



**PROPOSAL TUGAS AKHIR - MO 141326**

**ANALISIS TEGANGAN LOKAL MAKSIMUM KONSTRUKSI  
PANAMA *CHOCK* PADA SISTEM *TANDEM OFFLOADING*  
FSO ARCO ARDJUNA**

**Novia Noor Azkia**  
NRP. 4312 100 089

**DOSEN PEMBIMBING :**  
Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D.  
Ir. Mas Murtedjo M.Eng

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



**FINAL PROJECT - MO 141326**

**MAXIMUM LOCAL STRESS ANALYSIS ON PANAMA  
CHOCK CONSTRUCTION WITH TANDEM OFFLOADING  
SYSTEM IN FSO ARCO ARDJUNA**

**Novia Noor Azkia**  
NRP. 4312 100 089

**SUPERVISORS :**

Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D.

Ir. Mas Murtedjo M.Eng

**DEPARTMENT OF OCEAN ENGINEERING**  
Faculty of Marine Technology  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya  
2016

**ANALISIS TEGANGAN LOKAL MAKSIMUM KONSTRUKSI PANAMA  
CHOCK PADA SISTEM TANDEM OFFLOADING 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:

**NOVIA NOOR AZKIA**

**NRP. 4312100089**

Disetujui oleh:

1. Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D. (Pembimbing 1)

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

3. Ir. Wisnu Wardhana, S.E., M.Sc., Ph.D. (Penguji 1)

4. Ir. Joswan J. Soedjono, M.Sc. (Penguji 2)

SURABAYA, JULI 2016

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## ANALISIS TEGANGAN LOKAL MAKSIMUM KONSTRUKSI PANAMA CHOCK PADA SISTEM TANDEM OFFLOADING FSO ARCO ARDJUNA

Nama Mahasiswa : Novia Noor Azkia  
NRP : 4312100089  
Jurusan : Teknik Kelautan – FTK ITS  
Dosen Pembimbing : Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D.  
Ir. Mas Murtedjo, M.Eng.

### ABSTRAK

*Floating Storage and Offloading* (FSO) Arco Ardjuna beroperasi di *field* Ardjuna perairan Laut Jawa. FSO ini dilengkapi dengan sistem tambat (*mooring system*) jenis *Single Point Mooring* (SPM 3). Selain sebagai sistem tambat, SPM 3 juga berfungsi untuk sistem *offloading* dan direncanakan untuk dilakukan reparasi dikarenakan faktor umur. Agar *lifting capacity* tetap berjalan, dilakukan penambahan sistem *tandem offloading* pada FSO Arco Ardjuna. Untuk menunjang sistem ini, dibutuhkan konstruksi panama *chock* yang diletakkan pada bagian *stern* FSO. Konstruksi tersebut merupakan tumpuan dan jalur lewat *hawser 3* yang menghubungkan FSO Arco Ardjuna dengan *shuttle tanker*. Konstruksi panama *chock* diharapkan mampu menahan *shuttle tanker* dan beban lingkungan sehingga perlu dilakukan analisis kekuatan. *Tension hawser 3* digunakan sebagai pembebanan analisis kekuatan pada konstruksi panama *chock*. *Tension* ini dapat diketahui dari gerakan yang terjadi pada FSO, *shuttle tanker* dan SPM. Berdasarkan simulasi yang dilakukan, didapatkan *tension* maksimum pada *hawser 3* sebesar 2156,817 kN dengan *safety factor* 1,898. Nilai ini lebih besar dari yang disyaratkan oleh *American Bureau of Shipping* (ABS) yaitu 1,82. Pembebanan konstruksi panama *chock* menggunakan dua metode yaitu metode variasi sudut dan metode posisi relatif *hawser* atau *shuttle tanker* terhadap FSO. Didapatkan tegangan maksimum dan deformasi untuk metode variasi sudut sebesar 224,43 MPa dan 0,7633 mm. Sedangkan untuk metode dengan posisi relatif *hawser* atau *shuttle tanker* terhadap FSO sebesar 223,4 MPa dan 3,3129 mm. Dari hasil tersebut dapat diketahui bahwa konstruksi panama *chock* aman untuk beroperasi karena tegangan dan deformasi yang terjadi tidak lebih dari batas yang ditentukan oleh ABS yaitu 225 MPa dan 6 mm.

**Kata Kunci:** *FSO, hawser, panama chock, tandem offloading system, tension, von-Mises stress*

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

# MAXIMUM LOCAL STRESS ANALYSIS ON PANAMA CHOCK CONSTRUCTION WITH TANDEM OFFLOADING SYSTEM IN FSO

## ARCO ARDJUNA

**Name** : Novia Noor Azkia  
**NRP** : 4312100089  
**Department** : Teknik Kelautan – FTK ITS  
**Supervisors** : Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D.  
Ir. Mas Murtedjo, M.Eng

### ABSTRACT

Floating Storage and Offloading (FSO) Arco Ardjuna located at Ardjuna field in Java Sea. FSO was equipped with single point mooring (SPM 3) system. Its function is to offload the system and it has been designed to have a repair session for its durability. To keep its lifting capacity in its expected level still on going, so an adjustment to increase the capability of the tandem offloading system in FSO Arco Ardjuna which required panama chock construction to support its system that located on FSO's stern. Panama chock construction was used as its toehold and hawser 3's line track that connects FSO Arco Ardjuna with shuttle tanker. Panama chock construction is expected to hold for itself and its environmental load, so that a maximum local stress analysis becomes a must. Tension hawser 3 loads that used as its loading force measurement analysis on panama chock construction. Tension can be identified from any movement on FSO, shuttle tanker and SPM. Based on that simulation, we could obtain maximum tension on hawser 3 in level 2156.817 kN with safety factor 1.898 where its score is higher than ABS's prerequisite in 1.82. So based on loading case on panama chock construction model with using dual loading method which occupied on stance variation method and hawser or shuttle tanker relativity position method towards FSO. We could have that maximum tension and deformation that occurred on panama chock construction from stance variation method is 224.43 MPa with 0.7633 mm and hawser or shuttle tanker relativity position method towards FSO is 223.4 MPa with 3.3129 mm. From these results we could conclude that panama chock construction is safe to operate because its stress and deformation that could occurred is less than threshold that ABS's prerequisite which is in 225 MPa with 6 mm.

**Keywords:** *FSO, hawser, panama chock, tandem offloading system, tension, von-Mises stress*

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



## 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>xix</b>    |
| <b>DAFTAR TABEL</b> .....  | <b>xxxiii</b> |
| <b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....   | <b>xxxvii</b> |
| <b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....   | <b>1</b>      |
| 1.1 Latar Belakang Masalah.....  | 1             |
| 1.2 Perumusan Masalah.....   | 5             |
| 1.3 Tujuan.....  | 5             |
| 1.4 Manfaat.....   | 5             |
| 1.5 Batasan Masalah.....   | 6             |
| 1.6 Sistematika Penulisan.....   | 7             |
| <b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI</b> .....   | <b>9</b>      |
| 2.1 Tinjauan Pustaka.....  | 9             |
| 2.2 Dasar Teori.....   | 11            |
| 2.2.1 Teori Bangunan Kapal.....  | 11            |
| 2.2.1.1 Ukuran Utama Kapal.....  | 11            |
| 2.2.1.2 Stabilitas Kapal.....  | 13            |
| 2.2.1.3 Komponen Hidrostatik Kapal dalam Analisis <i>Response Amplitude Operator (RAO)</i> ..... | 16            |
| 2.2.2 <i>Floating Storage and Offloading System (FSO)</i> .....                                  | 18            |
| 2.2.3 Sistem Tambat.....   | 20            |
| 2.2.3.1 <i>Single Point Mooring (SPM)</i> .....  | 20            |
| 2.2.4 Sistem <i>Tandem Offloading</i> .....  | 26            |
| 2.2.5 Teori <i>Mooring Line</i> .....  | 27            |

|   |   |           |
|---|---|-----------|
| 2.2.6                                     | Analisis Dinamis.....   | 28        |
| 2.2.7                                     | <i>Heading</i> (Arah) Kapal terhadap Arah Gelombang.....            | 30        |
| 2.2.8                                     | Teori Gerak Kapal.....  | 31        |
| 2.2.9                                     | Gerakan <i>Surge</i> Murni ( <i>Uncouple Surging Motion</i> ).....  | 32        |
| 2.2.10                                    | Gerakan <i>Sway</i> Murni ( <i>Uncouple Swaying Motion</i> ).....   | 34        |
| 2.2.11                                    | Gerakan <i>Heave</i> Murni ( <i>Uncouple Heaving Motion</i> ).....  | 36        |
| 2.2.12                                    | Gerakan <i>Roll</i> Murni ( <i>Uncouple Rolling Motion</i> ).....   | 39        |
| 2.2.13                                    | Gerakan <i>Pitch</i> Murni ( <i>Uncouple Pitching Motion</i> )..... | 42        |
| 2.2.14                                    | Gerakan <i>Yaw</i> Murni ( <i>Uncouple Surging Motion</i> ).....    | 45        |
| 2.2.15                                    | Gerakan <i>Couple Six Degree of Freedom</i> .....                   | 47        |
| 2.2.16                                    | Perilaku Bangunan Apung pada Gelombang Reguler.....                 | 48        |
| 2.2.16.1                                  | Teori Gelombang Reguler.....  | 48        |
| 2.2.16.2                                  | <i>Response Amplitude Operator</i> (RAO).....                       | 48        |
| 2.2.16.3                                  | Beban Gelombang <i>Second Order</i> .....                           | 51        |
| 2.2.17                                    | Perilaku Bangunan Apung pada Gelombang Acak.....                    | 51        |
| 2.2.17.1                                  | Spektrum Gelombang.....   | 51        |
| 2.2.17.2                                  | Spektrum Respon Struktur Bangunan Apung.....                        | 53        |
| 2.2.18                                    | Konsep Pembebanan.....  | 54        |
| 2.2.18.1                                  | Beban Angin.....  | 55        |
| 2.2.18.2                                  | Beban Arus.....   | 57        |
| 2.2.18.3                                  | Beban Gelombang.....  | 58        |
| 2.2.18.4                                  | <i>Wave Drift Forces</i> .....                                      | 59        |
| 2.2.19                                    | Penentuan <i>Mooring Line</i> .....                                 | 60        |
| 2.2.20                                    | <i>Excursion</i> .....  | 62        |
| 2.2.21                                    | <i>Tension</i> pada <i>Hawser</i> .....                             | 63        |
| 2.2.22                                    | Tegangan Aksial.....  | 64        |
| 2.2.23                                    | <i>Bending Stress</i> .....   | 65        |
| 2.2.24                                    | Tegangan Geser.....   | 66        |
| 2.2.25                                    | Tegangan Von Misses.....  | 66        |
| <b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....</b> |   | <b>69</b> |
| 3.1                                       | Metode Penelitian.....  | 69        |
| 3.2                                       | Prosedur Penelitian.....  | 70        |

|  |           |
|--|-----------|
| 3.3 Pengumpulan Data.....  | 73        |
| 3.3.1 Data Lingkungan.....   | 73        |
| 3.3.2 Data FSO Arco Ardjuna.....   | 74        |
| 3.3.3 Data SPM.....  | 75        |
| 3.3.4 Data <i>Shuttle Tanker</i> .....   | 77        |
| 3.3.5 Data <i>Offloading System</i> .....  | 78        |
| 3.3.6 Data Konstruksi Panama <i>Chock</i> .....  | 78        |
| <b>BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN.....</b>   | <b>83</b> |
| 4.1 Pemodelan Struktur.....  | 83        |
| 4.1.1 <i>Floating Storage and Offloading (FSO)</i> .....   | 83        |
| 4.1.2 <i>Single Point Mooring (SPM)</i> .....  | 87        |
| 4.1.3 <i>Shuttle Tanker</i> .....  | 90        |
| 4.2. Validasi Pemodelan.....   | 94        |
| 4.2.1 <i>Floating Storage and Offloading (FSO)</i> .....   | 94        |
| 4.2.2 <i>Single Point Mooring (SPM)</i> .....  | 96        |
| 4.2.3 <i>Shuttle Tanker</i> .....  | 96        |
| 4.3 <i>Lines Plan</i> .....  | 98        |
| 4.3.1 <i>Floating Storage and Offloading (FSO)</i> .....   | 98        |
| 4.3.2 <i>Shuttle Tanker</i> .....  | 99        |
| 4.4 Konfigurasi Arah Pembebanan.....   | 100       |
| 4.5 Konfigurasi <i>Anchor Legs</i> dan <i>Hawser</i> .....   | 101       |
| 4.6 Analisis Respon Gerak Struktur.....  | 102       |
| 4.6.1 <i>Floating Storage and Offloading (FSO)</i> .....   | 102       |
| 4.6.2 <i>Single Point Mooring (SPM)</i> .....  | 104       |
| 4.6.3 <i>Shuttle Tanker</i> .....  | 105       |
| 4.6.4 <i>Response Amplitude Operator (RAO)</i> .....   | 106       |
| 4.6.4.1 <i>Response Amplitude Operator (RAO) Tertambat pada</i><br>FSO Kondisi <i>Full Load</i> .....  | 107       |
| 4.6.4.2 <i>Response Amplitude Operator (RAO) Tertambat</i><br>pada FSO Kondisi <i>Light Load</i> ..... | 112       |

|  |     |
|--|-----|
| 4.6.4.3 <i>Response Amplitude Operator (RAO) Tertambat pada SPM saat Sistem Tandem Offloading SPM – FSO Full Load – Shuttle Tanker Light Load</i> .....            | 117 |
| 4.6.4.4 <i>Response Amplitude Operator (RAO) Tertambat pada SPM saat Sistem Tandem Offloading SPM – FSO Light Load – Shuttle Tanker Full Load</i> .....            | 122 |
| 4.6.4.5 <i>Response Amplitude Operator (RAO) Tertambat pada Shuttle Tanker Kondisi Full Load</i> .....   | 127 |
| 4.6.4.6 <i>Response Amplitude Operator (RAO) Tertambat pada Shuttle Tanker Kondisi Light Load</i> .....  | 132 |
| 4.7 Analisis Spektrum Gelombang.....   | 137 |
| 4.8 Analisis Spektrum Respon Struktur.....   | 138 |
| 4.8.1 Analisis Spektrum Respon FSO ( <i>Full Load</i> ) Kondisi Tertambat.....   | 138 |
| 4.8.2 Analisis Spektrum Respon FSO ( <i>Light Load</i> ) Kondisi Tertambat.....  | 143 |
| 4.8.3 Analisis Spektrum Respon SPM Kondisi Tertambat saat Sistem <i>Tandem Offloading SPM – FSO Full Load – Shuttle Tanker Light Load</i> .....                    | 148 |
| 4.8.4 Analisis Spektrum Respon SPM Kondisi Tertambat saat Sistem <i>Tandem Offloading SPM – FSO Light Load – Shuttle Tanker Full Load</i> .....                    | 154 |
| 4.8.5 Analisis Spektrum Respon <i>Shuttle Tanker (Full Load)</i> Kondisi Tertambat.....  | 159 |
| 4.8.6 Analisis Spektrum Respon <i>Shuttle Tanker (Light Load)</i> Kondisi Tertambat.....   | 164 |
| 4.9 Analisis <i>Tension</i> pada <i>Anchor Legs</i> dan <i>Hawser</i> .....  | 169 |
| 4.9.1 Analisis <i>Tension</i> pada <i>Anchor Legs</i> dan <i>Hawser</i> saat Sistem <i>Tandem Offloading SPM – FSO Full Load – Shuttle Tanker Light Load</i> ..... | 170 |

|   |            |
|---|------------|
| 4.9.2 Analisis <i>Tension</i> pada <i>Anchor Legs</i> dan <i>Hawser</i> saat Sistem<br><i>Tandem Offloading SPM – FSO Light Load – Shuttle Tanker Full<br/>Load</i> ..... | 172        |
| 4.10 Pemodelan Konstruksi Panama. <i>Chock</i> .....  | 173        |
| 4.11 Pembebanan pada Analisis Lokal.....  | 177        |
| 4.11.1 Variasi Sudut.....   | 179        |
| 4.11.2 Posisi Relatif <i>Hawser</i> atau <i>Shuttle Tanker</i> terhadap FSO.....  | 184        |
| 4.12 <i>Meshing dan Sensitivity Analysis</i> .....  | 192        |
| 4.13 Analisis Tegangan Lokal Konstruksi Panama <i>Chock</i> .....   | 196        |
| <b>BAB V PENUTUP</b> .....  | <b>203</b> |
| 5.1 Kesimpulan.....   | 203        |
| 5.2 Saran.....  | 205        |
| <b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....   | <b>207</b> |
| <b>LAMPIRAN</b>   |            |
| <b>BIODATA PENULIS</b>  |            |

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR TABEL

|   |     |
|---|-----|
| <b>Tabel 2.1</b> Amplitudo dan Tinggi Gelombang pada Spektrum.....  | 51  |
| <b>Tabel 2.2</b> Kriteria <i>Tension Limit</i> dan Faktor Keamanan <i>Mooring</i> .....                     | 64  |
| <b>Tabel 3.1</b> Data Lingkungan Perairan Laut Jawa.....  | 73  |
| <b>Tabel 3.2</b> <i>Principle Dimension</i> FSO Arco Ardjuna.....   | 74  |
| <b>Tabel 3.3</b> <i>Principle Dimension CALM buoy</i> .....   | 75  |
| <b>Tabel 3.4</b> Karakteristik <i>Mooring Hawser</i> .....  | 75  |
| <b>Tabel 3.5</b> Karakteristik <i>Anchor Legs</i> .....   | 76  |
| <b>Tabel 3.6</b> <i>Principle Dimension Shuttle Tanker 85000 DWT</i> .....                                  | 77  |
| <b>Tabel 4.1</b> <i>Principle Dimension</i> FSO Arco Ardjuna.....   | 83  |
| <b>Tabel 4.2</b> <i>Principle Dimension</i> SPM 3.....  | 88  |
| <b>Tabel 4.3</b> <i>Principle Dimension Shuttle Tanker 85000 DWT</i> .....                                  | 90  |
| <b>Tabel 4.4</b> Validasi Data Hidrostatik FSO Arco Ardjuna Kondisi <i>Full Load</i> .....                  | 94  |
| <b>Tabel 4.5</b> Data Hidrostatik FSO Arco Ardjuna Kondisi <i>Light Load</i> .....                          | 95  |
| <b>Tabel 4.6</b> Validasi Data Hidrostatik FSO Arco Ardjuna Kondisi <i>Light Load</i> .....                 | 95  |
| <b>Tabel 4.7</b> Validasi Data Hidrostatik <i>Single Point Mooring</i> .....                                | 96  |
| <b>Tabel 4.8</b> Validasi Data Hidrostatik <i>Shuttle Tanker 85000 DWT</i> Kondisi <i>Full Load</i> .....   | 97  |
| <b>Tabel 4.9</b> Data Hidrostatik <i>Shuttle Tanker 85000 DWT</i> Kondisi <i>Light Load</i> .....           | 97  |
| <b>Tabel 4.10</b> Validasi Data Hidrostatik <i>Shuttle Tanker 85000 DWT</i> Kondisi <i>Light Load</i> ..... | 98  |
| <b>Tabel 4.11</b> Data Lingkungan Perairan Laut Jawa.....   | 103 |
| <b>Tabel 4.12</b> Data Titik Berat, Titik Apung dan Jari-jari Girasi FSO Arco Ardjuna.....                  | 103 |
| <b>Tabel 4.13</b> Data Titik Berat, Titik Apung dan Jari-jari Girasi <i>Single Point Mooring</i> .....      | 104 |
| <b>Tabel 4.14</b> Data Titik Berat, Titik Apung dan Jari-jari Girasi <i>Shuttle Tanker</i> .....            | 105 |
| <b>Tabel 4.15</b> Nilai RAO Tertinggi pada FSO Arco Ardjuna Kondisi <i>Full Load</i> saat Tertambat.....    | 112 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Tabel 4.16</b> Nilai RAO Tertinggi pada FSO Arco Ardjuna Kondisi <i>Light Load</i> saat Tertambat.....   | 117 |
| <b>Tabel 4.17</b> Nilai RAO Tertinggi pada SPM Kondisi Tertambat saat Sistem <i>Tandem Offloading SPM – FSO Full Load – Shuttle Tanker Light Load</i> .....   | 122 |
| <b>Tabel 4.18</b> Nilai RAO Tertinggi pada SPM Kondisi Tertambat saat Sistem <i>Tandem Offloading SPM – FSO Light Load – Shuttle Tanker Full Load</i> .....   | 127 |
| <b>Tabel 4.19</b> Nilai RAO Tertinggi pada <i>Shuttle Tanker 85000 DWT</i> Kondisi <i>Full Load</i> saat Tertambat.....   | 132 |
| <b>Tabel 4.20</b> Nilai RAO Tertinggi pada <i>Shuttle Tanker 85000 DWT</i> Kondisi <i>Light Load</i> saat Tertambat.....  | 137 |
| <b>Tabel 4.21</b> Nilai Respon Struktur Tertinggi pada FSO Arco Ardjuna Kondisi <i>Full Load</i> saat Tertambat.....  | 143 |
| <b>Tabel 4.22</b> Nilai Respon Struktur Tertinggi pada FSO Arco Ardjuna Kondisi <i>Light Load</i> saat Tertambat.....   | 148 |
| <b>Tabel 4.23</b> Nilai Respon Struktur Tertinggi pada SPM Kondisi Tertambat saat Sistem <i>Tandem Offloading SPM – FSO Full Load – Shuttle Tanker Light Load</i> .....   | 153 |
| <b>Tabel 4.24</b> Nilai Respon Struktur Tertinggi pada SPM Kondisi Tertambat saat Sistem <i>Tandem Offloading SPM – FSO Light Load – Shuttle Tanker Full Load</i> .....   | 158 |
| <b>Tabel 4.25</b> Nilai Respon Struktur Tertinggi pada <i>Shuttle Tanker 85000 DWT</i> Kondisi <i>Full Load</i> saat Tertambat.....   | 163 |
| <b>Tabel 4.26</b> Nilai Respon Struktur Tertinggi pada <i>Shuttle Tanker 85000 DWT</i> Kondisi <i>Light Load</i> saat Tertambat.....  | 168 |
| <b>Tabel 4.27</b> <i>Tension</i> Maksimum dari Hasil Analisis <i>Tension</i> pada <i>Anchor Legs</i> dan <i>Hawser</i> saat Sistem <i>Tandem Offloading SPM – FSO Full Load – Shuttle Tanker Light Load</i> Berdasarkan Arah Pembebanan dan <i>Safety Factor</i> .....  | 171 |
| <b>Tabel 4.28</b> <i>Tension</i> pada <i>Anchor Legs</i> , <i>Hawser 1</i> dan <i>Hawser 2</i> yang Mengacu pada Waktu dari <i>Tension</i> Maksimum <i>Hawser 3</i> saat Sistem <i>Tandem Offloading SPM – FSO Full Load – Shuttle Tanker Light Load</i> Berdasarkan Arah Pembebanan dan <i>Safety Factor</i> ..... | 171 |



