> .....	53

<b>Gambar 4.14</b> Grafik RAO <i>sway</i> pada FSO <i>light load condition</i> .....	54
<b>Gambar 4.15</b> Grafik RAO <i>heave</i> pada FSO <i>light load condition</i> .....	54
<b>Gambar 4.16</b> Grafik RAO <i>roll</i> pada FSO <i>light load condition</i> .....	55
<b>Gambar 4.17</b> Grafik RAO <i>pitch</i> pada FSO <i>full load condition</i> .....	55
<b>Gambar 4.18</b> Grafik RAO <i>yaw</i> pada FSO <i>light load condition</i> .....	56
<b>Gambar 4.19</b> Grafik RAO <i>surge</i> pada SPM.....	57
<b>Gambar 4.20</b> Grafik RAO <i>sway</i> pada SPM.....	57
<b>Gambar 4.21</b> Grafik RAO <i>heave</i> pada SPM.....	58
<b>Gambar 4.22</b> Grafik RAO <i>roll</i> pada SPM.....	58
<b>Gambar 4.23</b> Grafik RAO <i>pitch</i> pada SPM.....	59
<b>Gambar 4.24</b> Grafik RAO <i>yaw</i> pada SPM.....	59
<b>Gambar 4.25</b> Grafik RAO <i>surge</i> pada FSO tertambat <i>full load condition</i> .....	60
<b>Gambar 4.26</b> Grafik RAO <i>sway</i> pada FSO tertambat <i>full load condition</i> .....	61
<b>Gambar 4.27</b> Grafik RAO <i>heave</i> pada FSO tertambat <i>full load condition</i> .....	61
<b>Gambar 4.28</b> Grafik RAO <i>roll</i> pada FSO tertambat <i>full load condition</i> .....	62
<b>Gambar 4.29</b> Grafik RAO <i>pitch</i> pada FSO tertambat <i>full load condition</i> .....	62
<b>Gambar 4.30</b> Grafik RAO <i>yaw</i> pada FSO tertambat <i>full load condition</i> .....	63
<b>Gambar 4.31</b> Grafik RAO <i>surge</i> pada FSO tertambat <i>light load condition</i> .....	63
<b>Gambar 4.32</b> Grafik RAO <i>sway</i> pada FSO tertambat <i>light load condition</i> .....	64
<b>Gambar 4.33</b> Grafik RAO <i>heave</i> pada FSO tertambat <i>light load condition</i> .....	64
<b>Gambar 4.34</b> Grafik RAO <i>roll</i> pada FSO tertambat <i>light load condition</i> .....	64
<b>Gambar 4.35</b> Grafik RAO <i>pitch</i> pada FSO tertambat <i>light load condition</i> .....	64
<b>Gambar 4.36</b> Grafik RAO <i>yaw</i> pada FSO tertambat <i>light load condition</i> .....	65
<b>Gambar 4.37</b> Grafik RAO <i>surge</i> pada SPM tertambat FSO <i>full load condition</i> .....	66

<b>Gambar 4.38</b> Grafik RAO <i>surge</i> pada SPM tertambat FSO <i>full load condition</i> .....	66
<b>Gambar 4.39</b> Grafik RAO <i>surge</i> pada SPM tertambat FSO <i>full load condition</i> .....	67
<b>Gambar 4.40</b> Grafik RAO <i>roll</i> pada SPM tertambat FSO <i>full load condition</i> .....	67
<b>Gambar 4.41</b> Grafik RAO <i>pitch</i> pada SPM tertambat FSO <i>full load condition</i> .....	68
<b>Gambar 4.42</b> Grafik RAO <i>yaw</i> pada SPM tertambat FSO <i>full load condition</i> .....	68
<b>Gambar 4.43</b> Grafik RAO <i>surge</i> pada SPM tertambat FSO <i>light load condition</i> .....	69
<b>Gambar 4.44</b> Grafik RAO <i>sway</i> pada SPM tertambat FSO <i>light load condition</i> .....	69
<b>Gambar 4.45</b> Grafik RAO <i>heave</i> pada SPM tertambat FSO <i>light load condition</i> .....	70
<b>Gambar 4.46</b> Grafik RAO <i>roll</i> pada SPM tertambat FSO <i>light load condition</i> .....	70
<b>Gambar 4.47</b> Grafik RAO <i>pitch</i> pada SPM tertambat FSO <i>light load condition</i> .....	71
<b>Gambar 4.48</b> Grafik RAO <i>yaw</i> pada SPM tertambat FSO <i>light load condition</i> .....	71
<b>Gambar 4.49</b> Grafik Spektrum gelombang JONSWAP ( $H_s = 3.6$ m, $T_p = 9$ s).....	74
<b>Gambar 4.50</b> Langkah perhitungan mencari respon spektra.....	74
<b>Gambar 4.51</b> Respon spektra gerakan <i>surge</i> FSO ( <i>full load</i> ) kondisi <i>free floating</i> .....	74
<b>Gambar 4.52</b> Respon spektra gerakan <i>sway</i> FSO ( <i>full load</i> ) kondisi <i>free floating</i> .....	75
<b>Gambar 4.53</b> Respon spektra gerakan <i>heave</i> FSO ( <i>full load</i> ) kondisi <i>free floating</i> .....	75

<b>Gambar 4.54</b> Respon spektra gerakan <i>roll</i> FSO ( <i>full load</i> ) kondisi <i>free floating</i> .....	75
<b>Gambar 4.55</b> Respon spektra gerakan <i>pitch</i> FSO ( <i>full load</i> ) kondisi <i>free floating</i> .....	76
<b>Gambar 4.56</b> Respon spektra gerakan <i>yaw</i> FSO ( <i>full load</i> ) kondisi <i>free floating</i> .....	76
<b>Gambar 4.57</b> Respon spektra gerakan <i>surge</i> FSO ( <i>light load</i> ) kondisi <i>free floating</i> .....	77
<b>Gambar 4.58</b> Respon spektra gerakan <i>sway</i> FSO ( <i>light load</i> ) kondisi <i>free floating</i> .....	77
<b>Gambar 4.59</b> Respon spektra gerakan <i>heave</i> FSO ( <i>light load</i> ) kondisi <i>free floating</i> .....	77
<b>Gambar 4.60</b> Respon spektra gerakan <i>roll</i> FSO ( <i>light load</i> ) kondisi <i>free floating</i> .....	78
<b>Gambar 4.61</b> Respon spektra gerakan <i>pitch</i> FSO ( <i>light load</i> ) kondisi <i>free floating</i> .....	78
<b>Gambar 4.62</b> Respon spektra gerakan <i>yaw</i> FSO ( <i>light load</i> ) kondisi <i>free floating</i> .....	78
<b>Gambar 4.63</b> Respon spektra gerakan <i>surge</i> SPM kondisi <i>free floating</i> .....	79
<b>Gambar 4.64</b> Respon spektra gerakan <i>sway</i> SPM kondisi <i>free floating</i> .....	80
<b>Gambar 4.65</b> Respon spektra gerakan <i>heave</i> SPM kondisi <i>free floating</i> .....	80
<b>Gambar 4.66</b> Respon spektra gerakan <i>roll</i> SPM kondisi <i>free floating</i> .....	80
<b>Gambar 4.67</b> Respon spektra gerakan <i>pitch</i> SPM kondisi <i>free floating</i> .....	81
<b>Gambar 4.68</b> Respon spektra gerakan <i>yaw</i> SPM kondisi <i>free floating</i> .....	81
<b>Gambar 4.69</b> Respon spektra gerakan <i>surge</i> FSO ( <i>full load</i> ) kondisi tertambat.....	82
<b>Gambar 4.70</b> Respon spektra gerakan <i>sway</i> FSO ( <i>full load</i> ) kondisi tertambat.....	82
<b>Gambar 4.71</b> Respon spektra gerakan <i>heave</i> FSO ( <i>full load</i> ) kondisi tertambat.....	82
<b>Gambar 4.72</b> Respon spektra gerakan <i>roll</i> FSO ( <i>full load</i> ) kondisi tertambat.....	83



<b>Gambar 4.73</b> Respon spektra gerakan <i>pitch</i> FSO ( <i>full load</i> ) kondisi tertambat.....	83
<b>Gambar 4.74</b> Respon spektra gerakan <i>yaw</i> FPSO ( <i>full load</i> ) kondisi tertambat.....	83
<b>Gambar 4.75</b> Respon spektra gerakan <i>surge</i> FSO ( <i>light load</i> ) kondisi tertambat.....	84
<b>Gambar 4.76</b> Respon spektra gerakan <i>sway</i> FSO ( <i>light load</i> ) kondisi tertambat.....	84
<b>Gambar 4.77</b> Respon spektra gerakan <i>heave</i> FSO ( <i>light load</i> ) kondisi tertambat.....	85
<b>Gambar 4.78</b> Respon spektra gerakan <i>roll</i> FSO ( <i>light load</i> ) kondisi tertambat.....	85
<b>Gambar 4.79</b> Respon spektra gerakan <i>pitch</i> FSO ( <i>light load</i> ) kondisi tertambat.....	85
<b>Gambar 4.80</b> Respon spektra gerakan <i>yaw</i> FSO ( <i>light load</i> ) kondisi tertambat.....	86
<b>Gambar 4.81</b> Respon spektra gerakan <i>surge</i> SPM tertambat kondisi FSO <i>Light Load</i> .....	87
<b>Gambar 4.82</b> Respon spektra gerakan <i>sway</i> SPM tertambat kondisi FSO <i>Light Load</i> .....	87
<b>Gambar 4.83</b> Respon spektra gerakan <i>heave</i> SPM tertambat kondisi FSO <i>Light Load</i> .....	87
<b>Gambar 4.84</b> Respon spektra gerakan <i>roll</i> SPM kondisi tertambat kondisi FSO <i>Light Load</i> .....	88
<b>Gambar 4.85</b> Respon spektra gerakan <i>pitch</i> SPM tertambat kondisi FSO <i>Light Load</i> .....	88
<b>Gambar 4.86</b> Respon spektra gerakan <i>yaw</i> SPM tertambat k ondisi FSO <i>Light Load</i> .....	88
<b>Gambar 4.87</b> Respon spektra gerakan <i>surge</i> SPM tertambat kondisi FSO <i>Full Load</i> .....	89
<b>Gambar 4.88</b> Respon spektra gerakan <i>sway</i> SPM tertambat kondisi FSO <i>Full Load</i> .....	90

<b>Gambar 4.89</b> Respon spektra gerakan <i>heave</i> SPM tertambat kondisi FSO <i>Full Load</i> .....	90
<b>Gambar 4.90</b> Respon spektra gerakan <i>roll</i> SPM kondisi tertambat kondisi FSO <i>Full Load</i> .....	90
<b>Gambar 4.91</b> Respon spektra gerakan <i>pitch</i> SPM tertambat kondisi FSO <i>Full Load</i> .....	91
<b>Gambar 4.92</b> Respon spektra gerakan <i>yaw</i> SPM tertambat kondisi FSO <i>Full Load</i> .....	91
<b>Gambar 4.93</b> Hasil Analisis <i>Tension</i> berdasarkan Arah Pembebanan dan <i>Safety Factor</i> .....	93
<b>Gambar 4.94</b> Hasil Analisis <i>Tension</i> untuk Rantai Jangkar 1-4 untuk kondisi FSO <i>Light Load</i> Arah Pembebanan $0^\circ$ .....	93
<b>Gambar 4.95</b> Hasil Analisis <i>Tension</i> untuk Rantai Jangkar 5-6 dan Hawser untuk kondisi FSO <i>Light Load</i> Arah Pembebanan $0^\circ$ .....	94
<b>Gambar 4.96</b> Konstruksi SPM.....	94
<b>Gambar 4.97</b> Pemodelan Konstruksi SPM di Ansys 16.0.....	95
<b>Gambar 4.98</b> <i>Material property</i> untuk pemodelan struktur global.....	95
<b>Gambar 4.99</b> Percepatan Struktur SPM.....	96
<b>Gambar 4.100</b> Gaya Hidrostatik Struktur SPM.....	96
<b>Gambar 4.101</b> Konfigurasi beban pada pemodelan global.....	101
<b>Gambar 4.102</b> Model elemen dengan <i>meshing</i> 0.0397 m.....	97
<b>Gambar 4.103</b> Sensitivitas model konstruksi SPM.....	99
<b>Gambar 4.104</b> Tegangan maksimum pada konstruksi SPM.....	101
<b>Gambar 4.105</b> Deformasi maksimum pada konstruksi SPM.....	101

## DAFTAR LAMPIRAN

- LAMPIRAN A DATA DAN MODEL STRUKTUR SPM FSO Arco Ardjuna
- LAMPIRAN B PERHITUNGAN
- LAMPIRAN C HASIL ANALISA *TENSION*, GAYA HIDROSTATIK, DAN  
PERCEPATAN STRUKTUR SPM FSO Arco Ardjuna
- LAMPIRAN D HASIL ANALISA TEGANGAN GLOBAL STRUKTUR  
BUOY SPM FSO Arco Ardjuna

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang Masalah

Berkembangnya teknologi saat ini seiring dengan peningkatan populasi mengakibatkan meningkatnya konsumsi akan hidrokarbon sebagai bahan baku penghasil energi. Karena eksplorasi dan eksploitasi hidrokarbon khususnya di daerah laut dangkal semakin rendah, maka eksplorasi dan eksploitasi hidrokarbon mengarah ke laut dalam. Dengan beralihnya eksplorasi dan eksploitasi dilaut dalam, maka diperlukan teknologi yang mampu untuk eksplorasi dan eksploitasi hidrokarbon pada kondisi laut dalam. Salah satu teknologi yang dikembangkan dan telah digunakan adalah struktur terapung (*floating structure*). Disamping kemampuan *floating structure* untuk eksplorasi hidrokarbon dilaut dalam, struktur tersebut dinilai lebih ekonomis daripada struktur terpancang karena tidak perlu membuat struktur baru dan dapat dimanfaatkannya kembali ketika telah selesai eksplorasi. Salah satu struktur terapung yang sering digunakan dalam kegiatan eksplorasi dan eksploitasi hidrokarbon di laut dalam adalah *Floating Storage and Offloading System (FSO)*.

*FSO (Floating Storage and Offloading System)* adalah salah satu struktur terapung yang berfungsi menyimpan dan menyalurkan minyak dan gas bumi ke *shuttle tanker*. Pergerakan struktur terapung sangat dipengaruhi oleh beban lingkungannya. Beban lingkungan yang bekerja diantaranya adalah beban gelombang, beban angin dan beban arus. Perlu adanya analisis dan perhitungan mengenai pergerakan FSO agar FSO dapat beroperasi dan berfungsi dengan aman,. Salah satunya adalah dengan melakukan analisis terhadap kinerja sistem tambat pada bangunan apung FSO itu sendiri. Konfigurasi sistem tambat dapat berupa *spread mooring* atau *single point mooring*. Jenis *single point mooring* adalah tipe sistem tambat yang bersifat *weathervaning* yaitu mampu bergerak bebas mengikuti kondisi lingkungan. Jadi saat beroperasi, FSO atau struktur terapung lainnya dapat bergerak mengikuti arah gelombang namun tetap tertambat pada *mooring*. *Single point mooring* memiliki beberapa tipe salah satunya yang sering digunakan dalam sistem tambat FSO adalah tipe CALM (*Catenary*

*Anchored Leg Mooring*) *buoy*. Salah satu komponen penting dalam sistem tambat CALM *buoy* adalah *buoy*. Hal ini dikarenakan *buoy* yang digunakan dalam sistem tambat juga sangat berpengaruh besar terhadap kekuatan sistem tambat tersebut. Secara geometri, ukuran *buoy* yang digunakan dalam menambat FSO harus sesuai dengan ukuran FSO yang digunakan. Sehingga pada saat beroperasi SPM benar-benar bisa berfungsi untuk menahan gerakan FSO. Dengan memperhatikan geometri, *displasmen* dan tegangan maksimum global dari struktur *buoy* maka akan membantu mempermudah untuk mengetahui kelayakan *buoy* tersebut untuk dioperasikan dalam sistem tambat.

Pada studi kasus ini, sistem tambat FSO Arco Ardjuna akan ada penambahan umur operasi karena telah beroperasi selama 40 tahun lebih. Selain itu, sistem tambat FSO Arco Ardjuna telah memasuki batas masa klasifikasi regulasi yang ada sehingga memerlukan adanya analisis ulang kekuatan global dari stuktur *buoy* apakah masih layak digunakan untuk digunakan dalam sistem tambat. Dengan mengetahui gerakan dari FSO dan *single point mooring*, maka dapat diketahui besar *tension hawser* yang menghubungkan antara FSO dan SPM dan *tension* rantai jangkar yang menghubungkan SPM dengan jangkar, sehingga dapat dianalisis pengaruhnya terhadap konstruksi *buoy* dan dianggap aman dalam beroperasi. Berdasarkan latar belakang tersebut, maka pada tugas akhir ini akan dilakukan analisis kekuatan struktur global *buoy mooring* pada *single point mooring* FSO Arco Ardjuna.



**Gambar 1.1** FSO Arco Ardjuna tertambat SPM

(Sumber: PT. Citra Mas, 2014)

## 1.2. Perumusan Masalah

Permasalahan yang akan dibahas dalam tugas akhir ini adalah :

1. Bagaimana perilaku gerak yang terjadi pada FSO dan SPM akibat beban gelombang pada saat terapung bebas dan tertambat?
2. Berapa besar gaya tarik/*tension hawser* yang menghubungkan FSO dan SPM?
3. Berapa besar gaya tarik/*tension* rantai jangkar yang menghubungkan SPM dengan jangkar?
4. Berapa besar tegangan global maksimum dan deformasi struktur *buoy* pada *single point mooring* FSO Arco Arjuna saat tertambat?

## 1.3. Tujuan

Tujuan dari tugas akhir ini adalah :

1. Menghitung perilaku gerak yang terjadi pada FSO dan SPM akibat beban gelombang pada saat terapung bebas dan tertambat.
2. Menghitung besar gaya tarik/*tension hawser* yang menghubungkan FSO dan SPM.
3. Menghitung besar gaya tarik/*tension* rantai jangkar yang menghubungkan SPM dengan jangkar.
4. Menghitung besar tegangan global maksimum dan deformasi struktur *buoy* pada *single point mooring* FSO Arco Arjuna saat tertambat.

## 1.4. Manfaat

Adapun manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Dapat mengetahui cara menghitung besar pergerakan FSO dan SPM pada saat terapung bebas dan tertambat. Selain itu, dapat mengetahui cara menghitung besar gaya tarik/*tension* pada *hawser* yang menghubungkan antara FSO dan SPM dan besar gaya tarik/*tension* rantai jangkar yang menghubungkan SPM dengan jangkar.
2. Dapat mengetahui prosedur cara menganalisis dan menghitung besar tegangan global maksimum struktur *buoy* pada *single point mooring* FSO Arco Arjuna saat tertambat.

### **1.5. Batasan Masalah**

Agar lebih memudahkan analisis dan dapat dicapai tujuan yang diharapkan, maka perlu diberikan batasan-batasan sebagai berikut:

1. Penelitian ini merupakan studi kasus pada SPM untuk FSO Arco Ardjuna milik Pertamina Hulu Energi *Offshore North West Java* (PHE ONWJ).
2. Sistem tambat yang digunakan adalah *single point mooring* tipe CALM (*Catenary Anchored Leg Mooring*).
3. Jangkar tidak dimodelkan
4. *Heading* pembebanan pada  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  dan  $180^\circ$ .
5. Pemodelan mekanisme *turntable* SPM tidak dimodelkan.
6. Sistem *offloading side by side* dan tandem tidak diperhitungkan.
7. *Riser* tidak dimodelkan dan pergerakan *hose* diabaikan.
8. Validasi Maxsurf FSO Arco Ardjuna pada kondisi *Light Condition* dan *Full Condition*.

### **1.6. Sistematika Penulisan**

Sistematika penulisan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

#### **BAB I PENDAHULUAN**

Pada Bab ini menjelaskan tentang latar belakang tugas akhir yang akan dilakukan, perumusan masalah, tujuan yang hendak dicapai dalam penulisan tugas akhir ini, manfaat yang diperoleh dan ruang lingkup penelitian guna membatasi analisis yang akan dilakukan dalam tugas akhir ini;

#### **BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI**

Dalam penulisan tugas akhir ini, penulis berpedoman pada penelitian, jurnal serta buku-buku yang membahas tentang olah gerak bangunan apung, teori gelombang, eksitasi gelombang, respons struktur, dan bahan-bahan lain yang mendukung penelitian ini;

#### **BAB III METODOLOGI PENELITIAN**

Pada bab ini menjelaskan tentang metode pengerjaan dalam tugas akhir yang akan dilakukan beserta prosedur yang digunakan.



#### **BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN**

Pada bab ini akan dilakukan analisis mengenai hasil pemodelan FSO dan SPM dengan menggunakan *software* Maxsurf 20 untuk mengetahui hidrostatis struktur dan analisis gerakan FSO dan SPM pada saat terapung bebas. Selain itu, menggunakan *software* Ansys AQWA 16.0 untuk analisis gerakan FSO dan SPM pada saat tertambat dan mengetahui besar *tension* pada hawser dan rantai jangkar, serta menggunakan *software* Ansys Workbench 16 untuk permodelan global dari struktur *buoy* pada sistem tambat FSO. Selain hal tersebut, juga dilakukan pembahasan analisis hasil permodelan yang telah dilakukan pada penelitian ini.

#### **BAB V PENUTUP**

Pada bab ini menjelaskan tentang kesimpulan dari hasil Analisis dan pembahasan serta berisi saran-saran untuk penelitian ataupun tugas akhir selanjutnya.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

#### 2.1. Tinjauan Pustaka

Setiap tipe struktur terapung mempunyai karakteristik masing-masing. Karakteristik gerakan pada FSO misalnya berbeda dengan karakteristik gerakan *Tension Leg Platform* (TLP) atau SPAR. Di sisi lain, laut lepas memiliki karakteristik lingkungan sendiri. Gerakan pada struktur terapung yang berlebihan, terutama akibat beban lingkungan yang ekstrem, dapat mengakibatkan kegagalan sistem. (Sabana, 2012), sehingga pengetahuan tentang perkiraan respon sebuah struktur pada suatu lingkungan tertentu sangatlah penting.

Pergerakan *Single Point Mooring* (SPM) terhadap gerakan struktur terapung FSO diharapkan mampu meredam atau menahan gaya FSO akibat beban lingkungan. A. R. Halliwell and R. E. Sistem yang akan digunakan untuk menahan gaya FSO dapat dirancang dengan penentuan konfigurasi, penempatan, dan batasan gerak dari SPM tersebut. Sedangkan untuk merancang konstruksi dari sistem tambatnya sendiri dapat dilakukan dengan mengetahui tegangan pada *hawser* yang menghubungkan kedua struktur tersebut dan tegangan pada rantai jangkar yang menghubungkan SPM dengan jangkar. Harris (1988), melakukan analisis tentang model serta geometri dari *single point mooring* dengan memperhatikan variasi beban lingkungan yang diberikan pada SPM tersebut untuk menyelidiki pengaruh pada respons sistem yang dihitung berdasarkan gerakan dan tegangan pada sistem tersebut. Variasi beban lingkungan yang diberikan adalah frekuensi dan juga tinggi gelombang yang dilakukan pada dua tipe gelombang yakni pada gelombang acak dan juga pada gelombang regular.

Dalam sistem SPM salah satu bagian terpenting berpengaruh besar terhadap kekuatan sistem tambat tersebut adalah *buoy* yang terlihat pada Gambar 2.1. Suryanto (2009), menyatakan bahwa penggunaan *buoy* sebagai terminal saat ini menjadi perhatian utama untuk pendistribusian minyak dan gas dari laut ke darat (begitu pula sebaliknya). *Buoy* merupakan piranti tambahan pada sistem *mooring* yang biasanya digunakan pada perairan menengah ataupun *deep water*. Dengan memperhatikan

geometri, *displasmen* dan tegangan maksimum global dari struktur *buoy* maka akan membantu mempermudah untuk mengetahui kelayakan *buoy* tersebut untuk dioperasikan dalam sistem tambat.



**Gambar 2.1** *Buoy* pada SPM FSO Arco Ardjuna  
(Sumber: PT. Citra Mas, 2013)

Berdasarkan analisis yang sudah ada, yakni tentang analisis terhadap *single point mooring* mengenai kekuatan global dari *buoy* dari SPM yang digunakan dalam menambat kinerja FSO masih kurang perhatiannya, sehingga dengan adanya saya melakukan analisis kekuatan global *buoy* pada SPM CALM *buoy* diharapkan bisa mengetahui apakah struktur *buoy* tersebut masih layak digunakan atau memenuhi kriteria-kriteria sesuai *rules/code* yang berlaku.

## 2.2 Dasar Teori

### 2.2.1 *Floating Storage and Offloading System (FSO)*

*Floating Storage and Offloading System (FSO)* merupakan struktur terapung yang digunakan untuk menyimpan dan menyalurkan minyak dan gas bumi tanpa dilengkapi dengan fasilitas pemrosesan dari sumur-sumur di dasar laut ke kapal-kapal *shuttle tanker* atau *carrier* pengangkut yang kemudian didistribusikan di pasaran. 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 seperti Gambar 2.2 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*.



**Gambar 2.2** *Floating Storage and Offloading System (FSO)*

(Sumber: PT. Citra Mas, 2014 )

### **2.2.2 SPM (Single Point Mooring)**

*Single Point Mooring* (SPM) merupakan struktur terapung yang berfungsi sebagai penambatan dan interkoneksi untuk muatan tanker atau pembongkaran produk gas atau cairan. SPM terdiri atas sebuah *buoy* yang ditambat ke dasar laut dengan menggunakan empat, enam, atau delapan *mooring line*. SPM yang terlihat pada Gambar 2.3 memungkinkan struktur terapung bergerak sesuai arah dari beban lingkungan yang bekerja padanya (*weather vanning*). Hal tersebut penting untuk meminimalkan beban lingkungan yang bekerja pada struktur terapung (API RP 2SK,1996). Kelebihan sistem ini adalah struktur terapung yang ditambat dapat bergerak melingkar relatif terhadap SPM.

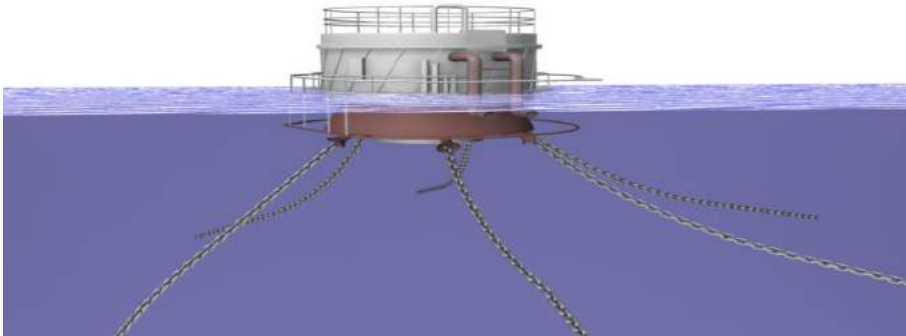


**Gambar 2.3.** *Single Point Mooring*

(Sumber : PT. Citra Mas, 2014)

Menurut API RP 2SK (1996) *Single point mooring* dapat dibagi menjadi *catenary anchor leg mooring (CALM)* seperti yang terdapat pada gambar 2.4, *Turret mooring*,

dan *Single Anchor Leg Mooring (SALM)*. Pada perkembangannya, dikenal SPM tipe *taut*. Perbedaan antara CALM dan taut adalah jangkar pada tipe CALM menyentuh dasar laut dalam posisi horizontal, sedangkan tipe taut dalam keadaan membentuk sudut. Material pada tipe taut memiliki bobot yang lebih ringan dibanding material pada tipe CALM.



**Gambar 2.4.** *Catenary Anchor Leg Mooring Buoy*

(Sumber: <http://www.freepatentsonline.com>)

### **2.2.3 Mooring Line**

Berdasarkan *API-RP2P* (2001) dan *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*. Rantai telah menunjukkan keunggulannya pada *offshore operations*. Rantai juga memiliki daya tahan yang lebih terhadap abrasi dasar laut dan memiliki kontribusi terhadap daya cengkram *anchor* yang sangat signifikan.

3. Kombinasi antara *chain* dan *wire rope*. Dengan pemilihan panjang yang tepat dari gabungan antara *wire rope* dan *chain*, maka akan diperoleh system *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. Hal tersebut membuat sistem ini cocok digunakan pada operasi laut dalam.

#### 2.2.4 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:

##### 1. *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 Pers. (2.1).

$$M(\omega) r + C(\omega) r + K(\omega) r = X e^{i\omega t} \dots \dots \dots (2.1)$$

dengan:

- M (ω) = matrik massa fungsi frekuensi (ton)
- C (ω) = matrik damping fungsi frekuensi (ton/s)
- K (ω) = 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  $\omega$ .
- r = vektor *displacement* (m)

## 2. 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 dibawah pengaruh dinamika frekuensi gelombang. Periode awal harus dimaksimalkan untuk meminimalkan efek transient. Namun, metode ini dalam membutuhkan proses lebih kompleks dan waktu yang lama. Hal ini membutuhkan simulasi *time history*. *Time history* memberikan hasil *tension* maksimum, beban jangkar, dan lain-lain. Keuntungan metode ini dibandingkan *frequency domain* adalah semua tipe *non-linear* (matrik 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).

Tugas Akhir ini menggunakan 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*).

### 2.2.5 Teori Gerak Bangunan Apung

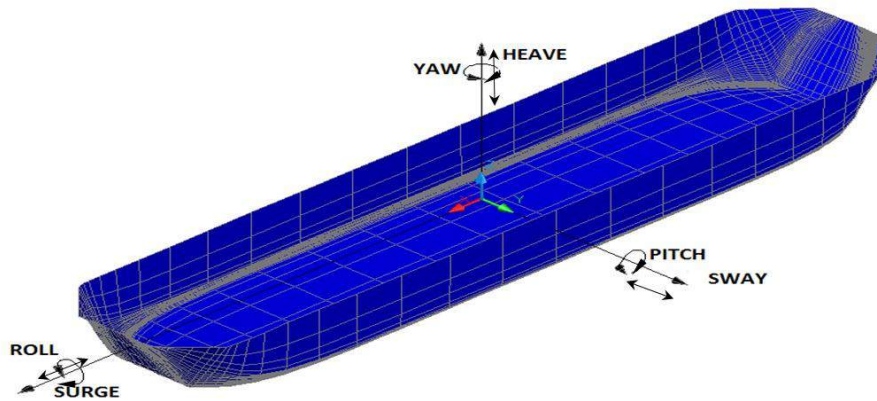
Pada dasarnya benda yang mengapung di laut mempunyai 6 mode gerakan bebas atau yang biasa dikenal dengan SDOF (*Six Degree Of Freedom*) yang dibagi menjadi dua kelompok, yakni 3 mode gerakan translasional dan 3 mode gerakan rotasional. Masing-masing mode gerakan tersebut dijelaskan pada bagian berikut, dan juga untuk lebih jelasnya disampaikan pula dalam bentuk gambar yang bisa menjelaskan masing-masing mode gerakan tersebut.

1. Mode gerak osilasi translasional
  - *Surge*, gerakan osilasi transversal arah sumbu x
  - *Sway*, gerakan osilasi transversal arah sumbu y
  - *Heave*, gerakan osilasi transversal arah sumbu z
2. Mode gerak osilasi rotasional



- *Roll*, gerakan osilasi rotasional pada sumbu x
- *Pitch*, gerakan osilasi rotasional pada sumbu y
- *Yaw*, gerakan osilasi rotasional pada sumbu z

Definisi SDOF tersebut diatas dapat dilihat dalam Gambar 2.5 berikut :



Gambar 2.5 Six Degree Of Freedom (SDOF) pada FSO

(Sumber: Wahyudi, 2009)

### 2.2.6 Gerakan Surge Murni

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

$$a\ddot{x} + b\dot{x} + cx = F_o \cos \omega_e t \dots\dots\dots(2.2)$$

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)

### 2.2.7 Gerakan Sway Murni

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

$$a\ddot{y} + b\dot{y} + cy = F_o \cos \omega_e t \dots\dots\dots(2.3)$$

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)

### 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. Maka dapat dituliskan persamaan umum pada kapal kondisi heaving adalah:

$$a\ddot{z} + b\dot{z} + cz = F_o \cos \omega_e t \dots\dots\dots(2.4)$$

dengan:

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

### 2.2.9 Gerakan Roll Murni

Kapal menjalani gerakan harmonis sederhana terhadap koordinat axis secara transversal maupun longitudinal. *Rolling* merupakan gerak 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:

$$a\ddot{\phi} + b\dot{\phi} + c\phi = M_o \cos \omega_e t \dots\dots\dots(2.5)$$

dengan:

- $M_o$  = Amplitudo momen eksitasi (m)
- $\omega_e$  = Frekuensi gelombang *encountering* (rad/sec)
- $a\ddot{\phi}$  = 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)

### 2.2.10 Gerakan *Pitch* Murni

Konstruksi benda apung dapat mengalami *simple harmonic motion* yang berupa gerakan dalam arah sumbu transversal maupun arah sumbu longitudinal apabila benda apung tersebut mengalami perpindahan posisi keseimbangannya dan kemudian dilepaskan atau pada benda apung tersebut dikenakan suatu kecepatan awal sehingga bergerak menjauh dari posisi keseimbangannya. *Pitching* merupakan gerak 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:

$$a\ddot{\theta} + b\dot{\theta} + c\theta = M_o \cos \omega_e t \dots\dots\dots(2.6)$$

dengan:

- $M_o$  = amplitudo momen eksitasi (m)
- $\omega_e$  = frekuensi gelombang *encountering* (rad/sec)
- $a\ddot{\theta}$  = *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)

### 2.2.11 Gerakan *Yaw* Murni

Gerak *yaw* merupakan gerak 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:

$$a\ddot{\phi} + b\dot{\phi} + c\phi = M_o \cos \omega_e t \dots\dots\dots(2.7)$$

dengan:

- $M_o$  = amplitudo momen eksitasi (m)
- $\omega_e$  = frekuensi gelombang *encountering* (rad/sec)
- $a\ddot{\phi}$  = *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)

### 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:

$$\sum_{n=1}^6 [(M_{jk} + A_{jk})\ddot{\xi}_k + B_{jk}\dot{\xi}_k + C_{jk}\xi_k] = F_j e^{i\omega t}, j = 1 \dots \dots \dots (2.8)$$

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.*

Pers. (2.8) di atas menunjukkan hubungan antara gaya aksi dan reaksi. Gaya aksi direpresentasikan oleh variabel pada ruas kanan, yang merupakan eksitasi gelombang terhadap bangunan apung. Gaya reaksi ditunjukkan oleh variabel kiri pada persamaan, yang terdiri dari gaya inersia, gaya redaman dan gaya pengembali, yang masing-masing berkorelasi dengan percepatan gerak, kecepatan gerak dan simpangan atau displasemen gerakan (Djarmiko, 2012).

### 2.2.13 Perilaku Bangunan Apung pada Gelombang Reguler

#### 2.2.13.1 Teori Gelombang Reguler

Teori gelombang Airy merupakan teori gelombang yang paling sering digunakan dalam menghitung beban gelombang (*wave load*) yang terjadi pada struktur. Teori gelombang Airy juga bisa disebut dengan teori gelombang amplitudo kecil, yang menjelaskan bahwa asumsi tinggi gelombang adalah sangat kecil jika dibandingkan terhadap panjang gelombang atau kedalaman laut. Periode gelombang diasumsikan sebagai variabel konstan yang tidak berubah terhadap waktu. Jadi jika dilaut diukur periode gelombang adalah 10 detik, maka periodenya akan tetap 10 detik selama

gelombang tersebut menjalar. Dengan mengasumsikan kondisi dasar laut adalah rata dan batasan horisontal pada permukaan bernilai tak hingga maka teori gelombang linear atau yang lebih dikenal dengan teori gelombang Airy dapat diterapkan.

**2.2.13.2 Response Amplitude Operator (RAO)**

*Response Amplitude Operator* (RAO) atau disebut juga dengan *Transfer Function* merupakan fungsi respon yang terjadi akibat gelombang dalam rentang frekuensi yang mengenai struktur. RAO merupakan alat untuk mentransfer gaya gelombang menjadi respon gerakan dinamis struktur.

RAO memuat informasi tentang karakteristik gerakan bangunan laut yang disajikan dalam bentuk grafik, dimana absisnya adalah parameter frekuensi, sedangkan ordinatnya adalah rasio antara amplitudo gerakan pada mode tertentu,

$\zeta_{k0}$ , dengan amplitudo gelombang,  $\zeta_0$ . Menurut Chakrabarti (1987), persamaan RAO dapat dicari dengan rumus:

$$RAO(\omega) = \frac{Z(\omega)}{\zeta_0(\omega)} \quad (\text{m/m}) \quad \dots\dots\dots(2.9)$$

dengan:

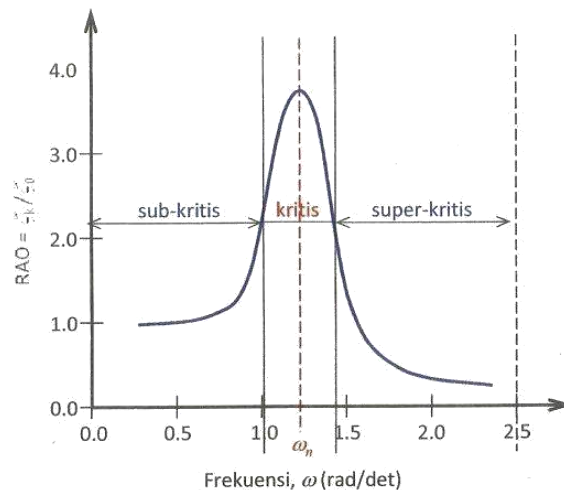
$Z(\omega)$  = amplitudo struktur (m)

$\zeta_0(\omega)$  = amplitudo gelombang (m)

Respon gerakan RAO untuk gerakan translasi (*surge, sway, heave*) merupakan perbandingan langsung antara amplitudo gerakan struktur dibanding dengan amplitudo gelombang insiden (keduanya dalam satuan elevasi panjang) (Djtmiko, 2012). Persamaan RAO untuk gerakan translasi sama dengan persamaan 2.9 di atas.

Sedangkan untuk respon gerakan 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 (Djtmiko, 2012):

$$RAO(\omega) = \frac{\theta(\omega)}{\zeta_0(\omega)} \quad (\text{rad/m}) \quad \dots\dots\dots(2.10)$$



**Gambar 2.6** Bentuk umum grafik respons gerakan bangunan apung  
(Sumber :Djarmiko, 2012)

Berdasarkan Gambar 2.6, kurva respons gerakan bangunan apung pada dasarnya dapat dibagi menjadi tiga bagian:

- 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  $\omega^2 < k/(m+a)$ , gerakan akan didominasi oleh faktor kekakuan.
- 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. Secara hidrodinamis di daerah frekuensi alami, yakni  $k/(m+a) < \omega^2 < k/a$ , gerakan akan didominasi oleh faktor redaman.
- 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. Oleh karena itu gerakan bangunan laut diistilahkan sebagai *platforming*. Dalam hal korelasi hidrodinamis, gerakan di daerah frekuensi tinggi ini, dimana  $\omega^2 < k/a$ , gerakan akan didominasi oleh faktor massa (Djarmiko, 2012).

### **2.2.13.3 Beban Gelombang *Second Order***

Pengaruh beban gelombang *second order* akan tampak pada perilaku struktur bangunan apung yang tertambat. Pada gelombang regular, cara yang paling sederhana untuk mendefinisikan pengaruh non linear adalah dengan melengkapi persamaan Bernoulli (Faltinsen, 1990).

Hasil dari persamaan tersebut dapat diklasifikasikan menjadi tiga komponen penyusun, yakni beban *mean wave drift*, beban osilasi variasi frekuensi dan beban osilasi dari penjumlahan frekuensi tersebut yang akan mendeskripsikan spektrum gelombang.

### **2.2.14 Perilaku Bangunan Apung pada Gelombang Acak**

#### **2.2.14.1 Respon Bangunan Apung pada Gelombang Acak**

Respons bangunan apung pada khususnya kapal yang diakibatkan oleh eksitasi gelombang acak telah diperkenalkan pertama kali oleh St. Denis dan Pierson (1953). Gerakan bangunan apung dalam kondisi ideal dapat dihitung sebagai reaksi adanya eksitasi gelombang sinusoidal, dengan karakteristik tinggi atau amplitudo dan frekuensi tertentu. Perhitungan kemudian dilakukan dengan mengambil amplitudo gelombang yang konstan, namun harga frekuensinya divariasikan dengan interval kenaikan tertentu.