|   |     |
|---|-----|
| <b>Tabel 4.29</b> <i>Tension</i> Maksimum dari Hasil Analisis <i>Tension</i> pada <i>Anchor Legs</i> dan <i>Hawser</i> saat Sistem <i>Tandem Offloading SPM – FSO Light Load – Shuttle Tanker Full Load</i> Berdasarkan Arah Pembebanan dan <i>Safety Factor</i> .....  | 172 |
| <b>Tabel 4.30</b> <i>Tension</i> pada <i>Anchor Legs</i> , <i>Hawser 1</i> dan <i>Hawser 2</i> yang Mengacu pada Waktu dari <i>Tension</i> Maksimum <i>Hawser 3</i> saat Sistem <i>Tandem Offloading SPM – FSO Light Load – Shuttle Tanker Full Load</i> Berdasarkan Arah Pembebanan dan <i>Safety Factor</i> ..... | 173 |
| <b>Tabel 4.31</b> Tabulasi Hasil <i>Maximum Von Mises</i> untuk Analisis Sensitifitas <i>Meshing</i> pada Konstruksi Panama <i>Chock</i> untuk Kondisi Pembebanan dengan Variasi Sudut.....   | 193 |
| <b>Tabel 4.32</b> Tabulasi Hasil <i>Maximum Von Mises</i> untuk Analisis Sensitifitas <i>Meshing</i> pada Konstruksi Panama <i>Chock</i> untuk Kondisi Pembebanan dengan Posisi Relatif <i>Hawser</i> atau <i>Shuttle Tanker</i> terhadap FSO.....  | 195 |
| <b>Tabel 4.33</b> Hasil Analisis Tegangan dan Deformasi Konstruksi Panama <i>Chock</i> pada Kondisi Pembebanan dengan Variasi Sudut.....  | 197 |
| <b>Tabel 4.34</b> Hasil Analisis Tegangan dan Deformasi Konstruksi Panama <i>Chock</i> pada Kondisi Pembebanan dengan Posisi Relatif <i>Hawser</i> atau <i>Shuttle Tanker</i> terhadap FSO.....   | 198 |

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR GAMBAR

|  |    |
|--|----|
| <b>Gambar 1.1</b> (a) Ardjuna Marine Terminal; (b) FSO Arco Ardjuna<br>Tertambat SPM 3.....  | 2  |
| <b>Gambar 1.2</b> (a) Ilustrasi Sistem <i>Tandem Offloading</i> FSO Arco Ardjuna;<br>(b) Letak Konstruksi Panama <i>Chock</i> pada FSO Arco Ardjuna.....         | 4  |
| <b>Gambar 1.3</b> (a) Panama <i>Chock</i> ; (b) <i>Hawser</i> .....  | 4  |
| <b>Gambar 2.1</b> Ukuran Utama Kapal.....  | 13 |
| <b>Gambar 2.2</b> Titik-titik Penting dalam Stabilitas Kapal.....  | 14 |
| <b>Gambar 2.3</b> Jari-jari Girasi <i>Rolling</i> .....  | 17 |
| <b>Gambar 2.4</b> Jari-jari Girasi <i>Pitching</i> .....   | 17 |
| <b>Gambar 2.5</b> Jari-jari Girasi <i>Yawing</i> .....   | 17 |
| <b>Gambar 2.6</b> <i>Floating Storage and Offloading System (FSO)</i> .....  | 20 |
| <b>Gambar 2.7</b> Sistem Tambat Kapal (a) <i>Tower Yoke Mooring System</i> ;<br>(b) <i>Turret Mooring System</i> ; (c) <i>Spread Mooring</i> .....               | 20 |
| <b>Gambar 2.8</b> <i>Fixed Tower</i> .....   | 21 |
| <b>Gambar 2.9</b> <i>Catenary Anchor Leg Mooring (CALM) buoy</i> .....   | 21 |
| <b>Gambar 2.10</b> <i>Single Anchor Leg Mooring (SALM) buoy</i> .....  | 22 |
| <b>Gambar 2.11</b> <i>Articulated Loading Platform (ALP)</i> .....   | 22 |
| <b>Gambar 2.12</b> <i>Single Point and Reservoir (SPAR)</i> .....  | 22 |
| <b>Gambar 2.13</b> <i>Single Anchor Loading (SAL)</i> .....  | 23 |
| <b>Gambar 2.14</b> <i>Turret Mooring</i> .....   | 23 |
| <b>Gambar 2.15</b> Gambaran Sistem CALM pada SPM 3.....  | 25 |
| <b>Gambar 2.16</b> <i>Tandem Offloading System</i> .....   | 26 |
| <b>Gambar 2.17</b> Definisi Arah Datang Gelombang terhadap <i>Heading</i> Kapal<br>(a) <i>Head Seas</i> ; (b) <i>Following Seas</i> ; (c) <i>Beam Seas</i> ..... | 30 |
| <b>Gambar 2.18</b> Gerakan <i>Translasi</i> dan <i>Rotational</i> pada Kapal.....  | 32 |
| <b>Gambar 2.19</b> Ilustrasi Gerakan <i>Surging</i> .....  | 33 |
| <b>Gambar 2.20</b> Ilustrasi Gerakan <i>Swaying</i> .....  | 35 |
| <b>Gambar 2.21</b> Ilustrasi Gerakan <i>Heaving</i> .....  | 37 |
| <b>Gambar 2.22</b> Ilustrasi Kondisi <i>Rolling</i> .....  | 40 |
| <b>Gambar 2.23</b> Ilustrasi Kondisi <i>Pitching</i> .....   | 43 |
| <b>Gambar 2.24</b> Ilustrasi Kondisi <i>Yawing</i> .....   | 45 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Gambar 2.25</b> Bentuk Umum Grafik Respons Gerakan Bangunan Apung.....  | 50 |
| <b>Gambar 2.26</b> Transformasi Spektra Gelombang menjadi Spektra Respons.....   | 54 |
| <b>Gambar 2.27</b> Panjang Minimum <i>Mooring Line</i> .....   | 60 |
| <b>Gambar 2.28</b> Langkah Analisis Tegangan Sebuah Benda.....   | 65 |
| <b>Gambar 2.29</b> Tegangan Lentur ( <i>Bending</i> ) pada Suatu Penampang.....  | 65 |
| <b>Gambar 2.30</b> Gaya yang Bekerja dalam Arah Sejajar terhadap Penampang.....  | 66 |
| <b>Gambar 2.31</b> <i>Von Misses Stress</i> suatu Penampang.....   | 68 |
| <b>Gambar 3.1</b> <i>Flowchart</i> Pengerjaan Tugas Akhir.....   | 69 |
| <b>Gambar 3.2</b> <i>Anchor Legs</i> dan <i>Pattern Definition (Top View)</i> .....  | 77 |
| <b>Gambar 3.3</b> <i>Tandem Arrangement</i> .....  | 78 |
| <b>Gambar 3.4</b> Lokasi Panama <i>Chock</i> pada FSO Arco Ardjuna.....  | 79 |
| <b>Gambar 3.5</b> Detail Lokasi Panama <i>Chock</i> pada FSO Arco Ardjuna.....   | 79 |
| <b>Gambar 3.6</b> Letak Titik Koordinat Panama <i>Chock</i> pada FSO Arco Ardjuna<br>Tampak Samping dan Tampak Atas.....   | 80 |
| <b>Gambar 3.7</b> Detail Panama <i>Chock</i> .....   | 80 |
| <b>Gambar 3.8</b> Detail Kontruksi Panama <i>Chock</i> .....   | 81 |
| <b>Gambar 4.1</b> Hasil Pemodelan FSO Arco Ardjuna Kondisi <i>Full Load</i> pada<br><i>Software</i> Maxsurf Modeler Tampak Isometri.....                           | 84 |
| <b>Gambar 4.2</b> Hasil Pemodelan FSO Arco Ardjuna Kondisi <i>Full Load</i> pada<br><i>Software</i> Maxsurf Modeler Tampak Depan ( <i>Body Plan</i> ).....         | 84 |
| <b>Gambar 4.3</b> Hasil Pemodelan FSO Arco Ardjuna Kondisi <i>Full Load</i> pada<br><i>Software</i> Maxsurf Modeler Tampak Samping ( <i>Sheer Plan</i> ).....      | 84 |
| <b>Gambar 4.4</b> Hasil Pemodelan FSO Arco Ardjuna Kondisi <i>Full Load</i> pada<br><i>Software</i> Maxsurf Modeler Tampak Atas ( <i>Half Breadth Plan</i> ).....  | 85 |
| <b>Gambar 4.5</b> Hasil Pemodelan FSO Arco Ardjuna Kondisi <i>Light Load</i> pada<br><i>Software</i> Maxsurf Modeler Tampak Isometri.....                          | 86 |
| <b>Gambar 4.6</b> Hasil Pemodelan FSO Arco Ardjuna Kondisi <i>Light Load</i><br>pada <i>Software</i> Maxsurf Modeler Tampak Depan ( <i>Body Plan</i> ).....        | 86 |
| <b>Gambar 4.7</b> Hasil Pemodelan FSO Arco Ardjuna Kondisi <i>Light Load</i> pada<br><i>Software</i> Maxsurf Modeler Tampak Samping ( <i>Sheer Plan</i> ).....     | 87 |
| <b>Gambar 4.8</b> Hasil Pemodelan FSO Arco Ardjuna Kondisi <i>Light Load</i> pada<br><i>Software</i> Maxsurf Modeler Tampak Atas ( <i>Half Breadth Plan</i> )..... | 87 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Gambar 4.9</b> Hasil Pemodelan SPM 3 pada <i>Software</i> Maxsurf Modeler<br>Tampak Isometri.....  | 88  |
| <b>Gambar 4.10</b> Hasil Pemodelan SPM 3 pada <i>Software</i> Maxsurf Modeler<br>Tampak Depan ( <i>Body Plan</i> ).....   | 89  |
| <b>Gambar 4.11</b> Hasil Pemodelan SPM 3 pada <i>Software</i> Maxsurf Modeler<br>Tampak Samping ( <i>Sheer Plan</i> ).....  | 89  |
| <b>Gambar 4.12</b> Hasil Pemodelan SPM 3 pada <i>Software</i> Maxsurf Modeler<br>Tampak Atas ( <i>Half Breadth Plan</i> ).....  | 89  |
| <b>Gambar 4.13</b> Hasil Pemodelan <i>Shuttle Tanker</i> 85000 DWT Kondisi<br><i>Full Load</i> pada <i>Software</i> Maxsurf Modeler Tampak Isometri.....                                  | 91  |
| <b>Gambar 4.14</b> Hasil Pemodelan <i>Shuttle Tanker</i> 85000 DWT Kondisi<br><i>Full Load</i> pada <i>Software</i> Maxsurf Modeler Tampak Depan ( <i>Body Plan</i> ).....                | 91  |
| <b>Gambar 4.15</b> Hasil Pemodelan <i>Shuttle Tanker</i> 85000 DWT Kondisi<br><i>Full Load</i> pada <i>Software</i> Maxsurf Modeler Tampak Samping ( <i>Sheer Plan</i> ).....             | 91  |
| <b>Gambar 4.16</b> Hasil Pemodelan <i>Shuttle Tanker</i> 85000 DWT Kondisi <i>Full</i><br><i>Load</i> pada <i>Software</i> Maxsurf Modeler Tampak Atas ( <i>Half Breadth Plan</i> ).....  | 92  |
| <b>Gambar 4.17</b> Hasil Pemodelan <i>Shuttle Tanker</i> 85000 DWT Kondisi <i>Light</i><br><i>Load</i> pada <i>Software</i> Maxsurf Modeler Tampak Isometri.....                          | 92  |
| <b>Gambar 4.18</b> Hasil Pemodelan <i>Shuttle Tanker</i> 85000 DWT Kondisi <i>Light</i><br><i>Load</i> pada <i>Software</i> Maxsurf Modeler Tampak Depan ( <i>Body Plan</i> ).....        | 93  |
| <b>Gambar 4.19</b> Hasil Pemodelan <i>Shuttle Tanker</i> 85000 DWT Kondisi <i>Light</i><br><i>Load</i> pada <i>Software</i> Maxsurf Modeler Tampak Samping ( <i>Sheer Plan</i> ).....     | 93  |
| <b>Gambar 4.20</b> Hasil Pemodelan <i>Shuttle Tanker</i> 85000 DWT Kondisi <i>Light</i><br><i>Load</i> pada <i>Software</i> Maxsurf Modeler Tampak Atas ( <i>Half Breadth Plan</i> )..... | 93  |
| <b>Gambar 4.21</b> <i>Lines Plan</i> FSO Arco Ardjuna.....  | 99  |
| <b>Gambar 4.22</b> <i>Lines Plan</i> <i>Shuttle Tanker</i> 85000 DWT.....   | 99  |
| <b>Gambar 4.23</b> Konfigurasi Arah Pembebanan Gelombang.....   | 100 |
| <b>Gambar 4.24</b> Konfigurasi Arah Pembebanan Gelombang pada <i>Single</i><br><i>Point Mooring</i> .....   | 100 |
| <b>Gambar 4.25</b> Konfigurasi <i>Anchor Legs</i> dan <i>Hawser</i> pada Ansys AQWA<br>(Tampak Atas).....   | 101 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Gambar 4.26</b> Konfigurasi <i>Anchor Legs</i> dan <i>Hawser</i> pada Ansys AQWA<br>(Tampak Samping).....                              | 101 |
| <b>Gambar 4.27</b> Model FSO Arco Ardjuna pada Ansys AQWA.....  | 104 |
| <b>Gambar 4.28</b> Model SPM pada Ansys AQWA.....   | 105 |
| <b>Gambar 4.29</b> Model <i>Shuttle Tanker</i> pada Ansys AQWA.....   | 106 |
| <b>Gambar 4.30</b> Grafik RAO Tertambat Gerakan Translasional pada FSO<br>Arco Ardjuna <i>Heading</i> 0° Kondisi <i>Full Load</i> .....   | 108 |
| <b>Gambar 4.31</b> Grafik RAO Tertambat Gerakan Rotasional pada FSO<br>Arco Ardjuna <i>Heading</i> 0° Kondisi <i>Full Load</i> .....      | 108 |
| <b>Gambar 4.32</b> Grafik RAO Tertambat Gerakan Translasional pada FSO<br>Arco Ardjuna <i>Heading</i> 45° Kondisi <i>Full Load</i> .....  | 109 |
| <b>Gambar 4.33</b> Grafik RAO Tertambat Gerakan Rotasional pada FSO<br>Arco Ardjuna <i>Heading</i> 45° Kondisi <i>Full Load</i> .....     | 109 |
| <b>Gambar 4.34</b> Grafik RAO Tertambat Gerakan Translasional pada FSO<br>Arco Ardjuna <i>Heading</i> 90° Kondisi <i>Full Load</i> .....  | 110 |
| <b>Gambar 4.35</b> Grafik RAO Tertambat Gerakan Rotasional pada FSO<br>Arco Ardjuna <i>Heading</i> 90° Kondisi <i>Full Load</i> .....     | 110 |
| <b>Gambar 4.36</b> Grafik RAO Tertambat Gerakan Translasional pada FSO<br>Arco Ardjuna <i>Heading</i> 180° Kondisi <i>Full Load</i> ..... | 111 |
| <b>Gambar 4.37</b> Grafik RAO Tertambat Gerakan Rotasional pada FSO<br>Arco Ardjuna <i>Heading</i> 180° Kondisi <i>Full Load</i> .....    | 111 |
| <b>Gambar 4.38</b> Grafik RAO Tertambat Gerakan Translasional pada FSO<br>Arco Ardjuna <i>Heading</i> 0° Kondisi <i>Light Load</i> .....  | 113 |
| <b>Gambar 4.39</b> Grafik RAO Tertambat Gerakan Rotasional pada FSO<br>Arco Ardjuna <i>Heading</i> 0° Kondisi <i>Light Load</i> .....     | 113 |
| <b>Gambar 4.40</b> Grafik RAO Tertambat Gerakan Translasional pada FSO<br>Arco Ardjuna <i>Heading</i> 45° Kondisi <i>Light Load</i> ..... | 114 |
| <b>Gambar 4.41</b> Grafik RAO Tertambat Gerakan Rotasional pada FSO<br>Arco Ardjuna <i>Heading</i> 45° Kondisi <i>Light Load</i> .....    | 114 |
| <b>Gambar 4.42</b> Grafik RAO Tertambat Gerakan Translasional pada FSO<br>Arco Ardjuna <i>Heading</i> 90° Kondisi <i>Light Load</i> ..... | 115 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Gambar 4.43</b> Grafik RAO Tertambat Gerakan Rotasional pada FSO<br>Arco Ardjuna <i>Heading</i> 90° Kondisi <i>Light Load</i> .....  | 115 |
| <b>Gambar 4.44</b> Grafik RAO Tertambat Gerakan Translasional pada FSO<br>Arco Ardjuna <i>Heading</i> 180° Kondisi <i>Light Load</i> .....  | 116 |
| <b>Gambar 4.45</b> Grafik RAO Tertambat Gerakan Rotasional pada FSO<br>Arco Ardjuna <i>Heading</i> 180° Kondisi <i>Light Load</i> .....   | 116 |
| <b>Gambar 4.46</b> Grafik RAO Tertambat Gerakan Translasional pada SPM<br><i>Heading</i> 0° saat Sistem <i>Tandem Offloading</i> SPM – FSO <i>Full Load</i> –<br><i>Shuttle Tanker Light Load</i> .....   | 118 |
| <b>Gambar 4.47</b> Grafik RAO Tertambat Gerakan Rotasional pada SPM<br><i>Heading</i> 0° saat Sistem <i>Tandem Offloading</i> SPM – FSO <i>Full Load</i> –<br><i>Shuttle Tanker Light Load</i> .....      | 118 |
| <b>Gambar 4.48</b> Grafik RAO Tertambat Gerakan Translasional pada SPM<br><i>Heading</i> 45° saat Sistem <i>Tandem Offloading</i> SPM – FSO <i>Full Load</i> –<br><i>Shuttle Tanker Light Load</i> .....  | 119 |
| <b>Gambar 4.49</b> Grafik RAO Tertambat Gerakan Rotasional pada SPM<br><i>Heading</i> 45° saat Sistem <i>Tandem Offloading</i> SPM – FSO <i>Full Load</i> –<br><i>Shuttle Tanker Light Load</i> .....     | 119 |
| <b>Gambar 4.50</b> Grafik RAO Tertambat Gerakan Translasional pada SPM<br><i>Heading</i> 90° saat Sistem <i>Tandem Offloading</i> SPM – FSO <i>Full Load</i> –<br><i>Shuttle Tanker Light Load</i> .....  | 120 |
| <b>Gambar 4.51</b> Grafik RAO Tertambat Gerakan Rotasional pada SPM<br><i>Heading</i> 90° saat Sistem <i>Tandem Offloading</i> SPM – FSO <i>Full Load</i> –<br><i>Shuttle Tanker Light Load</i> .....     | 120 |
| <b>Gambar 4.52</b> Grafik RAO Tertambat Gerakan Translasional pada SPM<br><i>Heading</i> 180° saat Sistem <i>Tandem Offloading</i> SPM – FSO <i>Full Load</i> –<br><i>Shuttle Tanker Light Load</i> ..... | 121 |
| <b>Gambar 4.53</b> Grafik RAO Tertambat Gerakan Rotasional pada SPM<br><i>Heading</i> 180° saat Sistem <i>Tandem Offloading</i> SPM – FSO <i>Full Load</i> –<br><i>Shuttle Tanker Light Load</i> .....    | 121 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Gambar 4.54</b> Grafik RAO Tertambat Gerakan Translasional pada SPM<br><i>Heading 0° saat Sistem Tandem Offloading SPM – FSO Light Load –<br/>Shuttle Tanker Full Load</i> .....   | 123 |
| <b>Gambar 4.55</b> Grafik RAO Tertambat Gerakan Rotasional pada SPM<br><i>Heading 0° saat Sistem Tandem Offloading SPM – FSO Light Load –<br/>Shuttle Tanker Full Load</i> .....      | 123 |
| <b>Gambar 4.56</b> Grafik RAO Tertambat Gerakan Translasional pada SPM<br><i>Heading 45° saat Sistem Tandem Offloading SPM – FSO Light Load –<br/>Shuttle Tanker Full Load</i> .....  | 124 |
| <b>Gambar 4.57</b> Grafik RAO Tertambat Gerakan Rotasional pada SPM<br><i>Heading 45° saat Sistem Tandem Offloading SPM – FSO Light Load –<br/>Shuttle Tanker Full Load</i> .....     | 124 |
| <b>Gambar 4.58</b> Grafik RAO Tertambat Gerakan Translasional pada SPM<br><i>Heading 90° saat Sistem Tandem Offloading SPM – FSO Light Load –<br/>Shuttle Tanker Full Load</i> .....  | 125 |
| <b>Gambar 4.59</b> Grafik RAO Tertambat Gerakan Rotasional pada SPM<br><i>Heading 90° saat Sistem Tandem Offloading SPM – FSO Light Load –<br/>Shuttle Tanker Full Load</i> .....     | 125 |
| <b>Gambar 4.60</b> Grafik RAO Tertambat Gerakan Translasional pada SPM<br><i>Heading 180° saat Sistem Tandem Offloading SPM – FSO Light Load –<br/>Shuttle Tanker Full Load</i> ..... | 126 |
| <b>Gambar 4.61</b> Grafik RAO Tertambat Gerakan Rotasional pada SPM<br><i>Heading 180° saat Sistem Tandem Offloading SPM – FSO Light Load –<br/>Shuttle Tanker Full Load</i> .....    | 126 |
| <b>Gambar 4.62</b> Grafik RAO Tertambat Gerakan Translasional pada <i>Shuttle<br/>Tanker 85000 DWT Heading 0° Kondisi Full Load</i> .....   | 128 |
| <b>Gambar 4.63</b> Grafik RAO Tertambat Gerakan Rotasional pada <i>Shuttle<br/>Tanker 85000 DWT Heading 0° Kondisi Full Load</i> .....  | 128 |
| <b>Gambar 4.64</b> Grafik RAO Tertambat Gerakan Translasional pada <i>Shuttle<br/>Tanker 85000 DWT Heading 45° Kondisi Full Load</i> .....  | 129 |
| <b>Gambar 4.65</b> Grafik RAO Tertambat Gerakan Rotasional pada <i>Shuttle<br/>Tanker 85000 DWT Heading 45° Kondisi Full Load</i> .....   | 129 |



|  |     |
|--|-----|
| <b>Gambar 4.66</b> Grafik RAO Tertambat Gerakan Translasional pada <i>Shuttle</i><br><i>Tanker 85000 DWT Heading 90° Kondisi Full Load</i> .....   | 130 |
| <b>Gambar 4.67</b> Grafik RAO Tertambat Gerakan Rotasional pada <i>Shuttle</i><br><i>Tanker 85000 DWT Heading 90° Kondisi Full Load</i> .....      | 130 |
| <b>Gambar 4.68</b> Grafik RAO Tertambat Gerakan Translasional pada <i>Shuttle</i><br><i>Tanker 85000 DWT Heading 180° Kondisi Full Load</i> .....  | 131 |
| <b>Gambar 4.69</b> Grafik RAO Tertambat Gerakan Rotasional pada <i>Shuttle</i><br><i>Tanker 85000 DWT Heading 180° Kondisi Full Load</i> .....     | 131 |
| <b>Gambar 4.70</b> Grafik RAO Tertambat Gerakan Translasional pada <i>Shuttle</i><br><i>Tanker 85000 DWT Heading 0° Kondisi Light Load</i> .....   | 133 |
| <b>Gambar 4.71</b> Grafik RAO Tertambat Gerakan Rotasional pada <i>Shuttle</i><br><i>Tanker 85000 DWT Heading 0° Kondisi Light Load</i> .....      | 133 |
| <b>Gambar 4.72</b> Grafik RAO Tertambat Gerakan Translasional pada <i>Shuttle</i><br><i>Tanker 85000 DWT Heading 45° Kondisi Light Load</i> .....  | 134 |
| <b>Gambar 4.73</b> Grafik RAO Tertambat Gerakan Rotasional pada <i>Shuttle</i><br><i>Tanker 85000 DWT Heading 45° Kondisi Light Load</i> .....     | 134 |
| <b>Gambar 4.74</b> Grafik RAO Tertambat Gerakan Translasional pada <i>Shuttle</i><br><i>Tanker 85000 DWT Heading 90° Kondisi Light Load</i> .....  | 135 |
| <b>Gambar 4.75</b> Grafik RAO Tertambat Gerakan Rotasional pada <i>Shuttle</i><br><i>Tanker 85000 DWT Heading 90° Kondisi Light Load</i> .....     | 135 |
| <b>Gambar 4.76</b> Grafik RAO Tertambat Gerakan Translasional pada <i>Shuttle</i><br><i>Tanker 85000 DWT Heading 180° Kondisi Light Load</i> ..... | 136 |
| <b>Gambar 4.77</b> Grafik RAO Tertambat Gerakan Rotasional pada <i>Shuttle</i><br><i>Tanker 85000 DWT Heading 180° Kondisi Light Load</i> .....    | 136 |
| <b>Gambar 4.78</b> Grafik Spektrum Gelombang JONSWAP ( $H_s = 3,6$ m,<br>$T_p = 9$ s).....   | 138 |
| <b>Gambar 4.79</b> Grafik Respon Spektra Gerakan Translasional pada FSO<br><i>Arco Ardjuna (Full Load) Heading 0° Kondisi Tertambat</i> .....      | 139 |
| <b>Gambar 4.80</b> Grafik Respon Spektra Gerakan Rotasional pada FSO<br><i>Arco Ardjuna (Full Load) Heading 0° Kondisi Tertambat</i> .....         | 139 |
| <b>Gambar 4.81</b> Grafik Respon Spektra Gerakan Translasional pada FSO<br><i>Arco Ardjuna (Full Load) Heading 45° Kondisi Tertambat</i> .....     | 140 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Gambar 4.82</b> Grafik Respon Spektra Gerakan Rotasional pada FSO<br>Arco Ardjuna ( <i>Full Load</i> ) Heading 45° Kondisi Tertambat.....  | 140 |
| <b>Gambar 4.83</b> Grafik Respon Spektra Gerakan Translasional pada FSO<br>Arco Ardjuna ( <i>Full Load</i> ) Heading 90° Kondisi Tertambat.....   | 141 |
| <b>Gambar 4.84</b> Grafik Respon Spektra Gerakan Rotasional pada FSO<br>Arco Ardjuna ( <i>Full Load</i> ) Heading 90° Kondisi Tertambat.....  | 141 |
| <b>Gambar 4.85</b> Grafik Respon Spektra Gerakan Translasional pada FSO<br>Arco Ardjuna ( <i>Full Load</i> ) Heading 180° Kondisi Tertambat.....  | 142 |
| <b>Gambar 4.86</b> Grafik Respon Spektra Gerakan Rotasional pada FSO<br>Arco Ardjuna ( <i>Full Load</i> ) Heading 180° Kondisi Tertambat.....   | 142 |
| <b>Gambar 4.87</b> Grafik Respon Spektra Gerakan Translasional pada FSO<br>Arco Ardjuna ( <i>Light Load</i> ) Heading 0° Kondisi Tertambat.....   | 144 |
| <b>Gambar 4.88</b> Grafik Respon Spektra Gerakan Rotasional pada FSO<br>Arco Ardjuna ( <i>Light Load</i> ) Heading 0° Kondisi Tertambat.....  | 144 |
| <b>Gambar 4.89</b> Grafik Respon Spektra Gerakan Translasional pada FSO<br>Arco Ardjuna ( <i>Light Load</i> ) Heading 45° Kondisi Tertambat.....  | 145 |
| <b>Gambar 4.90</b> Grafik Respon Spektra Gerakan Rotasional pada FSO<br>Arco Ardjuna ( <i>Light Load</i> ) Heading 45° Kondisi Tertambat.....   | 145 |
| <b>Gambar 4.91</b> Grafik Respon Spektra Gerakan Translasional pada FSO<br>Arco Ardjuna ( <i>Light Load</i> ) Heading 90° Kondisi Tertambat.....  | 146 |
| <b>Gambar 4.92</b> Grafik Respon Spektra Gerakan Rotasional pada FSO<br>Arco Ardjuna ( <i>Light Load</i> ) Heading 90° Kondisi Tertambat.....   | 146 |
| <b>Gambar 4.93</b> Grafik Respon Spektra Gerakan Translasional pada FSO<br>Arco Ardjuna ( <i>Light Load</i> ) Heading 180° Kondisi Tertambat.....   | 147 |
| <b>Gambar 4.94</b> Grafik Respon Spektra Gerakan Rotasional pada FSO<br>Arco Ardjuna ( <i>Light Load</i> ) Heading 180° Kondisi Tertambat.....  | 147 |
| <b>Gambar 4.95</b> Grafik Respon Spektra Gerakan Translasional pada SPM<br>Heading 0° Kondisi Tertambat saat Sistem <i>Tandem Offloading</i> SPM –<br>FSO <i>Full Load</i> – <i>Shuttle Tanker Light Load</i> ..... | 149 |
| <b>Gambar 4.96</b> Grafik Respon Spektra Gerakan Rotasional pada SPM<br>Heading 0° Kondisi Tertambat saat Sistem <i>Tandem Offloading</i> SPM –<br>FSO <i>Full Load</i> – <i>Shuttle Tanker Light Load</i> .....    | 149 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Gambar 4.97</b> Grafik Respon Spektra Gerakan Translasional pada SPM<br><i>Heading 45° Kondisi Tertambat saat Sistem Tandem Offloading SPM –<br/>FSO Full Load – Shuttle Tanker Light Load.....</i>   | 150 |
| <b>Gambar 4.98</b> Grafik Respon Spektra Gerakan Rotasional pada SPM<br><i>Heading 45° Kondisi Tertambat saat Sistem Tandem Offloading SPM –<br/>FSO Full Load – Shuttle Tanker Light Load.....</i>      | 150 |
| <b>Gambar 4.99</b> Grafik Respon Spektra Gerakan Translasional pada SPM<br><i>Heading 90° Kondisi Tertambat saat Sistem Tandem Offloading SPM –<br/>FSO Full Load – Shuttle Tanker Light Load.....</i>   | 151 |
| <b>Gambar 4.100</b> Grafik Respon Spektra Gerakan Rotasional pada SPM<br><i>Heading 90° Kondisi Tertambat saat Sistem Tandem Offloading SPM –<br/>FSO Full Load – Shuttle Tanker Light Load.....</i>     | 151 |
| <b>Gambar 4.101</b> Grafik Respon Spektra Gerakan Translasional pada SPM<br><i>Heading 180° Kondisi Tertambat saat Sistem Tandem Offloading SPM –<br/>FSO Full Load – Shuttle Tanker Light Load.....</i> | 152 |
| <b>Gambar 4.102</b> Grafik Respon Spektra Gerakan Rotasional pada SPM<br><i>Heading 180° Kondisi Tertambat saat Sistem Tandem Offloading SPM –<br/>FSO Full Load – Shuttle Tanker Light Load.....</i>    | 152 |
| <b>Gambar 4.103</b> Grafik Respon Spektra Gerakan Translasional pada SPM<br><i>Heading 0° Kondisi Tertambat saat Sistem Tandem Offloading SPM –<br/>FSO Light Load – Shuttle Tanker Full Load.....</i>   | 154 |
| <b>Gambar 4.104</b> Grafik Respon Spektra Gerakan Rotasional pada SPM<br><i>Heading 0° Kondisi Tertambat saat Sistem Tandem Offloading SPM –<br/>FSO Light Load – Shuttle Tanker Full Load.....</i>      | 155 |
| <b>Gambar 4.105</b> Grafik Respon Spektra Gerakan Translasional pada SPM<br><i>Heading 45° Kondisi Tertambat saat Sistem Tandem Offloading SPM –<br/>FSO Light Load – Shuttle Tanker Full Load.....</i>  | 155 |
| <b>Gambar 4.106</b> Grafik Respon Spektra Gerakan Rotasional pada SPM<br><i>Heading 45° Kondisi Tertambat saat Sistem Tandem Offloading SPM –<br/>FSO Light Load – Shuttle Tanker Full Load.....</i>     | 156 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Gambar 4.107</b> Grafik Respon Spektra Gerakan Translasional pada SPM<br><i>Heading 90° Kondisi Tertambat saat Sistem Tandem Offloading SPM –<br/>FSO Light Load – Shuttle Tanker Full Load</i> .....  | 156 |
| <b>Gambar 4.108</b> Grafik Respon Spektra Gerakan Rotasional pada SPM<br><i>Heading 90° Kondisi Tertambat saat Sistem Tandem Offloading SPM –<br/>FSO Light Load – Shuttle Tanker Full Load</i> .....     | 157 |
| <b>Gambar 4.109</b> Grafik Respon Spektra Gerakan Translasional pada SPM<br><i>Heading 180° Kondisi Tertambat saat Sistem Tandem Offloading SPM –<br/>FSO Light Load – Shuttle Tanker Full Load</i> ..... | 157 |
| <b>Gambar 4.110</b> Grafik Respon Spektra Gerakan Rotasional pada SPM<br><i>Heading 180° Kondisi Tertambat saat Sistem Tandem Offloading SPM –<br/>FSO Light Load – Shuttle Tanker Full Load</i> .....    | 158 |
| <b>Gambar 4.111</b> Grafik Respon Spektra Gerakan Translasional pada <i>Shuttle<br/>Tanker 85000 DWT (Full Load) Heading 0° Kondisi Tertambat</i> .....   | 159 |
| <b>Gambar 4.112</b> Grafik Respon Spektra Gerakan Rotasional pada <i>Shuttle<br/>Tanker 85000 DWT (Full Load) Heading 0° Kondisi Tertambat</i> .....  | 160 |
| <b>Gambar 4.113</b> Grafik Respon Spektra Gerakan Translasional pada <i>Shuttle<br/>Tanker 85000 DWT (Full Load) Heading 45° Kondisi Tertambat</i> .....  | 160 |
| <b>Gambar 4.114</b> Grafik Respon Spektra Gerakan Rotasional pada <i>Shuttle<br/>Tanker 85000 DWT (Full Load) Heading 45° Kondisi Tertambat</i> .....   | 161 |
| <b>Gambar 4.115</b> Grafik Respon Spektra Gerakan Translasional pada <i>Shuttle<br/>Tanker 85000 DWT (Full Load) Heading 90° Kondisi Tertambat</i> .....  | 161 |
| <b>Gambar 4.116</b> Grafik Respon Spektra Gerakan Rotasional pada <i>Shuttle<br/>Tanker 85000 DWT (Full Load) Heading 90° Kondisi Tertambat</i> .....   | 162 |
| <b>Gambar 4.117</b> Grafik Respon Spektra Gerakan Translasional pada <i>Shuttle<br/>Tanker 85000 DWT (Full Load) Heading 180° Kondisi Tertambat</i> .....   | 162 |
| <b>Gambar 4.118</b> Grafik Respon Spektra Gerakan Rotasional pada <i>Shuttle<br/>Tanker 85000 DWT (Full Load) Heading 180° Kondisi Tertambat</i> .....  | 163 |
| <b>Gambar 4.119</b> Grafik Respon Spektra Gerakan Translasional pada <i>Shuttle<br/>Tanker 85000 DWT (Light Load) Heading 0° Kondisi Tertambat</i> .....  | 164 |
| <b>Gambar 4.120</b> Grafik Respon Spektra Gerakan Rotasional pada <i>Shuttle<br/>Tanker 85000 DWT (Light Load) Heading 0° Kondisi Tertambat</i> .....   | 165 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Gambar 4.121</b> Grafik Respon Spektra Gerakan Translasiional pada <i>Shuttle Tanker</i> 85000 DWT ( <i>Light Load</i> ) Heading 45° Kondisi Tertambat.....  | 165 |
| <b>Gambar 4.122</b> Grafik Respon Spektra Gerakan Rotasiional pada <i>Shuttle Tanker</i> 85000 DWT ( <i>Light Load</i> ) Heading 45° Kondisi Tertambat.....   | 166 |
| <b>Gambar 4.123</b> Grafik Respon Spektra Gerakan Translasiional pada <i>Shuttle Tanker</i> 85000 DWT ( <i>Light Load</i> ) Heading 90° Kondisi Tertambat.....  | 166 |
| <b>Gambar 4.124</b> Grafik Respon Spektra Gerakan Rotasiional pada <i>Shuttle Tanker</i> 85000 DWT ( <i>Light Load</i> ) Heading 90° Kondisi Tertambat.....   | 167 |
| <b>Gambar 4.125</b> Grafik Respon Spektra Gerakan Translasiional pada <i>Shuttle Tanker</i> 85000 DWT ( <i>Light Load</i> ) Heading 180° Kondisi Tertambat.....   | 167 |
| <b>Gambar 4.126</b> Grafik Respon Spektra Gerakan Rotasiional pada <i>Shuttle Tanker</i> 85000 DWT ( <i>Light Load</i> ) Heading 180° Kondisi Tertambat.....  | 168 |
| <b>Gambar 4.127</b> Konfigurasi Arah Pembebanan Gelombang.....  | 170 |
| <b>Gambar 4.128</b> Letak Konstruksi Panama <i>Chock</i> pada <i>Construction Profile</i> FSO Arco Ardjuna.....   | 174 |
| <b>Gambar 4.129</b> Detail Konstruksi Panama <i>Chock</i> .....   | 175 |
| <b>Gambar 4.130</b> Pemilihan <i>Deck Longitudinal</i> (Kotak Biru) untuk Pemodelan Lokal Konstruksi Panama <i>Chock</i> .....  | 176 |
| <b>Gambar 4.131</b> Pemilihan <i>Deck Vertical</i> (Kotak Biru) untuk Pemodelan Lokal Konstruksi Panama <i>Chock</i> .....  | 176 |
| <b>Gambar 4.132</b> Pemodelan Konstruksi Panama <i>Chock</i> menggunakan <i>Software</i> AutoCAD 3D.....  | 177 |
| <b>Gambar 4.133</b> Hasil Pemodelan 3D Konstruksi Panama <i>Chock</i> .....   | 177 |
| <b>Gambar 4.134</b> Konfigurasi Sudut yang Terjadi akibat Perbedaan <i>Displacement</i> pada FSO Arco Ardjuna dan <i>Shuttle Tanker</i> 85000 DWT; (a)Sistem <i>Tandem Offloading</i> saat FSO <i>Full Load</i> dan <i>Shuttle Tanker Light Load</i> Tampak Samping; (b) Sistem <i>Tandem Offloading</i> saat FSO <i>Light Load</i> dan <i>Shuttle Tanker Full Load</i> Tampak Samping; (c) Sistem <i>Tandem Offloading</i> Tampang Atas..... | 178 |
| <b>Gambar 4.135</b> Konfigurasi Sudut <i>Hawser</i> dimana Pembebanan Mengenai Bagian Atas Panama <i>Chock</i> .....  | 179 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Gambar 4.136</b> Konfigurasi Sudut <i>Hawser</i> dimana Pembebanan Mengenai Bagian Samping Kanan Panama <i>Chock</i> .....   | 180 |
| <b>Gambar 4.137</b> Konfigurasi Sudut <i>Hawser</i> dimana Pembebanan Mengenai Bagian Samping Kiri Panama <i>Chock</i> .....  | 181 |
| <b>Gambar 4.138</b> Pembebanan terhadap Panama <i>Chock</i> yang Mengenai Bagian Atas Struktur; (a) Sudut 15°; (b) Sudut 30°; (c) Sudut 45°; (d) Sudut 60°.....   | 182 |
| <b>Gambar 4.139</b> Pembebanan terhadap Panama <i>Chock</i> yang Mengenai Bagian Samping Kanan Struktur; (a) Sudut 15°; (b) Sudut 30°; (c) Sudut 45°; (d) Sudut 60°.....  | 183 |
| <b>Gambar 4.140</b> Pembebanan terhadap Panama <i>Chock</i> yang Mengenai Bagian Samping Kiri Struktur; (a) Sudut 15°; (b) Sudut 30°; (c) Sudut 45°; (d) Sudut 60°.....   | 183 |
| <b>Gambar 4.141</b> Pembebanan terhadap Panama <i>Chock</i> untuk Kondisi Sistem <i>Tandem Offloading SPM – FSO Full Load – Shuttle Tanker Light Load</i> pada <i>Heading</i> 0°; (a) Saat T = 685,5 s; (b) Saat T = 5900 s.....    | 189 |
| <b>Gambar 4.142</b> Pembebanan terhadap Panama <i>Chock</i> untuk Kondisi Sistem <i>Tandem Offloading SPM – FSO Full Load – Shuttle Tanker Light Load</i> pada <i>Heading</i> 45°; (a) Saat T = 274,25 s; (b) Saat T = 499 s.....   | 190 |
| <b>Gambar 4.143</b> Pembebanan terhadap Panama <i>Chock</i> untuk Kondisi Sistem <i>Tandem Offloading SPM – FSO Full Load – Shuttle Tanker Light Load</i> pada <i>Heading</i> 90°; (a) Saat T = 94 s; (b) Saat T = 95,75 s.....     | 190 |
| <b>Gambar 4.144</b> Pembebanan terhadap Panama <i>Chock</i> untuk Kondisi Sistem <i>Tandem Offloading SPM – FSO Full Load – Shuttle Tanker Light Load</i> pada <i>Heading</i> 180°; (a) Saat T = 274,25 s; (b) Saat T = 499 s.....  | 190 |
| <b>Gambar 4.145</b> Pembebanan terhadap Panama <i>Chock</i> untuk Kondisi Sistem <i>Tandem Offloading SPM – FSO Light Load – Shuttle Tanker Full Load</i> pada <i>Heading</i> 0°; (a) Saat T = 881,75 s; (b) Saat T = 991,25 s..... | 191 |
| <b>Gambar 4.146</b> Pembebanan terhadap Panama <i>Chock</i> untuk Kondisi Sistem <i>Tandem Offloading SPM – FSO Light Load – Shuttle Tanker Full Load</i> pada <i>Heading</i> 45°; (a) Saat T = 176,75 s; (b) Saat T = 167 s.....   | 191 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Gambar 4.147</b> Pembebanan terhadap Panama <i>Chock</i> untuk Kondisi Sistem <i>Tandem Offloading</i> SPM – FSO <i>Light Load</i> – <i>Shuttle Tanker Full Load</i> pada <i>Heading</i> 90°; (a) Saat T = 9626,5 s; (b) Saat T = 9618,25 s.....  | 191 |
| <b>Gambar 4.148</b> Pembebanan terhadap Panama <i>Chock</i> untuk Kondisi Sistem <i>Tandem Offloading</i> SPM – FSO <i>Light Load</i> – <i>Shuttle Tanker Full Load</i> pada <i>Heading</i> 180°; (a) Saat T = 5083,5 s; (b) Saat T = 4058,25 s..... | 192 |
| <b>Gambar 4.149</b> Grafik Sensitivitas Konstruksi Panama <i>Chock</i> untuk Kondisi Pembebanan dengan Variasi Sudut.....  | 194 |
| <b>Gambar 4.150</b> Model Elemen <i>Meshing</i> Konstruksi Panama <i>Chock</i> pada Kondisi Pembebanan dengan Variasi Sudut untuk Ukuran <i>Meshing</i> Sebesar 55 mm.....   | 194 |
| <b>Gambar 4.151</b> Grafik Sensitivitas Konstruksi Panama <i>Chock</i> untuk Kondisi Pembebanan dengan Posisi Relatif <i>Hawser</i> atau <i>Shuttle Tanker</i> terhadap FSO.....   | 195 |
| <b>Gambar 4.152</b> Model Elemen <i>Meshing</i> Konstruksi Panama <i>Chock</i> pada Kondisi Pembebanan dengan Posisi Relatif <i>Hawser</i> atau <i>Shuttle Tanker</i> terhadap FSO untuk Ukuran <i>Meshing</i> Sebesar 57 mm.....                    | 196 |
| <b>Gambar 4.153</b> Letak <i>Constraint</i> atau <i>Boundary Condition</i> pada Konstruksi Panama <i>Chock</i> yang Ditunjukkan dengan <i>Deck</i> Berwarna Biru.....  | 196 |
| <b>Gambar 4.154</b> Hasil <i>Stress</i> Maksimum Konstruksi Panama <i>Chock</i> untuk Pembebanan dengan Variasi Sudut Sebesar 224,43 MPa.....  | 198 |
| <b>Gambar 4.155</b> Detail dari Hasil <i>Stress</i> Maksimum Konstruksi Panama <i>Chock</i> untuk Pembebanan dengan Variasi Sudut Sebesar 224,43 MPa.....  | 199 |
| <b>Gambar 4.156</b> Hasil Deformasi Konstruksi Panama <i>Chock</i> untuk Pembebanan dengan Variasi Sudut Sebesar 0,76328 mm.....   | 199 |
| <b>Gambar 4.157</b> Detail dari Hasil Deformasi Konstruksi Panama <i>Chock</i> untuk Pembebanan dengan Variasi Sudut Sebesar 0,76328 mm.....   | 199 |
| <b>Gambar 4.158</b> Hasil <i>Stress</i> Maksimum Konstruksi Panama <i>Chock</i> untuk Pembebanan dengan Posisi Relatif <i>Hawser</i> atau <i>Shuttle Tanker</i> terhadap FSO Sebesar 223,4 MPa.....  | 200 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Gambar 4.159</b> Detail dari Hasil <i>Stress</i> Maksimum Konstruksi Panama <i>Chock</i> untuk Pembebanan dengan Posisi Relatif <i>Hawser</i> atau <i>Shuttle Tanker</i> terhadap FSO Sebesar 223,4 MPa..... | 201 |
| <b>Gambar 4.160</b> Hasil Deformasi Konstruksi Panama <i>Chock</i> untuk Pembebanan dengan Posisi Relatif <i>Hawser</i> atau <i>Shuttle Tanker</i> terhadap FSO Sebesar 3,3129 mm.....                          | 201 |
| <b>Gambar 4.161</b> Detail dari Hasil Deformasi Konstruksi Panama <i>Chock</i> untuk Pembebanan dengan Posisi Relatif <i>Hawser</i> atau <i>Shuttle Tanker</i> terhadap FSO Sebesar 3,3129 mm.....              | 201 |



## DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN A Data dan Model Struktur FSO Arco Ardjuna, SPM 3, Konstruksi Panama *Chock*

LAMPIRAN B *Response Amplitude Operator* (RAO) pada FSO Arco Ardjuna, SPM 3 dan *Shuttle Tanker* 85000 DWT saat Kondisi Terapung Bebas (*Free Floating*)

LAMPIRAN C Perhitungan *Peakedness Parameter*

LAMPIRAN D Respon Spektra pada FSO Arco Ardjuna, SPM 3 dan *Shuttle Tanker* 85000 DWT saat Kondisi Terapung Bebas (*Free Floating*)

LAMPIRAN E Hasil Analisis *Tension* pada *Anchor Legs* dan *Hawser*

LAMPIRAN F Hasil dari *Software* Ansys AQWA untuk *Structure Position* pada FSO Arco Ardjuna dan *Shuttle Tanker* 85000 DWT

LAMPIRAN G *Meshing* dan *Sensitivity Analysis*

LAMPIRAN H Hasil Analisis Tegangan Lokal Konstruksi Panama *Chock*

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

# BAB I PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang Masalah

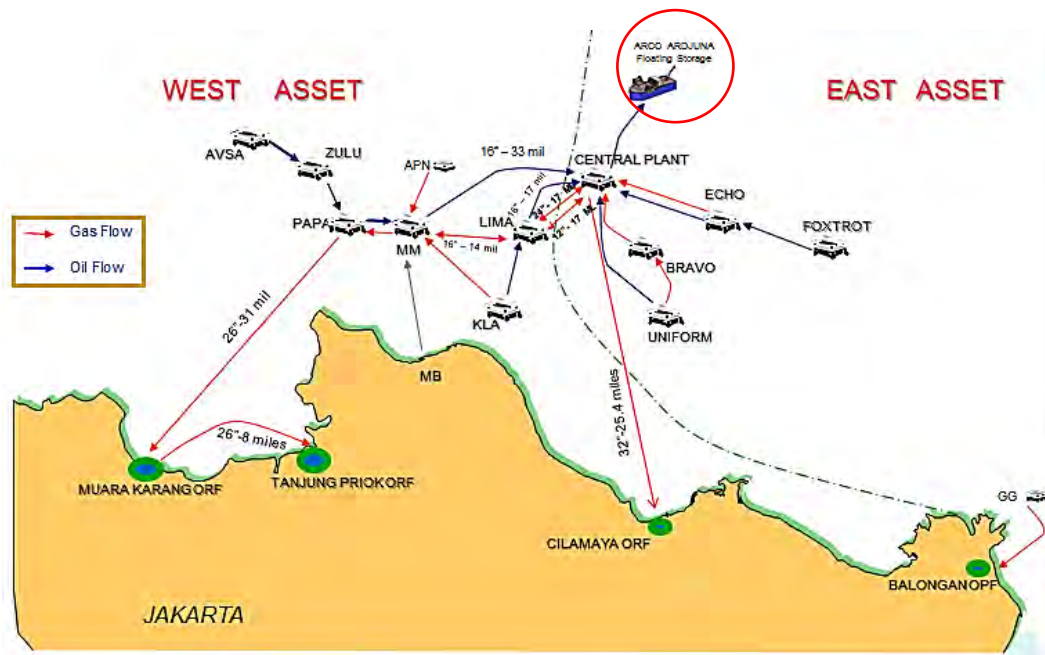
Kebutuhan minyak dan gas dunia seiring berjalannya waktu selalu meningkat dan telah mendorong bertambahnya aktivitas di lepas pantai. Hal ini menyebabkan bertambahnya kebutuhan bangunan lepas pantai. Menurut Nallayarasu (2009) bangunan lepas pantai dibangun untuk mengeksplorasi minyak dan gas yang terletak dikedalaman air yang sangat dangkal ke laut dalam tergantung dari kedalaman air dan kondisi lingkungan, penataan struktur dan ide-ide baru yang diperlukan. Berdasarkan geometri dan perilaku, struktur lepas pantai untuk pengembangan dibidang minyak dan gas dibagi menjadi beberapa kategori, yaitu *fixed platform*, *compliant tower* dan *floating structure*. Dimana *fixed platform* terdiri dari *steel template structure* dan *concrete gravity structure*, *compliant tower* terdiri dari *compliant tower*, *guyed tower*, *articulated tower* dan *tension leg platform*. Sedangkan *floating production system* dan *floating production, storage and offloading system* merupakan bagian dari *floating structure*.

Bangunan yang akan dioperasikan harus mempunyai nilai yang ekonomis dari berbagai aspek terutama biaya dikarenakan ladang minyak di masa mendatang diramalkan mempunyai kapasitas yang relatif lebih kecil, terletak diperairan yang lebih dalam, atau cadangan mineralnya tidak cukup ekonomis bila digali dengan teknologi yang ada sehingga membuat berkembangnya jenis bangunan apung dalam pengeksplorasi migas.

Bangunan laut terapung (*floating structure*) merupakan bangunan yang mempunyai karakter bergerak mengikuti gerakan gelombang. Ciri khasnya adalah mobilitas dan kemampuannya mengantisipasi gerakan akibat gelombang dan arus laut. Bangunan jenis ini juga dinilai lebih ekonomis karena dapat dimanfaatkan kembali setelah pengeksplorasi selesai. Dewasa ini kita mengenal bangunan apung jenis-jenis *semi-submersibles*, *single point anchor reservoir (SPAR)*, *tensioned leg platform (TLP)*, *floating production storage offloading (FPSO)* dan *floating storage and offloading (FSO)* (Djatkiko, 2012).

Bagi operasi migas, salah satu yang mutlak untuk dimiliki adalah FSO (*Floating Storage and Offloading*). FSO ini sebagai sarana tangki timbun

terapung berkapasitas besar untuk menampung minyak mentah sembari menunggu kedatangan *tanker* untuk pemuatan ekspor (PT. Tender Indonesia, 2009). Saat ini di wilayah lepas pantai Indonesia telah beroperasi sekitar 14 unit FSO dengan berbagai macam ukuran, baik bobot matinya (DWT) maupun kapasitas tangkinya. Salah satu FSO yang beroperasi sampai saat ini adalah FSO Arco Ardjuna milik Pertamina Hulu Energi Offshore North West Java (PHE ONWJ) seperti pada Gambar 1.1. FSO Arco Ardjuna merupakan fasilitas penyimpanan minyak yang beroperasi di Ardjuna Marine Terminal.



(a)

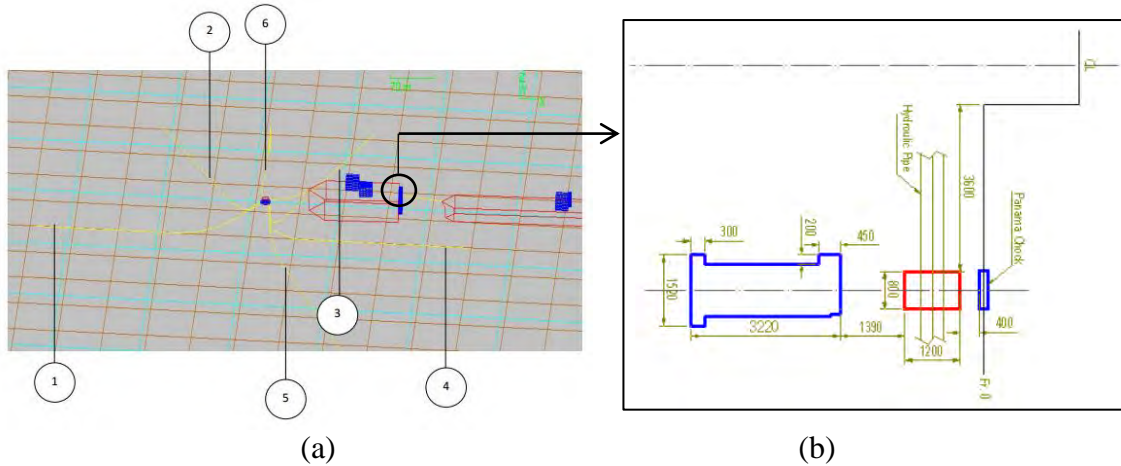


(b)

Gambar 1.1 (a) Ardjuna Marine Terminal; (b) FSO Arco Ardjuna Tertambat SPM 3 (Sumber: PT. PHE ONWJ, 2013)

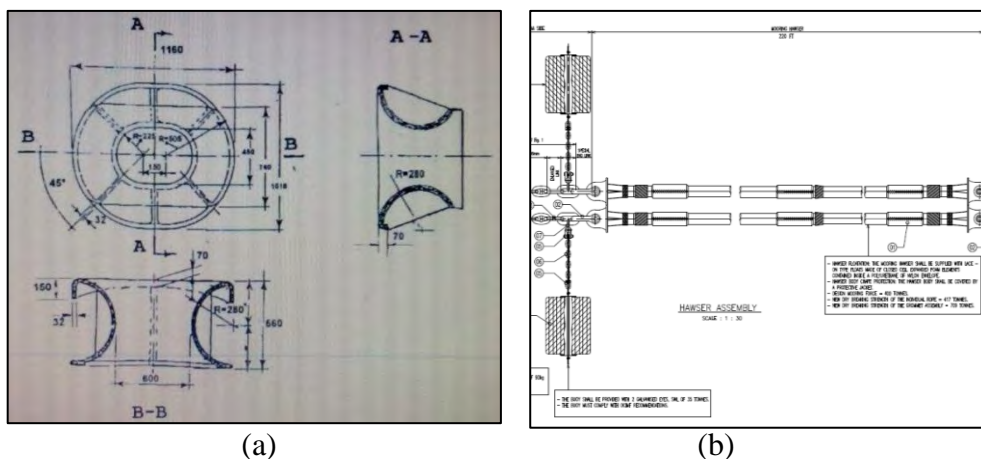
Menurut Soedjono (1998), bangunan laut terapung dalam operasinya memerlukan peralatan penambatan (*mooring*), seperti jangkar, kabel baja, rantai dan lain-lain. Sistem penambatan ini diperlukan agar struktur tidak akan jauh berpindah atau bergeser dari lokasi kerja. Sistem ini juga diharapkan mampu menahan beban lingkungan seperti beban gelombang, beban angin dan beban arus. Sistem tambat yang umum digunakan adalah SPM (*Single Point Mooring*) dimana sistem ini menghubungkan antara *subsea manifold geostatic* koneksi dan *weathervaning tanker*. *Weathervaning* merupakan kondisi dimana kapal mampu bergerak mengikuti arah gelombang (kondisi lingkungan) namun tetap tertambat pada *mooring*. Kelebihan lain dari SPM adalah mampu menangani kapal berbagai ukuran, bahkan kapal pengangkut minyak yang sangat besar sekalipun dimana tidak ada fasilitas alternatif yang tersedia. SALM (*Single Anchored Leg Mooring*), CALM (*Catenary Anchored Leg Mooring*) dan *Turret Mooring* merupakan sistem *mooring* SPM yang sering digunakan pada FSO. FSO Arco Ardjuna menggunakan sistem tambat SPM dengan tipe CALM seperti Gambar 1.1. SPM yang digunakan adalah SPM 3 milik PHE ONWJ. Sistem tambat SPM juga berfungsi sebagai sistem *offloading* untuk *shuttle tanker* yang ada di Ardjuna Marine Terminal.