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

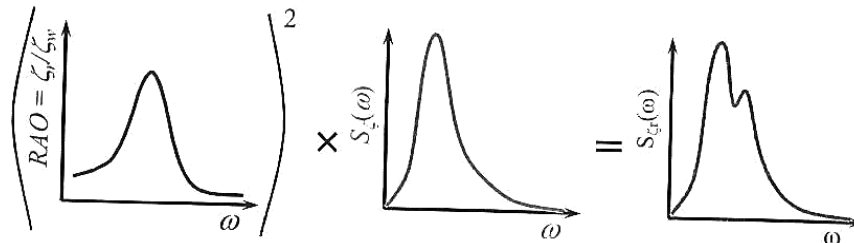
Dalam analisis respon bangunan apung pada gelombang regular dapat diketahui pengaruh interaksi hidrodinamik pada massa tambah, *potential damping* dan gaya eksternal. Analisis tersebut menghasilkan respon struktur pada gelombang regular. Respon struktur pada gelombang acak dapat dilakukan dengan mentransformasikan spektrum gelombang menjadi spektrum respon. Spektrum respon didefinisikan sebagai respon kerapatan energi pada struktur akibat gelombang. Hal ini dapat dilakukan

dengan mengalikan harga pangkat kuadrat dari *Response Amplitude Operator* (RAO) dengan spektrum gelombang pada daerah struktur bangunan apung tersebut beroperasi. Persamaan respon spektra struktur secara matematis dapat dituliskan pada persamaan 2.11 dan Gambar 2.8:

$$S_R = [RAO(\omega)]^2 S(\omega) \quad \dots\dots(2.11)$$

dengan :

- $S_R$  = respon spektra struktur ( $m^2$ -sec)
- $S(\omega)$  = spektrum gelombang ( $m^2$ -sec)
- $[RAO(\omega)]^2$  = *transfer function*
- $\omega$  = frekuensi gelombang (rad/sec)



**Gambar 2.8** Transformasi spektra gelombang menjadi spektra respons  
(Sumber: Djatmiko, 2012)

### 2.2.14.2. Spektrum Gelombang

Pemilihan spektrum energi gelombang untuk memperoleh respon spektra suatu struktur didasarkan pada kondisi real laut yang ditinjau. Bila tidak ada, maka dapat digunakan model spektrum yang dikeluarkan oleh berbagai institusi dengan mempertimbangkan kesamaan fisik lingkungan. Dari spektrum gelombang dapat diketahui parameter-parameter gelombang yang terdapat pada Tabel 2.1:

**Tabel 2.1.** Amplitudo dan tinggi gelombang pada spektrum

Profil Gelombang	Amplitudo	Tinggi
Gelombang rata-rata	$1,25\sqrt{m_0}$	$2,5\sqrt{m_0}$
Gelombang signifikan	$2,00\sqrt{m_0}$	$4,00\sqrt{m_0}$
Rata-rata 1/10 gelombang tertinggi	$2,55\sqrt{m_0}$	$5,00\sqrt{m_0}$
Rata-rata 1/1000 gelombang tertinggi	$3,44\sqrt{m_0}$	$6,67\sqrt{m_0}$



dengan:

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

$$m_0 = \int_0^{\infty} S(\omega) d\omega \dots\dots\dots(2.12)$$

Spektrum gelombang yang dipakai dalam tugas akhir ini adalah spektrum JONSWAP. Persamaan spektrum JONSWAP merupakan modifikasi dari persamaan spektrum Pierson-Morkowitz yang disesuaikan dengan kondisi laut yang ada. Persamaan spektrum JONSWAP dapat ditulis pada persamaan 2.13:

$$S(\omega) = \alpha g^2 \omega^{-5} EXP \left[ -1,25 \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right)^{-4} \right] \gamma^{EXP \left[ \frac{-(\omega-\omega_0)^2}{2\tau^2 \omega_0^2} \right]} \dots\dots(2.13)$$

dengan :

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

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

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

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

$$\omega_0 = 2\pi \left( \frac{g}{U_\omega} \right) (X_0)^{-0,33} \quad X_0 = \frac{g X}{U_\omega} \dots\dots\dots(2.14)$$

Sedang nilai dari parameter puncak ( $\gamma$ ) dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan Toursethaugen (1985) pada pers. (2.14):

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

dengan :

$T_p$  = periode puncak spektra (detik)

$H_s$  = tinggi gelombang signifikan (m)

Pada Tugas Akhir ini, dalam analisisnya akan digunakan spektrum gelombang JONSWAP. JONSWAP merupakan proyek yang dilakukan pada perairan *North Sea*. Menurut DNV RP-C205 (2010), formulasi spektrum JONSWAP merupakan modifikasi dari spektrum *Pierson-Moskowitz*. Spektrum JONSWAP mendeskripsikan angin yang membangkitkan gelombang dengan kondisi *sea state* yang ekstrim. Seperti halnya

dalam penelitian ini, karena FPSO beroperasi di Teluk Meksiko yang memiliki  $H_s$  (100 yrs) pada *sea state* 8 (ekstrim) maka penggunaan spektrum JONSWAP dapat diaplikasikan. Kriteria yang ada di DNV RP-C205, bahwa spektrum JONSWAP dapat diaplikasikan untuk perairan dengan :

$$3.6 < T_p / (H_s)^{1/2} < 5 \quad \dots\dots\dots(2.16)$$

### 2.2.15 Konsep Pembebanan

Pada suatu proses perancangan bangunan lepas pantai, untuk menentukan kemampuan kerja suatu struktur akan dipengaruhi oleh beban yang terjadi pada bangunan tersebut. Sehingga perancang harus menentukan akurasi atau ketepatan beban yang akan diterapkan dalam perancangan. Menurut (Soedjono, 1999), beban-baban yang harus dipertimbangkan dalam perancangan bangunan lepas pantai adalah sebagai berikut :

1. Beban mati (*Dead Load*)

Beban mati (*dead load*) adalah beban dari komponen-komponen kering serta beban-baban peralatan, perlengkapan dan permesinan yang tidak berubah dari mode operasi pada suatu struktur, meliputi : berat struktur, berat peralatan dari permesinan yang tidak digunakan untuk pengeboran atau proses pengeboran.

2. Beban hidup (*Live Load*)

Beban hidup adalah beban yang terjadi pada *platform* atau bangunan lepas pantai selama dipakai/berfungsi dan bisa berubah dari mode operasi satu ke mode operasi yang lain.

3. Beban akibat kecelakaan (*Accidental Load*).

Beban kecelakaan merupakan beban yang tidak dapat diduga sebelumnya yang terjadi pada suatu bangunan lepas pantai, misalnya tabrakan dengan kapal pemandu operasi, putusnya tali tambat, kebakaran, letusan.

4. Beban lingkungan (*Environmetal Load*)

Beban lingkungan adalah beban yang terjadi karena dipengaruhi oleh lingkungan dimana suatu bangunan lepas pantai dioperasikan atau bekerja. Beban lingkungan yang biasanya digunakan dalam perancangan adalah :

1. Beban angin
2. Beban arus

### 3. Beban gelombang

Menurut ABS (2004), beban desain pada SPM dibagi menjadi dua. Yaitu pada kondisi operasi dan pada kondisi badai:

#### a. Kondisi Operasi

Pada kondisi ini, pembebanan yang dipakai adalah pembebanan maksimum yang memungkinkan diterima vessel ketika tertambat. Beban tersebut tidak boleh melampaui beban ijin yang ditentukan. Data yang digunakan harus berasal dari lokasi dimana struktur beroperasi.

#### b. Kondisi Badai

Kondisi badai untuk SPM didefinisikan sebagai kondisi lingkungan dengan maksimum angin, arus, dan gelombang berdasarkan data 100 tahunan. Pada kondisi ini tidak ada vessel yang boleh ditambatkan ke SPM, kecuali SPM memang dirancang khusus untuk kondisi ini.

Beban yang harus diperhitungkan dalam pendesainan sistem tambat berfungsi untuk menentukan beban kritis yang akan terjadi pada satu kondisi lingkungan. Formula perhitungan yang digunakan mengacu pada Wischer (1988) dalam penelitian Yilmaz (1996).

#### 2.2.15.1 Beban Angin

Beban angin yang digunakan dalam desain diukur pada ketinggian 10m (33ft) di atas permukaan laut. Dalam penelitiannya, Yilmaz (1996) membuktikan bahwa beban angin memberi dampak yang kecil terhadap gerakan dari *buoy*. Persamaan yang digunakan dalam perhitungan ini adalah:

$$F_{1W} = 0,5 \rho_W A_T C_{1W} (\psi_{WR}) V_{WR}^2 \dots\dots\dots(2.17)$$

$$F_{2W} = 0,5 \rho_W A_L C_{2W} (\psi_{WR}) V_{WR}^2 \dots\dots\dots(2.18)$$

$$F_{6W} = 0,5 \rho_W A_L C_{6W} (\psi_{WR}) V_{WR}^2 \dots\dots\dots(2.19)$$

dengan:

$$V_{WR} = V_{10} \left( \frac{y}{10} \right)^x \dots\dots\dots(2.20)$$

dimana,

- $\rho_w$  = massa jenis air ( $\text{kg/m}^3$ )
- $A_T$  = total tranverse area ( $\text{m}^2$ )
- $A_L$  = total lateral area ( $\text{m}^2$ )
- $C_{1W}$  = koefisien tahanan dalam arah longitudinal
- $C_{2W}$  = koefisien tahanan dalam arah transversal
- $C_{6W}$  = koefisien tahanan dalam arah *yaw*
- $V_{WR}$  = kecepatan angin ( $\text{m/s}$ )
- $\psi_{WR}$  = sudut relatif angin ( $\text{deg}$ )
- $V_{10}$  = kecepatan angin pada ketinggian 10 m ( $\text{m/s}$ )
- $y$  = ketinggian dimana kecepatan angin dihitung (m)
- $x$  = faktor eksponen ( $\approx 0,16$ ), (m)

### 2.2.15.2 Beban Arus

Arus pada kondisi operasi adalah arus air maksimum yang berhubungan dengan angin dan gelombang pada lokasi dimana struktur ditambat. Kecepatan arus di dasar laut maupun di permukaan laut disertakan dalam proses perhitungan. Apabila profil arus tersebut tidak *linear*, maka kecepatan pada kedalaman yang berbeda-beda harus diperhitungkan. Gaya hidrodinamika pada *mooring line* diasumsikan kecil dan gaya tersebut tidak diperhitungkan dalam persamaan gerak (Yilmaz, 1996).

$$F_{1C-Stat} = 0.5 \rho L T C_{1C} (\psi_{CR}) V_{CR}^2 \dots\dots\dots(2.21)$$

$$F_{2C-Stat} = 0.5 \rho L T C_{2C} (\psi_{CR}) V_{CR}^2 \dots\dots\dots(2.22)$$

$$F_{6C-Stat} = 0.5 \rho L T C_{6C} (\psi_{CR}) V_{CR}^2 \dots\dots\dots(2.23)$$

dengan:

- $\rho$  = massa jenis air laut ( $\text{kg/m}^3$ )
- $L$  = panjang vessel (m)
- $T$  = tinggi sarat vessel (m)
- $C_{1C}$  = koefisien tahanan arah longitudinal
- $C_{2C}$  = koefisien tahanan arah transversal
- $C_{6C}$  = koefisien tahanan arah *yaw*

➤ kecepatan relatif pada *vessel* berhubungan dengan arus

$$V_{CR} = \sqrt{(u_R^2 + v_R^2)}$$

➤ sudut relatif pada arus

$$\psi_{CR} = \arctan(-v_R / u_R)$$

Nilai koefisien-koefisien tahanan  $C_{1C}$ ,  $C_{2C}$  dan  $C_{6C}$  di atas dapat dicari dalam *Oil Companies International Forum* (OCIMF).

### 2.2.15.3 Beban Gelombang

Bangunan apung mengalami enam mode gerakan bebas yang terbagi menjadi dua jenis, yaitu tiga mode gerakan *translational* dan tiga mode gerakan *rotasional* (Bhattacharyya, 1978). Gaya gelombang *time series* dapat dibangkitkan dari spektrum gelombang sebagai *first order* dan *second order*. Berikut adalah persamaan gaya gelombang *first order*:

$$F_{WV}^{(1)}(t) = \sum_{i=1}^N F_{WV}^{(1)}(\omega_i) \cos[\omega_i t + \varepsilon_i] a_i \dots\dots\dots (2.24)$$

dengan:

- $F_{WV}^{(1)}(t)$  = gaya gelombang *first order* tergantung waktu (N)
- $F_{WV}^{(1)}$  = gaya *exciting* gelombang *first order* per unit amplitudo gelombang (N)
- $\varepsilon_i$  = sudut fase komponen gelombang *first order* (deg)
- $a_i$  = amplitudo komponen gelombang *first order* (m)
- $S(\omega)$  = fungsi spektra gelombang

*Second order wave force* adalah gelombang dengan periode tinggi yang daerah pembangkitannya tidak didaerah itu (jauh dari lokasi gelombang terjadi) dan berpengaruh dominan pada kekuatan sistem tambat. Berikut adalah persamaan gaya gelombang *second order*:

$$F_{WV}^{(2)}(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N a_i a_j D_{ij} \cos[(\omega_i - \omega_j)t + (\varepsilon_i - \varepsilon_j)] \dots\dots\dots (2.25)$$

dengan:

$$D_{ij} = \text{drift force per unit amplitudo gelombang (N/m)}$$

### 2.2.15.4 Wave Drift Forces

Gaya hanyut yang digunakan adalah gaya hanyut frekuensi rendah. Untuk struktur yang berada di atas gelombang acak, gaya hanyut merupakan gaya fungsi waktu (Yilmaz,

1996). Pada gelombang acak, gaya hanyut ini berhubungan dengan kuadrat amplitudo gelombang. Persamaan untuk *low frequency second order wave drift force* adalah:

$$\bar{F} = 2 \int_0^\infty S_\zeta(\omega) \left[ \frac{F^2}{\zeta_1 \zeta_2}(\omega, \omega) \right] d\omega \dots\dots\dots(2.26)$$

dengan:

$$F^{(2)}(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \zeta_i \zeta_j P_{ij} \cos\{(\omega_i - \omega_j)t + (\varepsilon_i - \varepsilon_j)\} + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{1}{2} \zeta_i \zeta_j Q_{ij} \sin\{(\omega_i - \omega_j)t + (\varepsilon_i - \varepsilon_j)\} \dots\dots\dots(2.27)$$

dimana:

- $\zeta$  = fungsi tinggi gelombang terhadap waktu
- $F(t)$  = *wave drift force* (N)
- $P_{ij}$  dan  $Q_{ij}$  = amplitudo fase (m)
- $\varepsilon_i$  = sudut fase komponen gelombang (deg)
- $\omega$  = frekuensi gelombang (rad/sec)

**2.2.16 Excursion**

*Excursion* atau *Offset* adalah perpindahan posisi dari *vessel* dengan jarak sejauh *x* meter setelah terkena gelombang dan merupakan salah satu bentuk respon dari *vessel* pada saat mendapat beban lingkungan. *Offset* dapat dibedakan menjadi beberapa kelompok, yaitu:

1. *Mean offset*  
*Displacement* dari *vessel* karena kombinasi dari pengaruh beban arus, *wave drift* rata-rata dan angin.
2. *Maximum offset*  
*Mean offset* yang mendapat pengaruh dari kombinasi frekuensi gelombang dan *low-frequency motion*.

*Maximum offset* dapat ditentukan dengan prosedur di bawah ini:

1.  $S_{lfmax} > S_{wfmax}$ , maka :

$$S_{max} = S_{mean} + S_{lfmax} + S_{wfsig} \dots\dots\dots(2.28)$$

2.  $S_{wfmax} > S_{lfmax}$ , maka :

$$S_{max} = S_{mean} + S_{wfmax} + S_{lfsig} \dots \dots \dots (2.29)$$

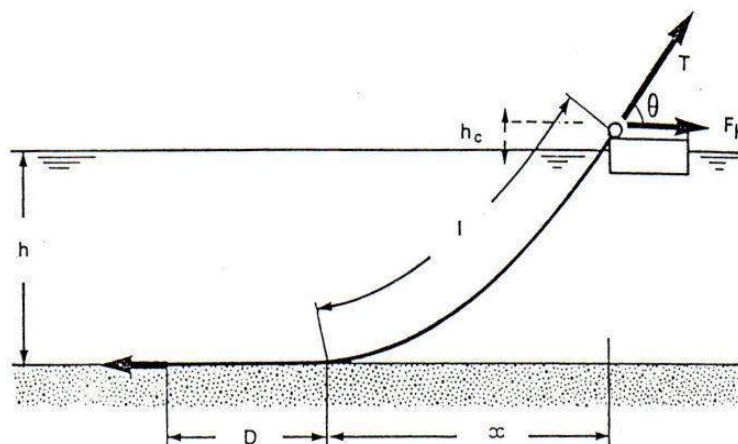
dimana,

- $S_{mean}$  = mean vessel offset (m)
- $S_{max}$  = maximum vessel offset (m)
- $S_{wfmax}$  = maximum wave frequency motion (m)
- $S_{wfsig}$  = significant wave frequency motion (m)
- $S_{lfmax}$  = maximum low-frequency motion (m)
- $S_{lfsig}$  = significant low-frequency motion (m)

Alternatif lain yang dapat digunakan dengan menggunakan time domain, frekuensi domain kombinasi keduanya atau model testing. Mean offset yang diijinkan adalah 2% sampai 4% dari kedalaman perairan sedangkan untuk maximum offset dipengaruhi oleh banyak faktor seperti kedalaman perairan, lingkungan dan sistem riser. Tetapi pada umumnya pada range 8% sampai 12% dari kedalaman perairan.

**2.2.17 Penentuan Panjang *Mooring Line***

Penentuan panjang *mooring line* berfungsi supaya FSO pada penambatannya memiliki posisi yang tepat. Dan juga supaya *mooring line* itu sendiri memiliki panjang dan *pretension* yang sesuai. Ilustrasi perhitungan panjang mooring line dapat dilihat pada Gambar 2.9 sabagai berikut:



**Gambar 2.9** Panjang minimum *mooring line* (Faltinsen, 1990)

Berikut adalah penentuan panjang minimum dari *mooring line* (*basic equation*).

$$\frac{l}{h} = \sqrt{\frac{2 F_H}{w h} + 1} \quad (2.30)$$

atau

$$\frac{l}{h} = \sqrt{\frac{2 T}{w h} - 1} \quad (2.31)$$

dengan :

- $l$  = panjang minimum tali tambat (m)
- $h$  = jarak vertical dari *fairlead* ke *seabed* =  $h_m + h_c$  (m)
- $h_m$  = kedalaman air (m)
- $h_c$  = tinggi *fairlead* di atas permukaan air (m)
- $w$  = berat tali tambat di dalam air per satuan panjang (kg/m)
- $F_H$  = horizontal *pre-tension* = 10% MBL (N)
- $T$  = *tension* maksimum dari tali tambat (*pre-tension*) (N)
- $D$  = *length resting on the seabed* (panjang tali tambat yang menempel pada *seabed*) (m)

Harga  $D$  dapat diasumsikan berdasarkan tipe dari tali tambat, yaitu:

- a. 200 s/d 300 m untuk tali tambat yang memiliki konfigurasi *wire rope anchor lines*.
- b. 50 s/d 100 m untuk tali tambat yang memiliki konfigurasi *chain anchor lines*.

### 2.2.18 Tension pada Mooring Line

Gerakan pada *vessel* dan pengaruh lingkungan menyebabkan adanya tarikan pada *mooring line*. Tarikan (*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-RP2SK 3rd edition*, *maximum* dapat ditentukan dengan prosedur dibawah ini:

1.  $T_{lfmax} > T_{wfmax}$  , maka:

$$T_{max} = T_{mean} + T_{lfmax} + T_{wfsig} \dots\dots\dots(2.32)$$

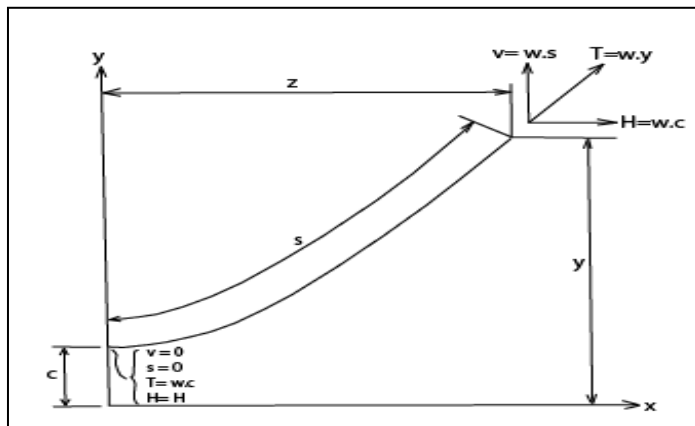
2.  $T_{wfmax} > T_{lfmax}$  , maka:

$$T_{max} = T_{mean} + T_{wfmax} + T_{lfsig} \dots\dots\dots(2.33)$$

dengan:

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

Sedangkan menurut Tsinker(1986) perhitungan tegangan maksimum tali tambat dapat menggunakan persamaan 2.34 – 2.37 dann ilustrasinya pada Gambar 2.10 :



**Gambar 2.10** *Catenary definition sketch* (Tsinker, 1986)

dengan:

$$V = wS = T \sin (\Theta) \dots\dots\dots(2.34)$$

$$H = wc = T \cos (\Theta)\dots\dots\dots(2.35)$$

$$T = wy\dots\dots\dots(2.36)$$

$$c = \frac{H}{w}\dots\dots\dots(2.37)$$

dimana,

- V = Gaya vertikal pada poin (x,y) (N)
- w = Berat dari *mooring chain* (kg/m)
- S = Panjang *mooring chain* dari (0,c) ke poin (x,y) (m)
- T = Besar *tension* pada poin (x,y) (N)
- H = Gaya horizontal pada poin (x,y) (N)
- c = panjang dari *touch down poin* ke titik y yang ditinjau (m)
- y = Jarak titik yang ditinjau ke dasar laut (m)

Perlu diketahui bahwa sistem *mooring* sebaiknya dilakukan analisis berdasarkan formulasi kriteria desain yang terbagi dalam tiga bagian batas, antara lain :

- a) *An ultimate limit state* (ULS) untuk memastikan bahwa setiap bagian *mooring lines* mempunyai kekuatan yang memadai untuk menahan efek beban yang diakibatkan oleh kondisi lingkungan ekstrem.
- b) *An accidental limit state* (ALS) untuk memastikan bahwa sistem *mooring* mempunyai kapasitas untuk menahan apabila terjadi kegagalan di salah satu *mooring line*, kegagalan dalam satu *thruster* atau satu kegagalan dalam pengontrol *thruster* atau *power system*.
- c) *A fatigue limit state* (FLS) untuk memastikan bahwa setiap bagian *mooring lines* mempunyai kapasitas dalam menahan beban siklis.

Batasan *tension* pada *mooring line* dan faktor keamanan (*safety factor*) yang direkomendasikan oleh ABS (2004) disajikan di **Tabel 2.2**:

**Tabel 2.2.** Kriteria *tension limit* dan faktor keamanan *mooring*

Condition	Percent Of MBS	Safety Factor
Intact(ULS)	60	>1.67
Damage(ALS)	80	>1.25

Dengan persamaan *safety factor* menurut API RP 2SK adalah:

$$Safety\ Factor = \frac{Minimum\ Breaking\ Load}{Maximum\ Tension} \dots\dots\dots(2.38)$$

### 2.2.19 Tegangan Aksial

Tegangan aksial (tegangan normal) adalah intensitas gaya pada suatu titik yang tegak lurus terhadap penampang, yang didefinisikan sebagai:

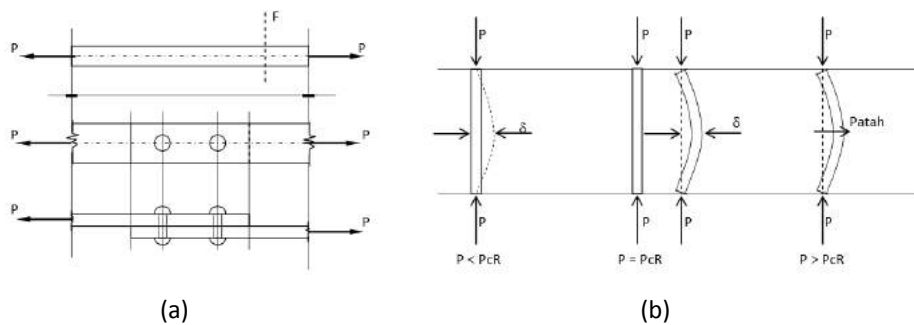
$$f = \frac{F}{A} \dots\dots\dots(2.39)$$

dengan:

F = gaya yang bekerja dalam arah tegak lurus terhadap penampang (N)

A = luas penampang (m<sup>2</sup>)

Pada batang-batang yang menahan gaya aksial saja, tegangan yang bekerja pada potongan yang tegak lurus terhadap sumbu batang adalah tegangan normal saja, tidak terjadi tegangan geser. Ilustrasi tegangan normal dapat dilihat pada Gambar 2.11 sebagai berikut:



**Gambar 2.11** Ilustrasi tegangan normal akibat gaya aksial, (+) tarik dan (-) tekan

(Sumber: Dansasmita, 2015)

### 2.2.20 Bending Stress

Momen luar diimbangi oleh momen dalam yang merupakan resultan tegangan lentur (bending) yang terlihat pada Gambar 2.12.

$$M = \int_A f \cdot dA \cdot y = \int_A \left( -\frac{y}{c} f_{\max} \right) dA \cdot y = -\frac{f_{\max}}{c} \int_A y^2 dA \dots\dots\dots(2.40)$$

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

$$M = -\frac{f_{\max}}{c} I \text{ atau } f_{\max} = -\frac{M c}{I} \dots\dots\dots(2.41)$$

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

$$f = -\frac{M y}{I} \dots\dots\dots(2.42)$$

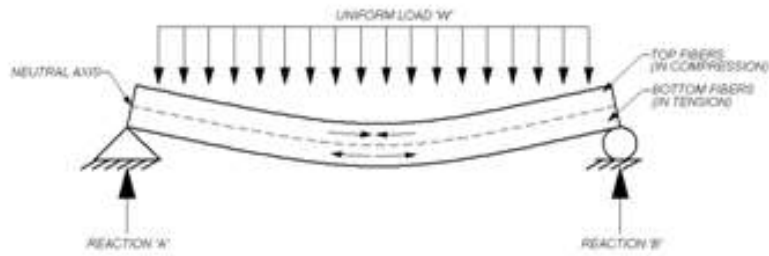


Figure 1-Beam diagram

Gambar 2.12 Tegangan lentur (*bending*) pada suatu penampang

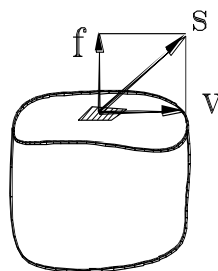
(Sumber: Dansasmita, 2015)

### 2.2.21 Tegangan Geser

Tegangan geser (*shear stress*) adalah intensitas gaya pada suatu titik yang sejajar terhadap penampang, yang didefinisikan sebagai:

$$v = \frac{V}{A} \text{ atau } \frac{\text{gaya geser}}{\text{luas}} \left[ \frac{N}{m^2} \right] \dots\dots\dots(2.43)$$

Dengan  $V$  adalah gaya yang bekerja dalam arah sejajar terhadap penampang dan  $A$  adalah luas penampang. Ilustrasi tegangan geser dapat dilihat pada Gambar 2.13 sebagai berikut:



Gambar 2.13 Gaya yang bekerja dalam arah sejajar terhadap penampang

(Sumber: Popov 1996)

### 2.2.22 Tegangan Von Misses

Struktur harus mampu menahan beban – beban operasional tambahan yang terjadi dengan aman, yaitu tegangan yang terjadi tidak boleh melebihi tegangan yang

dijinkan, serta pelat struktur, pelat bilah, agar tidak kehilangan stabilitasnya (tidak mengalami *buckling*).

Untuk menghitung tegangan kita memakai persamaan :

$$\sigma(x, y) = \frac{M_x \cdot Y}{I} \dots\dots\dots(2.44)$$

dengan:

- $M_x$  = momen bending (ton.m)
- $Y$  = jarak normal bidang (m)
- $I$  = momen inersia bidang ( $m^2$ )

Jadi harus ditentukan y yang merupakan jarak “titik berat bagian yang dihitung tegangannya” terhadap sumbu netral (garis mendatar yang melalui titik berat penampang), dan menghitung momen inersia penampang  $I_{(x)}$ . Karena penampang melintang kapal mempunyai banyak bagian, maka menghitung momen inersianya tak dapat dihitung dengan memakai rumus dasar ( $I = \frac{1}{12} b \cdot h^3$ ) dan sebaiknya dilakukan dalam bentuk tabulasi. Seperti telah dijelaskan didepan, akibat beban momen lengkung yang bekerja pada badan kapal ,maka bagian penampang kapal yang mengalami tekanan dan posisinya mendatar (horizontal) dimasukkan kedalam perhitungan momen inersia harus sudah diperhitungkan lebar efektifnya, dengan cara seperti pada uraian didepan. Pada element tiga dimensi, bekerja tegangan-tegangan searah sumbu x, y, dan z. Pada tiap-tiap sumbu dapat diketahui tegangan utama( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ) yang dihitung dari komponen tegangan dengan persamaan sebagai berikut(Ansys 13.0):

$$\begin{bmatrix} \sigma_x - \sigma_0 & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} & \sigma_y - \sigma_0 & \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_z - \sigma_0 \end{bmatrix} = 0 \dots\dots\dots(2.45)$$

dengan:

- $\sigma_0$  = tegangan utama yang bekerja pada sumbu (Pa)
- $\sigma_x$  = tegangan arah sumbu x (Pa)
- $\sigma_y$  = tegangan arah sumbu y (Pa)
- $\sigma_z$  = tegangan arah sumbu z (Pa)
- $\sigma_{xy}$  = tegangan arah sumbu xy (Pa)
- $\sigma_{xz}$  = tegangan arah sumbu xz (Pa)
- $\sigma_{yz}$  = tegangan arah sumbu yz (Pa)

Penggabungan tegangan-tegangan utama pada suatu element merupakan suatu cara untuk mengetahui nilai tegangan maksimum yang terjadi pada node tersebut. Salah satu cara mendapatkan tegangan gabunngan adalah dengan menggunakan formula tegangan *Von Mises*:

$$\sigma_{eq} = \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \quad \dots\dots(2.46)$$

dengan:

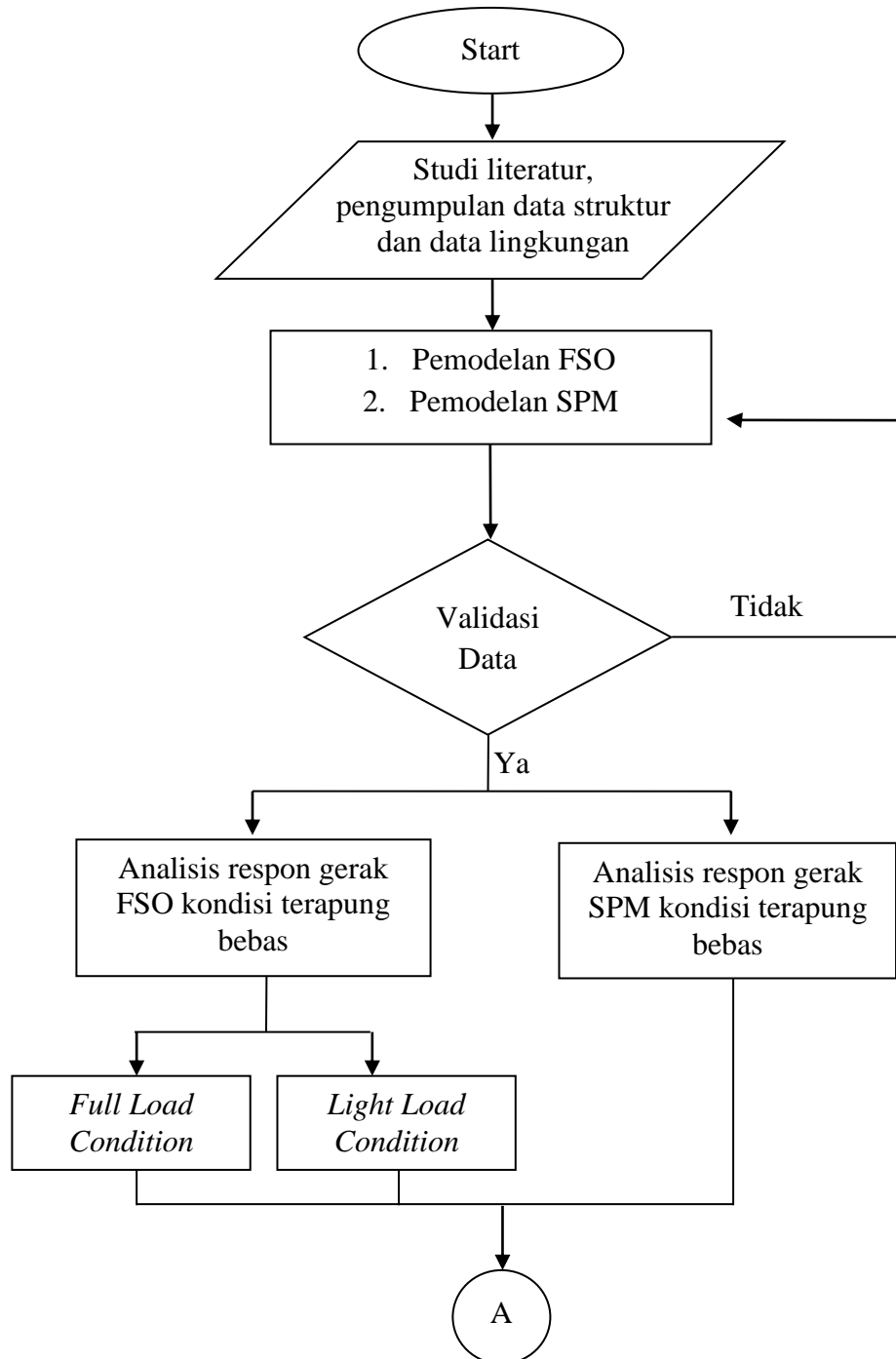
- $\sigma_{eq}$  = tegangan ekuivalen (*von mises stress*) (Pa)
- $\sigma_x$  = tegangan normal sumbu *x* (Pa)
- $\sigma_y$  = tegangan normal sumbu *y* (Pa)
- $\sigma_z$  = tegangan normal sumbu *z* (Pa)
- $\tau_{xy}$  = tegangan geser bidang *yz* (Pa)
- $\tau_{yz}$  = tegangan geser bidang *zx* (Pa)
- $\tau_{zx}$  = tegangan geser bidang *xy* (Pa)

## BAB III

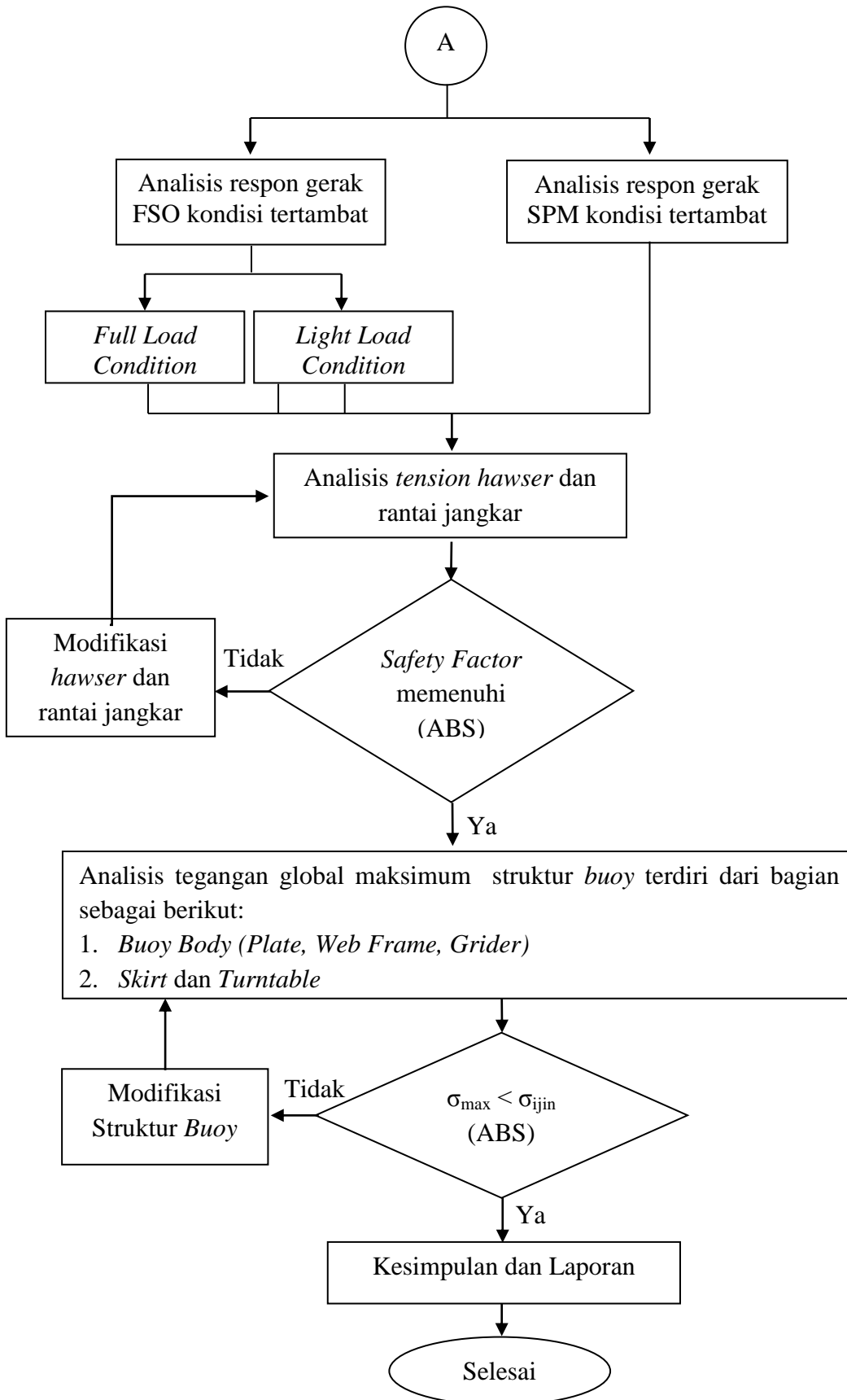
### METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Metode Penelitian

Secara umum langkah pengerjaan tugas akhir ini dapat digambarkan dalam bentuk diagram alir (*flowchart*) pada **Gambar 3.1** sebagai berikut :



**Gambar 3.1** Flowchart penyelesaian Tugas Akhir



Gambar 3.1 Flowchart penyelesaian Tugas Akhir



### 3.2 Prosedur Penelitian

Alur dalam pengerjaan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Studi literatur

Studi literatur pada tugas akhir ini diambil dari buku, materi perkuliahan, jurnal, dan penelitian sebelumnya termasuk laporan tugas akhir terdahulu yang memiliki keterkaitan topik serupa untuk mencari dasar teori yang digunakan, dan standard atau codes yang relevan yang dibutuhkan selama pengerjaan tugas akhir ini.

2. Data Struktur

Data SPM, FSO dan *mooring property* didapatkan dari PT. Citra Mas.

3. Pemodelan dengan FSO dan SPM

Pemodelan awal *body* FSO menggunakan *software* Maxsurf bertujuan untuk mendapatkan koordinat-koordinat bentuk *body* FSO, serta untuk mendapatkan data hidrostatis model. Pemodelan SPM dengan Autocad 2007.

4. Validasi Model

Setelah model FSO dan SPM dibuat pada Maxsurf, dilakukan validasi berdasarkan data hidrostatis yang didapatkan dari PT. Citra Mas. Jika validasi data dianggap salah, maka model akan didesain ulang sampai menyerupai *body* asli dengan batas faktor *error* tidak melebihi 5%.

5. Analisis Gerakan dengan Ansys AQWA

*Running* ANSYS AQWA dilakukan untuk mendapatkan RAO dari struktur FSO dan SPM kondisi terapung bebas.

6. Pemodelan pada Ansys AQWA

Pemodelan selanjutnya adalah memodelkan FSO dan SPM dengan kondisi tertambat sesuai data yang ada menggunakan software Ansys AQWA.

7. Analisis *Tension Mooring Line* dengan Ansys AQWA

*Running* Ansys AQWA dilakukan untuk mendapatkan RAO dari struktur FSO dan SPM kondisi tertambat. Setelah itu dicari *tension* pada *hawser* yang menghubungkan FSO dan SPM dan *tension* pada rantai jangkar yang menghubungkan SPM dengan jangkar, serta dihitung *safety factor* untuk mengetahui apakah *safety factor* tersebut tidak kurang dari yang disyaratkan oleh ABS.

8. Analisis Tegangan Global dengan Ansys Workbench

Sebelum melakukan pemodelan di Ansys, terlebih dahulu dibuat pemodelan 3D

pada CAD 2016 untuk mempermudah. Setelah itu dilanjutkan dengan mengkonversi model agar menjadi *solid* dan juga dilakukan pemilihan material untuk model sesuai data. Tegangan global struktur pada *buoy* dilakukan dengan *running* Ansys. Kemudian dilakukan analisis terhadap hasil yang didapat. Analisis dilakukan dengan mengacu pada standar yang digunakan, yaitu *American Bureau of Shipping* untuk mengetahui apakah struktur tersebut sesuai dengan kriteria atau tidak.

## 9. Kesimpulan

Pengambilan kesimpulan terhadap analisis yang telah dilakukan meliputi pergerakan struktur dan besar *tension* pada *hawser* yang menghubungkan SPM dengan FSO, *tension* pada rantai jangkar yang menghubungkan jangkar dan SPM, dan tegangan global maksimum dari struktur *buoy mooring* mengacu pada ABS.

### 3.3 Pengumpulan Data

Data yang dibutuhkan meliputi data struktur dan data lingkungan. Data struktur terdiri dari *principle dimension* FSO Arco Ardjuna, SPM, dan data hidrostatis FSO Arco Ardjuna, dan *property mooring line* yang terdapat pada Tabel 3.1-3.5.

- FSO Arco Ardjuna:

**Tabel 3.1** *Principle dimension* FSO Arco Ardjuna

<b>Designation</b>	<b>Units</b>	<b>Minimum Operating Draft</b>	<b>Maximum Operating Draft</b>
Length, LBP	m	142.6	
Breadth, B	m	48.2	
Depth, D	m	26.5	
Draft, T	m	2.5	24
Displacement	t	15529	153202
LCG	m	1.29	2.17
KG (VCG)	m	14.04	13.44
Yaw Radius of Gyration	m	34.5	34.5

(Sumber: PT. Citra Mas, 2013)

- *Single Mooring*

**Tabel 3.2** *Main dimension CALM buoy*

<b>Designation</b>	<b>Unit</b>	<b>Data</b>
<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. Citra Mas, 2013)

- *Mooring Hawsers*

**Tabel 3.3** Karakteristik *mooring hawser*

<b>Designation</b>	<b>Data</b>
<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. Citra Mas, 2013)

- *Anchor Legs and Pattern Definition*

**Tabel 3.4** Karakteristik *anchor legs*

<b>Designation</b>	<b>Data</b>
<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</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
<i>Stiffness EA</i>	868 MN
<i>Anchoring radius</i>	337.5 m

(Sumber: PT. Citra Mas, 2013)

- Data Lingkungan Perairan Laut Jawa

**Tabel 3.5** Data lingkungan

<b>Parameter</b>	<b><i>100-years return period</i></b>
Kedalaman	45 m
Tinggi Gelombang Maksimum/Hm	6.4 m
Periode Gelombang Maksimum /Tm	9.4 s
Tinggi Gelombang Signifikan/Hs	3.6 m
Periode Gelombang Signifikan/Ts	8.3 s
Periode Puncak Gelombang (Tp)	9 s
Spektrum	Jonswap

(Sumber: PT. Citra Mas, 2013)

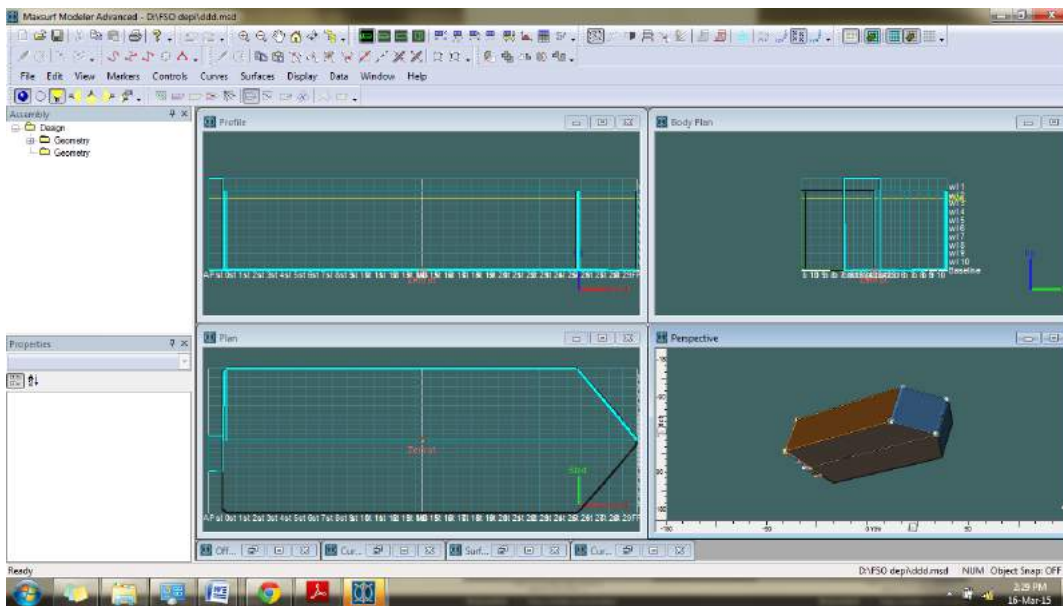
Data lingkungan di atas merupakan data lingkungan yang nilainya sama untuk semua arah pembebanan. Dalam hal ini, pembebanan pada struktur ialah pada arah  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  dan  $180^\circ$ .

## BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Pemodelan Struktur

#### 4.1.1 FSO

Pada pemodelan ini menggunakan kapal FSO Arco Ardjuna yang beroperasi di laut Jawa. Pemodelan FSO menggunakan *software* Maxsurf dengan acuan data yang ada. Berikut adalah gambar dari hasil pemodelan FSO dengan menggunakan *software* Maxsurf :



**Gambar 4.1** Pemodelan FSO Arco Ardjuna dengan menggunakan *software* Maxsurf

#### 4.1.2 *Single Point Mooring*

Pemodelan *Single Point Mooring* dengan Autocad 3D 2007 menggunakan data utama sebagai berikut :

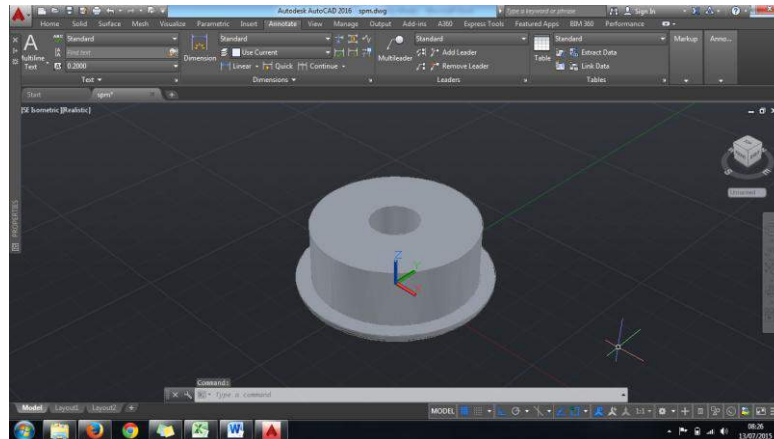
**Tabel 4.1** Ukuran utama(*principal dimention*) *Single Point Mooring*

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. Citra Mas, 2013)

Berikut adalah gambar dari hasil pemodelan *Single Point Mooring* dengan menggunakan *software* Autocad 2016:



**Gambar 4.2** Pemodelan *Body Surface Single Point Mooring* dengan menggunakan *software* Autocad 3D

## 4.2 Hidrostatik

### 4.2.1 FSO

Agar mendapatkan model kapal yang sama dengan keadaan sebenarnya, maka perlu dilakukan validasi data hidrostatik. Validasi model dilakukan dengan membandingkan data hasil hidrostatik yang dikeluarkan *software* Maxsurf dengan data hidrostatik Arco Ardjuna yang sudah ada. Dalam hal ini, validasi model dilakukan dalam dua kondisi yaitu pada saat *full load* dan *light load*.

Besaran-besaran hidrostatik yang dibandingkan terdapat pada **Tabel 4.2** dan **Tabel 4.3** dibawah ini. Perbedaan hasil perhitungan hidrostatik yang diperoleh antara Maxsurf dengan hidrostatik data pada Arco Ardjuna diberikan toleransi atau faktor *error* sebesar 5%. Dengan demikian hasil perancangan *lines plan* pada FSO adalah valid untuk dipakai sebagai input dalam menghitung karakteristik gerakan kapal.

**Tabel 4.2** Koreksi hidrostatik data dengan hidrostatik model Maxsurf pada kondisi *full load*

No	Data	Unit	FSO Arco Ardjuna	Maxsurf Modeler	Koreksi	Status
1	Displacement	tonne	153026	153459	-0.28%	Memenuhi
2	Volume	m <sup>3</sup>	149293.659	149715.712	-0.28%	Memenuhi
3	Draft to Baseline	m	24	24	0.00%	Memenuhi
4	Immersed depth	m	24	24	0.00%	Memenuhi
5	Lwl	m	142.6	142.6	0.00%	Memenuhi
6	Beam wl	m	48.2	48.2	0.00%	Memenuhi
7	WSA	m <sup>2</sup>	12841	13328.048	-3.79%	Memenuhi
8	Max cross sect area	m <sup>2</sup>	1150.63	1151.549	-0.08%	Memenuhi
9	Waterplane area	m <sup>2</sup>	6239	6265.599	-0.43%	Memenuhi
10	Cp		0.908	0.912	-0.44%	Memenuhi
11	Cb		0.9042	0.908	-0.42%	Memenuhi
12	Cm		0.9958	0.995	0.08%	Memenuhi
13	Cwp		0.9077	0.912	-0.47%	Memenuhi
14	LCB from midship	m	-2.78	-2.792	-0.43%	Memenuhi
15	LCF from midship	m	-2.79	-2.798	-0.29%	Memenuhi
16	KB	m	12.02	12.052	-0.27%	Memenuhi
17	KMt	m	19.73	19.772	-0.21%	Memenuhi
18	KMI	m	71.3	71.812	-0.72%	Memenuhi

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

No	Data	Unit	FSO Arco Ardjuna	Maxsurf Modeler	Koreksi	Status
1	Displacement	tonne	15385.000	15392.000	0.05%	Memenuhi
2	Volume	m <sup>3</sup>	15009.756	15017.006	0.05%	Memenuhi
3	Draft to Baseline	m	2.500	2.500	0.00%	Memenuhi
4	Immersed depth	m	2.500	2.500	0.00%	Memenuhi
5	Lwl	m	142.600	142.600	0.00%	Memenuhi
6	Beam wl	m	48.200	48.200	0.00%	Memenuhi
7	WSA	m <sup>2</sup>	6681.000	6932.825	3.77%	Memenuhi
8	Max cross sect area	m <sup>2</sup>	114.340	115.348	0.88%	Memenuhi
9	Waterplane area	m <sup>2</sup>	6239.000	6264.513	0.41%	Memenuhi
10	Cp		0.910	0.913	0.33%	Memenuhi
11	Cb		0.873	0.874	0.11%	Memenuhi
12	Cm		0.959	0.957	0.21%	Memenuhi
13	Cwp		0.908	0.912	0.44%	Memenuhi
14	LCB from midship	m	-2.690	-2.746	2.08%	Memenuhi

15	LCF from midship	M	-2.790	-2.796	0.22%	Memenuhi
16	KB	M	1.260	1.301	3.25%	Memenuhi
17	KMt	M	78.000	78.324	0.42%	Memenuhi
18	KMI	M	590.800	596.971	1.04%	Memenuhi

#### 4.2.2 Single Point Mooring

Hal yang sama juga dilakukan untuk model SPM, yaitu dilakukan validasi hidrostatik antara model Maxsurf dan model sebenarnya.

**Tabel 4.4** Koreksi hidrostatik data dengan hidrostatik model *Single Point Mooring* pada Ansys AQWA

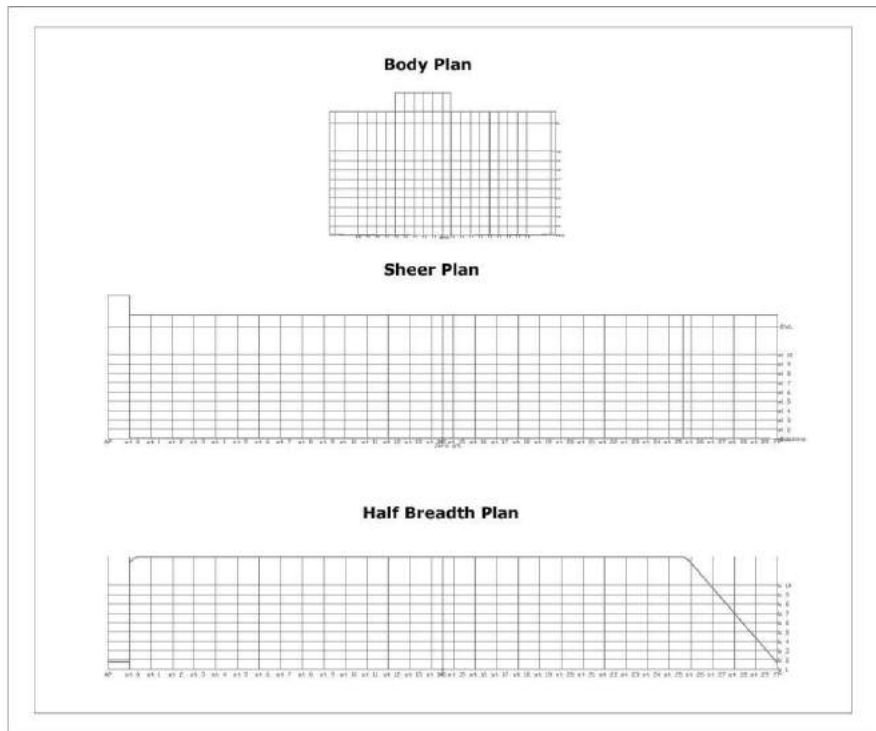
Designation	Unit	Data	Ansys AQWA	Koreksi	Status
<i>Shell Outer Diameter</i>	M	12	12		Memenuhi
<i>Centre Well Diameter</i>	M	3.57	3.57		Memenuhi
<i>Skirt Outer Diameter</i>	M	16.26	16.26		Memenuhi
<i>Buoy Body Height</i>	M	5.3	5.3		Memenuhi
<i>Skirt Thickness</i>	mm	12	12		Memenuhi
<i>Skirt Height/ Baseline</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	259.6	1.67%	Memenuhi

### 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 adalah gambar *lines plan* dari FSO Arco Ardjuna.





Gambar 4.3 Lines plan Arco Ardjuna

#### 4.4 Analisis Gerakan Kapal

##### 4.4.1 FSO

Untuk analisis gerakan FSO dilakukan dengan bantuan *software* Ansys AQWA. Dalam menggunakan *software* Ansys AQWA diperlukan model dari maxsurf v20. Pembuatan model FSO pada Ansys AQWA membutuhkan data titik berat, displacement dan *radius gyration*. Besar titik berat dan *radius gyration* dapat dilihat pada **Tabel 4.5** sebagai berikut :

Tabel 4.5 Data titik berat dan *radius gyration* pada FSO

	<b>FSO FULL LOAD CONDITION</b>	<b>FSO LIGHT LOAD CONDITION</b>
X	2.17	1.29
Y	0	0
Z	13.44	14.04
KX	16.388	16.388

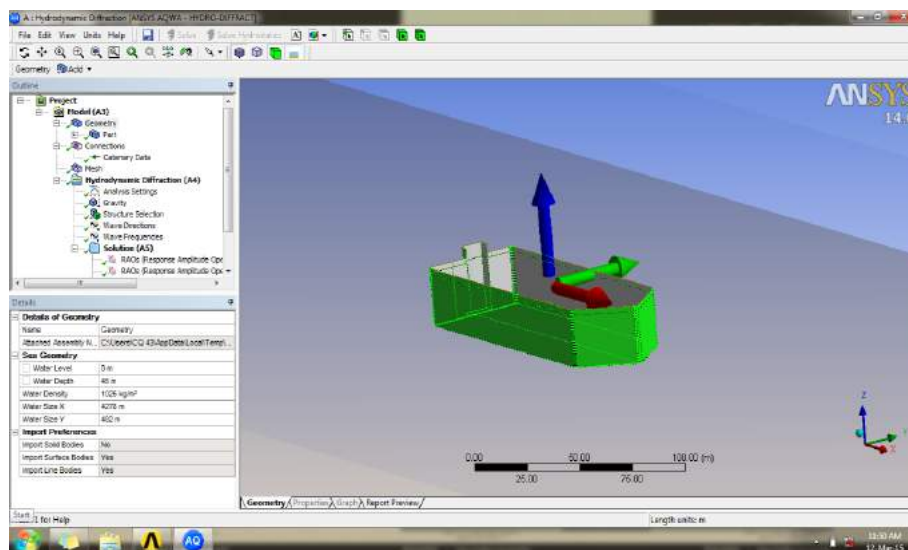
KY	35.65	35.65
KZ	36.076	36.076
Displacement	153459 ton	15392 ton

Selain 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 meliputi:

**Tabel 4.6** Data lingkungan

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

Berikut ini adalah model FSO yang dikeluarkan dari Ansys AQWA berdasarkan data yang diinputkan:



**Gambar 4.4** Model FSO Arco Ardjuna pada Ansys

Setelah semua data diinputkan dapat dilakukan analisis selanjutnya.

#### 4.4.2 Single Point Mooring

Untuk analisis gerakan SPM sama dengan FSO dilakukan dengan bantuan *software* Ansys AQWA. Dalam menggunakan *software* Ansys AQWA diperlukan model dari Autocad 3D 2007. Pembuatan model SPM pada Ansys AQWA

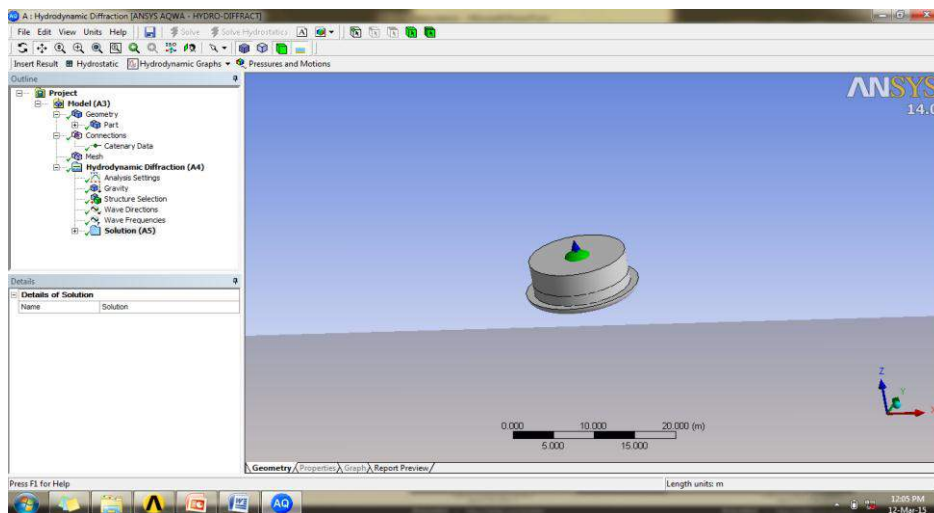
membutuhkan data titik berat, displacement dan *radius gyration*. Data lingkungan yang dibutuhkan sama dengan FSO, dan setelah data diinputkan semuanya, selanjutnya dilaksanakan analisis berikutnya. Besar titik berat dan *radius gyration* dapat dilihat pada **Tabel 4.7** sebagai berikut :

**Tabel 4.7** Data titik berat, displacement dan *radius gyration* pada SPM

	SPM
X	0
Y	0
Z	3.42
KX	7.63
KY	7.63
KZ	10.61
Displacement	259.6 ton

Berikut ini adalah model SPM yang dikeluarkan dari Ansys AQWA berdasarkan data yang diinputkan:

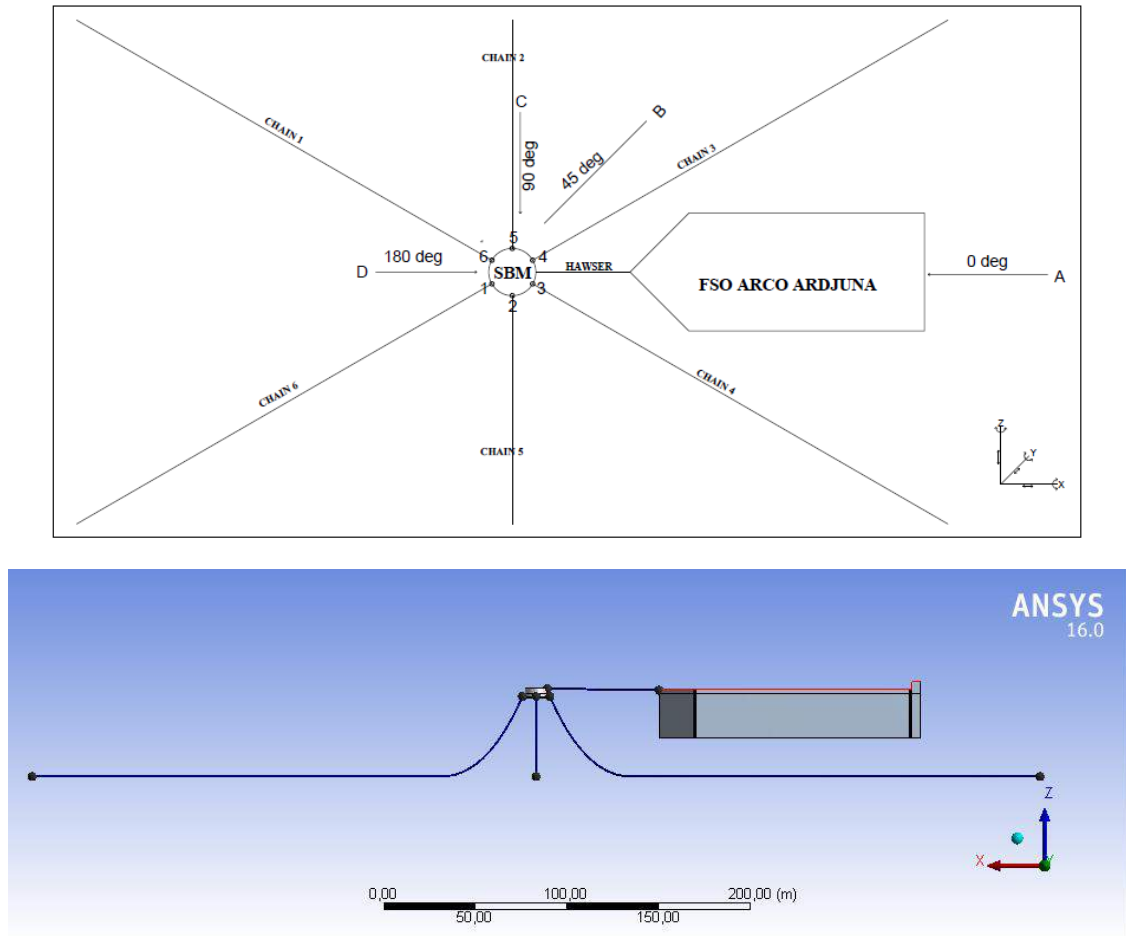
**Gambar 4.5** Model SPM pada Ansys



#### 4.5 Konfigurasi Tali Tambat

Pada Tugas Akhir ini akan dianalisis konfigurasi tali tambat, baik hawser maupun chain. 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. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada **Gambar 4.6**.



**Gambar 4.6** Konfigurasi Tali Tambat

Konfigurasi tali tambat yang dipasang pada FSO didesain memiliki panjang yang sama. Perhitungan panjang tali (*line*) didasarkan pada penelitian yang dilakukan oleh Faltinsen (1990) yang didukung oleh API RP 2SK. Dari perhitungan yang dilakukan, maka didapatkan hasil panjang tali tambat adalah 304.5 m.

#### **4.6 Response Amplitude Operator (RAO)**

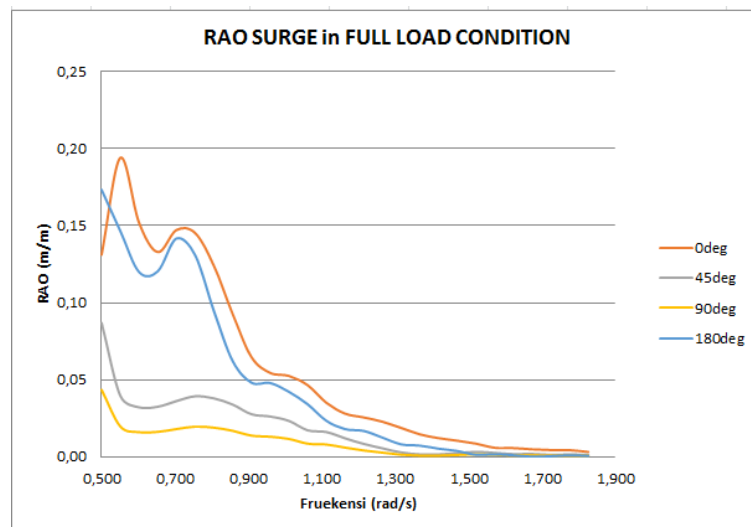
Untuk melakukan analisis respon gerak terhadap FSO dan *Single Point Mooring* dilakukan dengan mendapatkan *Response Amplitude Operator* (RAO) dengan bantuan *software* Ansys AQWA. Analisis respon ini memperhitungkan RAO pada saat kondisi FSO dan SPM terapung bebas maupun yang tertambat. Perhitungan RAO dilakukan pada *heading*  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ , dan  $180^\circ$ . Respon gerakan yang di analisis meliputi 3 gerakan translasional dan 3 gerakan rotasional. Gerakan translasional terdiri dari gerakan surge,

sway dan heave dengan satuan (m/m), sedangkan gerakan rotasional terdiri dari gerakan roll, pitch, dan yaw dengan satuan (deg/m). Grafik RAO dimulai dari frekuensi gelombang ( $\omega$ ) 0.5 rad/sec sebagai acuan. Hal ini karena data lingkungan diketahui bahwa periode gelombang signifikan 8.3 detik, maka frekuensi gelombang berdasarkan data lingkungan adalah 0.757 rad/s. Selain itu, terlebih dahulu juga dijelaskan skenario isi muatan dan skenario pembebanan yang akan dikenakan pada FSO. Berikut adalah penjelasan skenario untuk analisis respon gerak FSO:

- Skenario muatan FSO terdiri dari :
  - a. FPSO kondisi muatan 100% (*full load*)
  - b. FPSO kondisi muatan 0% (*light load*)
- Skenario pembebanan pada FSO:
  - a. FPSO dikenai beban arah  $0^\circ$
  - b. FPSO dikenai beban arah  $45^\circ$
  - c. FPSO dikenai beban arah  $90^\circ$
  - d. FPSO dikenai beban arah  $180^\circ$

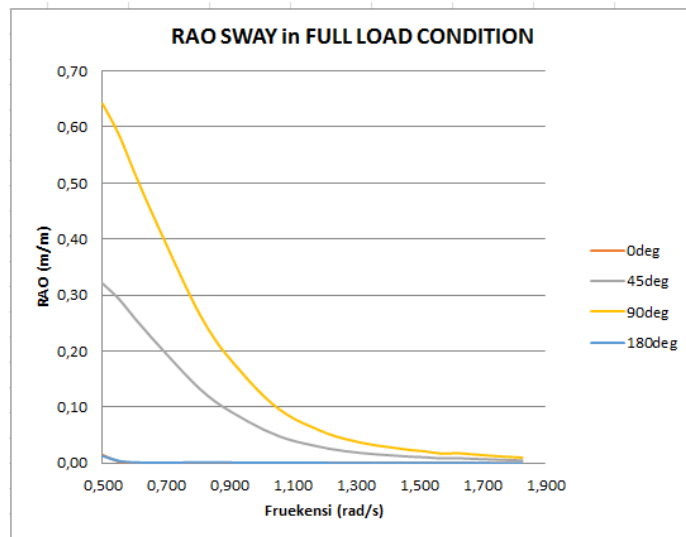
#### 4.6.1 Response Amplitude Operator (RAO) FSO Kondisi Terapung Bebas

Perhitungan *motion* FSO dilakukan pada kondisi *full load* dan pada kondisi *light load*. Pada kondisi *full load* dilakukan pada sarat 24 m dengan kedalaman laut 45 m. Berikut adalah grafik RAO pada kondisi *full load* untuk gerakan *surge*, *sway*, *heave*, *roll*, *pitch*, dan *yaw* dengan *heading* arah  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ , dan  $180^\circ$ :



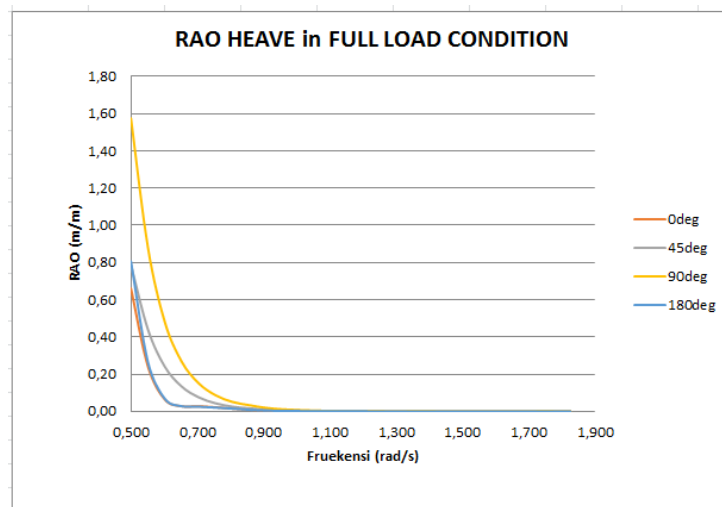
**Gambar 4.7** Grafik RAO *surge* pada FSO *full load condition*

Amplitudo *surge* tertinggi untuk *heading* 0° adalah 0.3492 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.551 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 45° adalah 0.1564 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 90° adalah 0.0782 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 180° adalah 0.3117 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec.



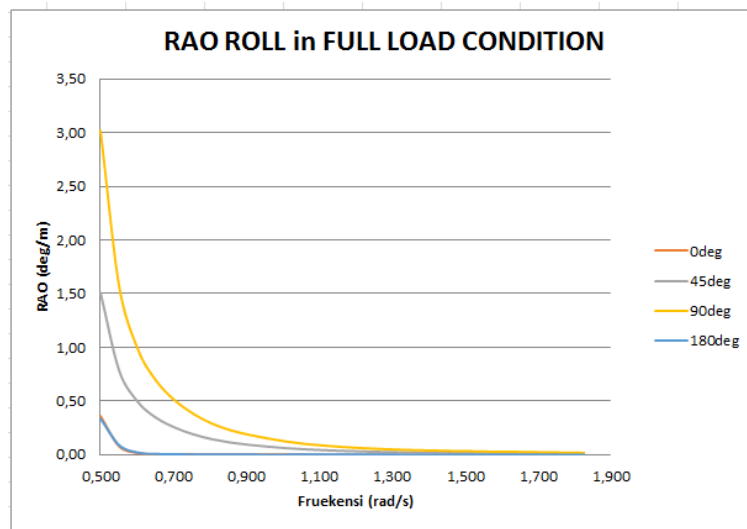
Gambar 4.8 Grafik RAO *sway* pada FSO *full load condition*

Amplitudo *sway* tertinggi untuk *heading* 0° adalah 0.0265 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 45° adalah 0.5773 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 90° adalah 1.1545 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 180° adalah 0.0238 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec.



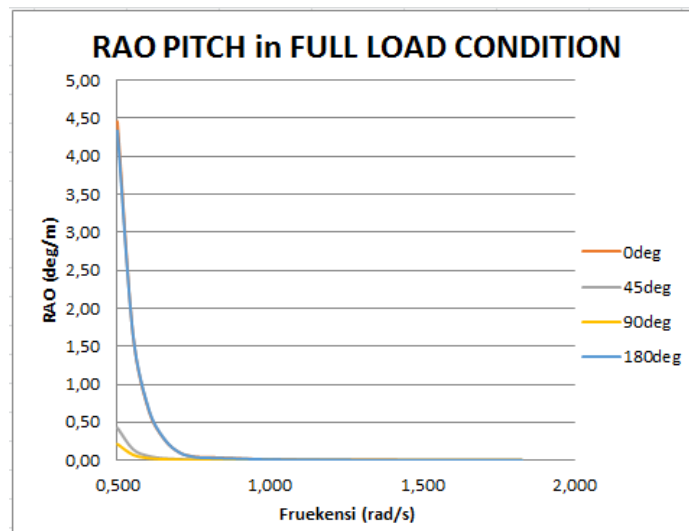
Gambar 4.9 Grafik RAO *heave* pada FSO *full load condition*

Amplitudo *heave* tertinggi untuk *heading* 0° adalah 0.0265 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 45° adalah 0.5773 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 90° adalah 1.1545 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 180° adalah 0.0238 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec.



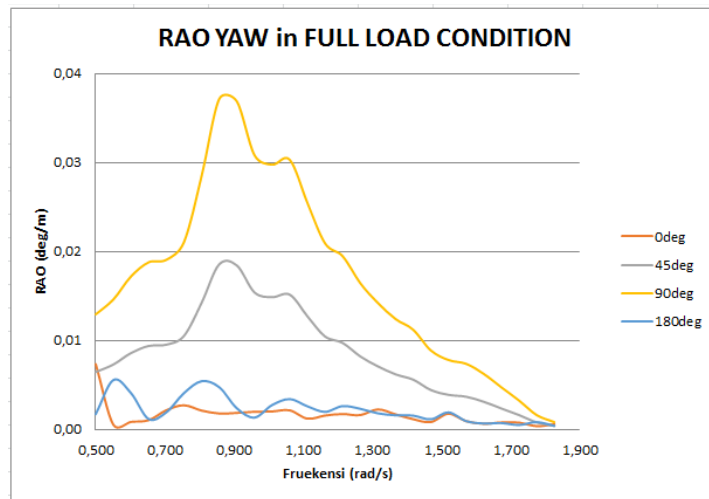
Gambar 4.10 Grafik RAO roll pada FSO full load condition

Amplitudo *roll* tertinggi untuk *heading* 0° adalah 1.1887° terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 45° adalah 1.41672° terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 90° adalah 2.8334° terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 180° adalah 1.4501° terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec.



Gambar 4.11 Grafik RAO pitch pada FSO full load condition

Amplitudo *pitch* tertinggi untuk *heading*  $0^\circ$  adalah  $8.0261^\circ$  terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading*  $45^\circ$  adalah  $0.7678^\circ$  terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading*  $90^\circ$  adalah  $0.3839^\circ$  terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading*  $180^\circ$  adalah  $7.8025^\circ$  terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec.

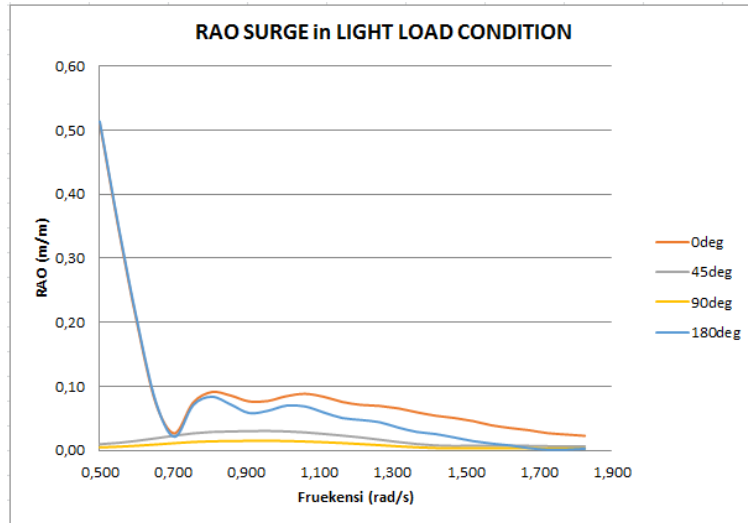


**Gambar 4.12** Grafik RAO yaw pada FSO *full load condition*

Amplitudo *yaw* tertinggi untuk *heading*  $0^\circ$  adalah  $0.0132^\circ$  terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading*  $45^\circ$  adalah  $0.0334^\circ$  terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.857 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading*  $90^\circ$  adalah  $0.03712^\circ$  terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.857 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading*  $180^\circ$  adalah  $0.00557^\circ$  terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec.

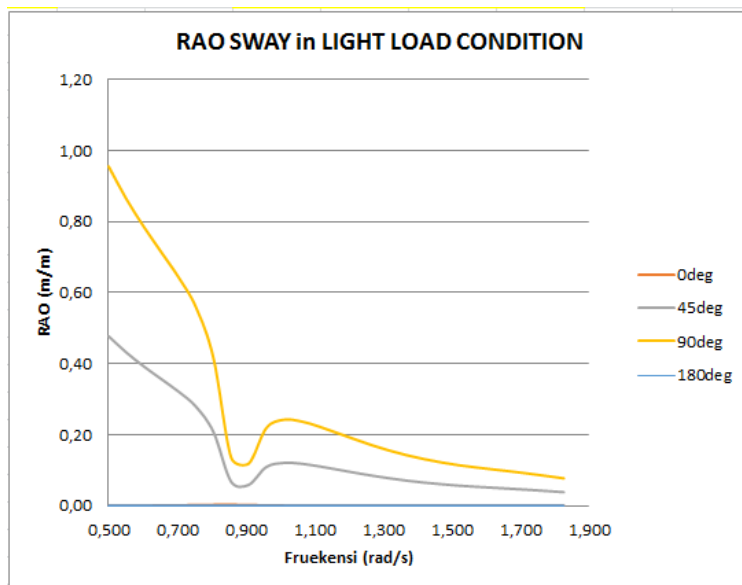
Untuk kondisi *light load* dilakukan pada sarat 2.5 m dengan kedalaman laut 45m. Berikut merupakan RAO FSO untuk kondisi *light load*:





**Gambar 4.13** Grafik RAO surge pada FSO light load condition

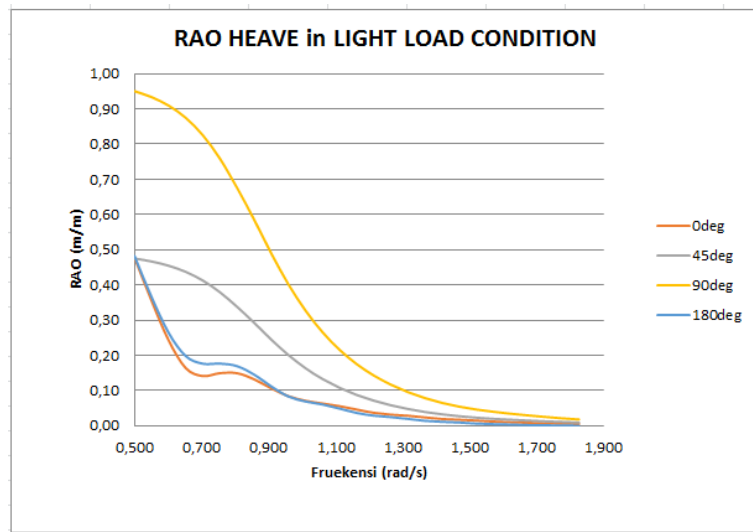
Amplitudo surge tertinggi untuk heading  $0^\circ$  adalah 0.0265 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi heading  $45^\circ$  adalah 0.5773 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi heading  $90^\circ$  adalah 1.1545 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi heading  $180^\circ$  adalah 0.0238 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec.



**Gambar 4.14** Grafik RAO sway pada FSO light load condition

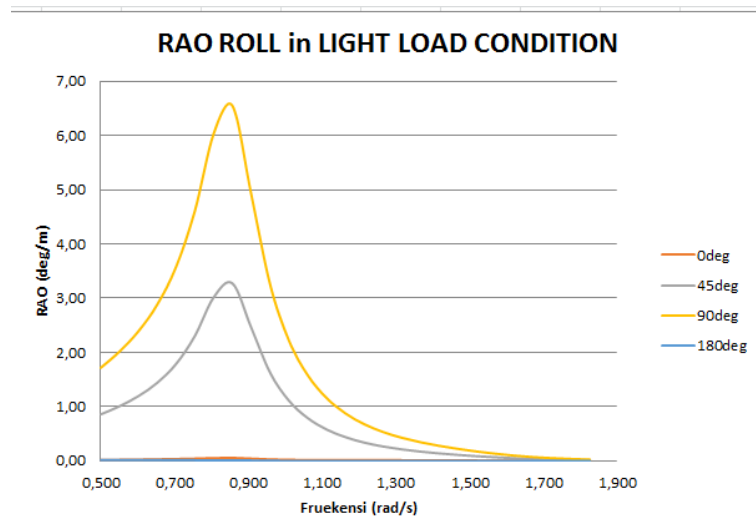
Amplitudo sway tertinggi untuk heading  $0^\circ$  adalah 0.0063 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.857 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi heading  $45^\circ$  adalah 0.85975 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi heading  $90^\circ$  adalah

1.7195 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 180° adalah 0.001753 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.857 rad/sec.



**Gambar 4.15** Grafik RAO *heave* pada FSO *light load condition*

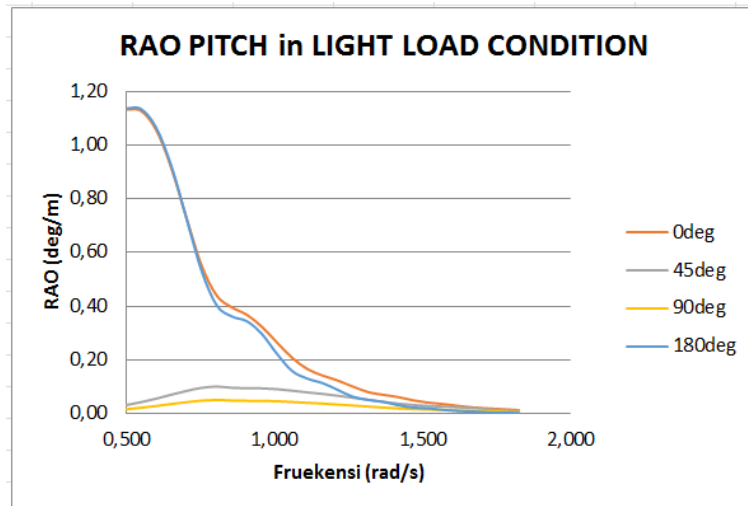
Amplitudo *heave* tertinggi untuk *heading* 0° adalah 0.8601 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 45° adalah 0.47536 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 90° adalah 1.71129 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 180° adalah 0.8682 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec.