Proses *offloading* adalah proses pemindahan muatan berupa minyak atau gas (hidrokarbon) dari penyimpanan sementara seperti FSO / FPSO menuju *shuttle tanker* untuk disalurkan ke daratan. Sistem *offloading* pada *shuttle tanker* yang digunakan di Ardjuna Marine Terminal awalnya menggunakan SPM. Dimana SPM telah beroperasi cukup lama dan telah direncanakan oleh tim PHE ONWJ untuk dilakukan reparasi dalam waktu dekat dikarenakan faktor umur SPM tersebut. Agar *lifting capacity* tetap berjalan saat berlangsungnya proses reparasi SPM, maka dilakukan penambahan sistem *offloading* pada FSO Arco Ardjuna dengan menggunakan sistem *tandem offloading*. Untuk menunjang sistem *tandem offloading* ini, dibutuhkan konstruksi *chock* dengan jenis panama *chock* yang berfungsi sebagai tumpuan dan jalur lewatnya *hawser* yang menghubungkan FSO Arco Ardjuna dengan *shuttle tanker* dimana sekarang sedang dilakukan pemasangan panama *chock* pada proses *dry docking* di Singapura. Untuk ilustrasi sistem *tandem offloading* pada FSO Arco Ardjuna dapat dilihat pada Gambar 1.2.



Gambar 1.2 (a) Ilustrasi Sistem *Tandem Offloading* FSO Arco Ardjuna; (b) Letak Konstruksi Panama *Chock* pada FSO Arco Ardjuna (Sumber: PT. PHE ONWJ, 2013)

Analisis yang dilakukan pada tugas akhir ini adalah analisis dari sistem *tandem offloading* pada FSO Arco Ardjuna dengan menambahkan konstruksi panama *chock*. Analisis tersebut dilakukan dengan mengetahui gerakan dari FSO, *shuttle tanker* dan SPM, dari respon gerak tersebut dapat diketahui besar gaya tarik (*tension*) *hawser* yang menghubungkan FSO dan *shuttle tanker* sehingga dapat dianalisis pengaruhnya terhadap konstruksi panama *chock* yang dianggap aman pada saat operasi. Berikut adalah gambar konstruksi panama *chock* dan *hawser* yang ditunjukkan pada Gambar 1.3.



Gambar 1.3 (a) Panama *Chock*; (b) *Hawser* (Sumber: PT. PHE ONWJ, 2013)

## 1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang akan dibahas dalam tugas akhir ini adalah:

1. Bagaimana perilaku gerak yang terjadi pada FSO Arco Ardjuna, *shuttle tanker* dan SPM saat terapung bebas (*free floating*)?
2. Bagaimana perilaku gerak yang terjadi pada FSO Arco Ardjuna, *shuttle tanker* dan SPM saat tertambat?
3. Berapa besar gaya tarik (*tension*) maksimum *hawser* yang menghubungkan FSO Arco Ardjuna dengan *shuttle tanker* pada saat sistem *tandem offloading*?
4. Berapa besar tegangan lokal maksimum yang terjadi pada konstruksi panama *chock* dengan sistem *tandem* karena pergerakan FSO Arco Ardjuna dan *shuttle tanker* pada saat *offloading*?

## 1.3 Tujuan

Tujuan dari tugas akhir ini adalah:

1. Mendapatkan perilaku gerak yang terjadi pada FSO Arco Ardjuna, *shuttle tanker* dan SPM saat terapung bebas (*free floating*).
2. Mendapatkan perilaku gerak yang terjadi pada FSO Arco Ardjuna, *shuttle tanker* dan SPM saat tertambat.
3. Mendapatkan besar gaya tarik (*tension*) maksimum *hawser* yang menghubungkan FSO Arco Ardjuna dengan *shuttle tanker* pada saat sistem *tandem offloading*.
4. Mendapatkan besar tegangan lokal maksimum yang terjadi pada konstruksi panama *chock* dengan sistem *tandem* karena pergerakan FSO Arco Ardjuna dan *shuttle tanker* pada saat *offloading*.

## 1.4 Manfaat

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui sistem *tandem offloading* pada FSO Arco Ardjuna.
2. Mengetahui cara menghitung besar pergerakan pada FSO Arco Ardjuna, *shuttle tanker* dan SPM pada saat terapung bebas (*free floating*) dan tertambat.
3. Mengetahui prosedur cara menganalisis dan menghitung gaya tarik (*tension*) maksimum pada *hawser* yang menghubungkan antara FSO Arco Ardjuna dan

*shuttle tanker* serta tegangan lokal maksimum yang terjadi pada konstruksi panama *chock* dengan sistem *tandem offloading*.

### 1.5 Batasan Masalah

Pembatasan masalah dilakukan untuk menghindari pembahasan yang melebar serta memudahkan penelitian dan dapat dicapai tujuan yang diharapkan. Batasan ruang lingkup yang diberlakukan adalah sebagai berikut:

1. Merupakan studi kasus pada sistem *tandem offloading* 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*) dengan sistem *tandem* pada saat *offloading*.
3. *Shuttle tanker* yang digunakan adalah *shuttle tanker* 85000 DWT dengan acuan ukuran dari Aframax.
4. Jangkar tidak dimodelkan.
5. Pemodelan mekanisme *turntable* SPM tidak dimodelkan.
6. *Riser* tidak dimodelkan dan pergerakan *hose* diabaikan.
7. Sistem konstruksi *smit bracket* dianggap kuat.
8. Validasi hidrostatis model yang dilakukan pada FSO Arco Ardjuna dan *shuttle tanker* saat kondisi *full load* dan *light load*.
9. Analisis perilaku gerak dilakukan dalam dua kondisi yaitu FSO Arco Ardjuna dan *shuttle tanker* dalam keadaan *full load* dan *light load*.
10. Analisis *motion* dengan gerakan *six degree of freedom*.
11. *Heading* pembebanan pada *heading angle*  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  dan  $180^\circ$ .
12. Analisis *mooring* dilakukan pada dua kondisi sistem *tandem offloading* yaitu kondisi SPM – FSO *full load* – *Shuttle tanker light load* dan SPM – FSO *light load* – *Shuttle tanker full load*.
13. Konstruksi panama *chock* pada sistem *tandem* diletakkan pada buritan FSO Arco Ardjuna (*stern*).
14. *Longitudinal bending moment* tidak diperhitungkan.
15. Beban lingkungan yang ditinjau adalah beban arus, beban angin dan beban gelombang dengan *heading* masing-masing beban searah.



16. Perhitungan tegangan lokal maksimum konstruksi panama *chock* difokuskan pada beban gaya tarik maksimum *hawser*.

## **1.6 Sistematika Penulisan**

Sistematika penulisan dalam laporan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

### **BAB I PENDAHULUAN**

Bab ini menjelaskan mengenai latar belakang studi yang dilakukan, permasalahan, tujuan yang akan dicapai, manfaat yang diperoleh dan batasan-batasan masalah serta sistematika penulisan laporan yang dipakai.

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

Bab ini berisikan tinjauan pustaka dan dasar teori yang menjadi acuan dari penelitian tugas akhir. Dalam menyelesaikan masalah dalam tugas akhir ini, penulis berpedoman pada beberapa penelitian tentang struktur bangunan lepas pantai yang pernah dilakukan. Selain itu juga berpedoman pada jurnal-jurnal internasional, literatur-literatur, buku, *codes* yang berkaitan dengan *offshore structure* sebagai dasar teori dalam tugas akhir ini.

### **BAB III METODOLOGI PENELITIAN**

Bab ini menjelaskan pemikiran dari keseluruhan penelitian serta langkah-langkah pengerjaan untuk menyelesaikan tugas akhir ini dan metode-metode yang digunakan.

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

Bab ini berisikan pembahasan hasil analisis penelitian dalam tugas akhir ini. Bab ini membahas pengolahan data hasil dari *output* pemodelan hingga menghasilkan kesimpulan.

### **BAB V KESIMPULAN DAN SARAN**

Bab ini berisikan kesimpulan mengenai tahap akhir dari penulisan tugas akhir, yang mana berisi tentang hasil akhir dari analisis yang telah dilakukan sesuai

dengan permasalahan yang ada, serta beberapa saran yang dapat digunakan sebagai bahan pertimbangan dalam penyempurnaan dari hasil analisis yang telah dilakukan.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

#### 2.1 Tinjauan Pustaka

Sejak tahun 1990-an telah terjadi peningkatan pada sektor *North Sea* ke produksi laut dalam dengan menggunakan sistem produksi dan penyimpanan terapung (Sii dkk, 2005). Sebuah inovasi teknologi guna menunjang produksi migas di laut dalam tersebut adalah menggunakan struktur terapung berupa *Floating Storage and Offloading* atau yang biasa disebut dengan FSO. Menurut Satria dan Manfaat (2012) FSO (*Floating Storage and Offloading*) adalah tipe bangunan apung yang berguna untuk menampung minyak yang diproduksi oleh bangunan lepas pantai.

Seperti yang disebutkan Purnawanti (2015), secara sederhana FSO merupakan *tanker* yang ditambat pada sistem tambat. Sistem tambat yang biasa digunakan yaitu SPM (*single point mooring*). Dalam Pratiwi (2013) menyebutkan bahwa hal yang diharapkan dalam pergerakan SPM terhadap gerakan bangunan apung FSO yaitu SPM dapat meredam atau menahan gaya FSO akibat beban lingkungan.

Pada proses *offloading*, sistem tambat adalah salah satu bagian kritis. Konfigurasi sistem tambat ini harus mampu menghasilkan gaya pengembali untuk menghindari perpindahan struktur dari posisi yang diinginkan. Menurut Perwitasari (2010) ada dua metode dari proses *offloading* untuk pentransferan minyak, yaitu konfigurasi *tandem* dan *side by side*. Untuk konfigurasi *tandem*, *tanker* ditambat pada FSO dengan konfigurasi *tandem*. *Hawser* dikoneksikan diantara stasiun *offloading* buritan FSO dengan *tanker*.

Pada tugas akhir ini, akan dibahas studi kasus mengenai penambahan sistem *tandem offloading* pada FSO Arco Ardjuna. Sistem *tandem* ini menghubungkan FSO Arco Ardjuna dengan *shuttle tanker* yang dikoneksikan menggunakan *hawser*. Dari penambahan sistem *tandem offloading* ini maka diperlukan peralatan-peralatan yang dapat mendukung kerja dari sistem *tandem offloading* tersebut, salah satunya berupa konstruksi *chock*. *Tension* yang terjadi pada *hawser* sangat mempengaruhi konstruksi *chock* karena *hawser* bertumpu dan melewati konstruksi *chock* tersebut, sehingga sangatlah penting untuk diperhatikan kekuatan pada konstruksi *chock*.

Penelitian yang dilakukan pada sistem tambat FSO telah dilakukan. Mauliani (2015) melakukan penelitian terhadap kekuatan struktur global *buoy* pada *single point mooring* FSO Arco Ardjuna. *Buoy* pada sistem tambat FSO Arco Ardjuna telah memasuki umur operasi 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. Penelitian tentang kekuatan *bollard* dilakukan oleh Purnawanti (2015). Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui tegangan lokal maksimum yang terjadi pada *bollard* dengan terlebih dahulu menganalisis tegangan maksimum dari rantai jangkar. Analisis ini dilakukan karena adanya modifikasi pada sistem tambat yang semula memakai SPOLS (*single point offshore loading system*) menjadi *spread mooring system*.

Penelitian tentang sistem *offloading* pada FSO telah dilakukan. Analisis tegangan lokal konstruksi *windlass* pada *bow* FSO akibat pengaruh modifikasi sistem *offloading* yang dilakukan oleh Irawati (2013). Penelitian ini dilakukan karena sistem *offloading* pada FSO yang awalnya menggunakan sistem *side by side* kemudian dilengkapi dengan sistem *tandem offloading*. Dari permasalahan tersebut diperlukan analisis tegangan *hawser* yang menghubungkan FSO dan SPM agar dapat diketahui tegangan lokal yang terjadi pada konstruksi *windlass* pada *bow* FSO. Penelitian selanjutnya dilakukan oleh Pratiwi (2013) yang menganalisa tentang kekuatan pada sistem *tandem* FSO. Analisis dilakukan pada FSO yang sistem *offloading*-nya menggunakan sistem *tandem* dengan *shuttle tanker* 85.000 DWT dimana *output* yang dihasilkan adalah *tension* maksimum pada *hawser* yang digunakan untuk mengetahui kekuatan *smit bracket* dan *panama chock*

Berdasarkan penelitian-penelitian yang telah dilakukan, penulis akan melakukan analisis *tension* yang terjadi pada *hawser* yang menghubungkan FSO Arco Ardjuna dengan *shuttle tanker* serta tegangan lokal pada konstruksi *chock* akibat dari penambahan sistem *tandem offloading* FSO Arco Ardjuna.

## 2.2 Dasar Teori

### 2.2.1 Teori Bangunan Kapal

#### 2.2.1.1 Ukuran Utama Kapal

Penting untuk diketahui istilah dan dasar teori bangunan kapal sebelum melakukan analisis. Untuk penjabaran tentang istilah-istilah untuk ukuran utama kapal dapat dilihat pada Gambar 2.1 dan penjelasan berikut.

a. *Length Between Perpendicular (Lpp)*

Panjang kapal antara dua garis tegak buritan dan garis tegak haluan yang diukur pada garis air muat panjang kapal yang menghubungkan antara 2 garis tegak yaitu jarak horizontal antara garis tegak depan/haluan/(FP) dengan garis tegak belakang/buritan/(AP).

1. *After Perpendicular (AP)* adalah garis tegak buritan yaitu garis tegak yang terletak berimpit pada sumbu poros kemudi.
2. *Fore Perpendicular (FP)* adalah garis tegak haluan yaitu garis tegak yang terletak pada/melalui titik potong antara linggi haluan dengan garis air pada sarat air muatan penuh yang telah direncanakan.

b. *Length of Water Line (Lwl)*

Lwl adalah panjang garis air yang diukur mulai dari perpotongan linggi buritan dengan garis air pada sarat sampai dengan pada perpotongan linggi haluan dengan garis air / FP (jarak mendatar antara kedua ujung garis muat). Sebagai pendekatan, panjang garis air dapat dirumuskan sebagai fungsi dari Lpp sebesar 4%, yaitu:

$$Lwl = Lpp + (2 \text{ sampai } 4)\% Lpp \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

c. *Length of Displacement (Ldisp)*

Adalah panjang kapal imajiner yang terjadi karena adanya perpindahan fluida sebagai akibat dari tercelupnya badan kapal. Panjang *displacement* dirumuskan sebagai rata-rata antara Lpp dan Lwl, yaitu:

$$Ldisp = \frac{1}{2} (Lpp + Lwl) \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

d. *Length Over All (Loa)*

Adalah panjang keseluruhan kapal yang diukur dari ujung bagian belakang kapal sampai dengan ujung bagian depan badan kapal.

e. *Breadth* (B)

*Breadth* adalah lebar kapal yang merupakan jarak mendatar dari gading utama (*midship*) yang diukur pada bagian luar gading (tidak termasuk tebal pelat lambung).

f. *Depth* (H)

Tinggi geladak utama (*main deck*) kapal adalah jarak vertikal yang diukur pada bidang tengah kapal (*midship*) dari atas *keel* (lunas) sampai sisi atas geladak di sisi kapal.

g. *Draught / Draft* (T)

Sarat air kapal yaitu jarak vertikal yang diukur dari sisi atas lunas sampai dengan garis air / *waterline* pada bidang tengah kapal (*midship*).

h. *Service Speed* (Vs)

Kecepatan dinas adalah kecepatan operasional kapal saat berlayar di laut. Kecepatan dinas umumnya (60 sampai 80)% kecepatan maksimum.

i. *Displacement* ( $\Delta$ )

Merupakan berat keseluruhan badan kapal termasuk didalamnya adalah konstruksi badan kapal, permesinan dan sistemnya, elektrikal dan sistemnya, furnitur dan interior, *crew* dan bawasanya, logistik, bahan bakar, pelumas, air tawar dan muatan kapal. Dengan definisi diatas, satuan *displacement* adalah ton. *Displacement* dapat dirumuskan sebagai berikut

$$\Delta = \text{LWT} + \text{DWT} \quad \dots (2.3)$$

$$= \text{LWL} \times \text{B} \times \text{T} \times \text{Cb} \times \gamma_{\text{air laut}} \text{ (ton)} \quad \dots (2.4)$$

$$= \nabla \times \gamma_{\text{air laut}} \text{ (ton)} \quad \dots (2.5)$$

j. *Volume Displacement* ( $\nabla$ )

Adalah volume perpindahan fluida (air) sebagai akibat adanya bagian badan kapal yang tercelup di bagian bawah permukaan air, yang dirumuskan sebagai berikut:

$$\nabla = \text{Lwl} \times \text{B} \times \text{T} \times \text{Cb} \text{ (m}^3\text{)} \quad \dots (2.6)$$

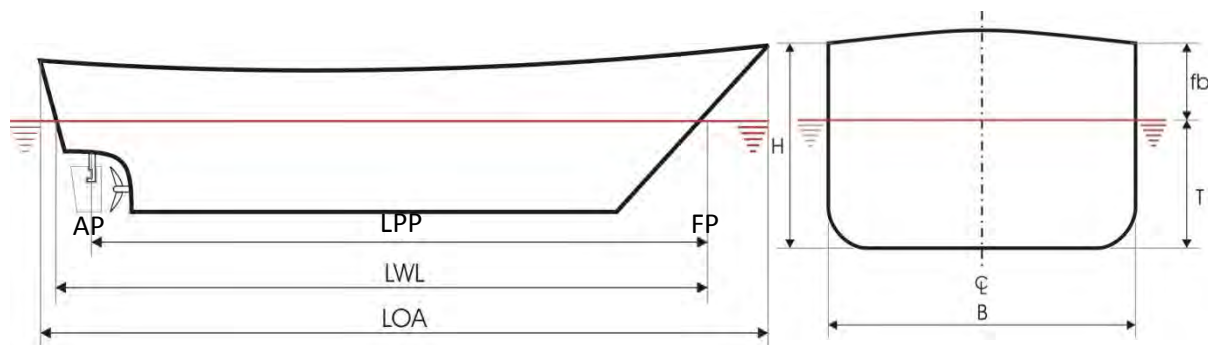
k. *Light Weight* (LWT)

Adalah berat komponen-komponen dalam kapal yang tidak berubah dalam fungsi waktu operasional kapal. Secara umum yang termasuk dalam LWT adalah berat-berat konstruksi badan kapal, mesin induk dan

sistemnya, mesin bantu dan sistemnya, pompa-pompa dan sistemnya, elektrik dan sistemnya, permesinan gladak, perlengkapan keselamatan, interior/*furniture* kapal, serta ditambah juga perlengkapan lainnya.

#### 1. *Dead Weight* (DWT)

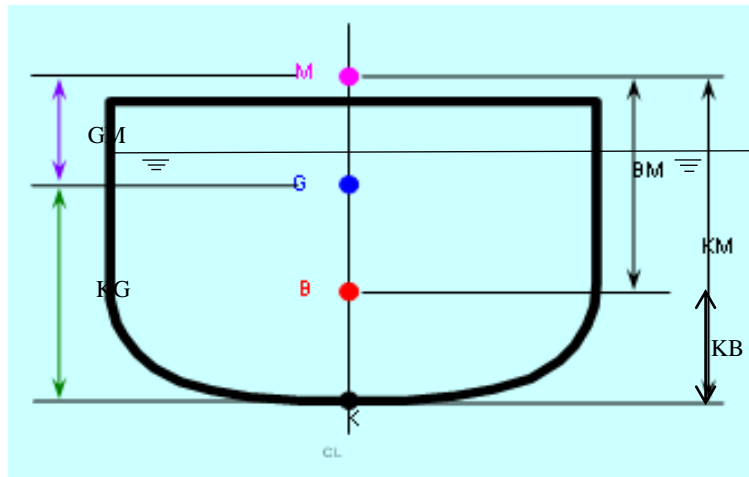
Adalah berat komponen-komponen dalam kapal yang bisa berubah dalam fungsi waktu operasional kapal. Secara umum yang termasuk dalam DWT adalah berat-berat muatan kapal, bahan bakar, pelumas, air tawar, bahan-bahan logistik, *crew* dan bawanya.



Gambar 2.1 Ukuran Utama Kapal (Sumber: Azkia, 2013)

#### 2.2.1.2 Stabilitas Kapal

Keseimbangan dari sebuah kapal atau yang biasa disebut dengan stabilitas, merupakan sifat atau kecenderungan dari sebuah kapal untuk kembali kepada kedudukan semula setelah mendapat senget (kemiringan) yang disebabkan oleh gaya-gaya dari luar. Stabilitas erat hubungannya dengan bentuk kapal, muatan, *draft* dan ukuran dari nilai tinggi metasentris. Kaitannya dengan bentuk dan ukuran, maka dalam menghitung stabilitas kapal sangat tergantung dari beberapa ukuran pokok yang berkaitan dengan dimensi pokok kapal. Menurut Hind (1967), titik penting dalam stabilitas antara lain adalah titik berat, titik apung dan titik metacentra yang dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Titik-titik Penting dalam Stabilitas Kapal

a. Titik Berat (*Centre of Gravity*)

Titik berat (*centre of gravity*) dikenal dengan titik G dari sebuah kapal, merupakan titik tangkap dari semua gaya-gaya yang menekan ke bawah terhadap kapal. Letak titik G ini di kapal dapat diketahui dengan meninjau semua pembagian bobot di kapal, makin banyak bobot yang diletakkan dibagian atas maka makin tinggilah letak titik G-nya.

Secara definisi titik berat (G) ialah titik tangkap dari semua gaya-gaya yang bekerja ke bawah. Letak titik G pada kapal kosong ditentukan oleh hasil percobaan stabilitas. Perlu diketahui bahwa, letak titik G tergantung daripada pembagian berat di kapal. Jadi selama tidak ada berat yang digeser, titik G tidak akan berubah walaupun kapal oleng atau mengangguk.

b. Titik Apung (*Centre of Buoyancy*)

Titik apung (*center of buoyancy*) dikenal dengan titik B dari sebuah kapal, merupakan titik tangkap dari resultan gaya-gaya yang menekan tegak ke atas dari bagian kapal yang terbenam dalam air. Titik tangkap B bukanlah merupakan suatu titik yang tetap, akan tetapi akan berpindah-pindah oleh adanya perubahan sarat dari kapal. Dalam stabilitas kapal, titik B inilah yang menyebabkan kapal mampu untuk tegak kembali setelah mengalami senget. Letak titik B tergantung dari besarnya senget kapal (bila senget berubah maka letak titik B akan berubah / berpindah). Bila kapal menyenget titik B akan berpindah kesisi yang rendah.



c. Titik Metacentra

Titik metasentris atau dikenal dengan titik M dari sebuah kapal, merupakan sebuah titik semu dari batas dimana titik G tidak boleh melewati di atasnya agar supaya kapal tetap mempunyai stabilitas yang positif (stabil). Meta artinya berubah-ubah, jadi titik metasentris dapat berubah letaknya dan tergantung dari besarnya sudut senget.

Apabila kapal senget pada sudut kecil (tidak lebih dari 15°), maka titik apung B bergerak disepanjang busur dimana titik M merupakan titik pusatnya dibidang tengah kapal (*centre of line*) dan pada sudut senget yang kecil ini perpindahan letak titik M masih sangat kecil, sehingga masih dapat dikatakan tetap.

Ada beberapa dimensi pokok dalam stabilitas kapal yaitu tinggi titik metasentris di atas lunas (KM), tinggi titik apung dari lunas (KB), jarak titik apung ke metasentris (BM), tinggi titik berat dari lunas (KG), tinggi metasentris (GM), momen penegak (*righting moment*) dan lengan penegak (*righting arms*), periode oleng (*rolling period*) dan pengaruh permukaan bebas (*free surface effect*).

a. Tinggi Titik Metasentris di atas Lunas (KM)

KM ialah jarak tegak dari lunas kapal sampai ke titik M, atau jumlah jarak dari lunas ke titik apung (KB) dan jarak titik apung ke metasentris (BM), sehingga KM dapat dicari dengan rumus :

$$KM = KB + BM \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

b. Tinggi Titik Apung dari Lunas (KB)

Letak titik B di atas lunas bukanlah suatu titik yang tetap, akan tetapi berpindah-pindah oleh adanya perubahan sarat atau senget kapal.

c. Jarak Iitik Apung ke Metasentris (BM)

BM dinamakan jari-jari metasentris atau *metacentris radius* karena bila kapal mengoleng dengan sudut-sudut yang kecil, maka lintasan pergerakan titik B merupakan sebagian busur lingkaran dimana M merupakan titik pusatnya dan BM sebagai jari-jarinya. Titik M masih bisa dianggap tetap karena sudut olengnya kecil (10°-15°).

d. Tinggi Titik Berat dari Lunas (KG)

Nilai KB untuk kapal kosong diperoleh dari percobaan stabilitas (*inclining experiment*), selanjutnya KG dapat dihitung dengan menggunakan dalil momen. Nilai KG dengan dalil momen ini digunakan bila terjadi pemuatan atau pembongkaran di atas kapal dengan mengetahui letak titik berat suatu bobot di atas lunas yang disebut dengan *vertical centre of gravity* (VCG) lalu dikalikan dengan bobot muatan tersebut sehingga diperoleh momen bobot tersebut, selanjutnya jumlah momen-momen seluruh bobot di kapal dibagi dengan jumlah bobot menghasilkan nilai KG pada saat itu.

e. Tinggi Metasentris (GM)

Tinggi metasentris atau *metacentris high* (GM) yaitu jarak tegak antara titik G dan titik M. Nilai GM inilah yang menunjukkan keadaan stabilitas awal kapal atau keadaan stabilitas kapal selama pelayaran nanti.

### **2.2.1.3 Komponen Hidrostatik Kapal dalam Analisis *Response Amplitude Operator* (RAO)**

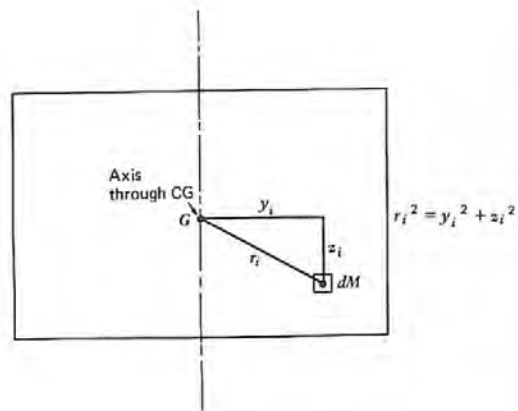
Dalam analisis *Response Amplitude Operator* (RAO) pada *software* Ansys AQWA, dibutuhkan *input-an* beberapa komponen hidrostatik dari kapal seperti tinggi titik berat dari lunas (KG), tinggi titik apung dari lunas (KB), jari-jari girasi, *displacement* ( $\Delta$ ), *volume displacement* ( $\nabla$ ), *longitudinal centre of gravity* (LCG) dan *transverse centre of gravity* (TCG).

a. Jari-jari Girasi

Dalam dunia *engineering*, jari-jari girasi sering diaplikasikan dalam berbagai keadaan. Misalnya untuk *structure engineering* dan *naval architect*. Pengertian jari-jari girasi adalah jarak yang menunjukkan distribusi massa (atau area) dari benda tersebut. Jari-jari girasi juga sering digunakan dalam dunia teknik perkapalan / *naval architect*. Karena kapal memiliki 6 DoF (*Degree of Freedom*) / 6 derajat kebebasan, maka jari-jari girasi kapal dapat dilihat pada Gambar 2.3 –2.5.

1. Jari-jari girasi *rolling* ( $K_{xx}$ )

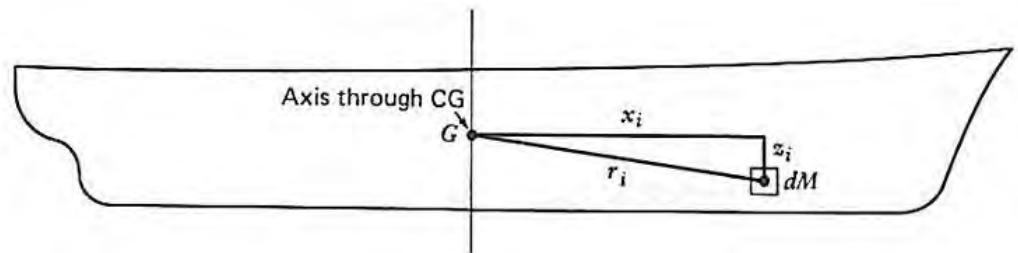
Jari-jari girasi kapal untuk *rolling* ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Jari-jari Girasi *Rolling* (Sumber: Bhattacharyya, 1978)

2. Jari-jari girasi *pitching* ( $K_{yy}$ )

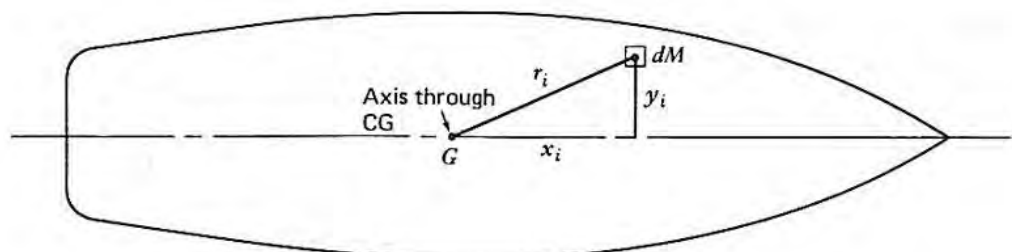
Jari-jari girasi kapal untuk *pitching* ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Jari-jari Girasi *Pitching* (Sumber: Bhattacharyya, 1978)

3. Jari-jari girasi *yawing* ( $K_{zz}$ )

Jari-jari girasi kapal untuk *yawing* ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Jari-jari Girasi *Yawing* (Sumber: Bhattacharyya, 1978)

Jari-jari girasi ini adalah akar jarak antara *centre of gravity* dengan bagian dari objek yang ditinjau. Jari-jari girasi berguna untuk mengetahui nilai kekuatan dan kekakuan atau *stiffness* dari sebuah struktur dalam hal ini kapal karena pada daerah ini mempunyai *bending moment* maksimum.

Untuk kapal yang tidak diketahui distribusi massa solidnya, maka jari-jari girasi ditentukan dengan menggunakan pendekatan sebagai berikut:

$$K_{xx} \approx 0,30B - 0,40B \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

$$K_{yy} \approx 0,22L - 0,28L \quad \dots\dots\dots (2.9)$$

$$K_{zz} \approx 0,22L - 0,28L \quad \dots\dots\dots (2.10)$$

dimana:

B = Lebar kapal

L = Panjang kapal

Dalam BV (2001), jari-jari girasi dirumuskan:

$$K_{xx} = 0,289 \times B \times \left( 1,0 + \left( \frac{2KG}{B} \right)^2 \right) \quad \dots\dots\dots (2.11)$$

$$K_{yy} \text{ dan } K_{zz} = \sqrt{\frac{1}{12}} \times L \quad \dots\dots\dots (2.12)$$

b. *Longitudinal Centre of Gravity* (LCG)

Pada arah memanjang kapal, posisi titik berat kapal adalah jaraknya terhadap garis tegak buritan atau *After Perpendicular* (AP) yang biasa disebut dengan istilah LCG (*Longitudinal Centre of Gravity*).

c. *Transverse Centre of Gravity* (TCG)

Pada arah melintang kapal, posisi titik berat kapal adalah jaraknya terhadap bidang tengah kapal (*midship*) yang dikenal dengan sebutan TCG (*Transverse Centre of Gravity*).

**2.2.2 Floating Storage and Offloading System (FSO)**

*Floating storage* adalah *offshore floating vessel* yang digunakan untuk persediaan minyak mentah atau gas. *Vessel* ini digunakan di lokasi lepas pantai dan biasanya disertai dengan *offloading vessel*, yang juga dapat disebut sebagai *floating storage and offloading* (FSO). Kegunaan utama *vessel* ini adalah untuk penyimpanan hidrokarbon dan juga dapat disebut sebagai

*floating production, storage and offloading* (FPSO) sederhana. Minyak dan gas yang ada di dalam tangki FSO disalurkan atau ditransportasikan menggunakan *shuttle tanker*. FSO tidak memiliki unit pengolahan minyak dan pada dasarnya adalah sebuah kapal *tanker* minyak yang besar atau dikenal sebagai *supertanker*. Yang membedakan FSO dengan kapal *tanker* adalah sistem operasinya dimana FSO tidak berlayar seperti *tanker* melainkan keadaannya tertambat. Ciri umum FSO adalah:

- a. Konstruksi gading-gading lebih kuat daripada kapal dengan ukuran yang sama, disebabkan adanya beban di atas *deck* yang sangat besar.
- b. Tempat akomodasi lebih besar, terdapat hampir sekitar 300 orang tinggal di atasnya (*living quarter*).

Spesifikasi yang harus dimiliki sebuah FSO adalah sebagai berikut:

- a. Tipe dari FPS,
- b. Lapangan yang menyebar,
- c. Kedalaman air dimana FSO ditempatkan,
- d. Ukuran FSO adalah *deadweight tonnage*,
- e. Kapasitas penyimpanan FSO adalah barel,
- f. Catatan waktu dalam persentase,
- g. Status dari FSO yaitu sewa atau dimiliki,
- h. Jumlah *riser*,
- i. FSO tidak memiliki kemampuan pengolahan sehingga tidak ada spesifikasi untuk minyak, gas atau air injeksi.

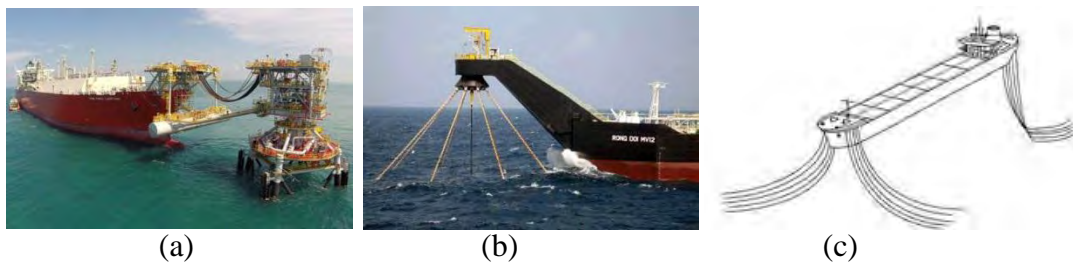
FSO (*Floating Storage and Offloading*), merupakan suatu bangunan terapung / kapal yang digunakan sebagai tempat untuk menyimpan *crude oil*. *Crude oil* ini biasanya dari FPS atau FPU yang ditransfer ke FSO melalui sistem *submerged turret loading* (STL), kemudian di *export / offload* ke *shuttle tanker* melalui *flexible hoses* pada bagian belakang FSO. Salah satu contoh FSO dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 *Floating Storage and Offloading System (FSO)* (Sumber: PT. PHE ONWJ, 2013)

### 2.2.3 Sistem Tambat

Sistem tambat pada prinsipnya berfungsi untuk mengamankan kapal agar posisinya tetap pada tempatnya. Pada FSO, sistem tambat dikategorikan menjadi dua jenis yaitu *weathervaning* dan *non-weathervaning*. Yang termasuk dalam sistem tambat *weathervaning* adalah *single point mooring (SPM)*, *turret mooring system* dan *tower yoke mooring system*. Sedangkan sistem tambat *non-weathervaning* adalah *spread mooring* dan *jetty mooring system*. Ilustrasi dari jenis-jenis sistem tambat dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Sistem Tambat Kapal (a) *Tower Yoke Mooring System*; (b) *Turret Mooring System*; (c) *Spread Mooring* (Sumber: [www.sofec.com](http://www.sofec.com), 2012)

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

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

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

Ada beberapa macam tipe dari SPM (Barltrop, 1998), diantaranya ditunjukkan pada Gambar 2.8 sampai dengan Gambar 2.14.

a. *Fixed Tower*



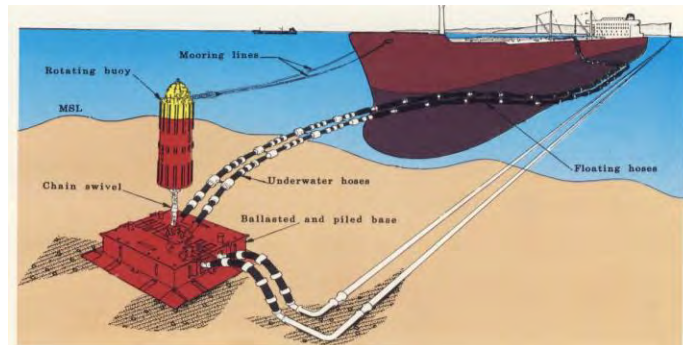
Gambar 2.8 *Fixed Tower* (Sumber: Helmidadang, 2012)

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



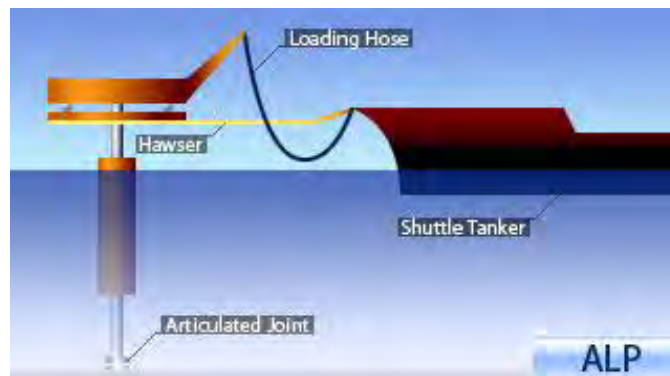
Gambar 2.9 *Catenary Anchor Leg Mooring (CALM) buoy* (Sumber: Helmidadang, 2012)

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



Gambar 2.10 *Single Anchor Leg Mooring (SALM) buoy* (Sumber: Helmidadang, 2012)

d. *Articulated Loading Platform (ALP)*



Gambar 2.11 *Articulated Loading Platform (ALP)* (Sumber: Helmidadang, 2012)

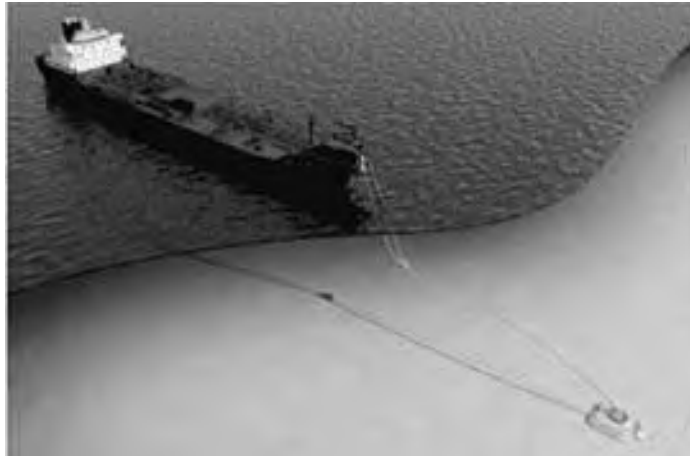
e. *Single Point and Reservoir (SPAR)*



Gambar 2.12 *Single Point and Reservoir (SPAR)* (Sumber: Helmidadang, 2012)



f. *Single Anchor Loading (SAL)*



Gambar 2.13 *Single Anchor Loading (SAL)* (Sumber: Helmidadang, 2012)

g. *Turret Mooring*



Gambar 2.14 *Turret Mooring* (Sumber: Helmidadang, 2012)

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

a. Tubuh pelampung

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

b. *Mooring* (Tambat atau Elemen Penahan)

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

Komponen *mooring* terbagi atas:

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

c. Sistem transfer

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

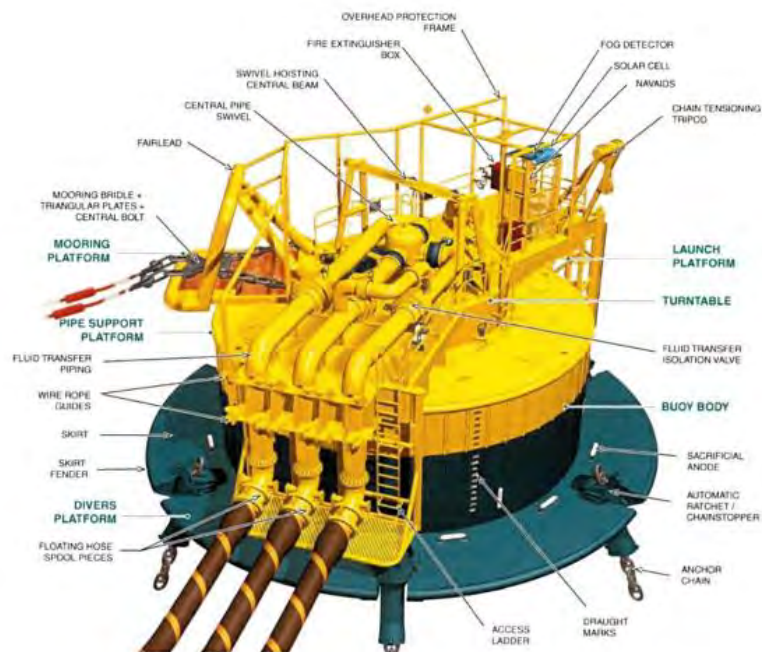
Komponen sistem transfer produk dari dasar laut adalah

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

cairan yang akan diambil dari dasar laut. *Swivel* dilengkapi dengan pengaturan segel ganda untuk meminimalkan kemungkinan kebocoran produk ke lingkungan.