**Gambar 4.16** Grafik RAO *roll* pada FSO *light load condition*

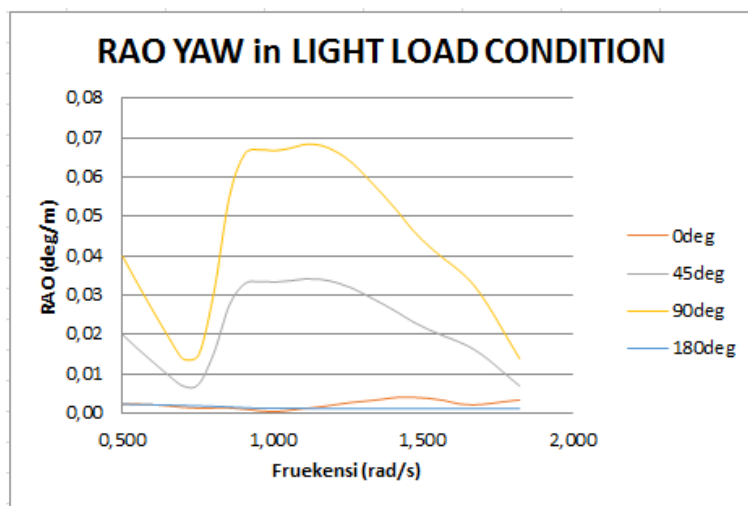
Amplitudo *roll* tertinggi untuk *heading* 0° adalah 1.1887° terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 45° adalah 1.41672° terjadi pada

frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 90° adalah 2.8334° terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 180° adalah 1.4501° terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec.



**Gambar 4.17** Grafik RAO *pitch* pada FSO *full load condition*

Amplitudo *pitch* tertinggi untuk *heading* 0° adalah 2.0405° terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 45° adalah 0.1796° terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.806 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 90° adalah 0.0898° terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.806 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 180° adalah 2.0487° terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec.



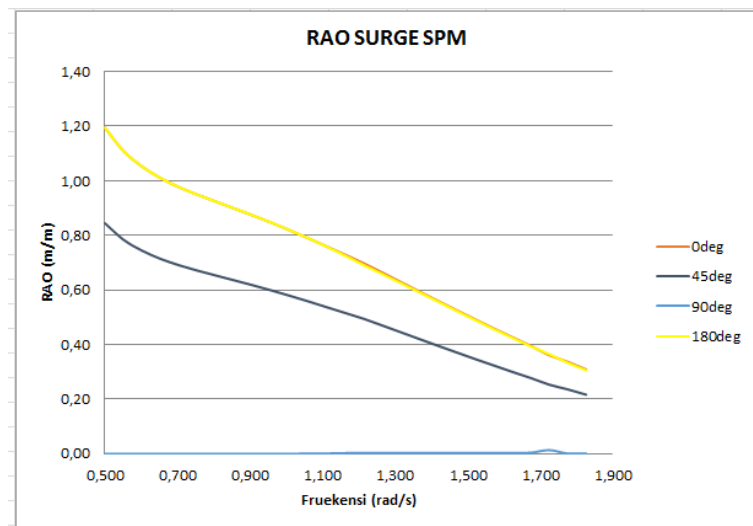
**Gambar 4.18** Grafik RAO *yaw* pada FSO *light load condition*

Amplitudo *yaw* tertinggi untuk *heading* 0° adalah 0.007359° terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 1.409 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 45° adalah 0.06151°

terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 1.112 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 90° adalah 0.12303° terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 1.112 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 180° adalah 0.00417° terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec.

#### 4.6.2 Response Amplitude Operator (RAO) Single Point Mooring Kondisi Terapung Bebas

Perhitungan RAO pada *Single Point 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*. Karena bentuk SPM silinder dan homogen maka pada semua *heading* memiliki grafik yang sama.



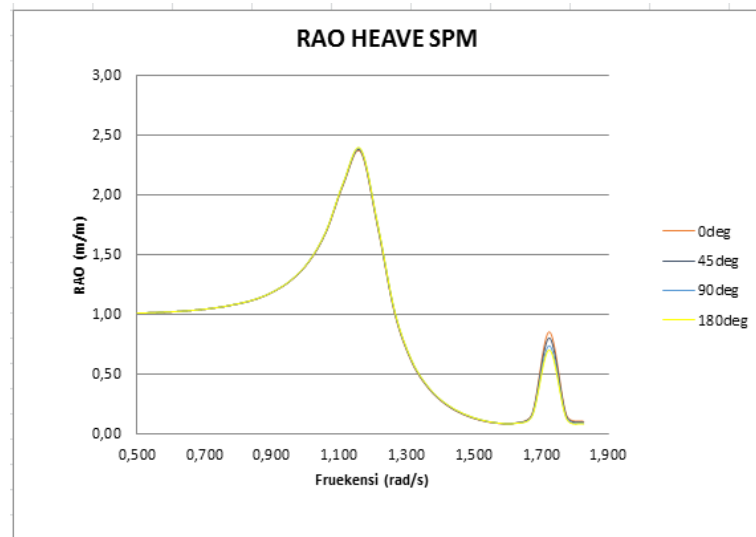
Gambar 4.19 Grafik RAO *surge* pada SPM

Amplitudo *surge* tertinggi pada SPM adalah 2.14996 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec untuk heading 0° dan 180°. Untuk heading 45° Amplitudo tertingginya adalah 1.5203 m berada pada pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk heading 90° amplitudo tertingginya adalah 0.0063 m berada pada pada frekuensi ( $\omega$ ) 1.214 rad/sec.



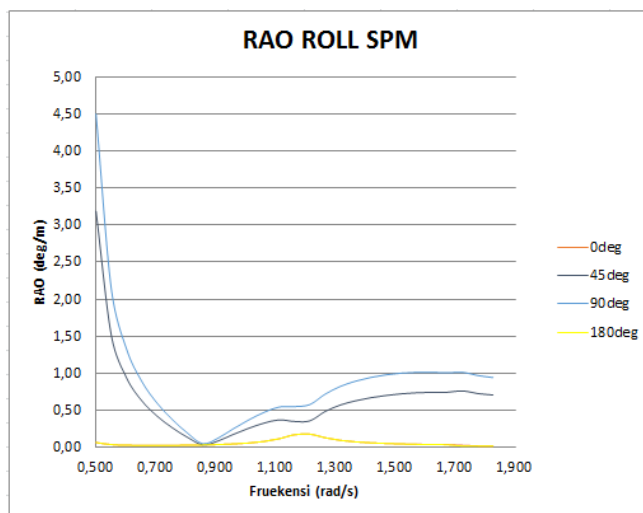
**Gambar 4.20** Grafik RAO *sway* pada SPM

Amplitudo *sway* tertinggi pada SPM adalah 0.0038 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 1.214 rad/sec untuk heading  $0^\circ$  dan  $180^\circ$ . Untuk heading  $45^\circ$  Amplitudo tertingginya adalah 1.5205 m berada pada pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk heading  $90^\circ$  amplitudo tertingginya adalah 2.1501 m berada pada pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec.



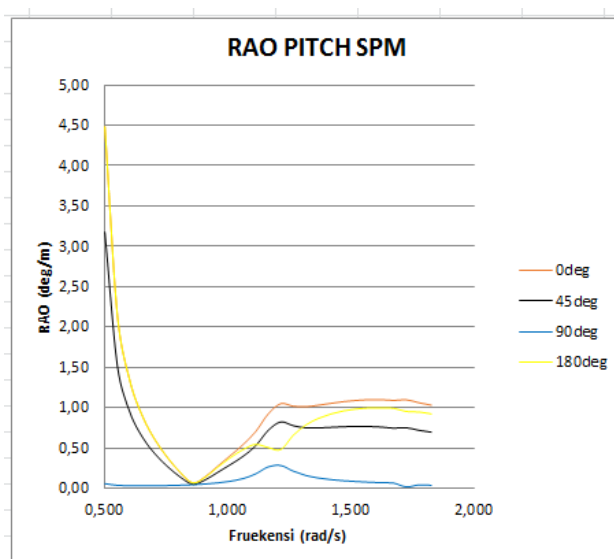
**Gambar 4.21** Grafik RAO *heave* pada SPM

Amplitudo *heave* tertinggi pada SPM adalah 4.2979 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 1.163 rad/sec.



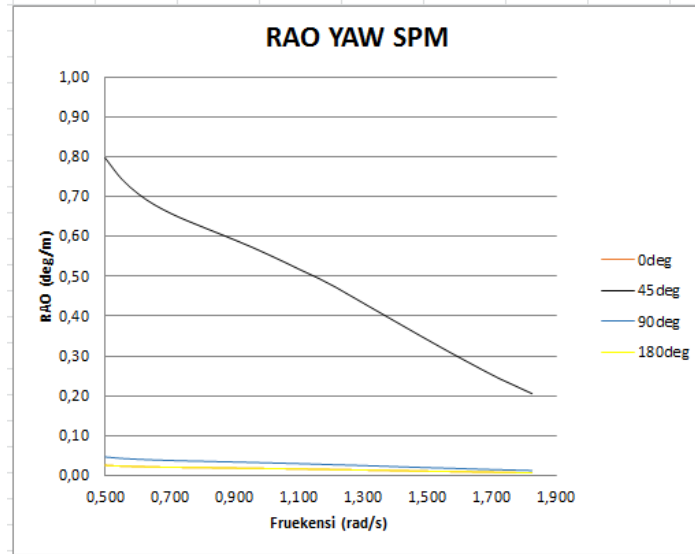
Gambar 4.22 Grafik RAO roll pada SPM

Amplitudo roll tertinggi pada SPM adalah  $0.3272^\circ$  terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 1.214 rad/sec untuk heading  $0^\circ$  dan  $180^\circ$ . Untuk heading  $45^\circ$  Amplitudo tertingginya adalah  $5.7376^\circ$  berada pada pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk heading  $90^\circ$  amplitudo tertingginya adalah  $8.0979^\circ$  berada pada pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec.



Gambar 4.23 Grafik RAO pitch pada SPM

Amplitudo pitch tertinggi pada SPM adalah  $8.0688^\circ$  terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec untuk heading  $0^\circ$  dan  $180^\circ$ . Untuk heading  $45^\circ$  Amplitudo tertingginya adalah  $5.717^\circ$  berada pada pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk heading  $90^\circ$  amplitudo tertingginya adalah  $0.50814^\circ$  berada pada pada frekuensi ( $\omega$ ) 1.214 rad/sec.

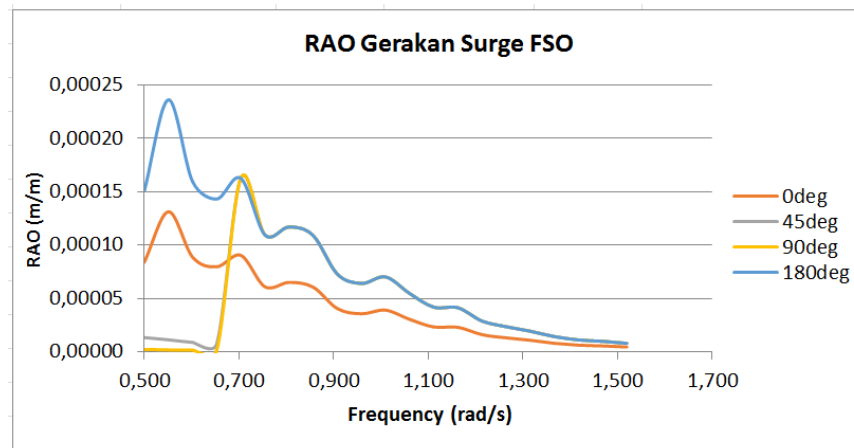


Gambar 4.24 Grafik RAO yaw pada SPM

Amplitudo *pitch* tertinggi pada SPM adalah  $0.0464^\circ$  terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec untuk heading  $0^\circ$  dan  $180^\circ$ . Untuk heading  $45^\circ$  Amplitudo tertingginya adalah  $1.4343^\circ$  berada pada pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk heading  $90^\circ$  amplitudo tertingginya adalah  $0.08395^\circ$  berada pada pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec.

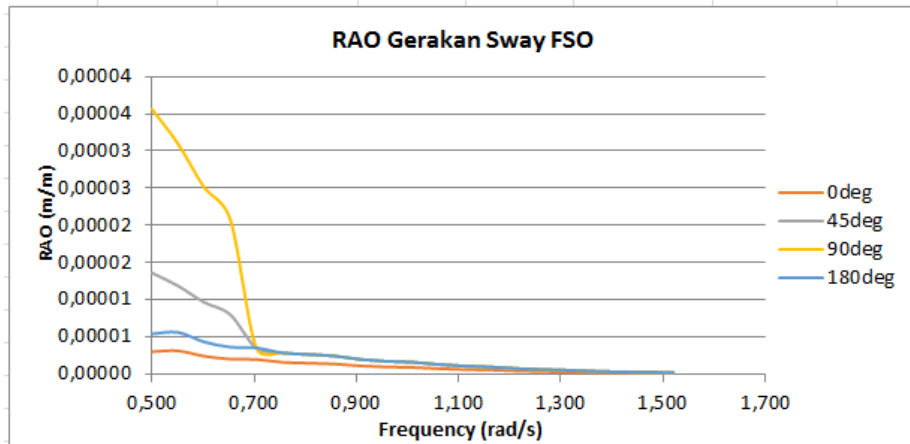
#### 4.6.3 Response Amplitude Operator (RAO) FSO Kondisi Tertambat

Perhitugn *motion* FSO tertambat dengan SPM juga dilakukan pada kondisi *full load* dan pada kondisi *light load*. Pada kondisi *full load* dilakukan pada sarat 24 m dengan kedalaman laut 45 m. Berikut adalah grafik RAO pada kondisi *full load* untuk gerakan *surge*, *sway*, *heave*, *roll*, *pitch*, dan *yaw* dengan *heading* arah  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ , dan  $180^\circ$ :



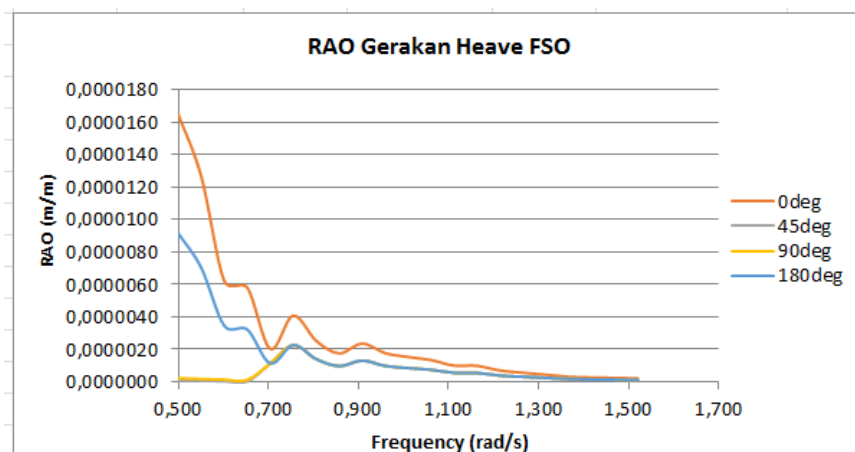
Gambar 4.25 Grafik RAO surge pada FSO tertambat *full load condition*

Amplitudo *surge* tertinggi untuk *heading* 0° adalah 0.0002 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.551 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 45° adalah 0.0003 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.704 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 90° adalah 0.0003 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.704 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 180° adalah 0.0004 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.551 rad/sec.



**Gambar 4.26** Grafik RAO *sway* pada FSO tertambat *full load condition*

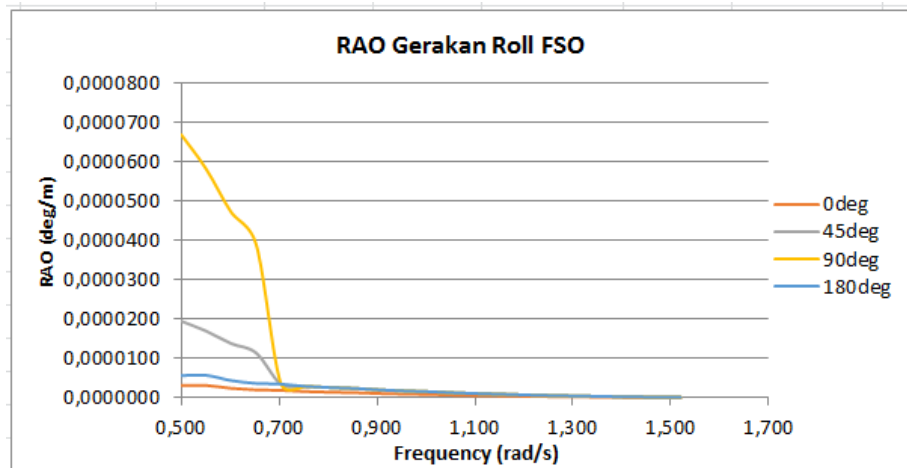
Amplitudo *sway* tertinggi untuk *heading* 0° adalah 0.000006 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 45° adalah 0.000025 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 90° adalah 0.000064 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 180° adalah 0.0000101 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec.



**Gambar 4.27** Grafik RAO *heave* pada FSO tertambat *full load condition*

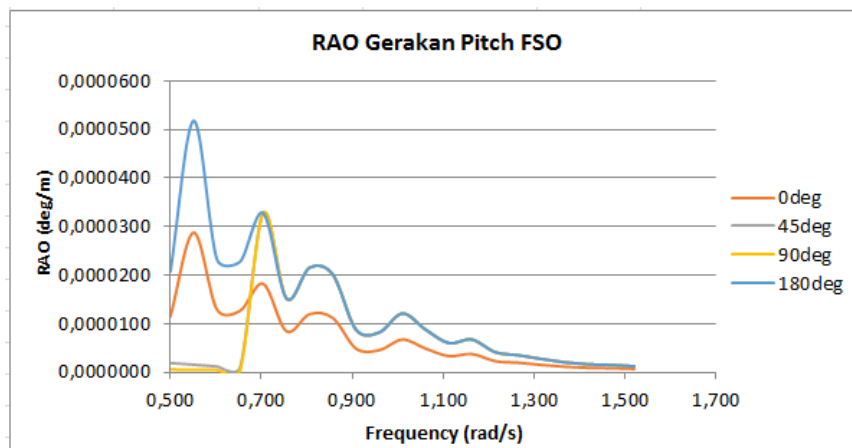


Amplitudo *heave* tertinggi untuk *heading*  $0^\circ$  adalah 0.00003 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading*  $45^\circ$  adalah 0.0000041 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.755 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading*  $90^\circ$  adalah 0.0000041 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.755 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading*  $180^\circ$  adalah 0.0000165 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec.



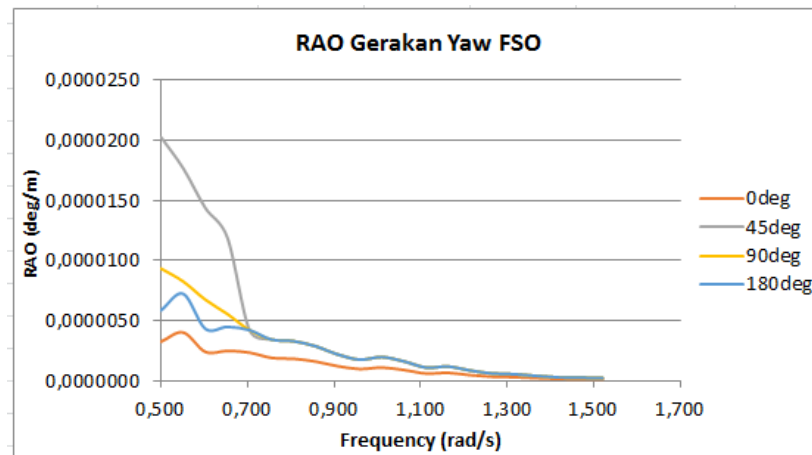
**Gambar 4.28** Grafik RAO *roll* pada FSO tertambat *full load condition*

Amplitudo *roll* tertinggi untuk *heading*  $0^\circ$  adalah  $0.0000058^\circ$  terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading*  $45^\circ$  adalah  $0.0000352^\circ$  terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading*  $90^\circ$  adalah  $0.0001206^\circ$  terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading*  $180^\circ$  adalah  $0.0000104^\circ$  terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec.



**Gambar 4.29** Grafik RAO *pitch* pada FSO tertambat *full load condition*

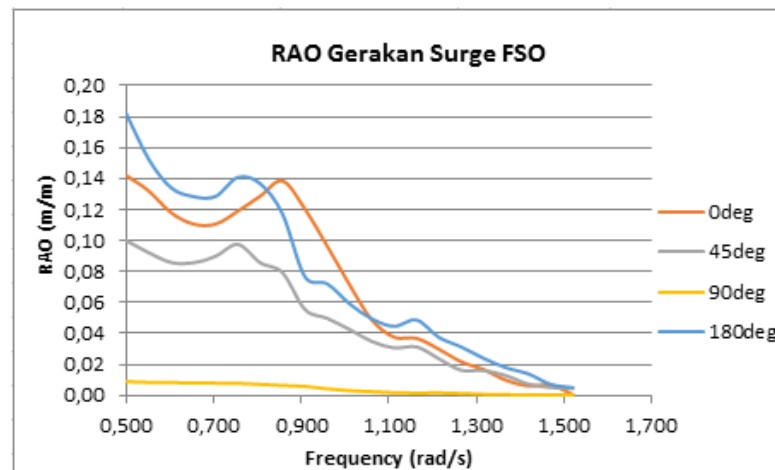
Amplitudo *pitch* tertinggi untuk *heading* 0° adalah 0.0000518° terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.551 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 45° adalah 0.0000590° terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.704 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 90° adalah 0.0000590° terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.704 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 180° adalah 0.0000932° terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.551 rad/sec.



Gambar 4.30 Grafik RAO yaw pada FSO tertambat *full load condition*

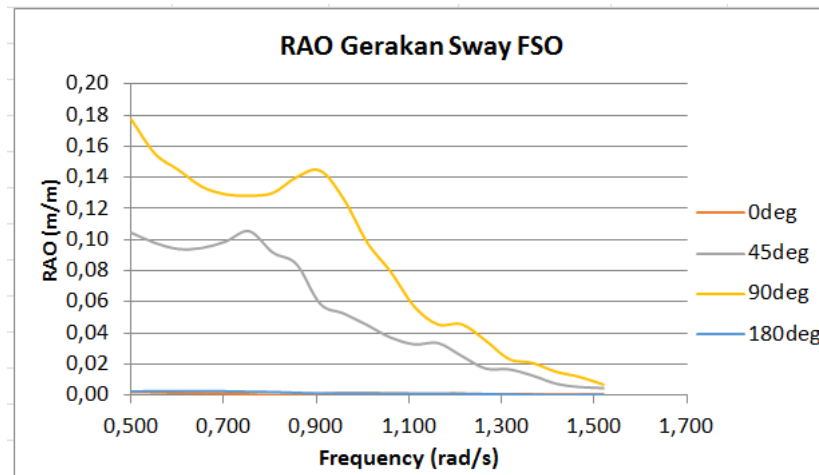
Amplitudo *yaw* tertinggi untuk *heading* 0° adalah 0.0000072° terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.551 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 45° adalah 0.0000364° terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 90° adalah 0.0000168° terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.551 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 180° adalah 0.0000130° terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec.

Untuk kondisi *light load* dilakukan pada sarat 2.5 m dengan kedalaman laut 45m. Berikut merupakan RAO FSO untuk kondisi *light load*:



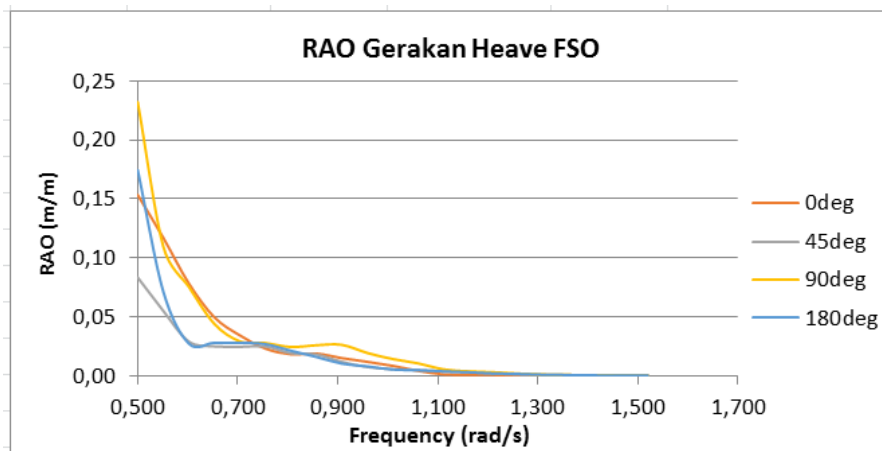
Gambar 4.31 Grafik RAO surge pada FSO tertambat *light load condition*

Amplitudo *surge* tertinggi untuk *heading* 0° adalah 0.2556 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 45° adalah 0.1799 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 90° adalah 0.01593 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 180° adalah 0.3276 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec.



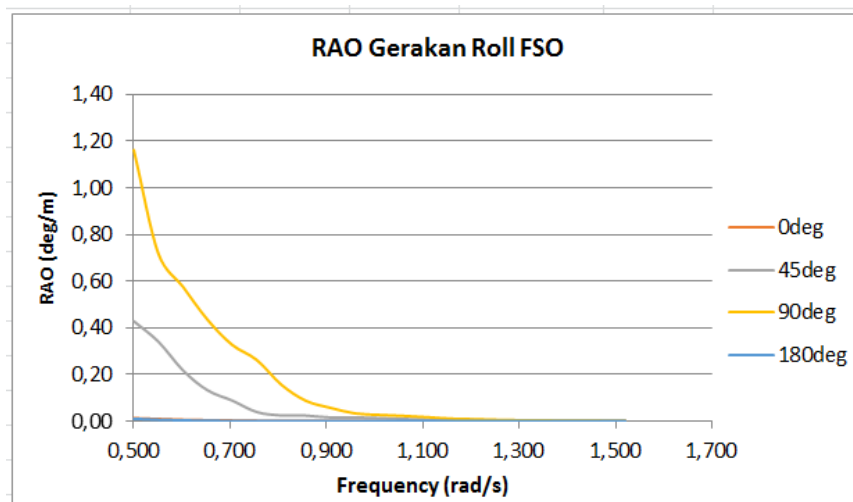
**Gambar 4.32** Grafik RAO *sway* pada FSO tertambat *light load condition*

Amplitudo *sway* tertinggi untuk *heading* 0° adalah 0.00378 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 45° adalah 0.1899 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 90° adalah 0.3191 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 180° adalah 0.00489 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec.



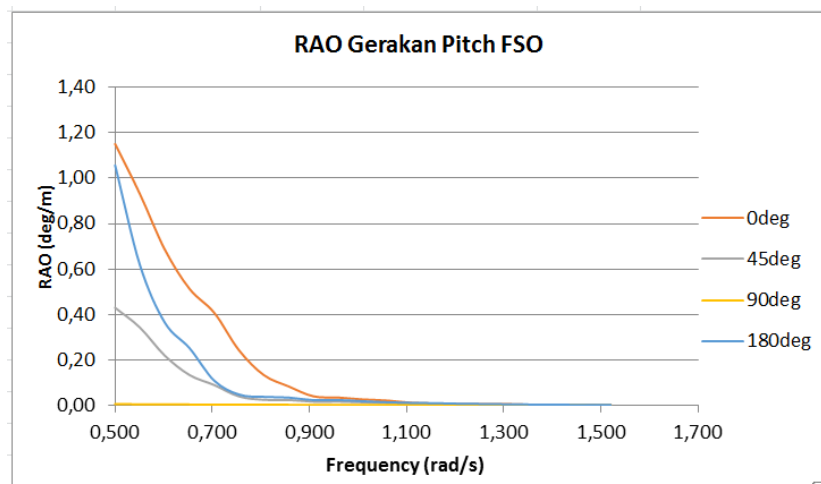
**Gambar 4.33** Grafik RAO *heave* pada FSO tertambat *light load condition*

Amplitudo *heave* tertinggi untuk *heading* 0° adalah 0.2761 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 45° adalah 0.1501 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 90° adalah 0.4179 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 180° adalah 0.3143 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec.



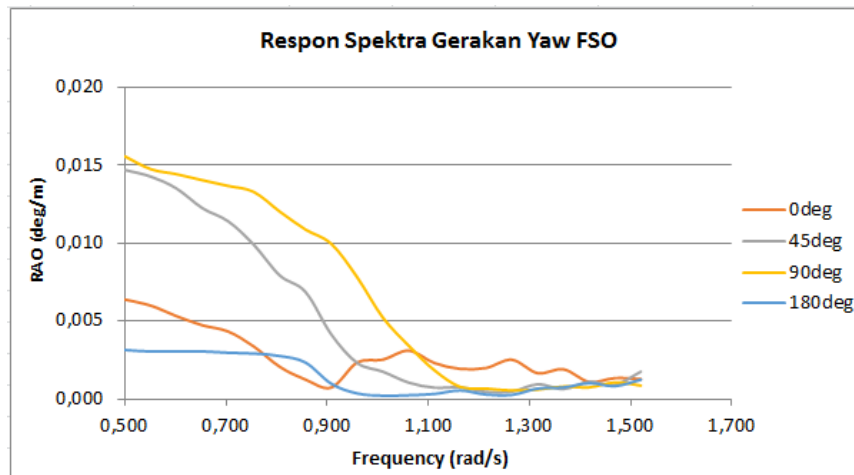
Gambar 4.34 Grafik RAO roll pada FSO tertambat *light load condition*

Amplitudo *roll* tertinggi untuk *heading* 0° adalah 0.0230° terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 45° adalah 0.7712° terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 90° adalah 2.0912° terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 180° adalah 0.0193° terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec.



Gambar 4.35 Grafik RAO pitch pada FSO tertambat *light load condition*

Amplitudo *pitch* tertinggi untuk *heading* 0° adalah 2.0716° terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 45° adalah 0.7730° terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 90° adalah 0.00979° terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 180° adalah 1.9027° terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec.



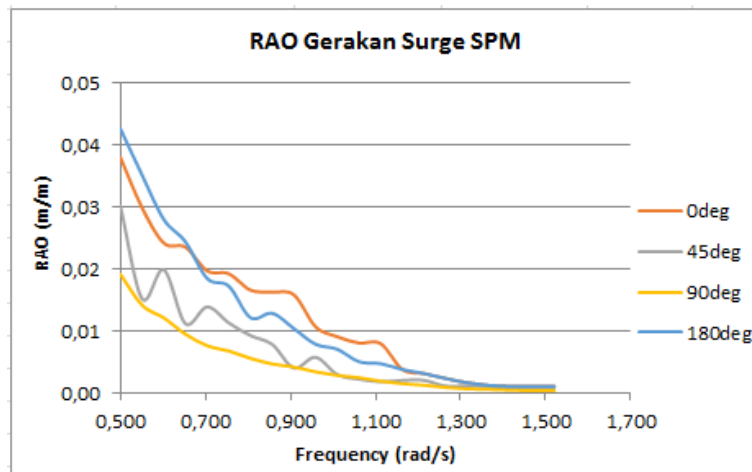
Gambar 4.36 Grafik RAO yaw pada FSO tertambat *light load condition*

Amplitudo *yaw* tertinggi untuk *heading* 0° adalah 0.0115 terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 45° adalah 0.02648° terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 90° adalah 0.0281° terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 180° adalah 0.00566° terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec.

#### 4.6.4 Response Amplitude Operator (RAO) Single Point Mooring Kondisi Tertambat

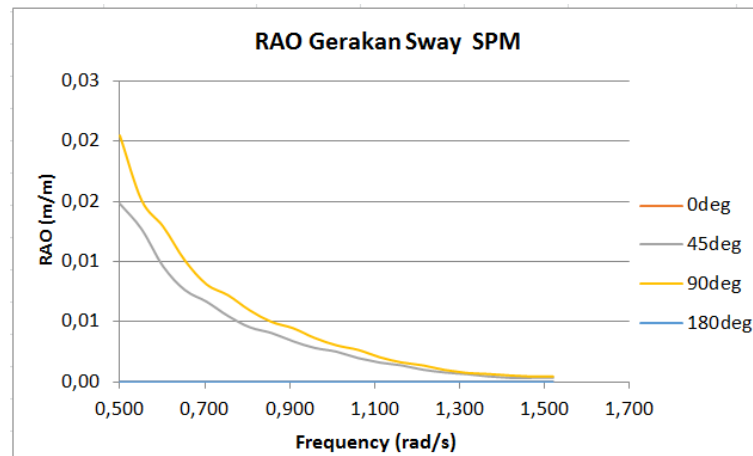
Perhitungan RAO pada *Single Point Mooring* dilakukan pada sarat 2.38 m, dengan kedalaman laut 45 m. Grafik RAO pada SPM dilakukan untuk gerakan *surge*, *sway*, *heave*, *roll*, *pitch*, dan *yaw*. RAO SPM yang tertambat dirancang untuk dua kondisi sesuai dengan muatan FSO, yaitu pada saat kondisi *full load* dan *light load*.

Berikut merupakan RAO SPM tertambat FSO untuk kondisi *full load*:



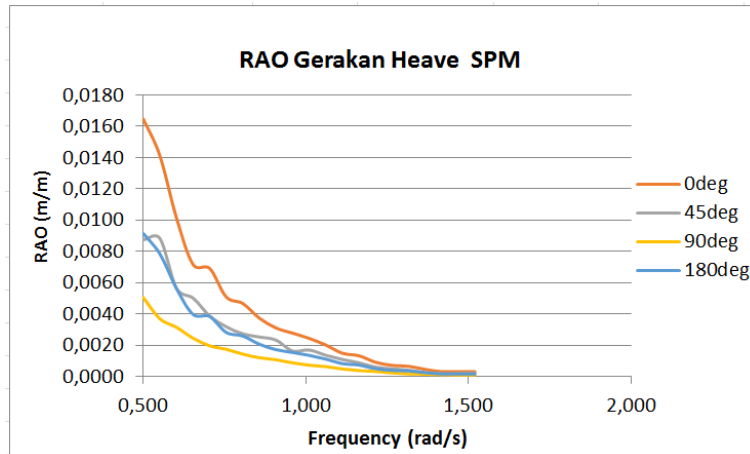
**Gambar 4.37** Grafik RAO *surge* pada SPM tertambat FSO *full load condition*

Amplitudo *surge* tertinggi untuk *heading* 0° adalah 0.0685 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 45° adalah 0.0543 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 90° adalah 0.0345 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 180° adalah 0.0768 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec.



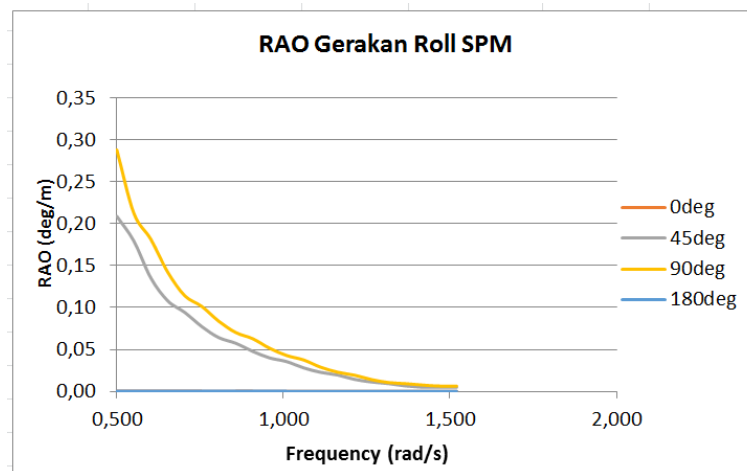
**Gambar 4.38** Grafik RAO *surge* pada SPM tertambat FSO *full load condition*

Amplitudo *sway* tertinggi untuk *heading* 0° adalah 0.000015 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 45° adalah 0.00266 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 90° adalah 0.0369 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 180° adalah 0.000027 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec.



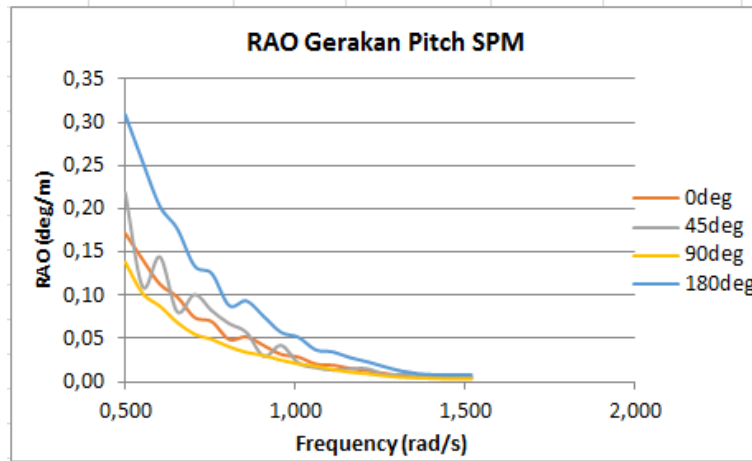
**Gambar 4.39** Grafik RAO surge pada SPM tertambat FSO full load condition

Amplitudo *heave* tertinggi untuk *heading* 0° adalah 0.0296 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 45° adalah 0.0159 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.551 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 90° adalah 0.00908 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 180° adalah 0.0165 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec.



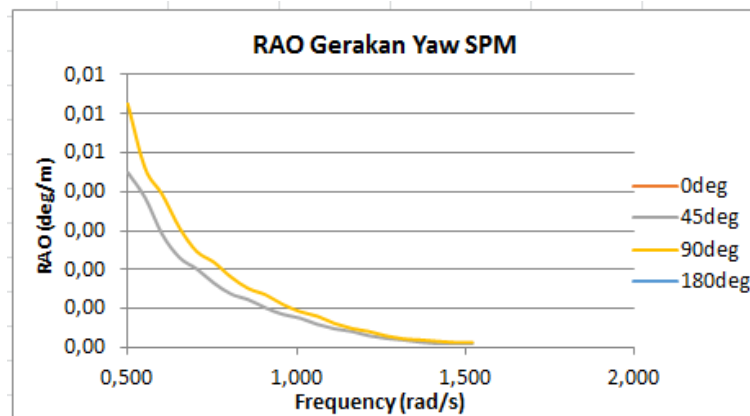
**Gambar 4.40** Grafik RAO roll pada SPM tertambat FSO full load condition

Amplitudo *roll* tertinggi untuk *heading* 0° adalah 0.000213° terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 45° adalah 0.3763° terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 90° adalah 0.5189° terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 180° adalah 0.000384° terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec.



**Gambar 4.41** Grafik RAO *pitch* pada SPM tertambat FSO *full load condition*

Amplitudo *pitch* tertinggi untuk *heading*  $0^\circ$  adalah  $0.309^\circ$  terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading*  $45^\circ$  adalah  $0.3931^\circ$  terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading*  $90^\circ$  adalah  $0.2487^\circ$  terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading*  $180^\circ$  adalah  $0.5563^\circ$  terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec.

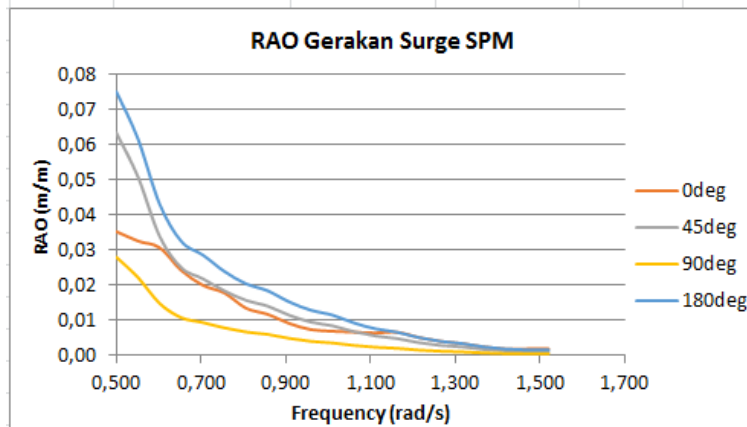


**Gambar 4.42** Grafik RAO *yaw* pada SPM tertambat FSO *full load condition*

Amplitudo *yaw* tertinggi untuk *heading*  $0^\circ$  adalah  $0.000003^\circ$  terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading*  $45^\circ$  adalah  $0.0081^\circ$  terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading*  $90^\circ$  adalah  $0.00113^\circ$  terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading*  $180^\circ$  adalah  $0.0000058^\circ$  terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec.

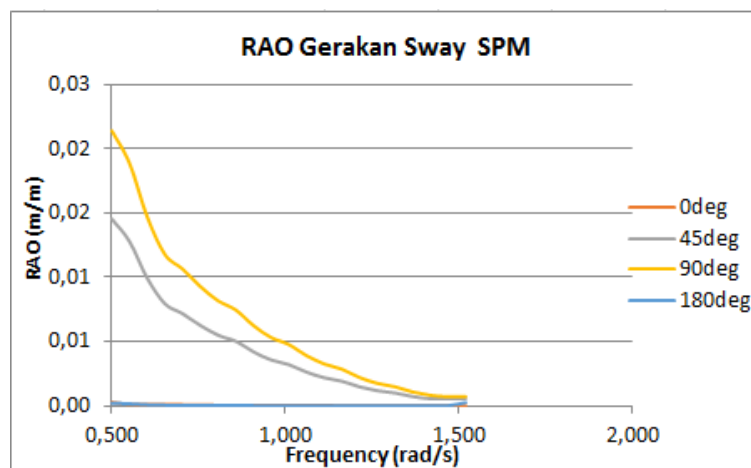
Berikut RAO SPM tertambat FSO untuk kondisi *light load* :





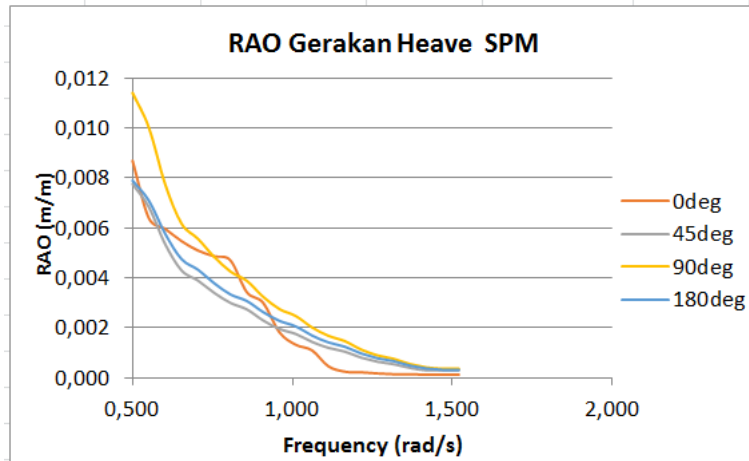
**Gambar 4.43** Grafik RAO *surge* pada SPM tertambat FSO *light load condition*

Amplitudo *surge* tertinggi untuk *heading* 0° adalah 0.0636 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 45° adalah 0.1153 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 90° adalah 0.0505 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 180° adalah 0.1354 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec.



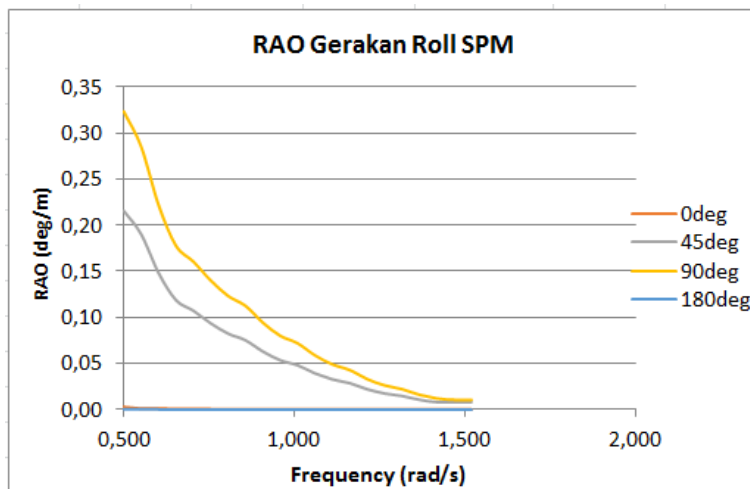
**Gambar 4.44** Grafik RAO *surge* pada SPM tertambat FSO *light load condition*

Amplitudo *sway* tertinggi untuk *heading* 0° adalah 0.000469 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 45° adalah 0.02615 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 90° adalah 0.0385 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading* 180° adalah 0.000444 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec.



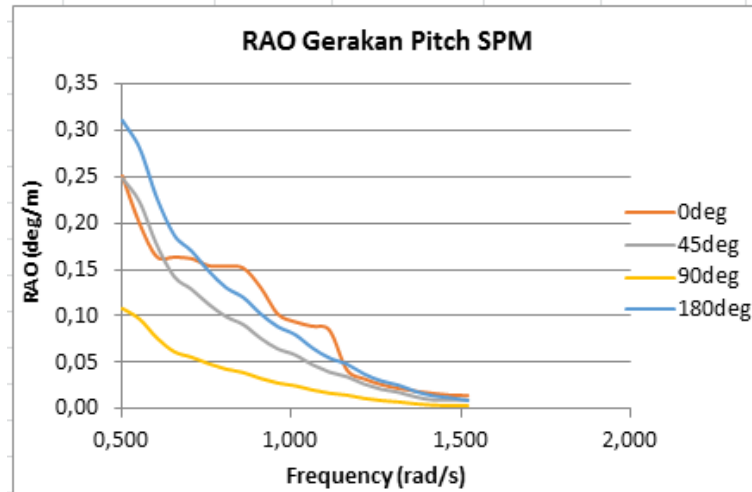
**Gambar 4.45** Grafik RAO *heave* pada SPM tertambat FSO *light load condition*

Amplitudo *heave* tertinggi untuk *heading*  $0^\circ$  adalah 0.0157 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading*  $45^\circ$  adalah 0.0140 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.551 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading*  $90^\circ$  adalah 0.0206 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading*  $180^\circ$  adalah 0.0142 m terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec.



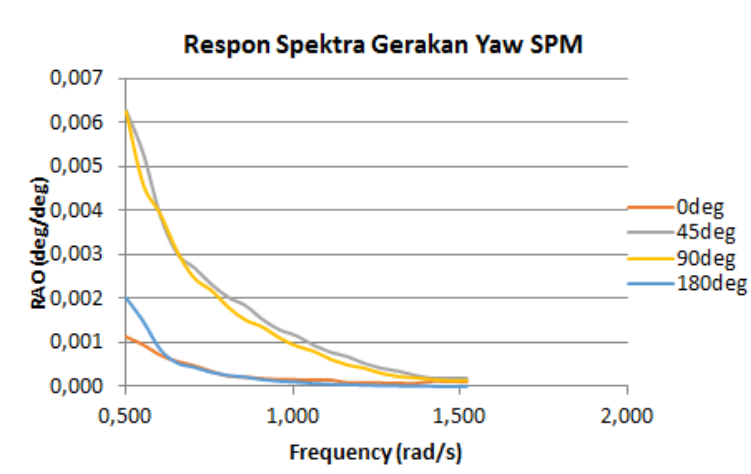
**Gambar 4.46** Grafik RAO *roll* pada SPM tertambat FSO *light load condition*

Amplitudo *roll* tertinggi untuk *heading*  $0^\circ$  adalah  $0.00546^\circ$  terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading*  $45^\circ$  adalah  $0.388^\circ$  terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading*  $90^\circ$  adalah  $0.5821^\circ$  terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading*  $180^\circ$  adalah  $0.001257^\circ$  terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec.



Gambar 4.47 Grafik RAO *pitch* pada SPM tertambat FSO *light load condition*

Amplitudo *pitch* tertinggi untuk *heading*  $0^\circ$  adalah  $0.451^\circ$  terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading*  $45^\circ$  adalah  $0.4469^\circ$  terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading*  $90^\circ$  adalah  $0.1948^\circ$  terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading*  $180^\circ$  adalah  $0.5585^\circ$  terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec.



Gambar 4.48 Grafik RAO *yaw* pada SPM tertambat FSO *light load condition*

Amplitudo *pitch* tertinggi untuk *heading*  $0^\circ$  adalah  $0.002^\circ$  terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading*  $45^\circ$  adalah  $0.0011^\circ$  terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading*  $90^\circ$  adalah  $0.00116^\circ$  terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec. Untuk amplitudo tertinggi *heading*  $180^\circ$  adalah  $0.0036^\circ$  terjadi pada frekuensi ( $\omega$ ) 0.500 rad/sec.

Dari keseluruhan pembahasan RAO FSO dan SPM baik dalam kondisi *light load* maupun *full load* pada kondisi tertambat yang ditunjukkan oleh **Gambar 4.25 – Gambar 4.48** maka dapat disimpulkan bahwa gerakan FSO dan SPM mengalami peredaman. Hal ini artinya, keberadaan tali tambat pada FSO dan SPM dapat mengurangi gerakan yang diakibatkan oleh gelombang dari keempat arah pembebanan. Resume dari nilai amplitudo tertinggi dapat dilihat dalam **Tabel 4.8-Tabel 4.9** sebagaimana berikut:

**Tabel 4.8** Resume nilai amplitudo struktur tertinggi untuk kedua kondisi muatan FSO dan SPM kondisi terapung bebas (*free floating*)

<b>Heading (deg)</b>	<b>Kondisi Muatan</b>	<b>Surge (m)</b>	<b>Sway (m)</b>	<b>Heave (m)</b>	<b>Roll (deg)</b>	<b>Pitch (deg)</b>	<b>Yaw (deg)</b>
<b>FSO</b>							
0	<i>Full Laod</i>	0,3492	0,0265	1,1887	0,6491	8,0261	0,0132
45		0,1564	0,5773	1,4167	2,7181	0,7678	0,0334
90		0,0782	1,1545	2,8334	5,4362	0,3839	0,0668
180		0,3117	0,0238	1,4501	0,6067	7,8025	0,0100
0	<i>Light Load</i>	0,91883	0,0063	0,86011	0,1014	2,04046	0,00736
45		0,05525	0,85975	0,85564	5,89117	0,17965	0,06151
90		0,02762	1,7195	1,71129	11,7823	0,08982	0,12303
180		0,92382	0,00175	0,86818	0,03502	2,04869	0,00417
<b>SPM</b>							
0		2,1500	0,0039	4,2512	0,3273	8,0688	0,0464
45		1,5203	1,5204	4,2677	5,7376	5,7170	1,4343
90		0,0063	2,1501	4,2884	8,0979	0,5081	0,0840
180		2,1500	0,0038	4,2980	0,3271	8,0690	0,0042

**Tabel 4.9** Resume nilai amplitudo struktur tertinggi untuk kedua kondisi muatan FSO dan SPM kondisi tertambat

<b>Heading (deg)</b>	<b>Kondisi Muatan</b>	<b>Surge (m)</b>	<b>Sway (m)</b>	<b>Heave (m)</b>	<b>Roll (deg)</b>	<b>Pitch (deg)</b>	<b>Yaw (deg)</b>
<b>FSO</b>							
0	<i>Full Laod</i>	0,000236	0,000006	0,000030	0,000006	0,000052	0,000007
45		0,000293	0,000024	0,000004	0,000035	0,000059	0,000036
90		0,000293	0,000064	0,000004	0,000121	0,000059	0,000017
180		0,000425	0,000010	0,000016	0,000010	0,000093	0,000013
0	<i>Light Load</i>	0,255632	0,003780	0,276148	0,022989	2,071577	0,011496
45		0,179930	0,189826	0,150101	0,771193	0,772975	0,026479
90		0,015927	0,319158	0,417932	2,091215	0,009792	0,028063
180		0,327646	0,004887	0,314271	0,019316	1,902695	0,005661

SPM							
0	<i>FSO Full Load</i>	0,068464	0,000015	0,029640	0,000214	0,309029	0,000003
45		0,054303	0,026647	0,015899	0,376314	0,393122	0,008090
90		0,034536	0,036867	0,009083	0,518955	0,248744	0,011257
180		0,076799	0,000027	0,016467	0,000384	0,556253	0,000006
0	<i>FSO Light Load</i>	0,063634	0,000469	0,015655	0,005461	0,450826	0,002035
45		0,114317	0,026141	0,013979	0,388042	0,446916	0,011317
90		0,050514	0,038500	0,020550	0,582107	0,194765	0,011615
180		0,135401	0,000445	0,014229	0,001257	0,558481	0,003636

#### 4.7 Analisis Spektra Gelombang

Pemilihan spektrum gelombang untuk analisis respon gerak struktur pada gelombang acak adalah berdasarkan kondisi real laut yang ditinjau. Dari beberapa jenis spektrum gelombang, yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah Spektrum JONSWAP. Pemilihan spektrum JONSWAP ini di-dasarkan pada penentuan yang ada pada Chakrabarti (1987) yang telah dibahas pada BAB II. Selain itu, pada DNV RP C205 juga dijelaskan bahwa spektrum JONSWAP diaplikasikan pada perairan dengan :  $T_p / (H_s)^{1/2} \leq 3.6$  ,  $\gamma = 5$

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

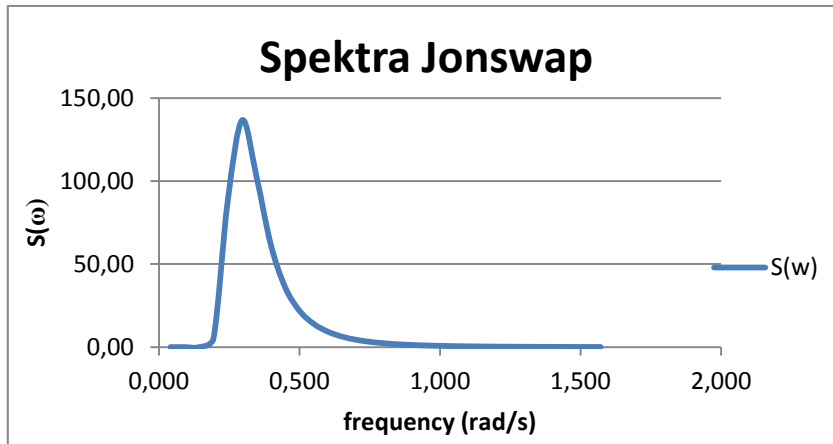
Karena hasilnya lebih dari persyaratan maka memperoleh nilai gammanya menggunakan persamaan sebagai berikut:

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

Sehingga:

$$\gamma = \exp(5.75 - 1.15 \times 9 / (3.6)^{1/2}) = \mathbf{1.3}$$

Berikut adalah grafik spektrum gelombang untuk perairan Laut Jawa tempat FSO dan SPM beroperasi terdapat pada **Gambar 4.49**:



Gambar 4.49 Grafik Spektrum gelombang JONSWAP ( $H_s = 3.6$  m,  $T_p = 9$  s)

Pada analisis ini akan ditentukan respon struktur dari FSO dan SPM 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 :

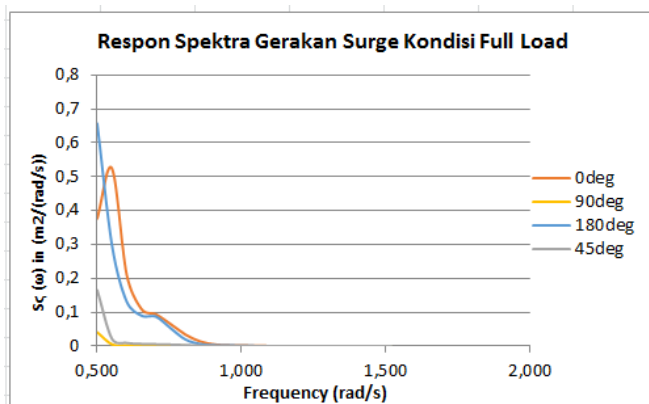
$$\text{RAO}^2 \times S(\omega) = \text{Sr}(\omega)$$

Gambar 4.50 Langkah perhitungan mencari respon spektra

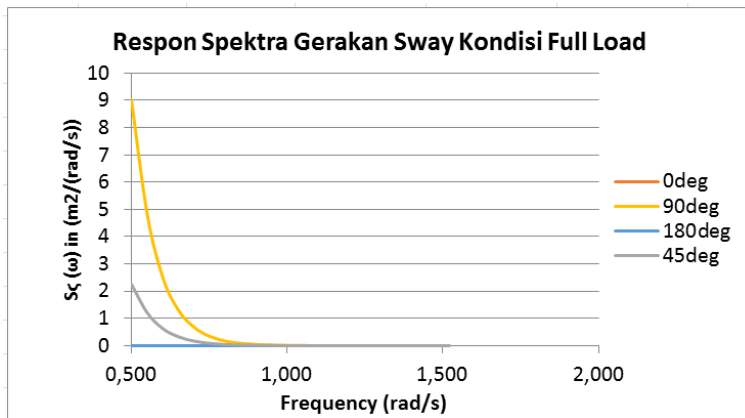
Sama halnya dengan penjelasan analisis perilaku gerak di gelombang regular (RAO) pada bahasan sebelumnya, penjelasan hasil analisis perilaku gerak di gelombang acak juga akan dijabarkan sesuai dengan kondisi muatan yang ditinjau. Berikut adalah penjelasannya secara lebih lengkap.

#### 4.7.1 Analisis Perilaku Gerak FSO Pada Gelombang Acak Kondisi *Free Floating* (Terapung Bebas)

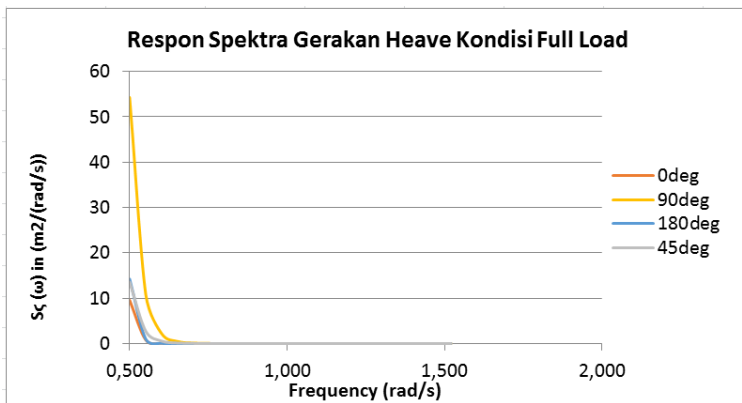
- Analisis Respon Gerak FSO Kondisi *Full Load*



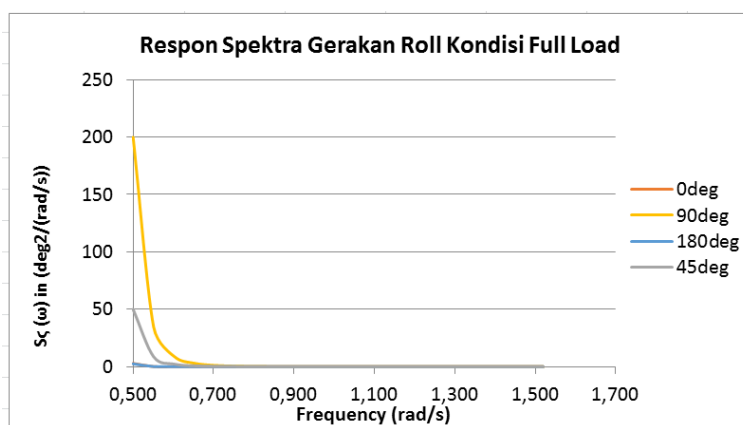
Gambar 4.51 Respon spektra gerakan *surge* FSO (*full load*) kondisi *free floating*



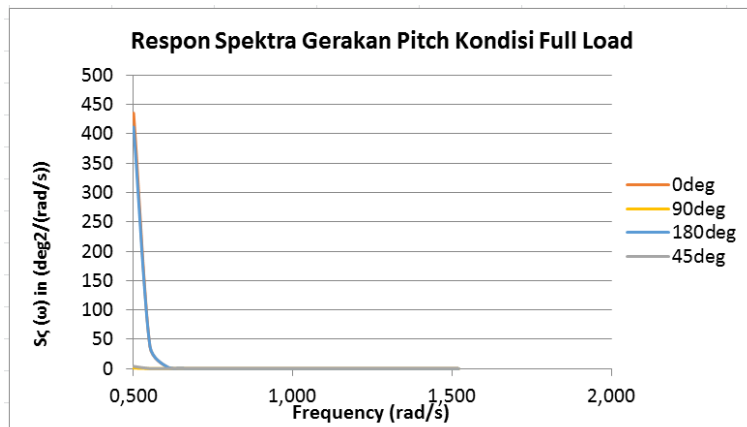
**Gambar 4.52** Respon spektra gerakan *sway* FSO (*full load*) kondisi *free floating*



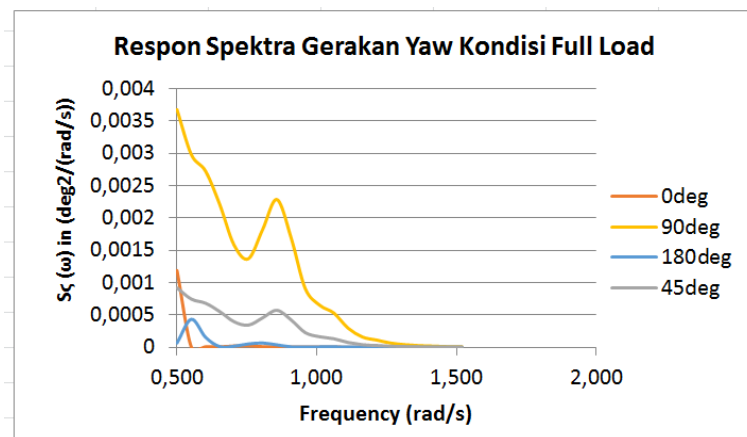
**Gambar 4.53** Respon spektra gerakan *heave* FSO (*full load*) kondisi *free floating*



**Gambar 4.54** Respon spektra gerakan *roll* FSO (*full load*) kondisi *free floating*



**Gambar 4.55** Respon spektra gerakan *pitch* FSO (*full load*) kondisi *free floating*



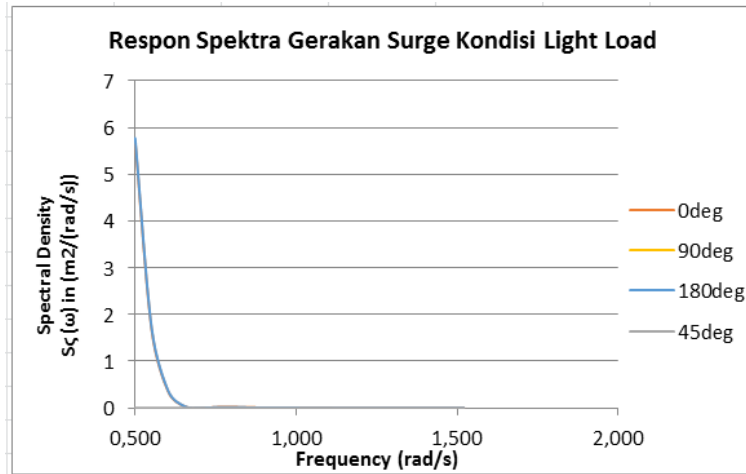
**Gambar 4.56** Respon spektra gerakan *yaw* FSO (*full load*) kondisi *free floating*

Dari **Gambar 4.51** – **Gambar 4.56** yang telah ditampilkan maka dapat disimpulkan bahwa respon struktur FSO kondisi muatan penuh (*full load*) pada kondisi ekstrim (gelombang 100 yrs) di perairan Laut Jawa untuk gerakan *surge* terjadi paling besar adalah akibat gelombang arah 180°, yaitu dengan nilai  $S_R(\omega)_{surge} = 0.657232$  [ $m^2/(\text{rad/s})$ ]. Respon struktur untuk gerakan *sway* terjadi paling besar adalah akibat gelombang arah 90°, yaitu dengan nilai  $S_R(\omega)_{sway} = 9.01407$  [ $m^2/(\text{rad/s})$ ]. Respon struktur untuk gerakan *heave* terjadi paling besar adalah akibat gelombang arah 90°, yaitu dengan nilai sebesar  $S_R(\omega)_{heave} = 54.29382$  [ $m^2/(\text{rad/s})$ ]. Respon struktur untuk gerakan *roll* terjadi paling besar adalah akibat gelombang arah 90°, yaitu dengan nilai  $S_R(\omega)_{roll} = 199.8512$  [ $\text{deg}^2/(\text{rad/s})$ ]. Respon struktur untuk gerakan *pitch* terjadi paling besar adalah akibat gelombang arah 0°, yaitu dengan nilai  $S_R(\omega)_{pitch} = 435.6466$  [ $\text{deg}^2/(\text{rad/s})$ ]. Respon struktur untuk gerakan *yaw* terjadi paling besar adalah akibat

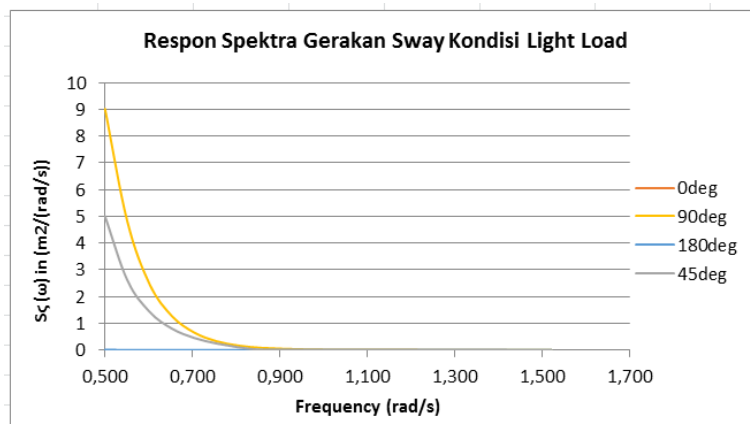


gelombang arah 90° dengan nilai  $S_R(\omega)_{yaw} = 0.003675 \text{ [deg}^2\text{/(rad/s)]}$ .

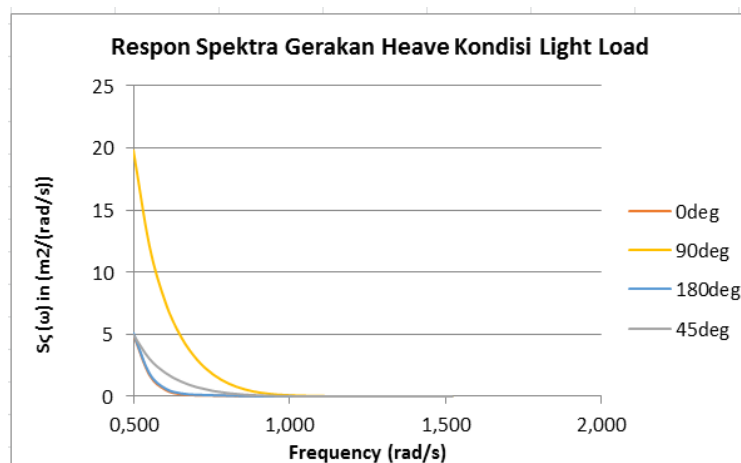
- **Analisis Respon Gerak FSO Kondisi *Light Load***



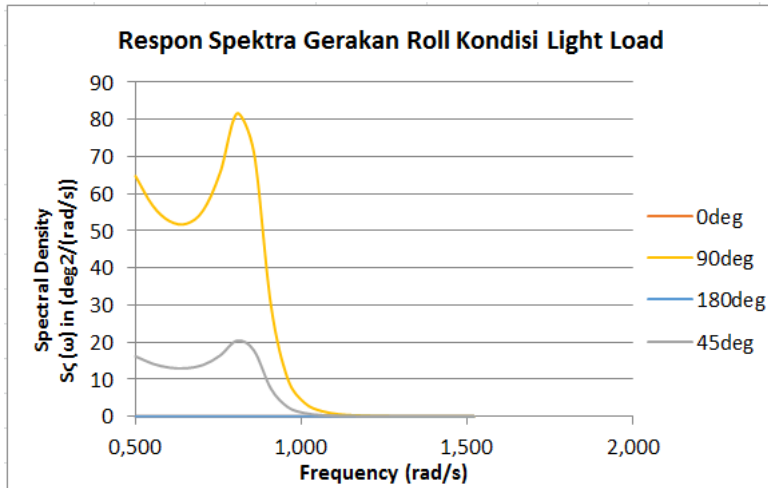
**Gambar 4.57** Respon spektra gerakan *surge* FSO (*light load*) kondisi *free floating*



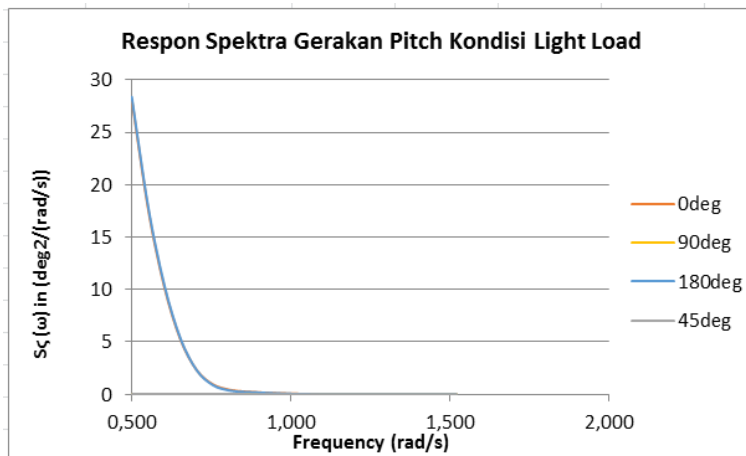
**Gambar 4.58** Respon spektra gerakan *sway* FSO (*light load*) kondisi *free floating*



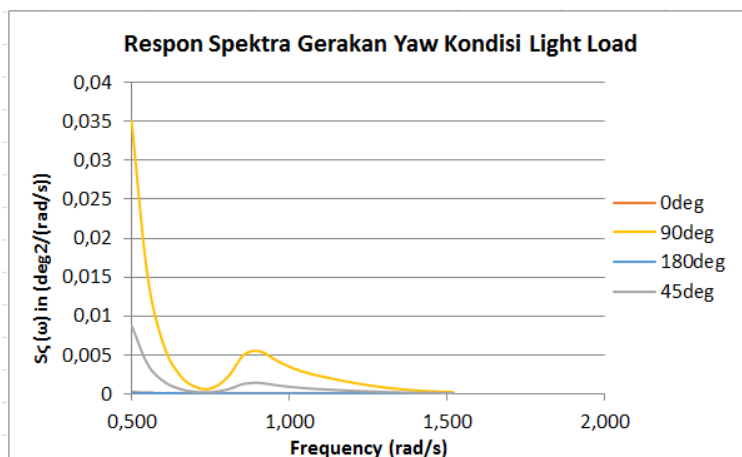
**Gambar 4.59** Respon spektra gerakan *heave* FSO (*light load*) kondisi *free floating*



Gambar 4.60 Respon spektra gerakan roll FSO (*light load*) kondisi *free floating*



Gambar 4.61 Respon spektra gerakan pitch FSO (*light load*) kondisi *free floating*

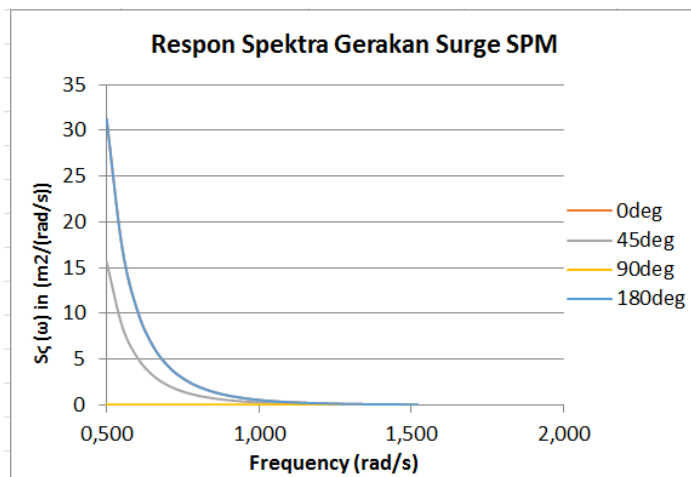


Gambar 4.62 Respon spektra gerakan yaw FSO (*light load*) kondisi *free floating*

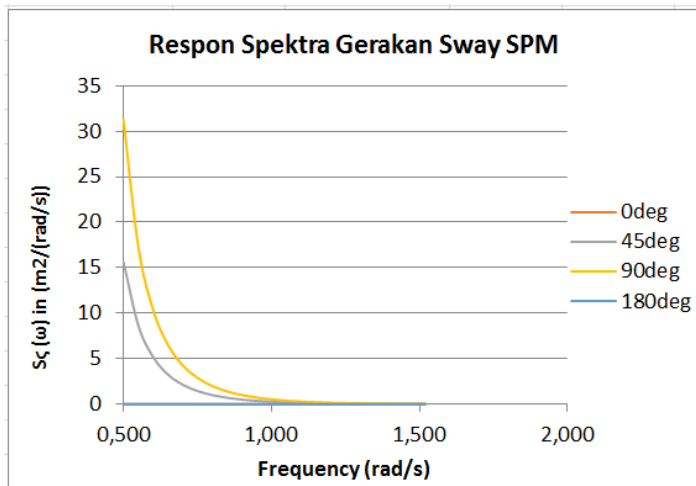
Dari **Gambar 4.57 – Gambar 4.62** yang telah ditampilkan maka dapat disimpulkan bahwa respon struktur FSO kondisi *light load* pada kondisi ekstrim (gelombang 100 yrs) di perairan Laut Jawa untuk gerakan *surge* terjadi paling besar adalah akibat gelombang arah 180°, yaitu dengan nilai  $S_R(\omega)_{surge} = 0.657232$  [ $m^2/(rad/s)$ ]. Respon struktur untuk gerakan *sway* terjadi paling besar adalah akibat gelombang arah 90°, yaitu dengan nilai  $S_R(\omega)_{sway} = 9.01407$  [ $m^2/(rad/s)$ ]. Respon struktur untuk gerakan *heave* terjadi paling besar adalah akibat gelombang arah 90°, yaitu dengan nilai sebesar  $S_R(\omega)_{heave} = 54.29382$  [ $m^2/(rad/s)$ ]. Respon struktur untuk gerakan *roll* terjadi paling besar adalah akibat gelombang arah 90°, yaitu dengan nilai  $S_R(\omega)_{roll} = 199.8512$  [ $deg^2/(rad/s)$ ]. Respon struktur untuk gerakan *pitch* terjadi paling besar adalah akibat gelombang arah 0°, yaitu dengan nilai  $S_R(\omega)_{pitch} = 435.6466$  [ $deg^2/(rad/s)$ ]. Respon struktur untuk gerakan *yaw* terjadi paling besar adalah akibat gelombang arah 90° dengan nilai  $S_R(\omega)_{yaw} = 0.003675$  [ $deg^2/(rad/s)$ ].

#### 4.7.2 Analisis Perilaku Gerak SPM Pada Gelombang Acak Kondisi *Free Floating* (Terapung Bebas)

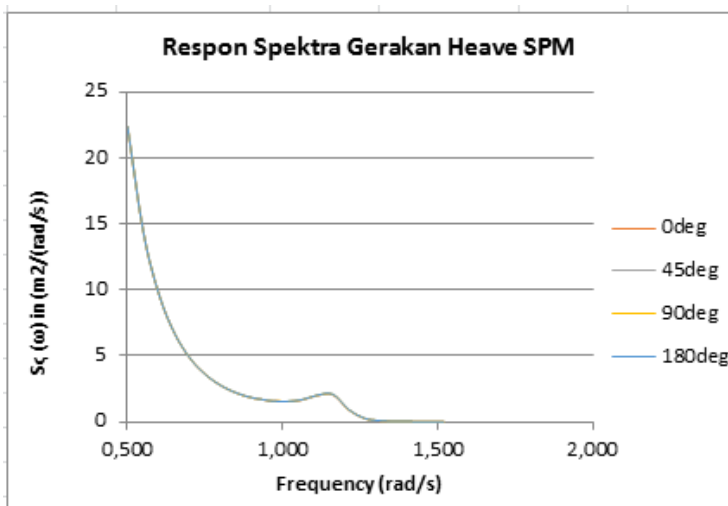
- Analisis Respon Gerak SPM



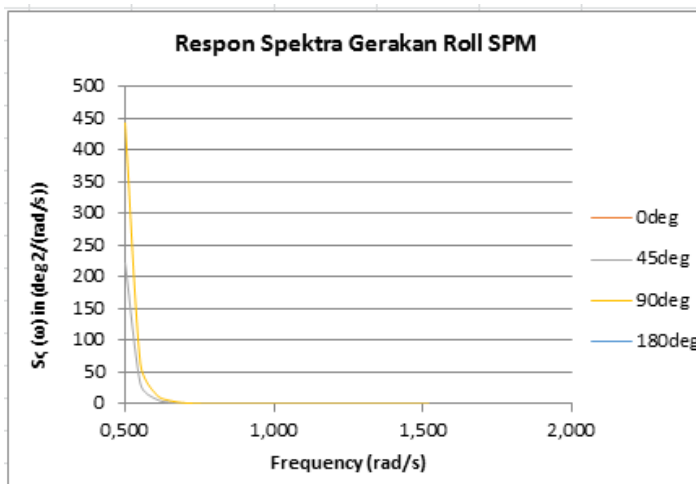
**Gambar 4.63** Respon spektra gerakan *surge* SPM kondisi *free floating*



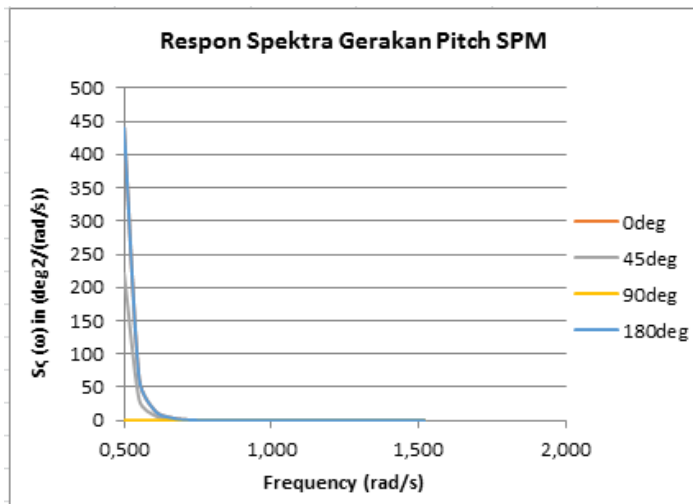
Gambar 4.64 Respon spektra gerakan *sway* SPM kondisi *free floating*



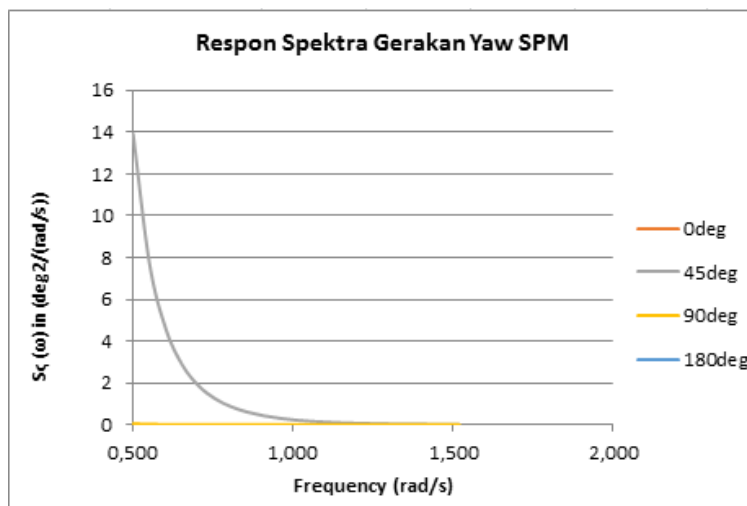
Gambar 4.65 Respon spektra gerakan *heave* SPM kondisi *free floating*



Gambar 4.66 Respon spektra gerakan *roll* SPM kondisi *free floating*



Gambar 4.67 Respon spektra gerakan *pitch* SPM kondisi *free floating*



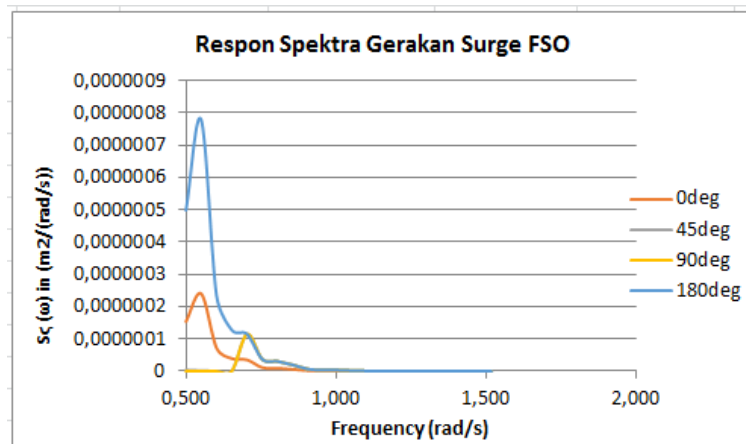
Gambar 4.68 Respon spektra gerakan *yaw* SPM kondisi *free floating*

Dari **Gambar 4.63** – **Gambar 4.68** yang telah ditampilkan maka dapat disimpulkan bahwa respon struktur SPM pada kondisi ekstrim (gelombang 100 yrs) di perairan Laut Jawa untuk gerakan *surge* terjadi paling besar adalah akibat gelombang arah  $180^\circ$  dan  $0^\circ$ , yaitu dengan nilai  $S_R(\omega)_{surge} = 31.2596 [m^2/(rad/s)]$ . Respon struktur untuk gerakan *sway* terjadi paling besar adalah akibat gelombang arah  $90^\circ$ , yaitu dengan nilai  $S_R(\omega)_{sway} = 31.2648 [m^2/(rad/s)]$ . Respon struktur untuk gerakan *heave* terjadi paling besar adalah akibat gelombang arah  $180^\circ$ , yaitu dengan nilai sebesar  $S_R(\omega)_{heave} = 22.3587 [m^2/(rad/s)]$ . Respon struktur untuk gerakan *roll* terjadi paling besar adalah akibat gelombang arah  $90^\circ$ , yaitu dengan nilai  $S_R(\omega)_{roll} = 443.468 [deg^2/(rad/s)]$ . Respon struktur untuk gerakan *pitch* terjadi paling besar adalah akibat gelombang arah  $180^\circ$ , yaitu dengan nilai  $S_R(\omega)_{pitch} = 440.316 [deg^2/(rad/s)]$ . Respon struktur untuk

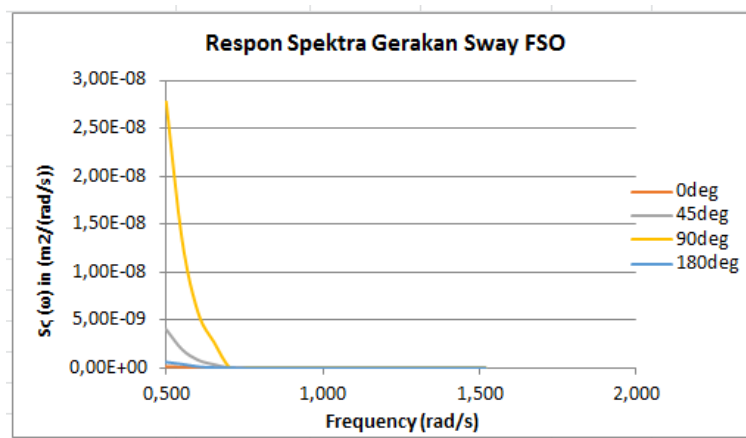
gerakan *yaw* terjadi paling besar adalah akibat gelombang arah  $90^\circ$  dengan nilai  $S_R(\omega)_{yaw} = 13.9129 \text{ [deg}^2\text{/(rad/s)]}$ .