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

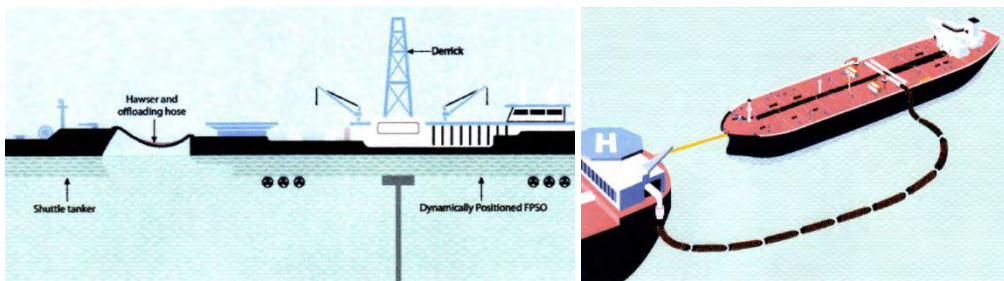
Pada tugas akhir ini dilakukan analisis menggunakan *single point mooring* (SPM) tipe *catenary anchor leg mooring* (CALM) yang bernama SPM 3 milik PT. PHE ONWJ yang ditunjukkan pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15 Gambaran Sistem CALM pada SPM 3 (Sumber: PT. PHE ONWJ, 2013)

#### 2.2.4 Sistem *Tandem Offloading*

Proses *offloading* adalah proses pemindahan muatan berupa minyak atau gas (hidrokarbon) dari penyimpanan sementara seperti FSO / FPSO menuju *shuttle tanker* untuk disalurkan ke daratan. Di dalam proses *offloading* FSO, ada dua sistem yaitu *side by side* dan *tandem*. *Side by side offloading* merupakan sistem dimana *shuttle tanker* berada tepat di samping FSO pada saat proses *offloading* FSO dilakukan. *Tandem offloading* merupakan sistem *offloading* dimana *shuttle tanker* berada di belakang FSO dengan jarak yang telah ditentukan yang ilustrasinya dapat dilihat pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16 *Tandem Offloading System* (Sumber: Oil Companies International Marine Forum, 2009)

*Offloading* FSO umumnya dilakukan menggunakan konfigurasi *tandem*, yang berarti bahwa *shuttle tanker* diposisikan pada jarak tertentu di belakang FSO. Kedua kapal secara fisik dihubungkan dengan *hawser rope*. *Shuttle tanker* tersebut juga dihubungkan dengan kapal *AHTS vessel* supaya tidak membebani FSO pada saat *offloading*. Dalam sistem *tandem offloading* menggunakan *shuttle tanker* akan mudah sekali terjadi tabrakan yang disebabkan oleh putusanya *hawser* penyambung antara FSO dengan *shuttle tanker*. Di dalam penelitian Jos van Doorn dijelaskan bahwa *shuttle tanker* digunakan pada *turret mooring* dan hanya mensimulasikan pada kondisi gelombang dan *low frequency motion*.

Sistem *tandem* hanya dapat digunakan untuk transfer muatan berupa minyak, sedangkan untuk transfer gas harus dilakukan dengan sistem *side by side*.

Pada tugas akhir ini, akan dibahas studi kasus mengenai sistem *tandem offloading* FSO Arco Ardjuna dengan *shuttle tanker* yang dihubungkan dengan *hawser*.

### 2.2.5 Teori *Mooring Line*

Berdasarkan API-RP2SK 3<sup>rd</sup> edition (2005), *mooring line* pada *vessel* yang ditambat dapat dibuat dari *chain*, *wire rope*, *synthetic rope* atau kombinasinya. Tipe *mooring line* yang digunakan pada *floating structure* dibagi menjadi 3 kategori, yaitu:

- a. 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.
- b. 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. Akan tetapi, karena *chain* memiliki berat yang besar maka rantai tidak terlalu digunakan pada kondisi operasi perairan laut dalam.
- c. Kombinasi antara *chain* dan *wire rope*. Dengan pemilihan panjang yang tepat dari gabungan antara *wire rope* dan *chain*, maka akan diperoleh sistem *mooring* yang menguntungkan, yaitu *pretension* yang rendah, *restoring force* yang tinggi dan *holding anchor* yang lebih besar dan daya tahan terhadap abrasi dasar laut yang bagus. Hal tersebut membuat sistem ini cocok digunakan pada operasi laut dalam.

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.

### 2.2.6 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 API-RP2SK 3<sup>rd</sup> edition (2005), metode analisis simulasi domain pada bangunan lepas pantai dibagi menjadi dua, yaitu:

- a. *Frequency Domain Analysis*

*Frequency domain analysis* adalah simulasi kejadian pada saat tertentu dengan interval frekuensi yang telah ditentukan sebelumnya. Metode ini bisa digunakan untuk memperkirakan respon gelombang acak, seperti gerakan dan percepatan *platform*, gaya tendon dan sudut. Keuntungan metode ini adalah tidak membutuhkan banyak waktu untuk perhitungan, *input* dan *output* juga lebih sering digunakan oleh perancang. Kekurangannya adalah untuk setiap persamaan *non-linear* harus diubah menjadi *linear*. Pada *frequency domain analysis*, keseimbangan dinamik dari sistem *linear* dapat diformulasikan dengan persamaan (2.13).

$$M(\omega)r + C(\omega)r + K(\omega)r = Xei\omega t \dots\dots\dots (2.13)$$

dengan:

$M(\omega)$  : Matriks massa fungsi frekuensi (ton)

$C(\omega)$  : Matriks *damping* fungsi frekuensi (ton/s)

$K(\omega)$  : Matriks 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)

b. *Time Domain Analysis*

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

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

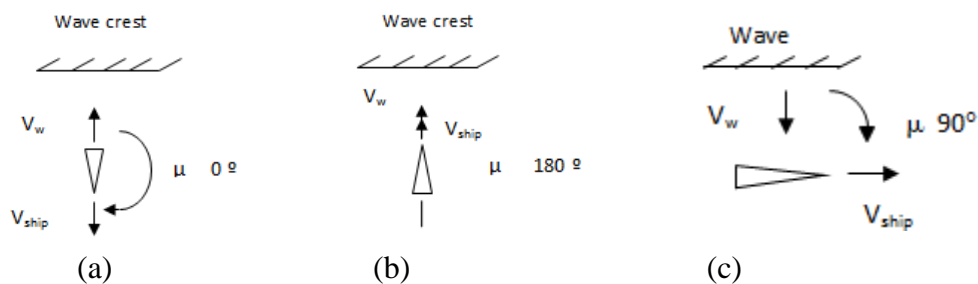
### 2.2.7 Heading (Arah) Kapal terhadap Arah Gelombang

Pada saat bangunan laut berada pada lokasi operasinya, baik dalam mode stasioner, diam di tempat, maupun dalam mode melaju dengan kecepatan untuk berpindah-pindah lokasi, akan menghadapi gelombang yang dapat berpropagasi dari berbagai arah. Perbedaan arah eksitasi gelombang akan mempunyai dampak intensitas gerakan yang berbeda-beda dalam enam derajat kebebasan.

Arah gelombang,  $\mu$ , didefinisikan sebagai sudut antara arah propagasi gelombang dengan arah laju bangunan laut. Arah gelombang  $\mu$  sebesar  $0^\circ$  ditetapkan bila arah propagasi gelombang berlawanan dengan arah laju bangunan laut. Sebaliknya, bila arah propagasi gelombang sama dengan arah melajunya bangunan laut, maka ditetapkan sebagai  $\mu = 180^\circ$ . Dengan kata lain  $\mu = 0^\circ$  adalah sama dengan gelombang yang datang dari arah haluan bangunan laut, sedangkan  $\mu = 180^\circ$  adalah gelombang yang datang dari arah buritan. Mengikuti kedua definisi tersebut mudalah kemudian ditetapkan bahwa sudut gelombang  $\mu = 90^\circ$  adalah bila datang dari arah sisi dan tegak lurus terhadap sumbu memanjang bangunan laut.

Ada beberapa istilah yang lazim digunakan untuk menjelaskan arah gelombang datang. Pertama gelombang yang mempunyai arah  $\mu = 0^\circ$  adalah lazim diistilahkan sebagai *head seas* atau gelombang haluan. Kedua, gelombang yang mempunyai arah  $\mu = 180^\circ$  adalah lazim diistilahkan sebagai *following seas*, yaitu gelombang buritan. Ketiga, gelombang yang mempunyai arah  $\mu = 90^\circ$  lazim diistilahkan sebagai *beam seas* atau gelombang sisi.

Arah kapal terhadap arah gelombang untuk kondisi *head seas*, *following seas* dan *beam seas* digambarkan pada Gambar 2.17.



Gambar 2.17 Definisi Arah Datang Gelombang terhadap Heading Kapal (a) *Head Seas*; (b) *Following Seas*; (c) *Beam Seas* (Sumber: Bhattacharyya, 1978)



### 2.2.8 Teori Gerak Kapal

Gerakan kapal adalah gerakan *oscillasi* dari sebuah kapal dimana kapal tersebut dianggap sebagai berikut:

1. Kapal dianggap sebagai benda yang benar-benar padat (*perfectly rigid body*).
2. Terapung dipermukaan air baik dalam keadaan tenang (*still water*) maupun dalam keadaan bergoyang (*disturbed water*).

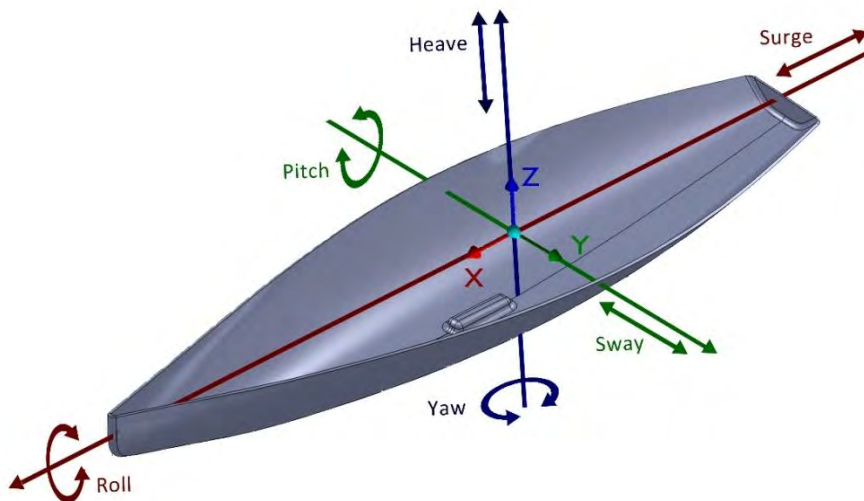
Ada tiga macam gerakan kapal yang merupakan gerakan kapal pokok, yaitu:

1. *Rolling* : yaitu gerakan *oscillasi rotational* terhadap sumbu *longitudinal* (sumbu x).
2. *Pitching* : yaitu gerakan *oscillasi rotational* terhadap sumbu *transversal* (sumbu y).
3. *Heaving* : yaitu gerakan *oscillasi translasi* terhadap sumbu *vertical* (sumbu z).

Disamping ketiga macam gerakan pokok di atas, masih ada tiga macam gerakan kapal lainnya yang terjadi kadang kala bersama-sama dengan gerakan-gerakan kapal pokok tadi. Ketiga gerakan kapal yang bukan merupakan gerakan pokok tersebut adalah:

1. *Surging* : yaitu gerakan *oscillasi translasi* terhadap sumbu *longitudinal* (sumbu x).
2. *Swaying* : yaitu gerakan *oscillasi translasi* terhadap sumbu *transversal* atau melintang kapal (sumbu y).
3. *Yawing* : yaitu gerakan *oscillasi rotational* terhadap sumbu *vertical* (sumbu z).

Dalam kenyataannya, kapal yang berlayar akan mengalami kombinasi dari gerakan-gerakan tersebut di atas. Untuk ilustrasi dari gerakan-gerakan tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.18.



Gambar 2.18 Gerakan *Translasi* dan *Rotational* pada Kapal

Sehingga gerakan kapal di atas dapat dikelompokkan menjadi sebagai berikut:

1. Gerak *oscillasi translasi*, yaitu:
  - a. *Surging*
  - b. *Swaying*
  - c. *Heaving*
2. Gerak *oscillasi rotational*, yaitu:
  - a. *Rolling*
  - b. *Pitching*
  - c. *Yawing*

### 2.2.9 Gerakan *Surge* Murni (*Uncouple Surging Motion*)

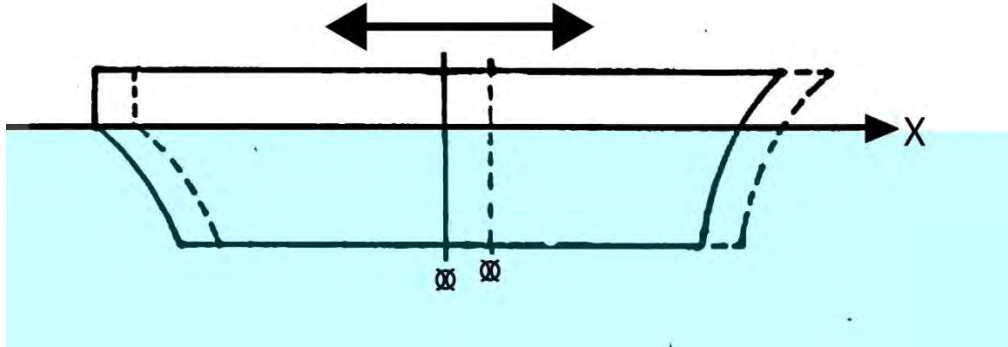
*Surge* merupakan gerakan *oscillasi translasi* kapal dengan sumbu *longitudinal* (sumbu x) sebagai pusat gerak dimana ilustrasi dari gerakan ini ditunjukkan pada Gambar 2.19. Persamaan umum pada kapal kondisi *surging* adalah:

$$a\ddot{x} + b\dot{x} + cx = F_o \cos \omega_e t \quad \dots\dots\dots (2.14)$$

dengan:

- $a\ddot{x}$  : *Inertial force* (N)
- $b\dot{x}$  : *Damping force* (N)

$cx$  : Restoring force (N)  
 $F_0 \cos \omega_e t$  : Exciting force (N)



Gambar 2.19 Ilustrasi Gerakan *Surging* (Sumber: Murtedjo, 1990)

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

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

Variable  $a$  adalah masa dari struktur bangunan apung sedangkan  $\ddot{x}$  adalah percepatan gerak *surge* atau turunan kedua dari jarak perpindahan *surge* ( $m/s^2$ ). *Inertial force* merupakan percepatan gerakan secara kontinu dari fluida yang terjadi, gaya yang lebih besar dari massa percepatan waktu kapal (Bhattacharyya, 1978).

$$a \frac{d^2x}{dt^2} = \text{massa kapal} + \text{massa tambah} \dots\dots\dots (2.15)$$

$$a \frac{d^2x}{dt^2} = M \frac{d^2x}{dt^2} + a_x \frac{d^2x}{dt^2} \dots\dots\dots (2.16)$$

dengan:

$M$  : Massa dari kapal (ton)

$a_x$  : Massa tambah (ton)

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

Variabel  $b$  adalah koefisien redaman struktur sedangkan  $\dot{x}$  adalah kecepatan *surging* atau turunan pertama dari jarak perpindahan *surge* (m/s). *Damping coefficient* untuk *surging* dapat dicari dengan cara eksperimen ataupun pendekatan *strip theory* yang ditentukan oleh tiap *station* dan diintegrasikan sebanyak *station* di kapal.

3. *Restoring Force (cx)*

Variable *c* adalah koefisien gaya pengembali sedangkan *x* adalah jarak perpindahan gerakan *surge* (m). *Restoring force* untuk *surging* diberikan sebagai tambahan gaya *bouyancy* kapal ketika di bawah permukaan air. Sehingga *restoring force* diberikan sebagai jumlah *displacement* air atau berat spesifik tambahan pada volume tercelup.