#### 4.7.3 Analisis Perilaku Gerak FSO Pada Gelombang Acak Kondisi Tertambat

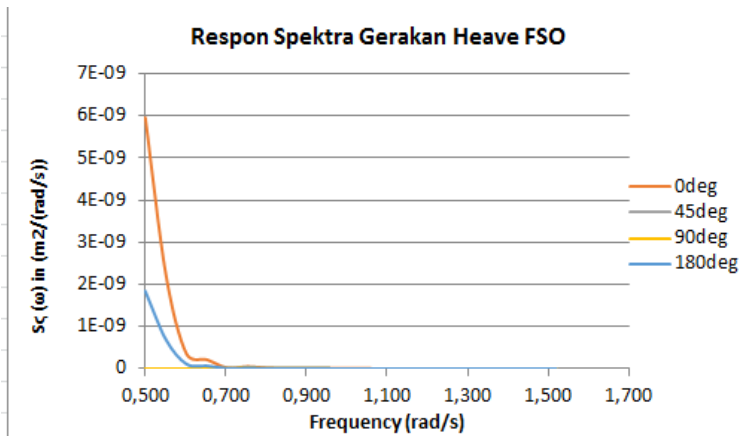
- Analisis Respon Gerak FSO tertambat Kondisi *Full Load*



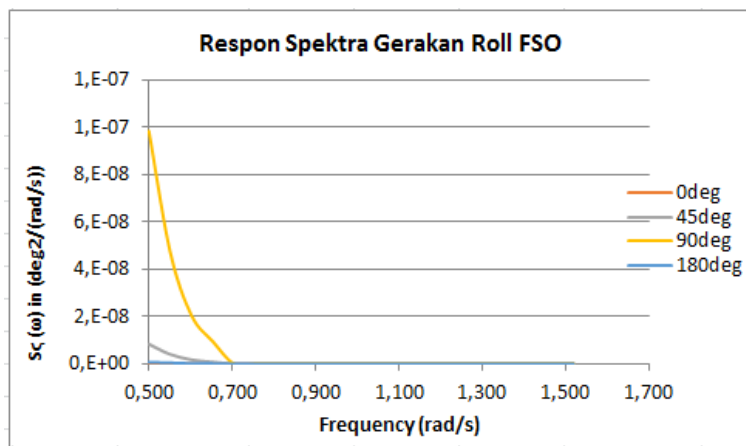
Gambar 4.69 Respon spektra gerakan *surge* FSO (*full load*) kondisi tertambat



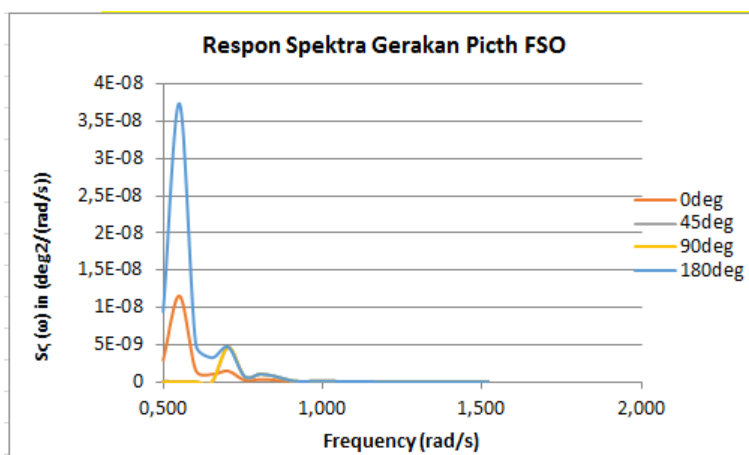
Gambar 4.70 Respon spektra gerakan *sway* FSO (*full load*) kondisi tertambat



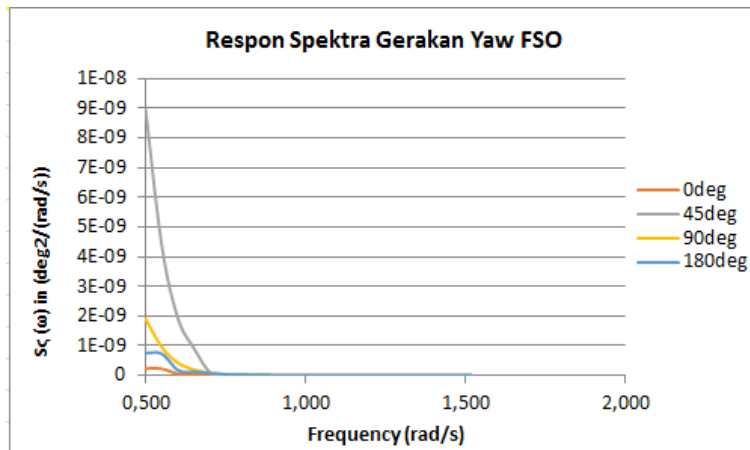
Gambar 4.71 Respon spektra gerakan *heave* FSO (*full load*) kondisi tertambat



Gambar 4.72 Respon spektra gerakan *roll* FSO (*full load*) kondisi tertambat



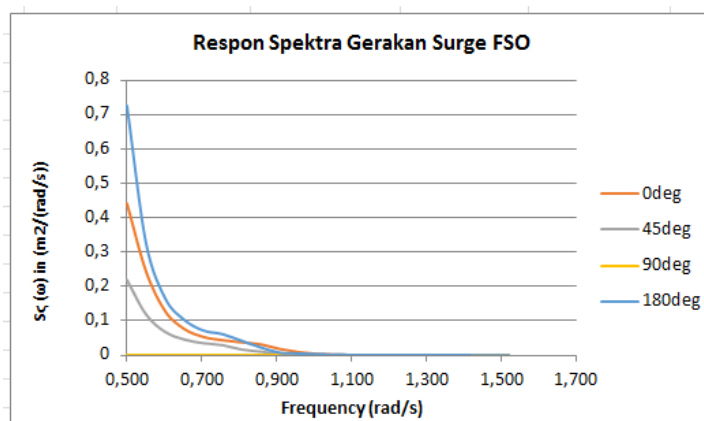
Gambar 4.73 Respon spektra gerakan *pitch* FSO (*full load*) kondisi tertambat



Gambar 4.74 Respon spektra gerakan yaw FPSO (*full load*) kondisi tertambat

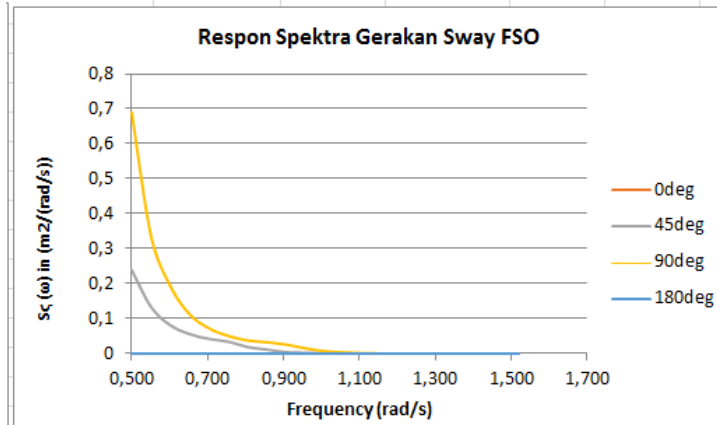
Dari Gambar 4.69 – Gambar 4.74 yang telah ditampilkan maka dapat disimpulkan bahwa respon struktur FSO kondisi muatan penuh (*full load*) pada kondisi ekstrim (gelombang 100 yrs) di perairan Laut Jawa untuk gerakan *surge* terjadi paling besar adalah akibat gelombang arah 180°, yaitu dengan nilai  $S_R(\omega)_{surge} = 0.00000008$  [m<sup>2</sup>/(rad/s)]. Respon struktur untuk gerakan *sway* terjadi paling besar adalah akibat gelombang arah 90°, yaitu dengan nilai  $S_R(\omega)_{sway} = 0.000000003$  [m<sup>2</sup>/(rad/s)]. Respon struktur untuk gerakan *heave* terjadi paling besar adalah akibat gelombang arah 0°, yaitu dengan nilai sebesar  $S_R(\omega)_{heave} = 0.000000006$  [m<sup>2</sup>/(rad/s)]. Respon struktur untuk gerakan *roll* terjadi paling besar adalah akibat gelombang arah 90°, yaitu dengan nilai  $S_R(\omega)_{roll} = 0.000000016$  [deg<sup>2</sup>/(rad/s)]. Respon struktur untuk gerakan *pitch* terjadi paling besar adalah akibat gelombang arah 180°, yaitu dengan nilai  $S_R(\omega)_{pitch} = 0.000000045$  [deg<sup>2</sup>/(rad/s)]. Respon struktur untuk gerakan *yaw* terjadi paling besar adalah akibat gelombang arah 45° dengan nilai  $S_R(\omega)_{yaw} = 0.000000009$  [deg<sup>2</sup>/(rad/s)].

- Analisis Respon Gerak FSO Tertambat Kondisi *Light Load*

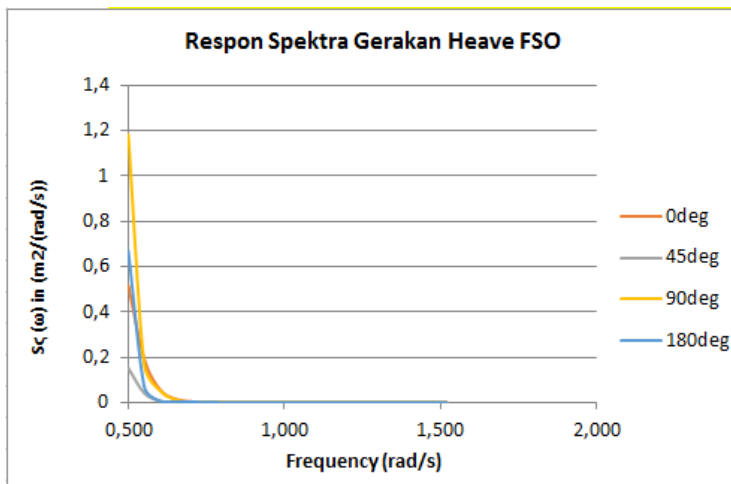


Gambar 4.75 Respon spektra gerakan surge FSO (*light load*) kondisi tertambat

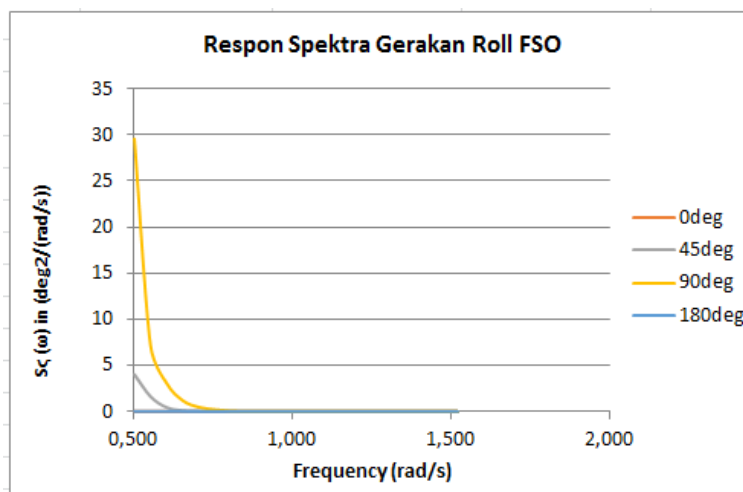




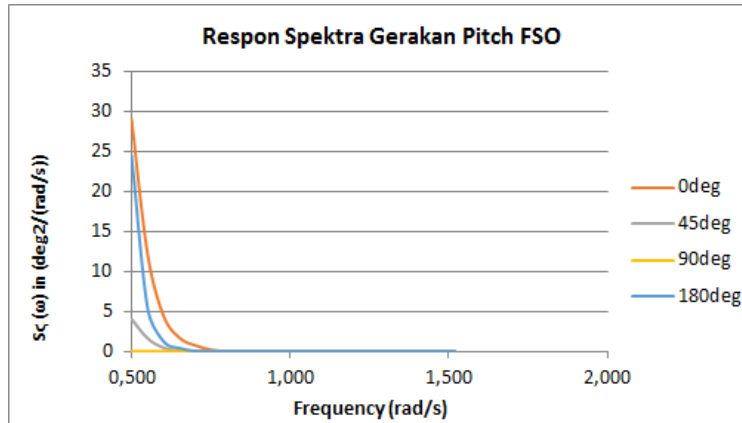
Gambar 4.76 Respon spektra gerakan *sway* FSO (*light load*) kondisi tertambat



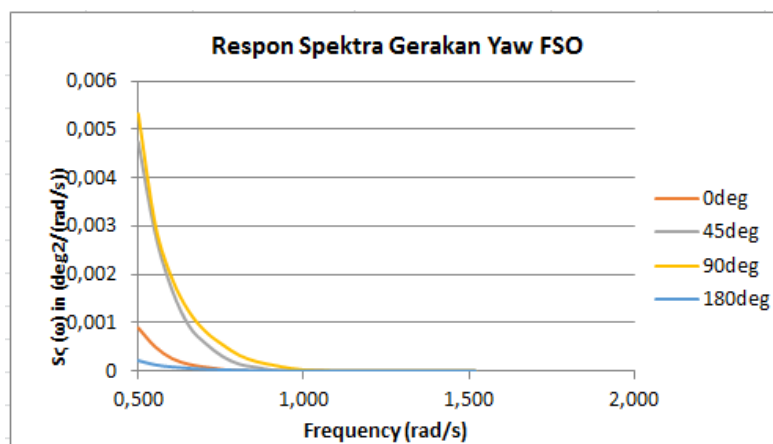
Gambar 4.77 Respon spektra gerakan *heave* FSO (*light load*) kondisi tertambat



Gambar 4.78 Respon spektra gerakan *roll* FSO (*light load*) kondisi tertambat



Gambar 4.79 Respon spektra gerakan *pitch* FSO (*light load*) kondisi tertambat



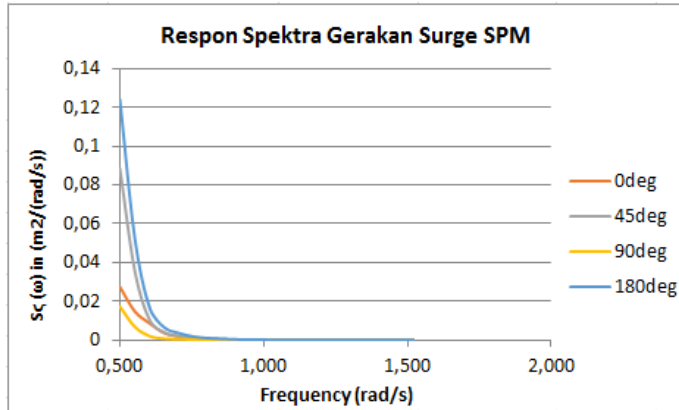
Gambar 4.80 Respon spektra gerakan *yaw* FSO (*light load*) kondisi tertambat

Dari **Gambar 4.73** – **Gambar 4.80** yang telah ditampilkan maka dapat disimpulkan bahwa respon struktur FSO kondisi *light load* pada kondisi ekstrim (gelombang 100 yrs) di perairan Laut Jawa untuk gerakan *surge* terjadi paling besar adalah akibat gelombang arah 180°, yaitu dengan nilai  $S_R(\omega)_{surge} = 0.72599 [m^2/(rad/s)]$ . Respon struktur untuk gerakan *sway* terjadi paling besar adalah akibat gelombang arah 90°, yaitu dengan nilai  $S_R(\omega)_{sway} = 0.6888 [m^2/(rad/s)]$ . Respon struktur untuk gerakan *heave* terjadi paling besar adalah akibat gelombang arah 90°, yaitu dengan nilai sebesar  $S_R(\omega)_{heave} = 1.18122 [m^2/(rad/s)]$ . Respon struktur untuk gerakan *roll* terjadi paling besar adalah akibat gelombang arah 90°, yaitu dengan nilai  $S_R(\omega)_{roll} = 1.1618 [deg^2/(rad/s)]$ . Respon struktur untuk gerakan *pitch* terjadi paling besar adalah akibat gelombang arah 0°, yaitu dengan nilai  $S_R(\omega)_{pitch} = 29.0218 [deg^2/(rad/s)]$ . Respon struktur untuk gerakan *yaw* terjadi paling besar adalah akibat gelombang arah 90° dengan nilai  $S_R(\omega)_{yaw} =$

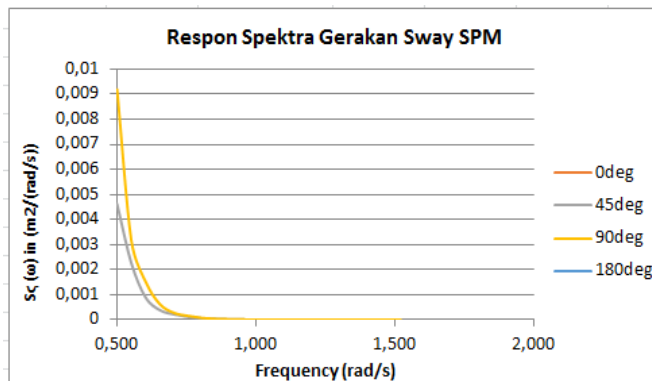
0.005326 [deg<sup>2</sup>/(rad/s)].

#### 4.7.4 Analisis Perilaku Gerak SPM Pada Gelombang Acak Kondisi Tertambat

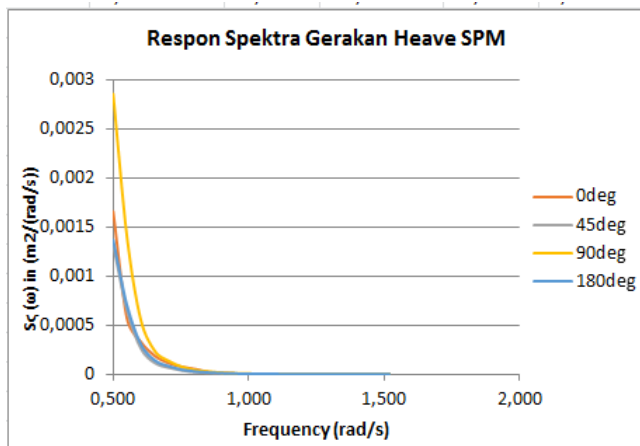
- Analisis Respon Gerak SPM Tertambat Kondisi FSO *Light Load*



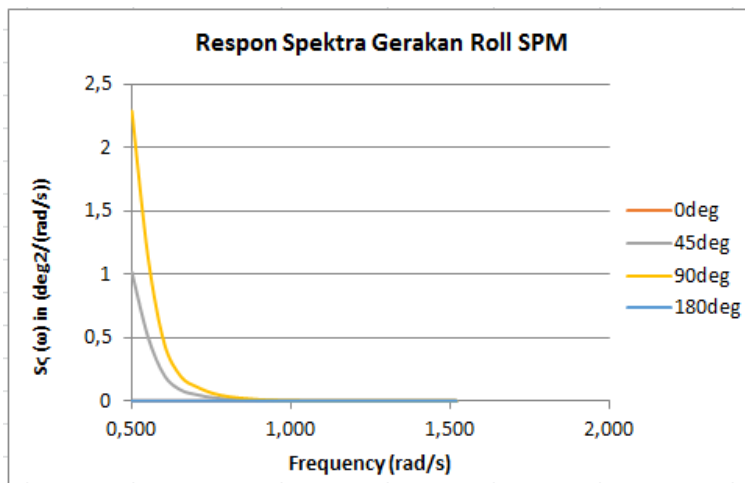
Gambar 4.81 Respon spektra gerakan *surge* SPM tertambat kondisi FSO *Light Load*



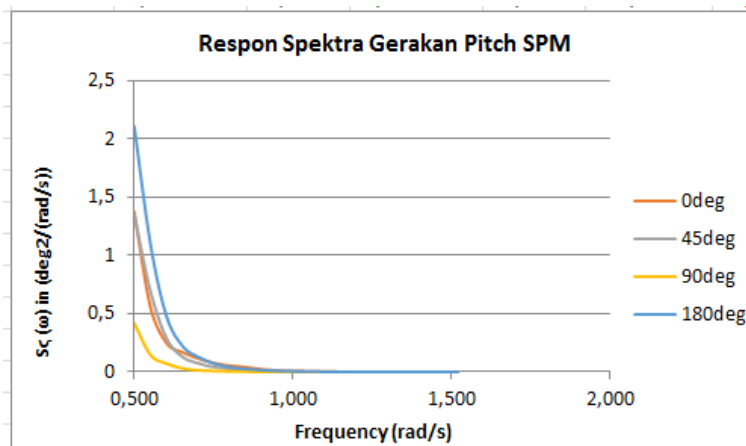
Gambar 4.82 Respon spektra gerakan *sway* SPM tertambat kondisi FSO *Light Load*



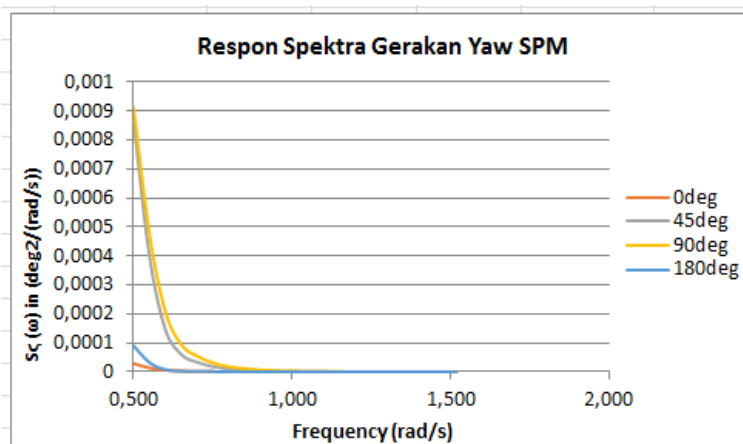
Gambar 4.83 Respon spektra gerakan *heave* SPM tertambat kondisi FSO *Light Load*



Gambar 4.84 Respon spektra gerakan *roll* SPM kondisi tertambat kondisi FSO *Light Load*



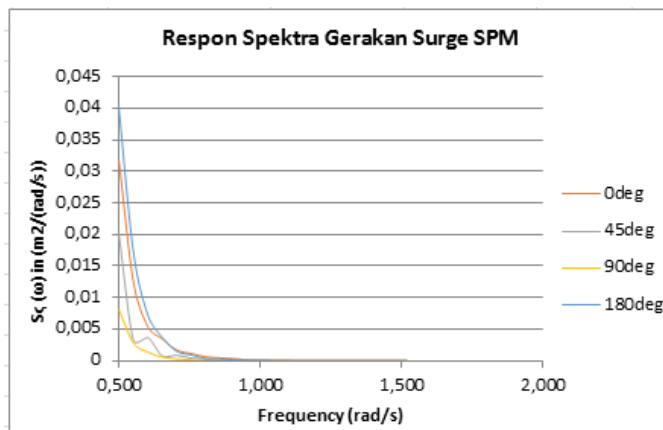
Gambar 4.85 Respon spektra gerakan *pitch* SPM tertambat kondisi FSO *Light Load*



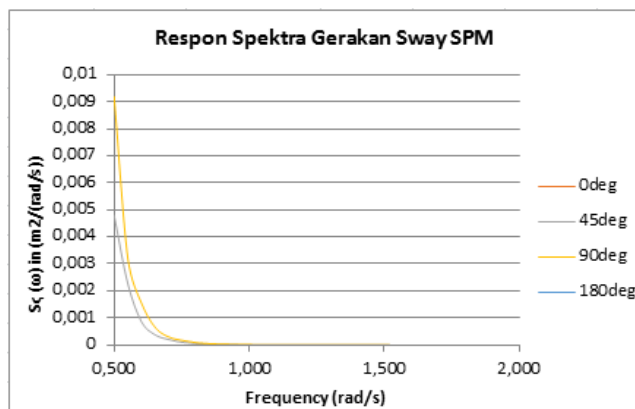
Gambar 4.86 Respon spektra gerakan *yaw* SPM tertambat kondisi FSO *Light Load*

Dari **Gambar 4.81 – Gambar 4.86** yang telah ditampilkan maka dapat disimpulkan bahwa respon struktur SPM pada kondisi ekstrim (gelombang 100 yrs) di perairan Laut Jawa untuk gerakan *surge* terjadi paling besar adalah akibat gelombang arah 180°, yaitu dengan nilai  $S_R(\omega)_{surge} = 0.1240 \text{ [m}^2/(\text{rad/s})]$ . Respon struktur untuk gerakan *sway* terjadi paling besar adalah akibat gelombang arah 90°, yaitu dengan nilai  $S_R(\omega)_{sway} = 0.01 \text{ [m}^2/(\text{rad/s})]$ . Respon struktur untuk gerakan *heave* terjadi paling besar adalah akibat gelombang arah 90°, yaitu dengan nilai sebesar  $S_R(\omega)_{heave} = 0.0029 \text{ [m}^2/(\text{rad/s})]$ . Respon struktur untuk gerakan *roll* terjadi paling besar adalah akibat gelombang arah 90°, yaitu dengan nilai  $S_R(\omega)_{roll} = 2.2915 \text{ [deg}^2/(\text{rad/s})]$ . Respon struktur untuk gerakan *pitch* terjadi paling besar adalah akibat gelombang arah 180°, yaitu dengan nilai  $S_R(\omega)_{pitch} = 2.1093 \text{ [deg}^2/(\text{rad/s})]$ . Respon struktur untuk gerakan *yaw* terjadi paling besar adalah akibat gelombang arah 90° dengan nilai  $S_R(\omega)_{yaw} = 0.0009 \text{ [deg}^2/(\text{rad/s})]$ .

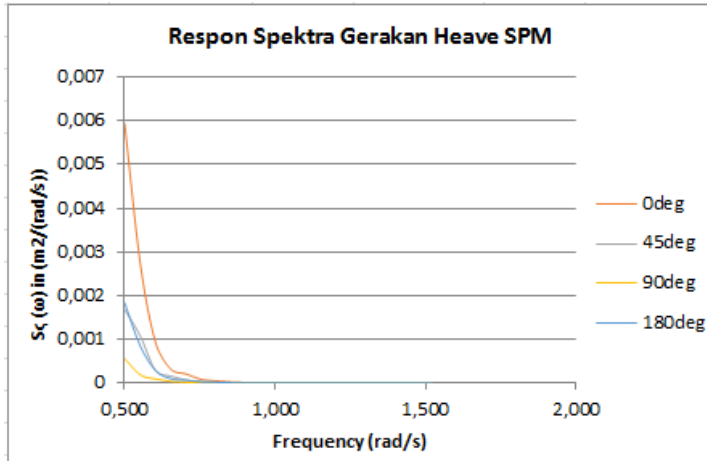
- Analisis Respon Gerak SPM Tertambat Kondisi FSO *Full Load*



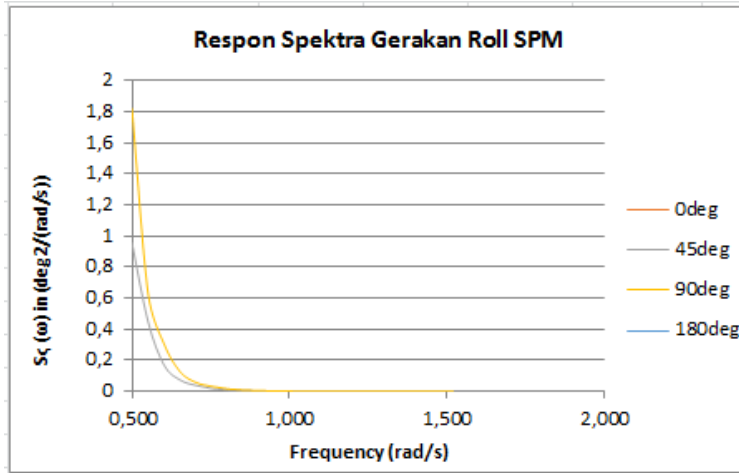
**Gambar 4.87** Respon spektra gerakan *surge* SPM tertambat kondisi FSO *Full Load*



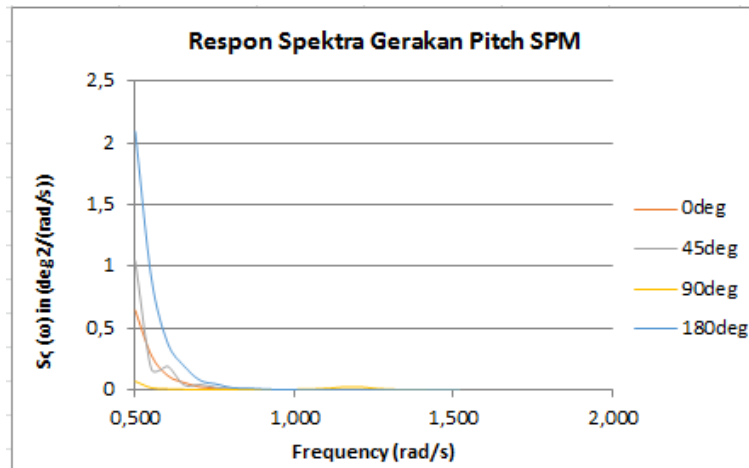
**Gambar 4.88** Respon spektra gerakan *sway* SPM tertambat kondisi FSO *Full Load*



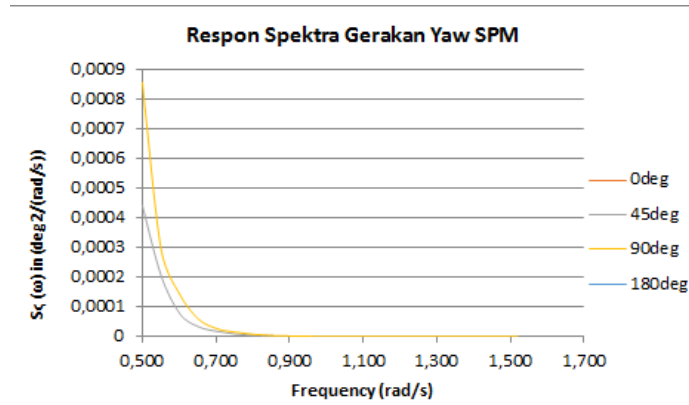
Gambar 4.89 Respon spektra gerakan *heave* SPM tertambat kondisi FSO *Full Load*



Gambar 4.90 Respon spektra gerakan *roll* SPM kondisi tertambat kondisi FSO *Full Load*



Gambar 4.91 Respon spektra gerakan *pitch* SPM tertambat kondisi FSO *Full Load*



**Gambar 4.92** Respon spektra gerakan yaw SPM tertambat kondisi FSO Full Load

Dari **Gambar 4.87** – **Gambar 4.92** yang telah ditampilkan maka dapat disimpulkan bahwa respon struktur SPM pada kondisi ekstrem (gelombang 100 yrs) di perairan Laut Jawa untuk gerakan *surge* terjadi paling besar adalah akibat gelombang arah 180°, yaitu dengan nilai  $S_R(\omega)_{surge} = 0.0399 \text{ [m}^2/(\text{rad/s})]$ . Respon struktur untuk gerakan *sway* terjadi paling besar adalah akibat gelombang arah 90°, yaitu dengan nilai  $S_R(\omega)_{sway} = 0.0092 \text{ [m}^2/(\text{rad/s})]$ . Respon struktur untuk gerakan *heave* terjadi paling besar adalah akibat gelombang arah 0°, yaitu dengan nilai sebesar  $S_R(\omega)_{heave} = 0.0059 \text{ [m}^2/(\text{rad/s})]$ . Respon struktur untuk gerakan *roll* terjadi paling besar adalah akibat gelombang arah 90°, yaitu dengan nilai  $S_R(\omega)_{roll} = 1.8213 \text{ [deg}^2/(\text{rad/s})]$ . Respon struktur untuk gerakan *pitch* terjadi paling besar adalah akibat gelombang arah 180°, yaitu dengan nilai  $S_R(\omega)_{pitch} = 2.0925 \text{ [deg}^2/(\text{rad/s})]$ . Respon struktur untuk gerakan *yaw* terjadi paling besar adalah akibat gelombang arah 90° dengan nilai  $S_R(\omega)_{yaw} = 0.0009 \text{ [deg}^2/(\text{rad/s})]$ .

#### 4.8 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 API RP 2SK 2<sup>nd</sup> edition.

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.

Dengan berbasis *time-domain*, analisis dilakukan selama 3 jam. Dan kondisi pembebanan dilakukan pada kondisi Ultimate Limit State (ULS) dan Accidental Limit State (ALS). Kondisi ULS adalah pembebanan yang terjadi pada kondisi operasi, dimana tali tambat yang bekerja sebagai *mooring system* pada FPSO bekerja optimum, utuh tanpa ada tali tambat dari yang diputus. Sedangkan ALS adalah pembebanan dengan kondisi yang sama dengan ULS, akan tetapi terdapat tali tambat dari *mooring system* yang diputus secara bebas. Berikut adalah hasil analisis *tension* tali tambat pada FPSO untuk kedua kondisi tersebut.

#### 4.8.1 Analisis *Tension* Tali Tambat Untuk FSO dan SPM pada Kondisi ULS

Sebelumnya perlu dihitung terlebih dahulu berapa nilai *tension* maksimum yang diijinkan oleh API RP 2SK 2<sup>nd</sup> edition. Perhitungannya adalah sebagai berikut:

□ **Untuk *Hawser***

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

$$1.82 = \frac{4094000 \text{ N}}{\text{Maximum Tension}}$$

$$\text{Maximum Tension} = \mathbf{2249450,55 \text{ N}}$$

□ **Untuk *Chain***

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

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

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

Dari perhitungan kriteria tersebut maka dapat disimpulkan bahwa nilai *tension* maksimum tali tambat yang dihasilkan pada kondisi ULS untuk material *steel wire* tidak boleh melebihi 2249450.55 N dan untuk material *chain* tidak boleh melebihi 4222155.69 N.



Dari hasil analisis menggunakan software Ansys Aqwa 16.0 selama 3 jam, didapatkan nilai tension untuk tali tambat, baik rantai jangkar maupun hawser yang terdapat pada Gambar 4.93 dan pada Gambar 4.94-4.95 merupakan salah satu hasil analisis tension untuk kondisi FSO Light Load arah pembebanan 0°. Hasil analisis tension untuk kondisi muatan dan arah pembebanan yang lainnya dapat dilihat pada lampiran.

**Gambar 4.93** Hasil Analisis Tension berdasarkan Arah Pembebanan dan Safety Factor

**Full Load**  
 MBL chain = 7051000 N MBL hawser = 4094000 N

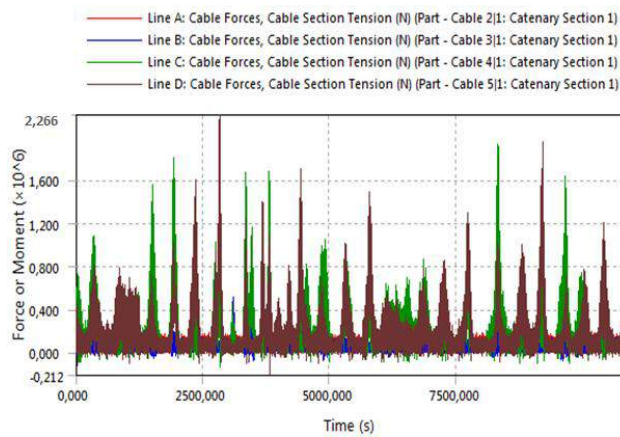
Heading (deg)	Chain 1 (N)	Chain 2 (N)	Chain 3 (N)	Chain 4 (N)	Chain 5 (N)	Chain 6 (N)	Hawser 1 (N)	Hawser 2 (N)
0	408121,813	843627,813	1928726,125	2205887	448134,625	243608,156	1893612,625	1889660,25
45	310018,438	905744,125	1791839,875	348645,25	159873,609	190381,875	1154863,625	1659706,125
90	1012676,75	1532661,125	771846,5	151059,297	176345,531	199104,797	987710,688	1488051,125
180	1440455,625	184299,703	180661,359	180767,063	248197,625	1497996,875	1974126,375	1884853
Max	1440455,625	1532661,125	1928726,125	2205887	448134,625	1497996,875	1974126,375	1889660,25
SF	4,89	4,60	3,66	3,20	15,73	4,71	2,07	2,17

+

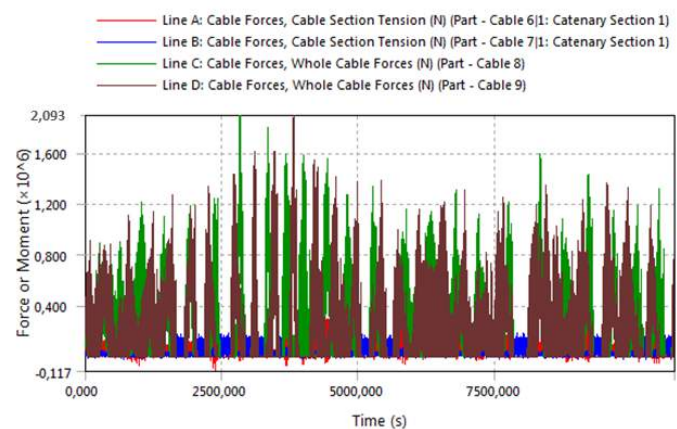
**Light Load**  
 MBL chain = 7051000 N MBL hawser = 4094000 N

Heading (deg)	Chain 1 (N)	Chain 2 (N)	Chain 3 (N)	Chain 4 (N)	Chain 5 (N)	Chain 6 (N)	Hawser 1 (N)	Hawser 2 (N)
0	474261,063	920417,751	1977889,469	2266493,25	447287,266	212744,781	2093191	2004744,75
45	332130,531	614437,688	1418774,375	849440,563	160135,156	242668	1024419,438	1033056
90	1338438,125	1212072,375	642842	181179,438	203871,406	267981,688	1599804,75	2181761,5
180	1506594,875	261089,641	229824,703	241373,313	247350,266	1467133,5	2173704,75	1999937,5
Max	1506594,875	1212072,375	1977889,469	2266493,25	447287,266	1467133,5	2173704,75	2181761,5
SF	4,68	5,82	3,56	3,11	15,76	4,81	1,88	1,88

**Gambar 4.94** Hasil Analisis Tension untuk Rantai Jangkar 1-4 untuk kondisi FSO Light Load Arah Pembebanan 0°

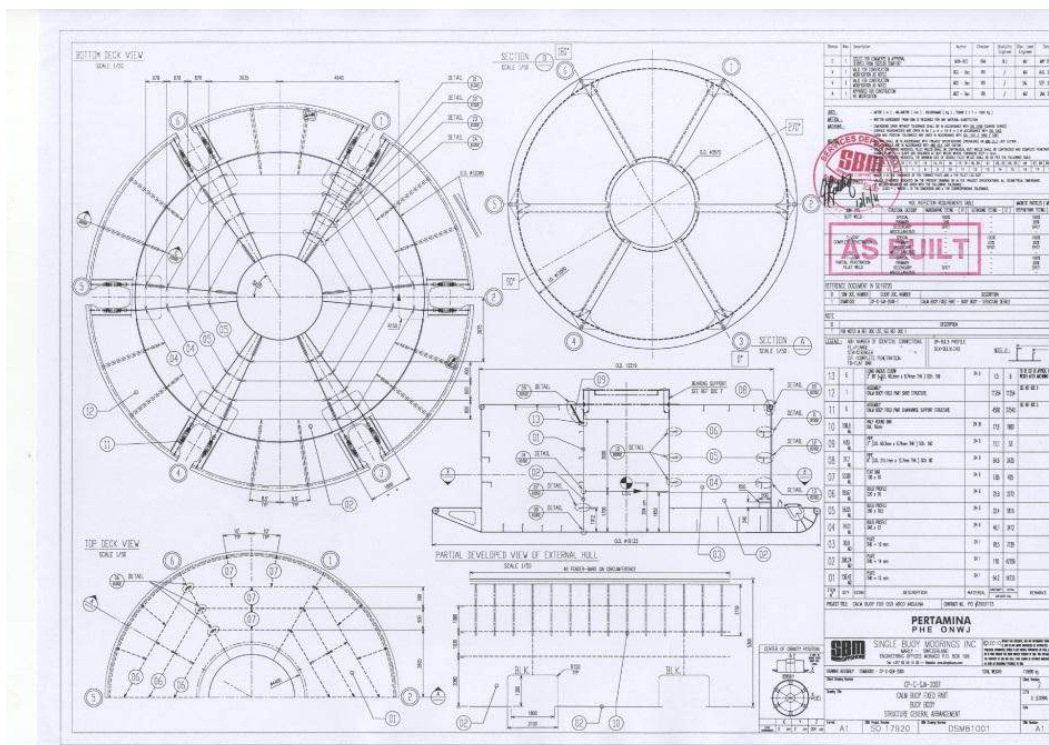


**Gambar 4.95** Hasil Analisis Tension untuk Rantai Jangkar 5-6 dan Hawser untuk kondisi FSO Light Load Arah Pembebanan 0°

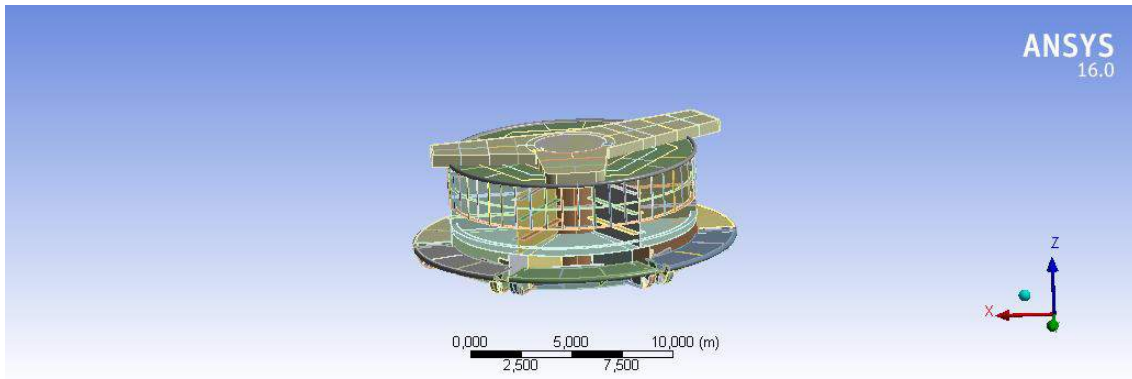


#### 4.9 Konstruksi Single Point Mooring

Seperti yang dijelaskan bahwa konstruksi SPM dimodelkan secara global dengan Autocad 3D dan analisis kekuatannya menggunakan Ansys Mechanical 16.0. Konstruksi SPM dapat dilihat pada Gambar 4.96-4.97 sebagai berikut:

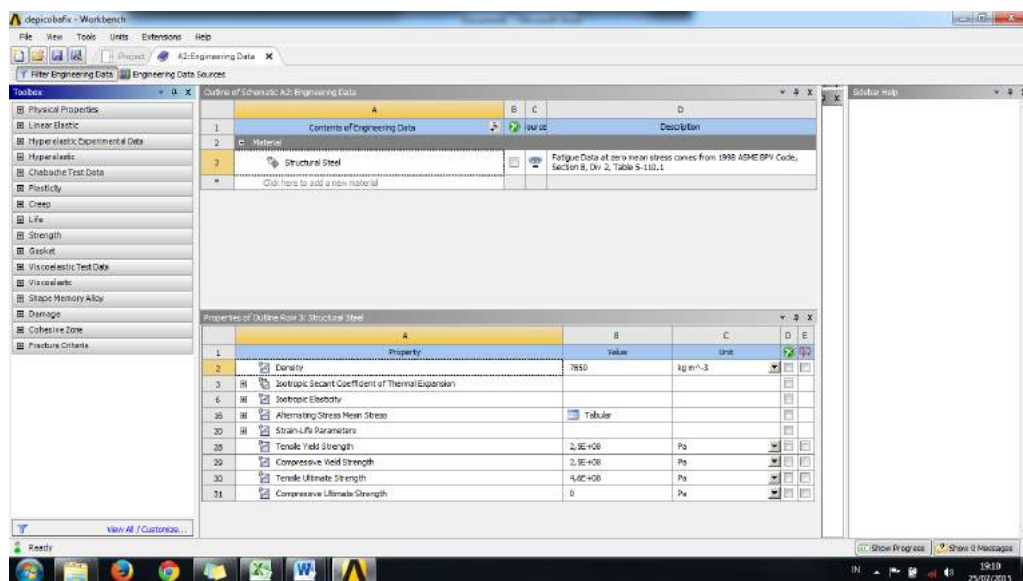


**Gambar 4.96** Konstruksi SPM (Sumber: PT. Citra Mas, 2015)



**Gambar 4.97** Pemodelan Konstruksi SPM di Ansys 16.0

Struktur yang dimodelkan pada Ansys Structural 16.0 meliputi konstruksi SPM yang terdiri dari bagian *body*, *skirt*, dan *turntable*. Untuk mempermudah analisis, pengait dari rantai jangkar dimodelkan dengan sederhana berupa batang silinder. Selain itu, juga dilakukan pemilihan material untuk struktur, yaitu Baja ASTM A36.

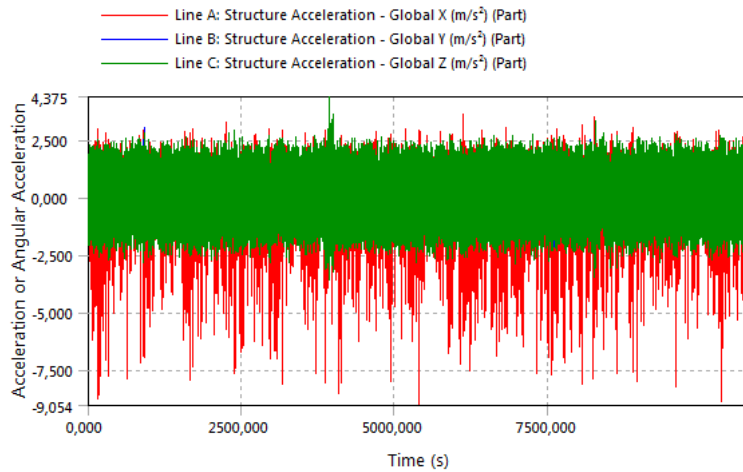


**Gambar 4.98** Material property untuk pemodelan struktur global

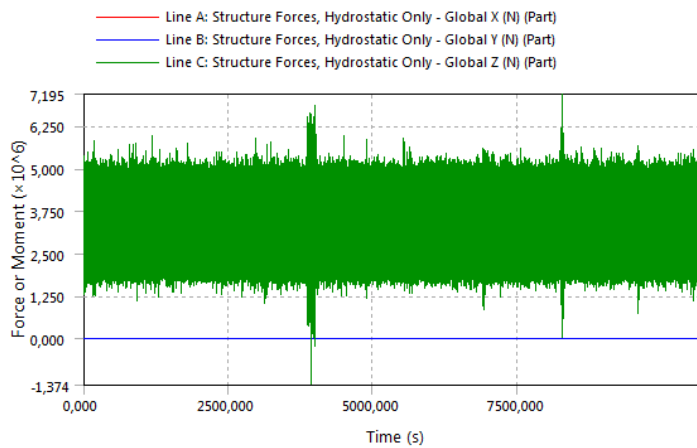
#### 4.10 Analisis Distribusi Tegangan Global

Distribusi tegangan pada pemodelan struktur global konstruksi SPM ini dihasilkan oleh berat struktur SPM sendiri, tension pada rantai jangkar maupun hawser, percepatan struktur dan gaya hidrostatis yang didapat dari perhitungan pada *Ansys Aqwa*. Pembebanan gelombang periode 100-tahunan digunakan untuk mengetahui titik yang mengalami tegangan paling kritis akibat pengaruh gerakan struktur. Hasil dari

percepatan struktur dan gaya hidrostatis dapat dilihat pada Gambar 4.99-4.100 untuk kondisi FSO *Light Load* dengan arah pembebanan 0°, untuk hasil dari kondisi muatan dan arah pembebanan yang lain dapat dilihat pada lampiran.



**Gambar 4.99** Percepatan Struktur SPM



**Gambar 4.100** Gaya Hidrostatik Struktur SPM

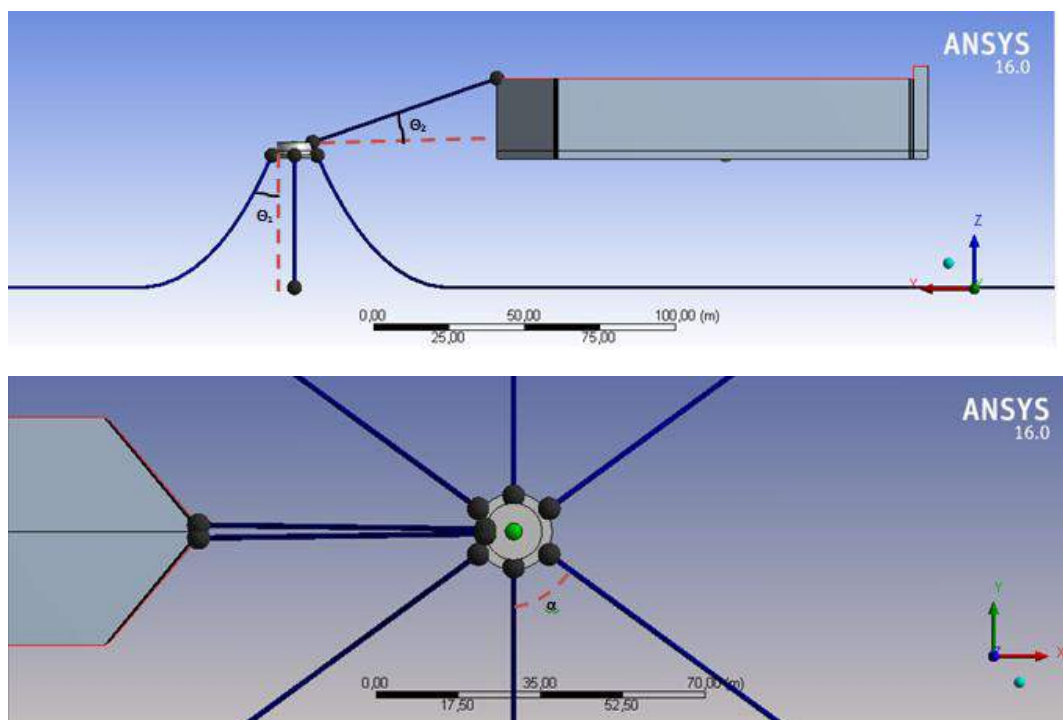
**Tabel 4.10** Hasil Gaya Hidrostatik dan Percepatan Struktur pada kondisi FSO *Light Load* dengan arah pembebanan 0°

Mooring Line	Tension (N)	Detik(s)	Hydro Force (N)	Percepatan Struktur (m/s <sup>2</sup> )		
				x	y	z
Chain 1 (N)	66139,25	2840,75	5278184	-1,299	0,973	1,776
Chain 2 (N)	94078,714					
Chain 3 (N)	558635,2175					
Chain 4 (N)	2266493,25					
Chain 5 (N)	301710,482					

Chain 6 (N)	460637,975					
Hawser 1 (N)	1.679.535					
Hawser 2 (N)	379988,844					

#### 4.11 Pembebanan Pada Analisis Global

Pada analisis lokal konstruksi SPM dengan menggunakan *software* Ansys Structural 16.0 ini digunakan 4 pembebanan yaitu hasil dari analisis *tension* baik rantai jangkar maupun hawser, tekanan hidrostatis, percepatan struktur dan beban berat struktur sendiri. Pada analisis menggunakan *software* Ansys, pemberian gaya hanya pada bagian di SPM yang di anggap paling kritis. Jadi pada kondisi muatan FSO *light* memiliki bagian kritis yang sama tetapi nilai beban yang berbeda. *Tension* yang didapatkan dari simulasi merupakan gaya dengan sudut tertentu, maka perlu diperhitungkan sudut yang dibentuk untuk melakukan pembebanan pada konstruksi bolder. Konfigurasi beban tersebut dapat dilihat pada ilustrasi Gambar 4.101.



**Gambar 4.101** Konfigurasi beban pada pemodelan global

Pada Gambar 4.101, tinggi FSO adalah 24 m dan panjang jarak FSO ke SPM adalah 67.056 m. Berdasarkan perhitungan, didapatkan  $\theta_1$  sebesar  $7.61^\circ$ ,  $\theta_2$  sebesar  $19.69^\circ$  dan  $\alpha$  sebesar  $60^\circ$ . setelah diketahui kedua sudut tersebut, maka dapat dihitung gaya yang akan digunakan sebagai *input* beban pada pemodelan global konstruksi SPM.



Hasil perhitungan dari gaya pada konstruksi SPM ialah terdapat pada Tabel 4.11 untuk kondisi muatan FSO *light* dengan arah pembebanan  $0^\circ$ . Untuk hasil perhitungan arah pembebanan lainnya dapat dilihat pada lampiran.

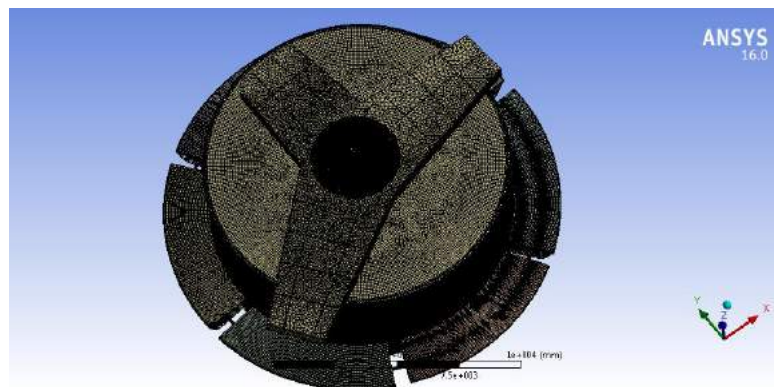
**Tabel 4.11** Hasil perhitungan beban pada konstruksi SPM

Keterangan	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Detik(s)	Hydro Force (N)	Percepatan Struktur (m/s <sup>2</sup> )		
						x	y	z
Chain 1	7580,92	4376,98	65557,4	2840,75	5278184	-1,299	0,973	1,776
Chain 2	12451,9	0	93251					
Chain 3	64031,1	36969,5	553720					
Chain 4	259787	149992	2246553					
Chain 5	39933,3	0	299056					
Chain 6	52798,6	30484,2	456585					
Hawser 1	0	565964	1581304					
Hawser 2	0	128047	357764					

#### 4.12 Meshing dan Sensitivity Analysis

*Sensitivity Analysis* dilakukan untuk mengecek apakah tegangan yang dihasilkan dari hasil *running* sudah benar atau sudah mendekati nilai kebenaran. Pada Tugas Akhir ini, uji *sensitivity* dilakukan dengan cara variasi kerapatan *meshing*. 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%.

Pada Tugas Akhir ini dilakukan *running* pada kondisi muatan FSO *light* dengan arah pembebanan  $0^\circ$ , karena memiliki tegangan yang maksimum dari arah pembebanan lainnya. Selain itu, juga dilakukan *running* dengan 8 kondisi kerapatan *meshing*.

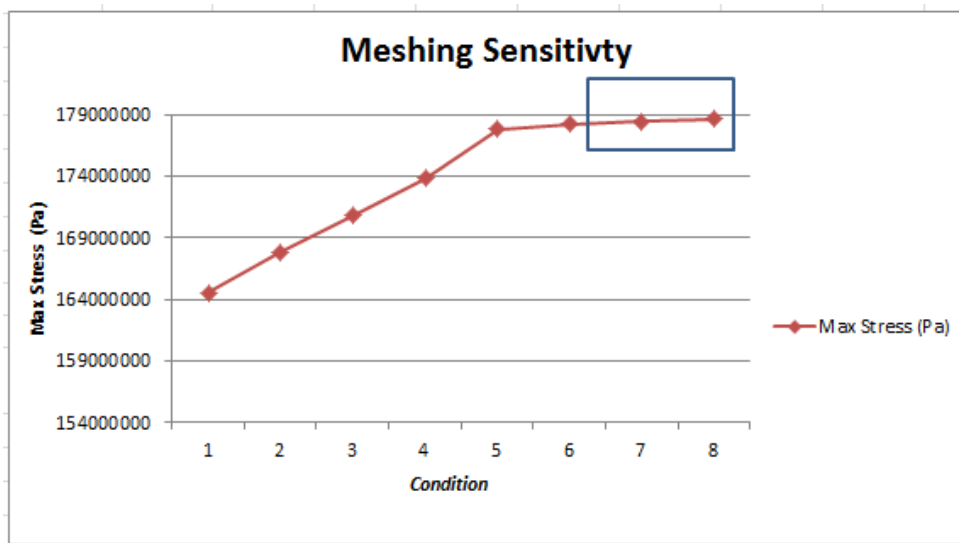


**Gambar 4.102** Model elemen dengan *meshing* 0.0397 m

Gambar 4.102 merupakan contoh *mesh* pada struktur. *Meshing* dilakukan dengan kerapatan 0.045; 0.044; 0.043; 0.042; 0.041; 0.040; 0.0399 ; dan 0.0397m. Berdasarkan variasi *mesh* yang dilakukan, didapatkan tabulasi *mesh* yang terdapat pada Tabel 4.12 sebagai berikut:

**Tabel 4.12** Tabulasi hasil *Maximum von MisesStress* untuk variasi kerapatan *meshing*

<i>Condition</i>	<i>Mesh Sizing(m)</i>	<i>Nodes</i>	<i>Elements</i>	<i>Max Stress (Pa)</i>	<i>Error (%)</i>
1	0,045	623644	163357	164510000	
2	0,044	637232	176629	167810000	-1,97
3	0,043	651452	190533	170810000	-1,76
4	0,042	666304	205069	173810000	-1,73
5	0,041	689769	228056	177810000	-2,25
6	0,040	697904	236037	178210000	-0,22
7	0,0399	706201	244172	178410000	-0,11
8	0,0397	714652	252469	178610000	-0,11



**Gambar 4.103** Sensitivitas model konstruksi SPM

Berdasarkan Tabel 4.12 dan grafik pada Gambar 4.103 dapat disimpulkan bahwa struktur SPM pada FSO Arco Ardjuna dapat dengan baik dimodelkan pada ukuran *mesh* 0.0397 meter karena hasil perhitungan *error* untuk *mesh* ini kurang dari 5%.

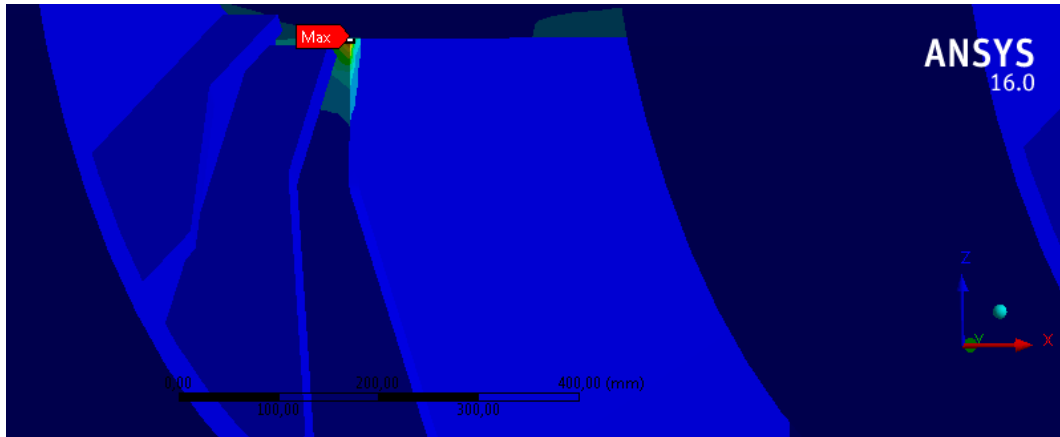
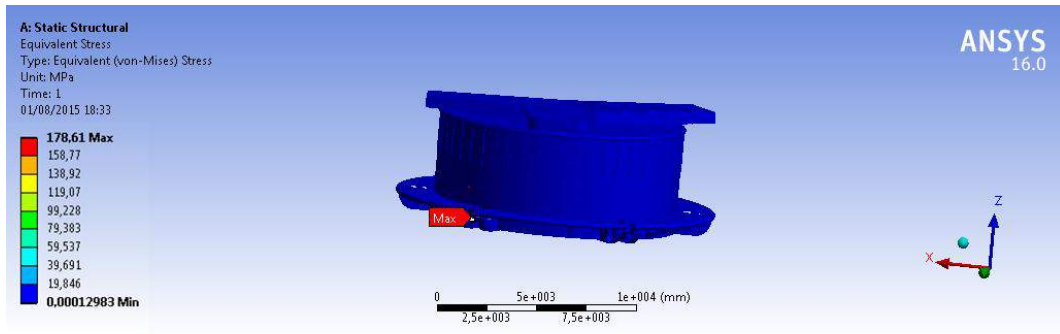
#### 4.13 Analisis Tegangan Global Konstruksi SPM

Pada analisis ini *constraint* pada pemodelan yang digunakan yaitu pada ujung pengait rantai jangkar di *fix* dan diberi beban *tension* rantai jangkar. Untuk tekanan hidrostatik diberikan pada bagian konstruksi SPM, sedangkan beban *tension* hawser pada *padeye* hawser. Beban dari percepatan struktur dan berat struktur sendiri diberikan sesuai dengan hasil analisis pada *Ansys Aqwa* sebelumnya.

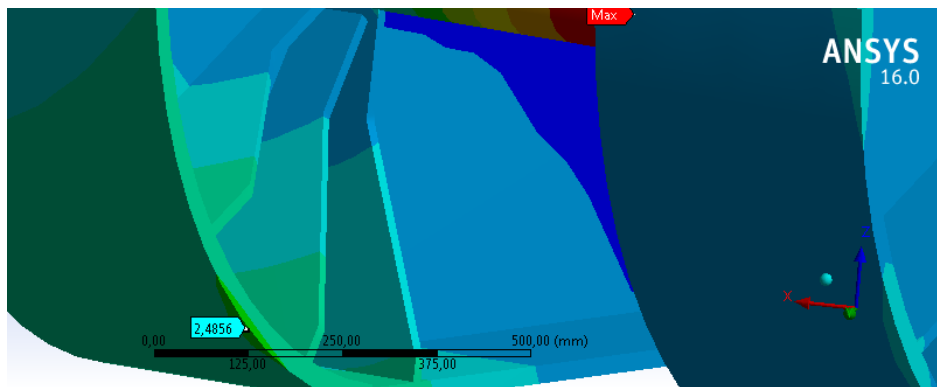
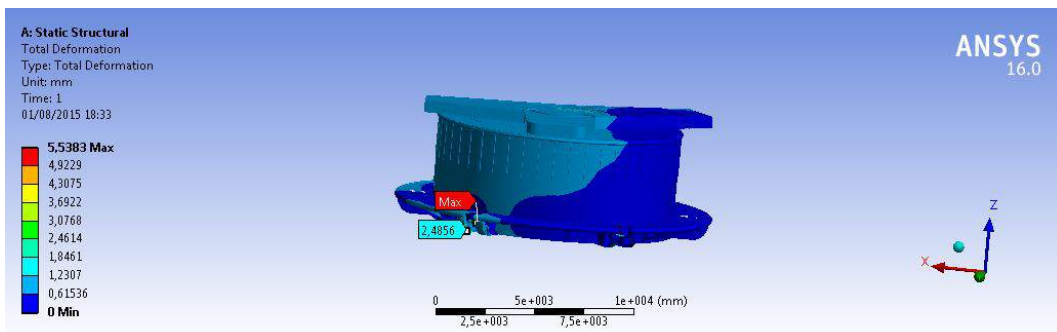
Berdasarkan hasil *meshing* dan pembebanan yang dilakukan dari *running*, menunjukkan bahwa tegangan maksimum terjadi pada penegar dari pengait rantai jangkar dan didapatkan hasil tegangan maksimum sebesar 178.61 MPa, untuk hasil tegangan rata-rata sebesar 27.064 MPa dan deformasi maksimum sebesar 5.54 mm, tetapi konsentrasi dari analisis ini ingin mengetahui kekuatan dari penegar pengait rantai jangkar, sehingga deformasi maksimum penegar dari pengait rantai jangkar adalah 2.49 mm. Berdasarkan material yang digunakan, yaitu baja A36 dengan nilai *yield strength* 250 MPa dan mengacu pada ketentuan ABS “*Safehull-Dynamic Loading Approach for FPSO Systems*” yang menganjurkan tegangan von Mises tidak boleh melebihi 90% dari *yield strength material*, yaitu 225 MPa, maka struktur ini dapat dikatakan aman untuk beroperasi. Hasil analisis dapat dilihat pada Gambar 4.104-4.105.

Untuk deformasi, nilai deformasi terbesar yang terjadi pada struktur yang telah dimodelkan adalah sebesar 2.49 mm. Nilai ini masih lebih kecil jika dibandingkan dengan syarat deformasi maksimum yang tercantum dalam ABS “*Shipbuilding and Repair Quality Standard for Hull Structures during Construction*” yaitu 8 mm. Dengan demikian, struktur dapat dinyatakan aman untuk terus beroperasi.





**Gambar 4.104** Tegangan maksimum pada konstruksi SPM



**Gambar 4.105** Deformasi maksimum pada konstruksi SPM

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat dibuat berdasarkan pengerjaan Tugas Akhir ini adalah :

1. Respon struktur FSO Arco Ardjuna dan SPM akibat beban gelombang pada saat *free floating* dan tertambat, adalah sebagai berikut :
  - Amplitudo struktur FSO Arco Ardjuna pada kondisi *free floating*, nilai terbesar terjadi pada kondisi *light* dengan *surge* terbesar 0.9238 m, *sway* terbesar 1.7195 m, *heave* terbesar 2.8334 m, *roll* terbesar  $11.7823^0$ , *pitch* terbesar  $8.0261^0$ , *yaw* terbesar  $0.1230^0$ .
  - Amplitudo struktur SPM pada kondisi *free floating*, nilai terbesar terjadi pada kondisi *light* dengan *surge* terbesar 2.15 m, *sway* terbesar 2.15 m, *heave* terbesar 4.298 m, *roll* terbesar  $8.0979^0$ , *pitch* terbesar  $8.0690^0$ , *yaw* terbesar  $1.4343^0$ .
  - Amplitudo struktur FSO Arco Ardjuna pada kondisi tertambat, nilai terbesar terjadi pada kondisi *light* dengan *surge* terbesar 0.3276 m, *sway* terbesar 0.3192 m, *heave* terbesar 0.4179 m, *roll* terbesar  $2.0912^0$ , *pitch* terbesar  $2.0716^0$ , *yaw* terbesar  $0.0281^0$ .
  - Amplitudo struktur SPM pada kondisi tertambat, nilai terbesar terjadi pada kondisi *light* dengan *surge* terbesar 0.1355 m, *sway* terbesar 0.0385 m, *heave* terbesar 0.0296 m, *roll* terbesar  $0.5821^0$ , *pitch* terbesar  $0.5585^0$ , *yaw* terbesar  $0.0116^0$ .
  
2. Hasil *tension hawser* terbesar yang menghubungkan antara FSO Arco Ardjuna dengan SPM sebesar 2181.76 kN dengan kondisi muatan FSO *light* dan sudut pembebanan  $90^0$ . *Hawser* memiliki *Minimum Breaking Load* sebesar 4094 kN sehingga dengan *tension* yang didapatkan dari hasil simulasi, memiliki *safety factor* 1.88. *Safety factor* ini lebih dari 1.82 yang dianjurkan oleh *American Bureau of Shipping*. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa *hawser* dalam kondisi aman selama proses operasi dengan beban lingkungan 100 tahunan.

3. Hasil *tension* rantai jangkar terbesar yang menghubungkan antara FSO Arco Ardjuna dengan SPM sebesar 2266.49 kN dengan kondisi muatan FSO *light* dan sudut pembebanan  $0^0$ . *Hawser* memiliki *Minimum Breaking Load* sebesar 7051 kN sehingga dengan *tension* yang didapatkan dari hasil simulasi, memiliki *safety factor* 3.11. *Safety factor* ini lebih dari 1.67 yang dianjurkan oleh *American Bureau of Shipping*. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa rantai jangkar dalam kondisi aman selama proses operasi dengan beban lingkungan 100 tahunan.
  
4. Berdasarkan hasil pemodelan struktur global konstruksi SPM dengan pembebanan sesuai *tension hawser* dan rantai jangkar terbesar hasil simulasi sebelumnya, tekanan hidrostatis, percepatan struktur dan berat struktur sendiri, maka didapatkan tegangan maksimum konstruksi SPM sebesar 178.61 MPa dengan deformasi 2.49 mm. Nilai tegangan maksimum tersebut masih lebih kecil jika dibandingkan dengan tegangan ijin yang dianjurkan oleh ABS "*Safehull-Dynamic Loading Approach for FPSO Systems*" sebesar 225 MPa. Dan Nilai deformasi yang dihasilkan juga masih lebih kecil jika dibandingkan dengan syarat deformasi maksimum yang tercantum dalam ABS "*Shipbuilding and Repair Quality Standard for Hull Structures during Construction*" yaitu 8 mm. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa konstruksi SPM masih aman untuk beroperasi.

#### 4.2 Saran

1. Perlu dilakukan analisis yang lebih detail dengan cara memvariasikan sudut pembebanan yang lebih kecil intervalnya.
2. Untuk analisa lebih spesifik dalam penentuan tegangan lokal maksimum konstruksi SPM pada FSO Arco Ardjuna, perlu mempertimbangkan factor kondisi lingkungan seperti korosi.
3. Perlu dilakukan analisis yang lebih detail dengan memodelkan mekanisme turntable secara spesifik dan pengaruh dari gerakan hose.

## DAFTAR PUSTAKA

- A.R. Halliwell and R.E. Harris. (1988) “*A Parametric Experimental Study Of Flow-Frequency Motions of Single Point Mooring System in Waves*”. *Computational Mechanics Publications*. UK
- ABS, 2001, ‘*Safehull-Dynamic Loading Approach*’ for Floating Production, Storage and Offloading (FPSO) Installations, USA: American Bureau of Shipping ABS Plaza.
- ABS, 2001, ‘*Shipbuilding and Repair Quality Standard for Hull Structures during Construction*, USA: American Bureau of Shipping ABS Plaza.
- ABS, 2004, *Guide for Building and Classing Floating Production Installations*, USA: American Bureau of Shipping. C. J. Kaufman, Rocky Mountain Research Lab., Boulder, CO, komunikasi pribadi, (1995, May).
- API RP 2SK. (1996). *Recommended Practice for Design and Analysis of Station Keeping Systems for Floating Structures*. Washington. DC
- API RP 2P. (2001). *Recommended Practice for Design and Analysis of Station Keeping Systems for Floating Structures*. Washington. DC
- API RP2SK 3<sup>rd</sup> edition. (2005). *Recommended Practice for Design and Analysis of Station Keeping Systems for Floating Structures*. Washington. DC
- Bhattacharyya. R., 1978, *Dynamics of Marine Vehicles*, New York: John Wiley & Sons Inc.
- Chakrabarti, S.K., 1987, *Hydrodynamics of Offshore Structures*, USA: Computational Mechanics Publications Southampton.
- Djarmiko, E. B, 2012, *Perilaku dan Operabilitas Bangunan Laut di Atas Gelombang Acak*, its press, Surabaya.
- Djarmiko, E. B. and Murdijanto, 2003, *Seakeeping: Perilaku Bangunan Apung di atas Gelombang*, Jurusan Teknik Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia.
- DNV OS E301, 2004, “*Position Mooring*”, Det Norske Veritas, Norway.
- DNV RP C205, 2010, “*Environmental Conditions and Environmental Loads*”, Det Norske Veritas , Norway.

- Faltinsen, O.M., 1990, “*Sea Loads On Ships And Offshore Structures*”, United Kingdom: Cambridge University Press.
- Sabana, Norman Mahdar., 2012, *Analisis Tegangan pada Yoke Arm External Turret Mooring System Floating Production Storage and Offloading (FPSO)*, Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan, ITS, Surabaya.
- Oil Companies International Marine Forum, 2009, *Tandem Mooring & Offloading Guidelines for Conventional Tankers at F(P)SO Facilities*, United Kingdom: Oil Companies International Marine Forum.
- Popov, E. P., 1996, *Mekanika Teknik*, Jakarta: Erlangga.
- Soedjono, J.J., 1999. “*Diktat mata kuliah Konstruksi Bangunan Laut II*”, Jurusan Teknik Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia.
- Suryanto. AKS (2009) “*Study Selection Configuration Multi Buoy Mooring Due Extrem Condition Based On Reliability*”. *Scientific Publications Search Engine*. ITS Surabaya
- Wischer J. E. W. and Van Sluys M. F. *The influence of waves on the low-frequency hydrodynamic coefficients of moored vessels*. OTC 3225. 1979.
- Yilmaz. O.&.A.I.. 1996. *Hydrodynamic Design of Moored Floating Platforms*. Elsevier. *Marine Structures*. 9. pp.545-75.

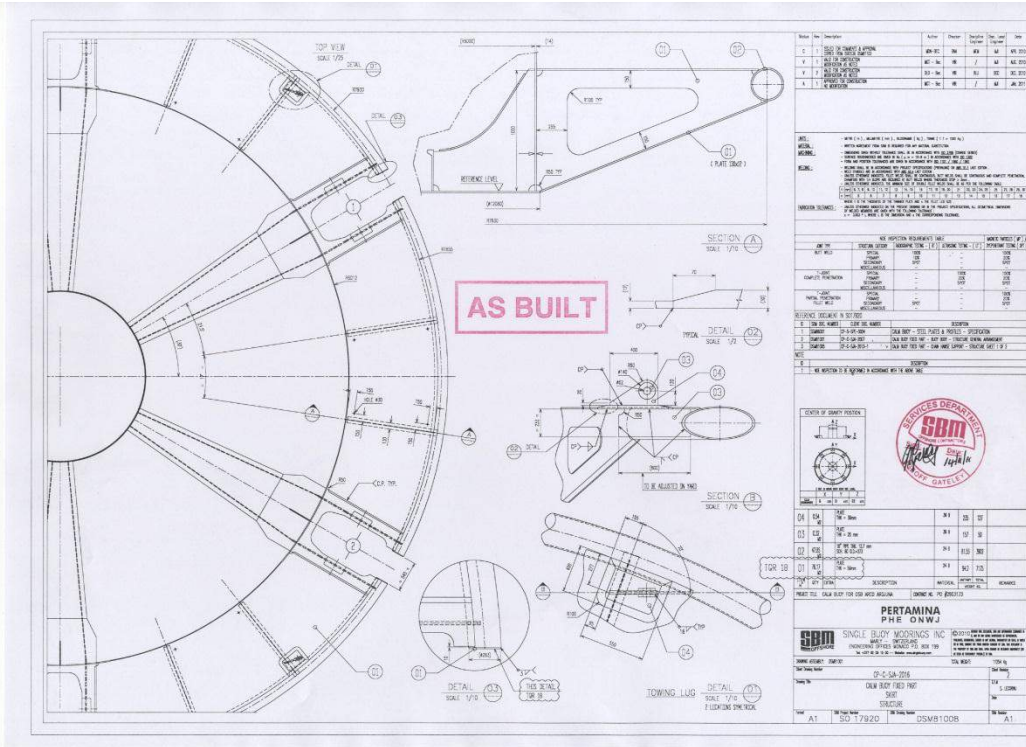
**LAMPIRAN A**  
**DATA DAN MODEL STRUKTUR SPM**  
**FSO Arco Ardjuna**

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

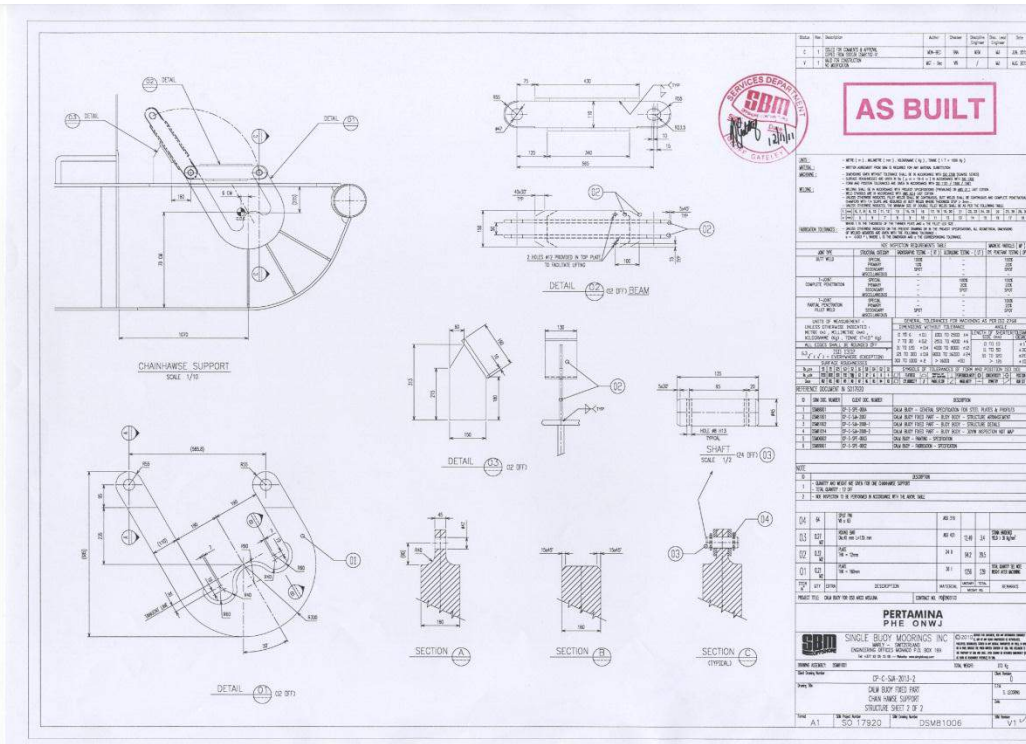




• SKIRT



• PENGAIT RANTAI JANGKAR



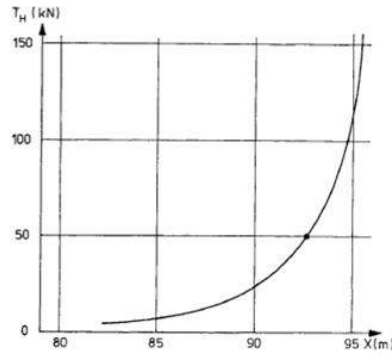




**LAMPIRAN B**  
**PERHITUNGAN**

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

## PERHITUNGAN JARAK ANTARA JANGKAR DENGAN SPM



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

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

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

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

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

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

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

## PERHITUNGAN PEMBEBANAN PADA ANSYS STRUCTURAL 16.0

Berdasarkan gambar yang sudah dijelaskan di laporan utama didapatkan nilai sebagai berikut:

- Untuk *tension* rantai jangkar

$$Fx = T \sin \phi_1 \sin \alpha$$

$$Fy = T \sin \phi_1 \cos \alpha$$

$$Fz = T \cos \phi_1$$

- Untuk *tension* hawser

$$Fx = T \cos \phi_2 \cos \alpha$$

$$Fy = T \cos \phi_2 \sin \alpha$$

$$Fz = T \sin \phi_2$$

**Heading 45°**

Keterangan	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Detik(s)	Hydro Force (N)	Percepatan Struktur (m/s <sup>2</sup> )		
						x	y	z
Chain 1	2330,99	1345,84	20157,6	312,5	2322280	-5,17	0,23	-2,28
Chain 2	8031,59	0	60147,7					
Chain 3	162621	93891,9	1406292					
Chain 4	61469,5	35490,5	531568					
Chain 5	9135,64	0	68415,8					
Chain 6	1165,66	673,015	10080,3					
Hawser 1	154867	219048	612021					
Hawser 2	176364	249453	696973					

**Heading 90°**

Keterangan	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Detik(s)	Hydro Force (N)	Percepatan Struktur (m/s <sup>2</sup> )		
						x	y	z
Chain 1	153413	88575,4	1326663	66	5278977	0,95	-1,57	0,93
Chain 2	32651,8	0	244526					
Chain 3	6696	3866,05	57904,9					
Chain 4	988,521	570,74	8548,42					
Chain 5	2524,43	0	18905,2					
Chain 6	11223,6	6480,14	97058					
Hawser 1	365986	365986	1022566					
Hawser 2	103630	103630	289542					

**Heading 180°**

Keterangan	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Detik(s)	Hydro Force (N)	Percepatan Struktur (m/s <sup>2</sup> )		
						x	y	z
Chain 1	172687	99703,7	1493340	1391,75	1826139	-0,841	-0,0556	-0,992
Chain 2	7488,31	0	56079,1					
Chain 3	47,3349	27,3296	409,337					
Chain 4	56,8636	32,8312	491,738					
Chain 5	30365,8	0	227406					
Chain 6	115086	66446,9	995226					
Hawser 1	0	427874	1195479					
Hawser 2	0	176032	491834					

**LAMPIRAN C**

**HASIL ANALISIS *TENSION*, GAYA  
HIDROSTATIK, DAN PERCEPATAN  
STRUKTUR SPM FSO Arco Ardjuna**



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

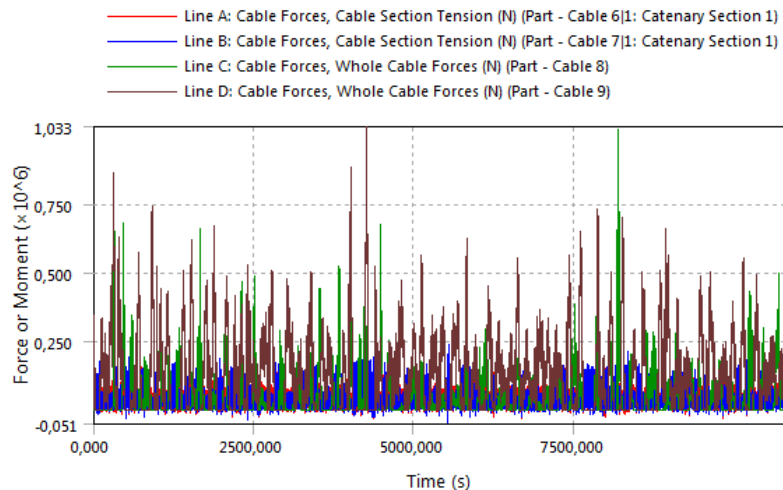
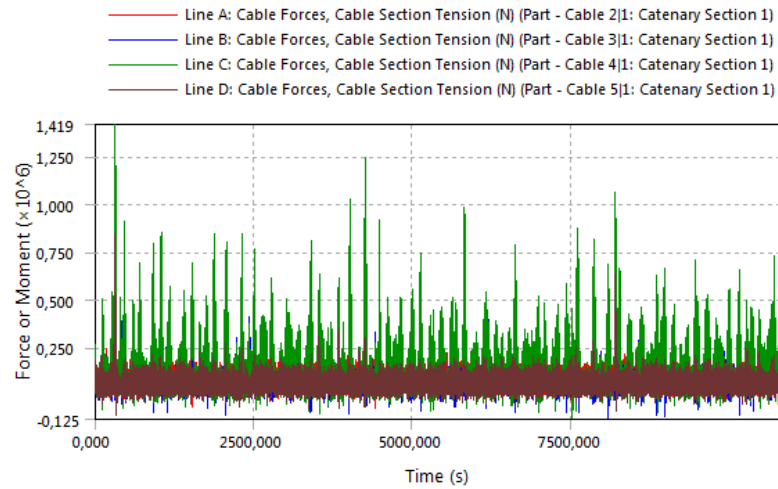
## HASIL *TENSION* HAWSER DAN RANTAI JANGKAR

Keterangan:

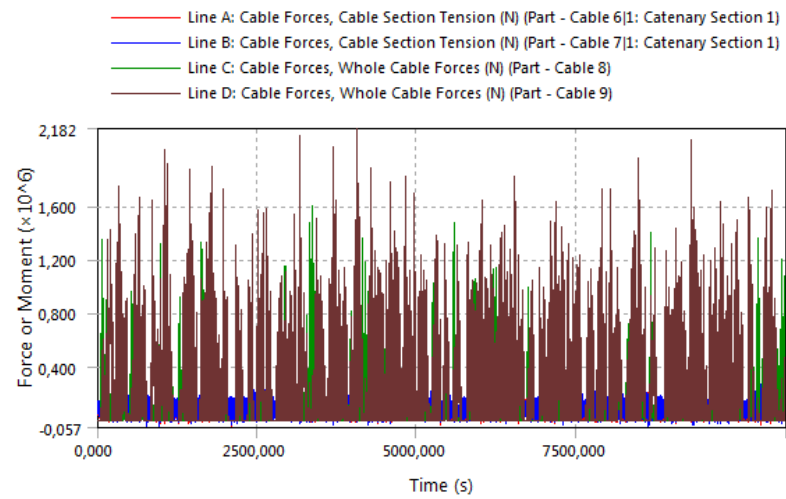
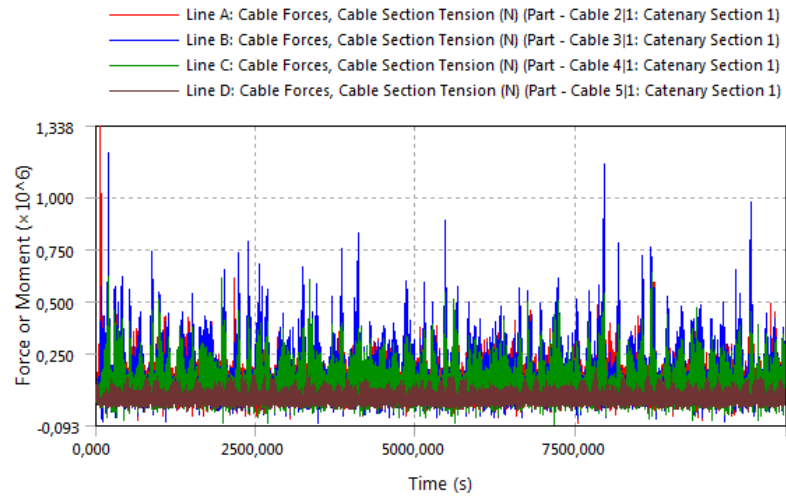
- Cable 2 : Rantai jangkar 1
- Cable 3 : Rantai jangkar 2
- Cable 4 : Rantai jangkar 3
- Cable 5 : Rantai jangkar 4
- Cable 6 : Rantai jangkar 5
- Cable 7 : Rantai jangkar 6
- Cable 8 : Hawser 1
- Cable 9 : Hawser 2

### Kondisi FSO *Ligth Load*

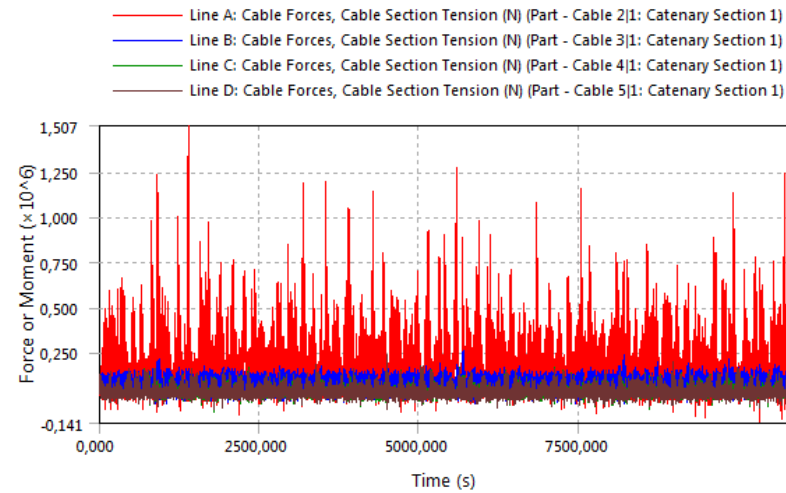
*Heading 45°*

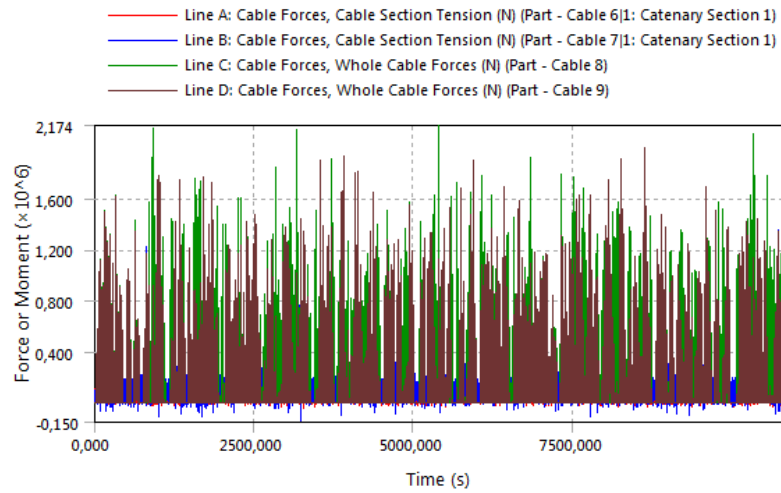


## Heading 90°



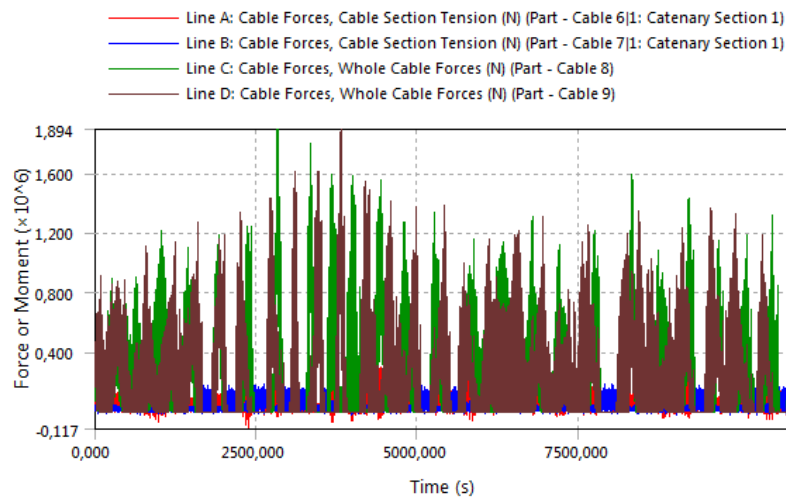
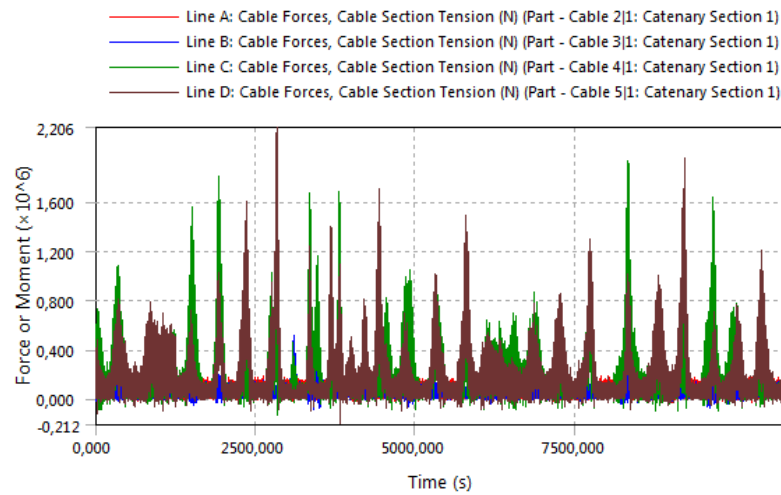
## Heading 180°



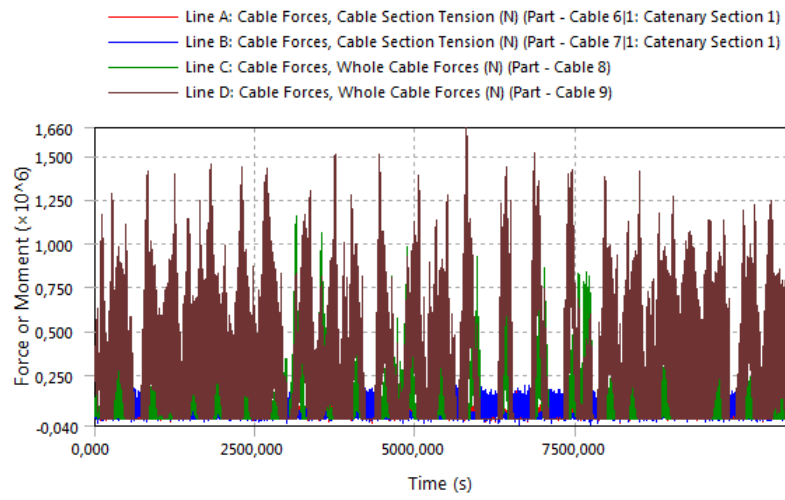
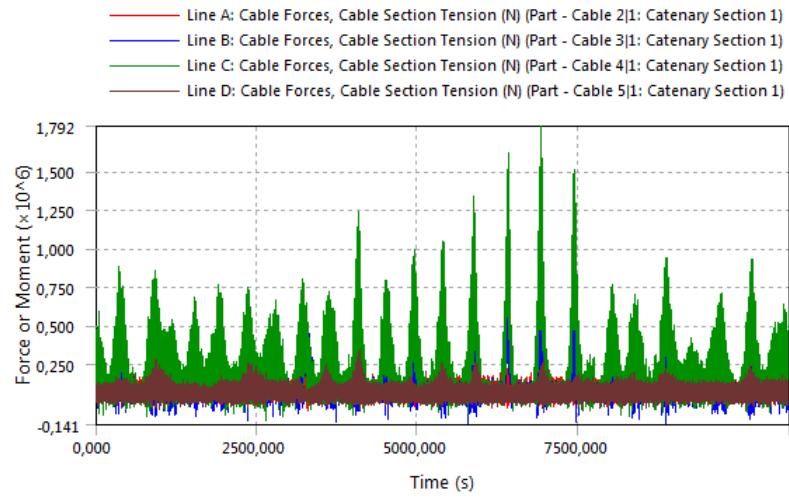


**Kondisi FSO Full Load**

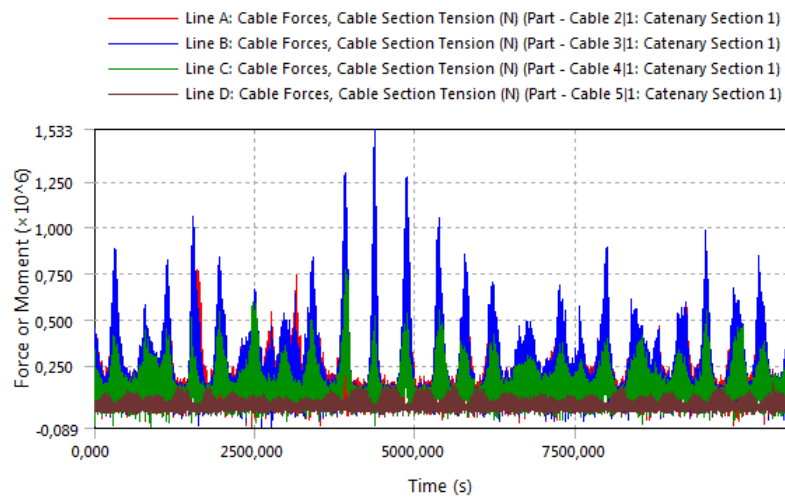
***Heading 0°***

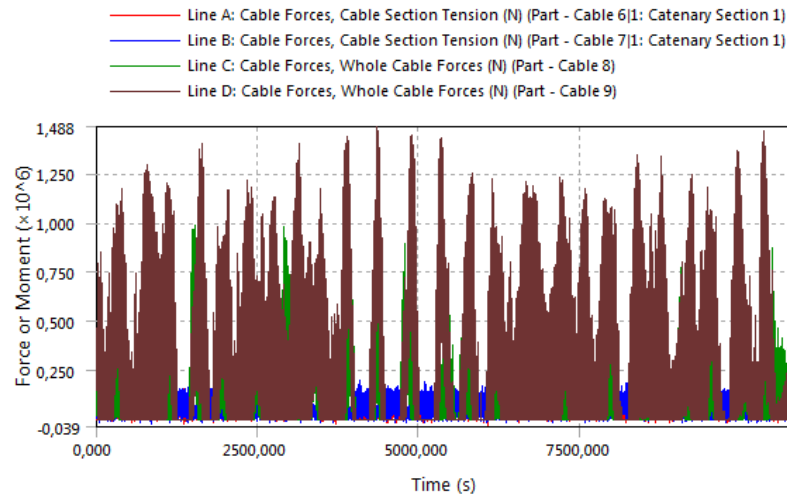


## Heading 45°

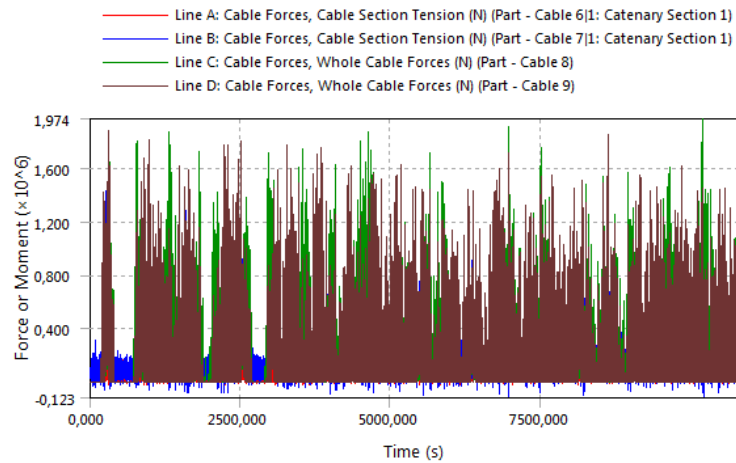
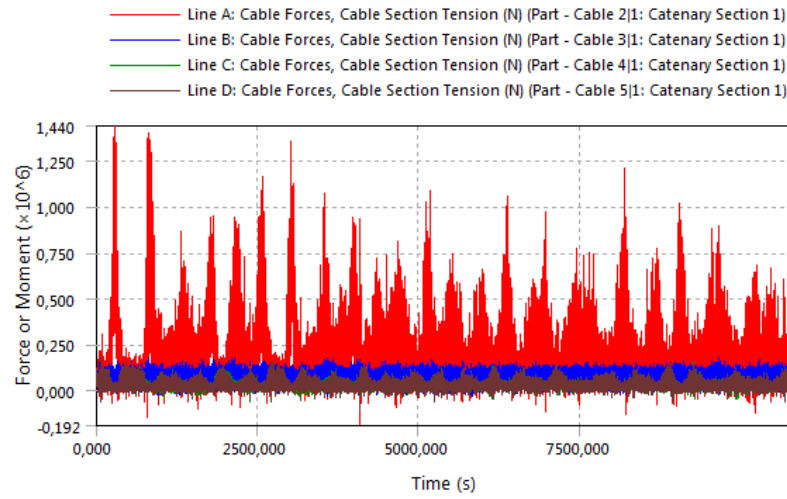


## Heading 90°





### Heading 180°

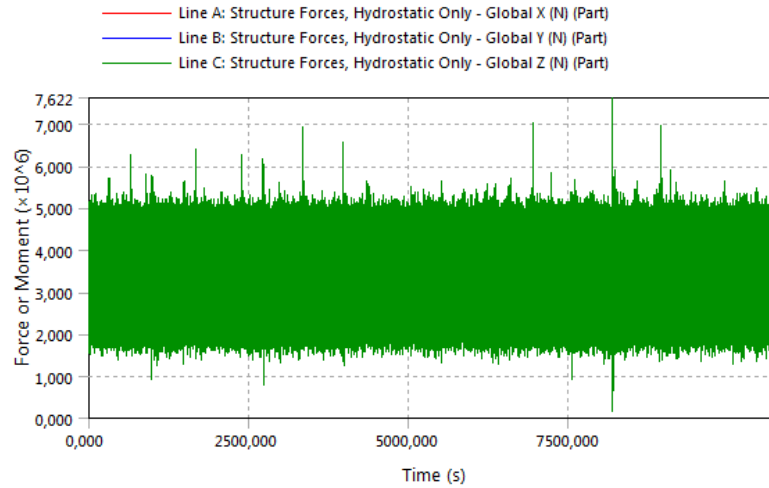


# HASIL GAYA HIDROSTATIK DAN PERCEPATAN STRUKTUR

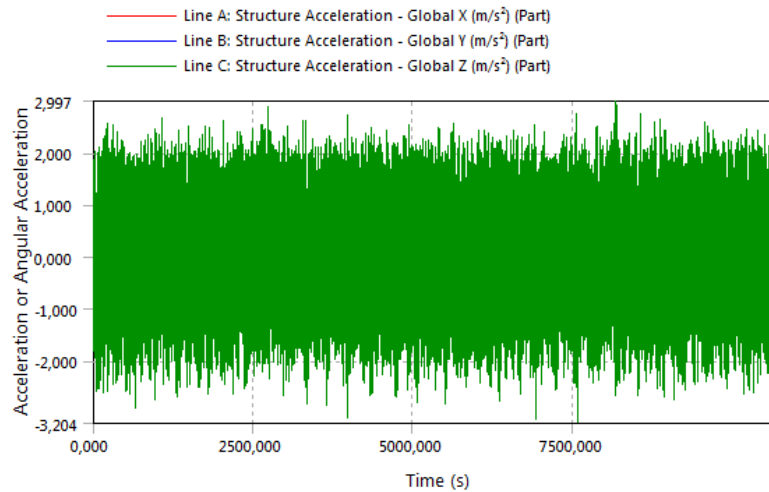
## Kondisi FSO *Ligth Load*

### *Heading 45°*

- Gaya Hidostatik

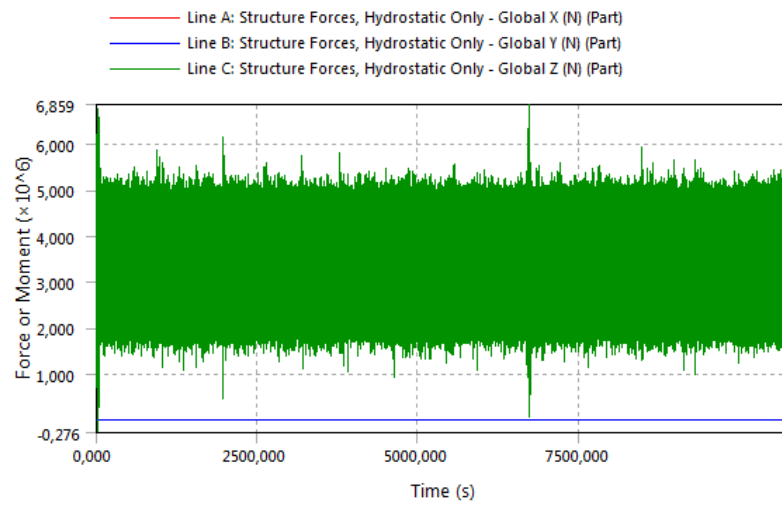


- Percepatan Struktur

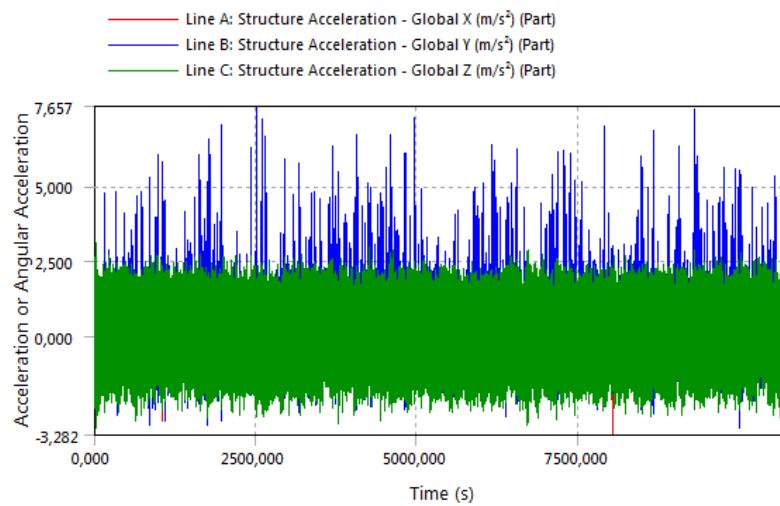


## Heading 90°

- Gaya Hidostatik

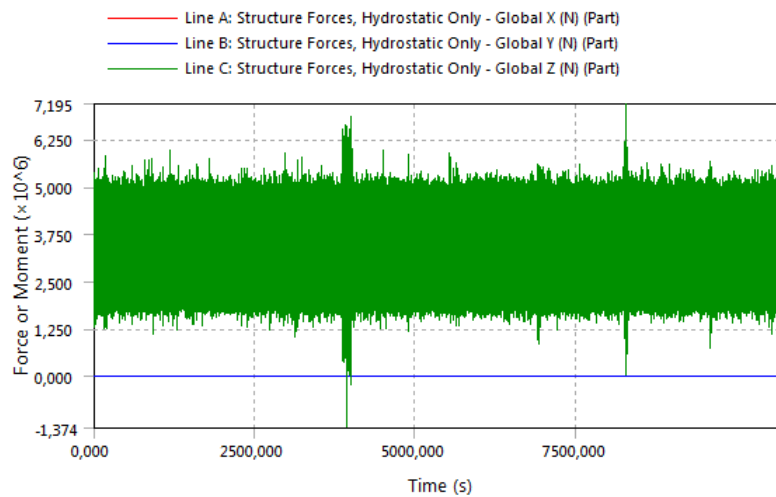


- Percepatan Struktur



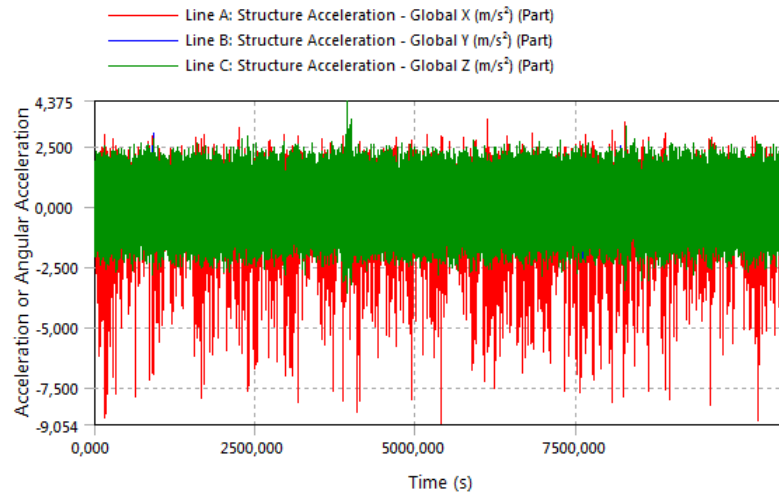
## Heading 180°

- Gaya Hidostatik





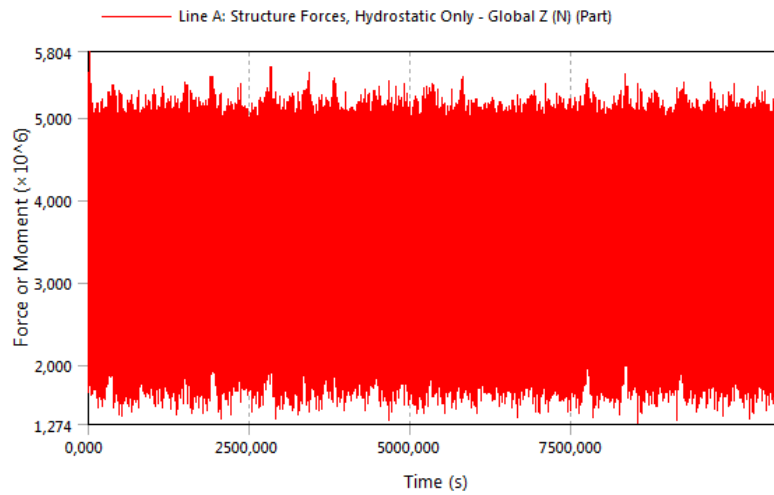
- Percepatan Struktur



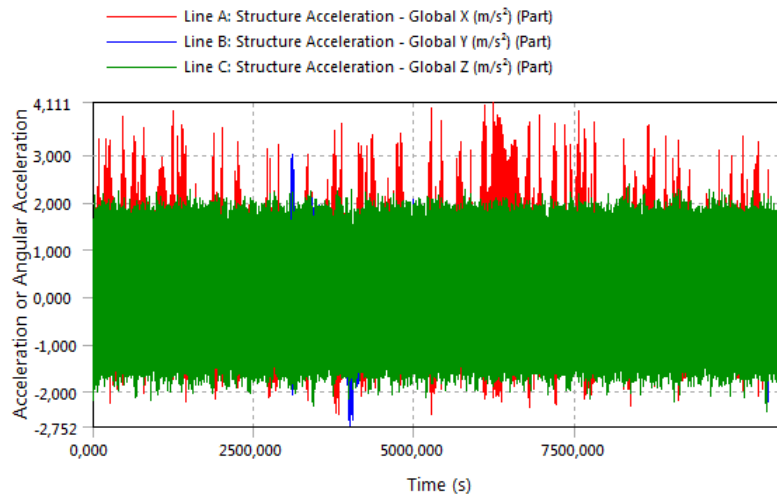
**Kondisi FSO Full Load**

*Heading 0°*

- Gaya Hidostatik

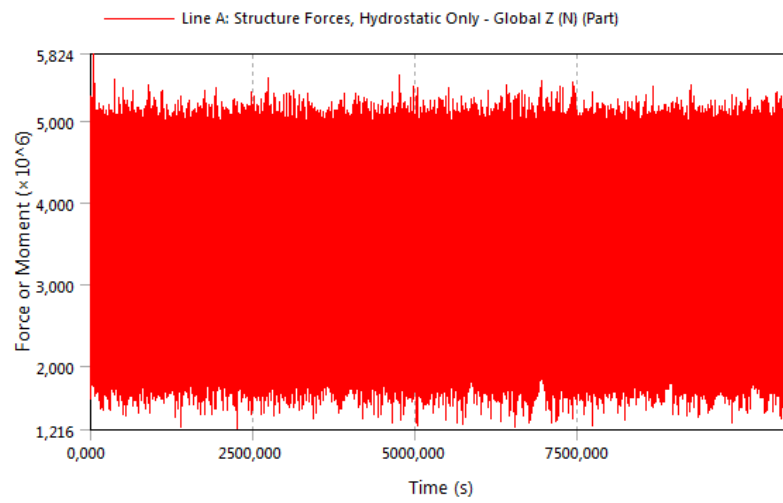


- Percepatan Struktur

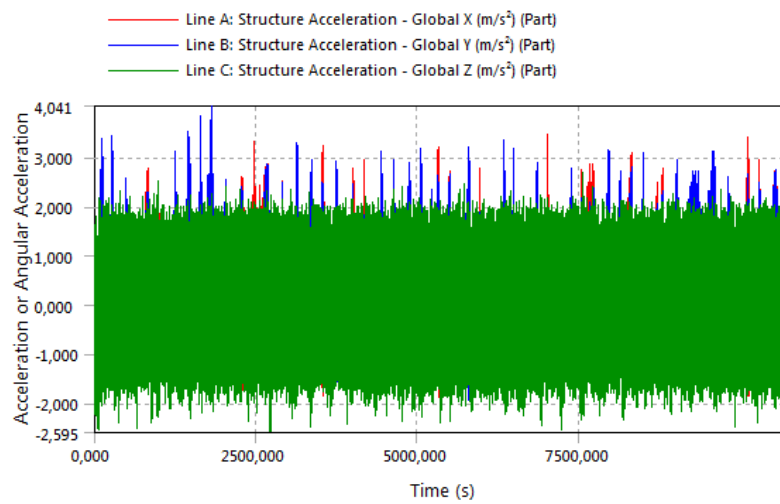


## Heading 45°

- Gaya Hidostatik

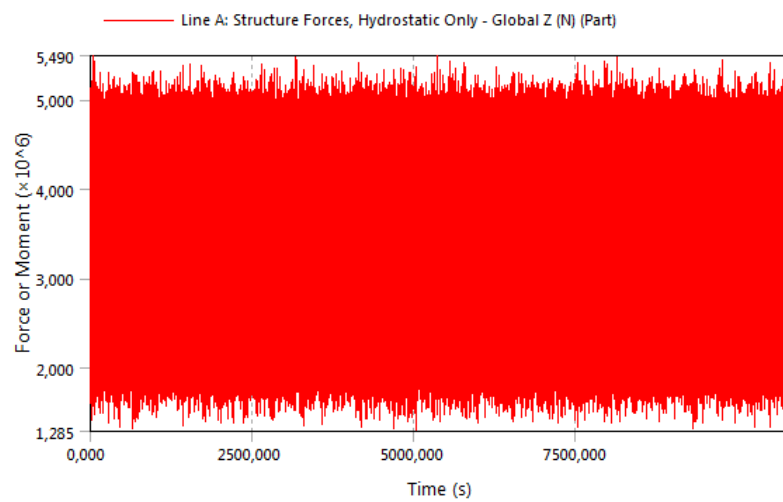


- Percepatan Struktur

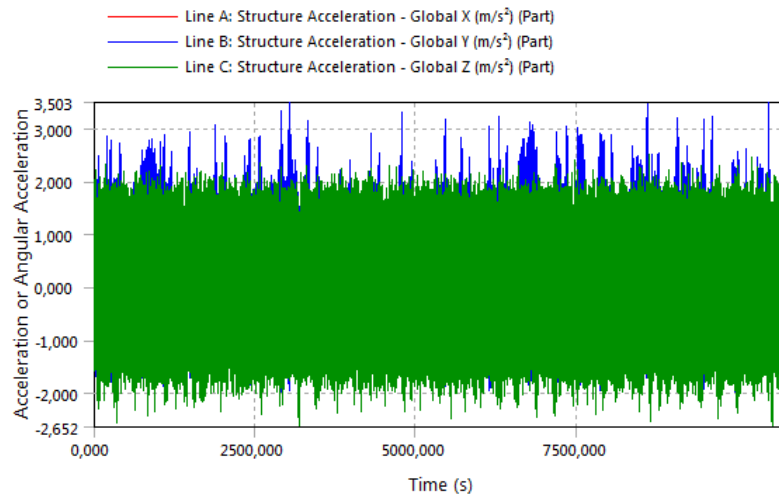


## Heading 90°

- Gaya Hidostatik

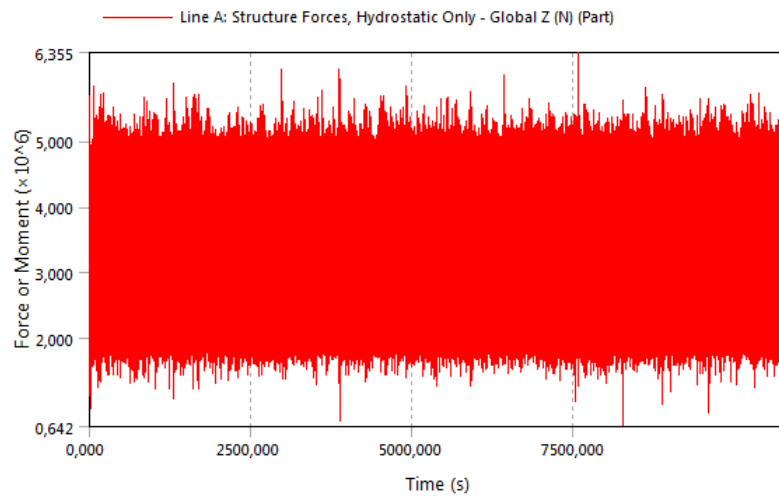


- Percepatan Struktur

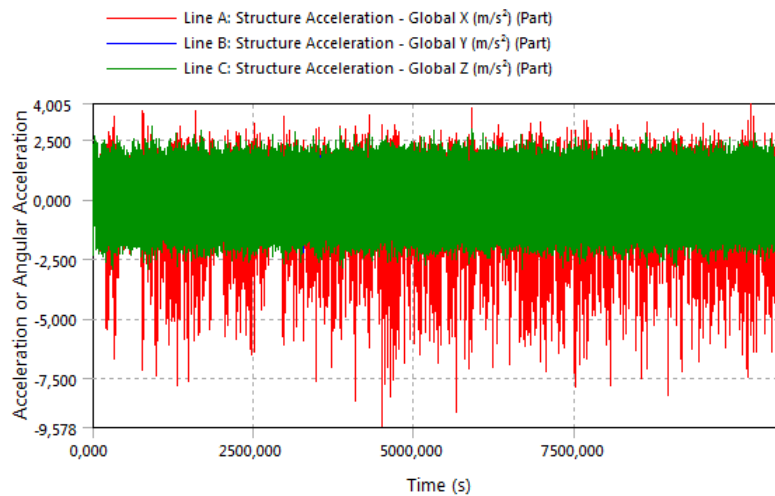


**Heading 180°**

- Gaya Hidostatik



- Percepatan Struktur



**LAMPIRAN D**

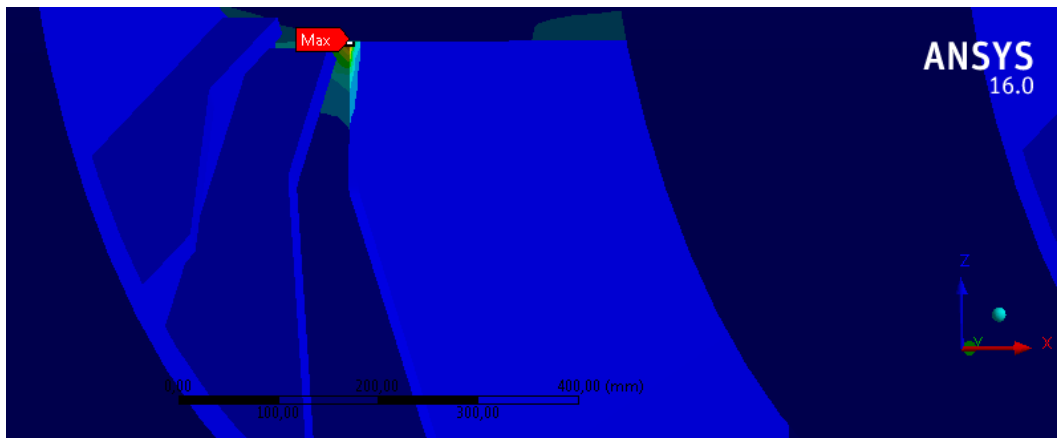
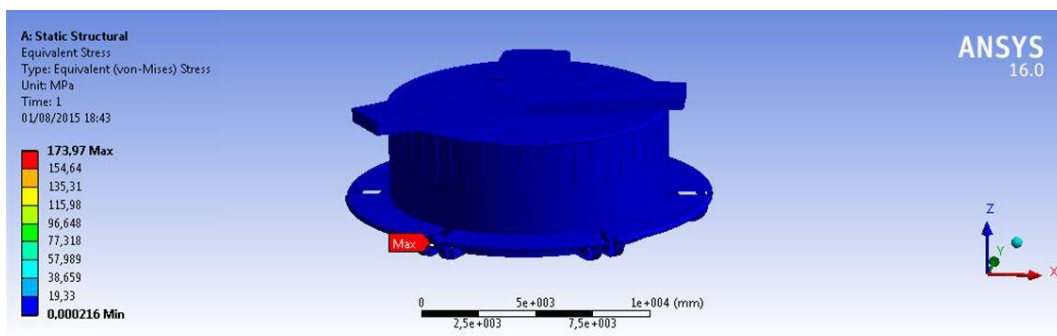
**HASIL ANALISIS TEGANGAN GLOBAL  
STRUKTUR BUOY SPM FSO Arco Ardjuna**

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

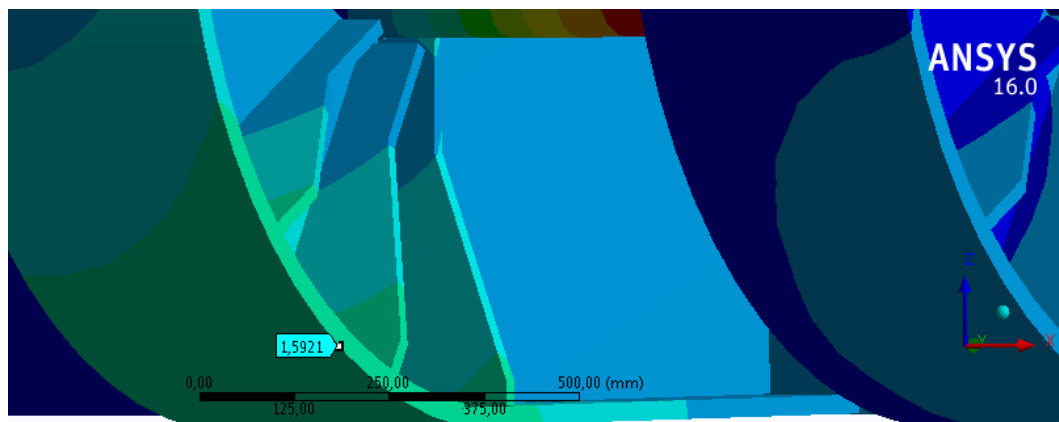
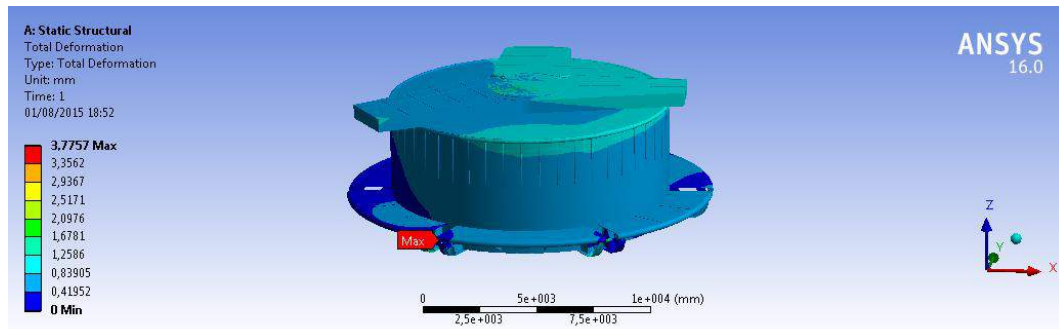
## HASIL ANALISIS TEGANGAN GLOBAL STRUKTUR BUOY SPM pada FSO Arco Ardjuna

Heading (deg)	Tegangan (Mpa)	Tegangan Ijin (Mpa)	Deformasi (mm)	Batas Ijin (mm)	Keterangan
0	178,61	225	2,49	8	Memenuhi
45	168,85	225	1,43	8	Memenuhi
90	163,78	225	1,49	8	Memenuhi
180	173,92	225	1,59	8	Memenuhi

### Tegangan maksimum pada konstruksi SPM heading 180°



## Deformasi maksimum pada konstruksi SPM *heading* 180°



## BIODATA PENULIS



Defi Rizki Mauliani dilahirkan di Surabaya pada 2 Oktober 1992. Pendidikan di SDN Margorejo V/407 Surabaya, SMPN 13 Surabaya dan SMAN 16 Surabaya. Setelah itu penulis mengikuti Seleksi Penerimaan Mahasiswa Baru melalui jalur SNMPTN Undangan dan diterima di Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Selama kuliah, penulis sempat aktif menjadi staff Departemen Sosial Masyarakat HIMATEKLA 12/13. Penulis juga aktif menjadi panitia kegiatan kampus. Penulis juga pernah bekerja praktek di PT. Depriwangga Engineering dan magang di PT. Citra Mas Surabaya. Bidang yang dipilih oleh penulis adalah hidrodinamika lepas pantai sehingga Tugas Akhir yang diambil berhubungan dengan kriteria Olah Gerak Bangunan Apung.