4. *Exciting Force (F)*

*Exciting force* merupakan total momen yang menyebabkan gerakan *surge* pada bangunan apung. Gaya ini merupakan gaya gelombang yang mengenai struktur, untuk struktur dengan  $D / \lambda < 0,2$  gaya gelombang dapat dicari dengan menggunakan teori morison sedangkan untuk  $D / \lambda > 0,2$  dapat menggunakan teori difraksi. Gaya eksitasi pada *surging* adalah pengintegrasian dari penambahan *buoyancy* karena gelombang melewati sepanjang kapal sehingga dapat dirumuskan:

$$F = F_0 \cos \omega_e t \dots\dots\dots (2.17)$$

dengan:

- $F_0$  : Amplitudo gaya eksitasi (m)
- $\omega_e$  : Frekuensi gelombang *encountering* (rad/sec)

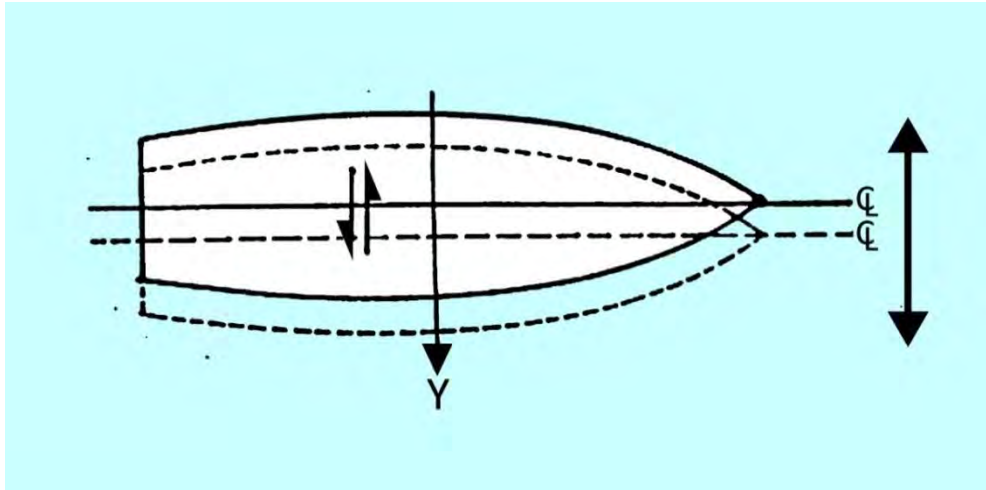
**2.2.10 Gerakan Sway Murni (*Uncouple Swaying Motion*)**

*Sway* merupakan gerakan *oscilasi translasi* kapal dengan sumbu *transversal* atau melintang kapal (sumbu *y*) sebagai pusat gerak yang ilustrasinya dapat dilihat pada Gambar 2.20. Persamaan umum kapal pada kondisi *swaying* adalah:

$$a\ddot{y} + b\dot{y} + cy = F_0 \cos \omega_e t \dots\dots\dots (2.18)$$

dengan:

- $a\ddot{y}$  : *Inertial force* (N)
- $b\dot{y}$  : *Damping force* (N)
- $cy$  : *Restoring force* (N)
- $F_0 \cos \omega_e t$  : *Exciting force* (N)



Gambar 2.20 Ilustrasi Gerakan *Swaying* (Sumber: Murtedjo, 1990)

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

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

Merupakan percepatan gerakan secara kontinu dari fluida yang terjadi, gaya yang lebih besar dari massa percepatan waktu kapal (Bhattacharyya, 1978). Variabel  $a$  adalah masa dari struktur bangunan apung sedangkan  $\ddot{y}$  adalah percepatan gerak *sway* atau turunan kedua dari jarak perpindahan *sway* ( $m/s^2$ ).

$$a \frac{d^2y}{dt^2} = \text{massa kapal} + \text{massa tambah} \dots\dots\dots (2.19)$$

$$a \frac{d^2y}{dt^2} = M \frac{d^2y}{dt^2} + a_y \frac{d^2y}{dt^2} \dots\dots\dots (2.20)$$

dengan:

$M$  : Massa dari kapal (ton)

$a_y$  : Massa tambah (ton)

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

*Damping force* selalu bergerak berlawanan arah dari gerakan kapal dan menyebabkan redaman yang berangsur-angsur pada amplitudo gerakan. Variabel  $b$  adalah koefisien redaman struktur sedangkan  $\dot{y}$  adalah kecepatan *swaying* atau turunan pertama dari jarak perpindahan *sway* ( $m/s$ ). *Damping coefficient* untuk *swaying* dapat dicari dengan cara eksperimen ataupun pendekatan *strip theory* yang ditentukan oleh tiap *station* dan diintegrasikan sebanyak *station* di kapal.

3. *Restoring Force (cy)*

Variabel  $c$  adalah koefisien gaya pengembali sedangkan  $y$  adalah jarak perpindahan gerakan *sway* (m). *Restoring force* untuk *swaying* diberikan sebagai tambahan gaya *bouyancy* kapal ketika di bawah permukaan air. Sehingga *restoring force* diberikan sebagai jumlah *displacement* air atau berat spesifik tambahan pada volume tercelup.

4. *Exciting Force (F)*

*Exciting force* merupakan gaya total yang menyebabkan gerakan *sway* pada bangunan apung. Gaya ini merupakan gaya gelombang yang mengenai struktur, untuk struktur dengan  $D / \lambda < 0,2$  gaya gelombang dapat dicari dengan menggunakan teori morison sedangkan untuk  $D / \lambda > 0,2$  dapat menggunakan teori difraksi. Gaya eksitasi pada *swaying* adalah pengintegrasian dari penambahan *buoyancy* karena gelombang melewati sepanjang kapal sehingga dapat dirumuskan:

$$F = F_o \cos \omega_e t \quad \dots\dots\dots (2.21)$$

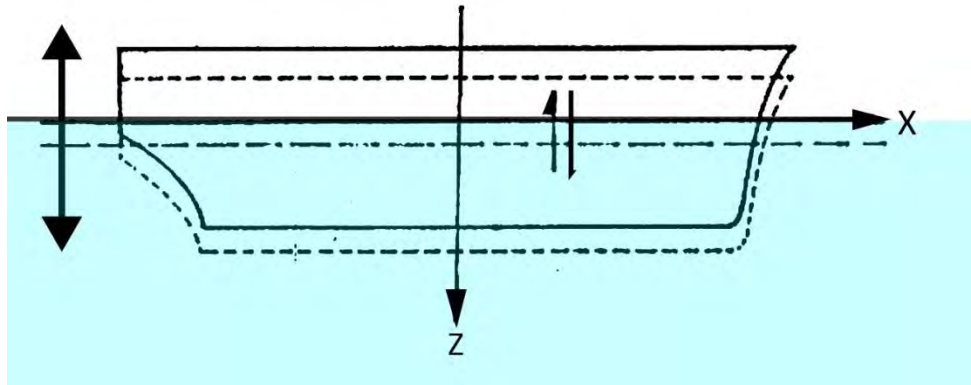
dengan:

$F_o$  : Amplitudo gaya eksitasi (m)

$\omega_e$  : Frekuensi gelombang *encountering* (rad/sec)

**2.2.11 Gerakan *Heave Murni (Uncouple Heaving Motion)***

*Heave* merupakan gerakan *oscillasi translasi* kapal dengan sumbu *vertical* (sumbu  $z$ ) sebagai pusat gerak 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. Ilustrasi gerakan *heave* dapat dilihat pada Gambar 2.21.



Gambar 2.21 Ilustrasi Gerakan *Heaving* (Sumber: Murtedjo, 1990)

Dapat dituliskan persamaan umum pada kapal kondisi *heaving* adalah:

$$a\ddot{z} + b\dot{z} + cz = F_0 \cos \omega_e t \quad \dots\dots\dots (2.22)$$

dengan:

- $a\ddot{z}$  : *Inertial force* (N)
- $b\dot{z}$  : *Damping force* (N)
- $cz$  : *Restoring force* (N)
- $F_0 \cos \omega_e t$  : *Exciting force* (N)
- $\omega_e$  : Frekuensi gelombang *encountering* (rad/sec)

Empat elemen penting dalam gerakan *heave*, yaitu:

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

Variable  $a$  adalah masa dari struktur bangunan apung sedangkan  $\ddot{z}$  adalah percepatan gerak *heave* atau turunan kedua dari jarak perpindahan *heave* ( $m/s^2$ ). Percepatan gerakan secara kontinu dari fluida yang terjadi, gaya yang lebih besar dari massa percepatan waktu kapal (Bhattacharyya, 1978).

$$a \frac{d^2 z}{dt^2} = \text{massa kapal} + \text{massa tambah} \quad \dots\dots\dots (2.23)$$

$$a \frac{d^2 z}{dt^2} = M \frac{d^2 z}{dt^2} + a_y \frac{d^2 z}{dt^2} \quad \dots\dots\dots (2.24)$$

dengan:

- $M$  : Massa dari kapal (ton)
- $a_y$  : Massa tambah (ton)

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

Variable  $b$  adalah koefisien redaman struktur sedangkan  $\dot{z}$  adalah kecepatan *heaving* atau turunan pertama dari jarak perpindahan *heave* (m/s). *Damping coefficient* untuk *heaving* dapat dicari dengan *experiment* ataupun pendekatan *strip theory* yang ditentukan oleh tiap *station* dan diintegrasikan sebanyak *station* di kapal. *Damping force* selalu bergerak berlawanan arah dari gerakan kapal dan menyebabkan redaman yang berangsur-angsur pada amplitudo gerakan.

$$F_b = -b \frac{dz}{dt} = b \cdot \dot{z} \dots\dots\dots (2.25)$$

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

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

3. *Restoring Force* ( $cz$ )

*Restoring force* adalah gaya pengembali yang diakibatkan oleh kekakuan dari struktur atau dalam hal bangunan apung kekakuannya adalah kekakuan hidrostatis. Kekakuan hidrostatis muncul akibat adanya gangguan eksternal yang merubah nilai *buoyancy* secara tiba-tiba sehingga mengganggu keseimbangan sistem. Sistem yang tidak seimbang secara tiba-tiba pula akan mencari titik setimbangnya, hal inilah yang menyebabkan seolah-olah kembali ke posisi awal saat terjadi gerakan *heaving*. Variable  $c$  adalah koefisien gaya pengembali sedangkan  $z$  adalah jarak perpindahan gerakan *heaving* (m). *Restoring force* untuk *heaving* diberikan sebagai tambahan gaya *bouyancy* kapal ketika di bawah permukaan air. Sehingga *restoring force* diberikan sebagai jumlah *displacement* air atau berat spesifik tambahan pada volume tercelup.

$$cz = \rho \cdot g \cdot A_{wp} \cdot z = \rho \cdot g \cdot L \cdot B \cdot C_{wp} \cdot z \dots\dots\dots (2.14)$$

dengan:

- $A_{wp}$ : *Water plane area* ( $m^2$ )
- $z$  : Simpangan gerak *heaving* (m)
- $C_{wp}$ : Koefisien *water plane area*



$\rho$  : Massa jenis air laut (1025 kg/ m<sup>3</sup>)

$g$  : Kecepatan gravitasi (9,81 m/s<sup>2</sup>)

#### 4. *Exciting Force (F)*

*Exciting force* merupakan total momen yang menyebabkan gerakan *heave* pada bangunan apung. Gaya ini merupakan gaya gelombang yang mengenai struktur, untuk struktur dengan  $D / \lambda < 0,2$  gaya gelombang dapat dicari dengan menggunakan teori morison sedangkan untuk  $D / \lambda > 0,2$  dapat menggunakan teori difraksi. Gaya eksitasi pada *heaving* adalah pengintegrasian dari penambahan *buoyancy* karena gelombang melewati sepanjang kapal sehingga dapat dirumuskan:

$$F = F_o \cos \omega_e t \quad \dots\dots\dots (2.27)$$

dengan:

$F_o$  : Amplitudo gaya eksitasi (m)

$\omega_e$  : Frekuensi gelombang *encountering* (rad/sec)

#### 2.2.12 Gerakan *Roll Murni (Uncouple Rolling Motion)*

*Roll* merupakan gerakan *oscillasi rotational* kapal dengan sumbu *longitudinal* (sumbu x) sebagai pusat gerak. Kapal menjalani gerakan harmonis sederhana terhadap koordinat *axis* secara transversal maupun longitudinal. Gerakan ini akan berpengaruh terhadap *initial velocity* sehingga perlu dilakukan perhitungan terhadap momen gaya. Ilustrasi gerakan *roll* dapat dilihat pada Gambar 2.22.

Rumus umum dari persamaan gerak akibat *rolling* ialah:

$$a\ddot{\phi} + b\dot{\phi} + c\phi = M_o \cos \omega_e t \quad \dots\dots\dots (2.28)$$

dengan:

$M_o$  : Amplitudo momen eksitasi (m)

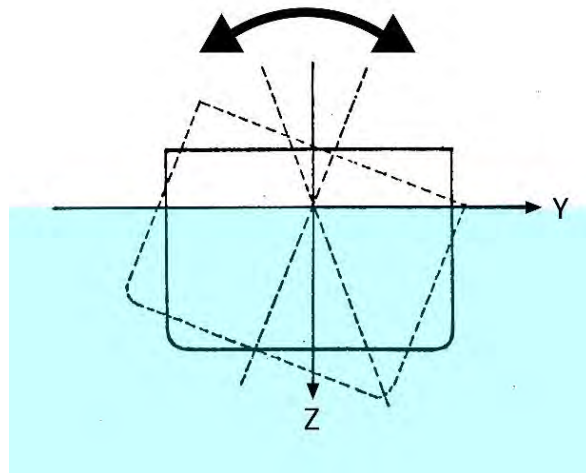
$\omega_e$  : Frekuensi gelombang *encountering* (rad/sec)

$a\ddot{\phi}$  : *Inertial Moment* (Nm)

$b\dot{\phi}$  : *Damping Moment* (Nm)

$c\phi$  : *Restoring Moment* (Nm)

$M_o \cos \omega_e t$  : *Exciting Moment* (Nm)



Gambar 2.22 Ilustrasi Kondisi *Rolling* (Sumber: Murtedjo, 1990)

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

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

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

$$a = I_{xx} + \delta I_{xx} \quad \dots\dots\dots (2.29)$$

$$a = \frac{\Delta}{g} k_{xx}^2 + \delta I_{xx} \quad \dots\dots\dots (2.30)$$

dengan:

$\delta I_{xx}$  : Moment inertia massa tambah untuk gerakan *rolling* ( $\text{m}^4$ )

$k_{xx}^2$  : Kuadrat dari jari-jari girasi pada kondisi *rolling* ( $\text{m}^2$ )

$I_{xx}$  : Moment inersia massa kapal ( $\text{m}^4$ )

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

$$0,33B \leq k_{xx}^2 \leq 0,45B \quad \dots\dots\dots (2.31)$$

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

*Damping coefficient* adalah koefisien redaman struktur dan  $b \frac{d\phi}{dt}$  merupakan momen redaman dimana  $\dot{\phi}$  adalah kecepatan sudut *rolling* atau turunan pertama dari sudut *rolling* (rad/s). *Damping coefficient* untuk *rolling* dapat dicari dengan *experiment* ataupun pendekatan *strip theory* yang ditentukan oleh tiap *station* dan diintegrasikan sebanyak *station* di kapal.

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

*Restoring moment* adalah momen pengembali yang diakibatkan oleh kekakuan dari struktur atau dalam hal bangunan apung kekakuannya adalah kekakuan hidrostatis. Kekakuan hidrostatis muncul akibat adanya gangguan eksternal yang merubah nilai *buoyancy* secara tiba-tiba sehingga mengganggu keseimbangan sistem. Sistem yang tidak seimbang secara tiba-tiba pula akan mencari titik setimbangnya, hal inilah yang menyebabkan seolah-olah kembali ke posisi awal saat terjadi gerakan *rolling*. Variable  $c$  adalah koefisien momen pengembali sedangkan  $\phi$  adalah sudut gerakan *rolling* (rad). *Restoring moment* untuk *rolling* dapat dihitung dengan persamaan sederhana sebagai berikut:

$$c\phi = \Delta \overline{GZ} \quad \dots\dots\dots (2.32)$$

Untuk sudut kecil,

$$c\phi \approx \Delta \overline{GM}_T \sin \phi \quad \dots\dots\dots (2.33)$$

$$c\phi = \rho g \nabla \overline{GM}_T \phi \quad \dots\dots\dots (2.34)$$

sehingga diperoleh koefisien momen pengembali

$$c = \rho g \nabla \overline{GM}_T \quad \dots\dots\dots (2.35)$$

dengan:

- $c$  : *Restoring moment coefficient*
- $\rho$  : Massa jenis air laut (1025 kg/ m<sup>3</sup>)
- $g$  : Kecepatan gravitasi (9,81 m/s<sup>2</sup>)
- $\nabla$  : Volume *displacement* (m<sup>3</sup>)
- $\Delta$  : *Displacement* (ton) =  $\rho \cdot g \cdot \nabla$

#### 4. *Exciting Moment*

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

$$M_{\theta} = M_o \cos \omega_e t \quad \dots\dots\dots (2.36)$$

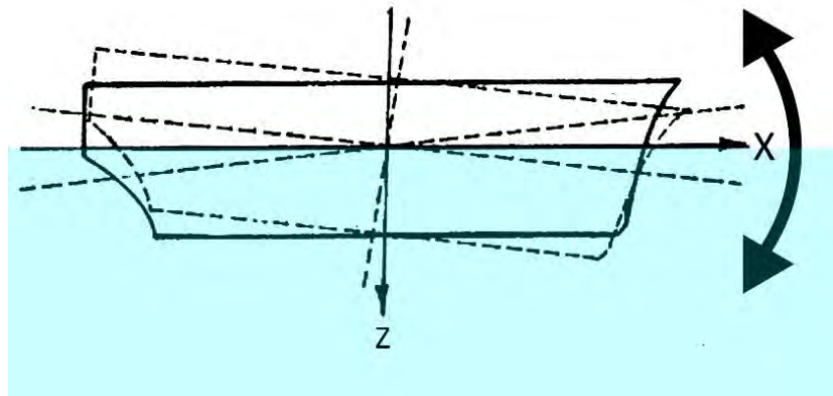
#### 2.2.13 Gerakan *Pitch Murni (Uncouple Pitching Motion)*

*Pitch* merupakan gerakan *oscillasi rotational* kapal dengan sumbu *transversal* (sumbu y) sebagai pusat gerak yang ilustrasinya dapat dilihat pada Gambar 2.23. 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. Gerak pada *pitching* akan berpengaruh terhadap kesetimbangan posisi, maka momen yang terjadi akibat *pitching* perlu diperhitungkan. Rumus umum dari persamaan gerakan akibat *pitching* adalah:

$$a\ddot{\theta} + b\dot{\theta} + c\theta = M_o \cos \omega_e t \quad \dots\dots\dots (2.37)$$

dengan:

- $M_o$  : Amplitudo momen eksitasi (m)
- $\omega_e$  : Frekuensi gelombang *encountering* (rad/sec)
- $a\ddot{\theta}$  : *Inertial Moment* (Nm)
- $b\dot{\theta}$  : *Damping Moment* (Nm)
- $c\theta$  : *Restoring Moment* (Nm)
- $M_o \cos \omega_e t$  : *Exciting Moment* (Nm)



Gambar 2.23 Ilustrasi Kondisi *Pitching* (Sumber: Murtedjo, 1990)

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

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

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

$$a = I_{yy} + \delta I_{yy} \dots\dots\dots (2.38)$$

$$a = \frac{\Delta}{g} k_{yy}^2 + \delta I_{yy} \dots\dots\dots (2.39)$$

dengan:

$\delta I_{yy}$  : Moment inertia massa tambah untuk gerakan *pitching* ( $\text{m}^4$ )

$k_{yy}^2$  : Kuadrat dari jari-jari girasi pada kondisi *pitching* ( $\text{m}^2$ )

$I_{yy}$  : Moment inersia massa kapal ( $\text{m}^4$ )

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

$$k_{yy}^2 \text{ berada pada range } 0,24L - 0,26L \dots\dots\dots (2.40)$$

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

*Damping coefficient* adalah koefisien redaman dan  $b \frac{d\theta}{dt}$  merupakan momen redaman dimana  $\theta$  adalah kecepatan sudut *pitching* atau turunan pertama dari sudut *pitching* (rad/s). *Damping coefficient* untuk *pitching* dapat dicari dengan *experiment* ataupun pendekatan *strip theory* yang ditentukan oleh tiap *station* dan diintegrasikan sebanyak *station* di kapal.

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

*Restoring moment* adalah momen pengembali yang diakibatkan oleh kekakuan dari struktur atau dalam hal bangunan apung kekakuannya adalah kekakuan hidrostatis. Kekakuan hidrostatis muncul akibat adanya gangguan eksternal yang merubah nilai *buoyancy* secara tiba-tiba sehingga mengganggu keseimbangan sistem. Sistem yang tidak seimbang secara tiba-tiba pula akan mencari titik setimbangnya, hal inilah yang menyebabkan seolah-olah kembali ke posisi awal saat terjadi gerakan *pitching*. Variable  $c$  adalah koefisien momen pengembali sedangkan  $\theta$  adalah sudut gerakan *pitching* (rad). *Restoring moment* untuk *pitching* dapat dihitung dengan persamaan sederhana sebagai berikut:

$$c\theta = \rho \cdot g \cdot \theta \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} x^2 y(x) dx \quad \dots\dots\dots (2.41)$$

$$c\theta = \rho \cdot g \cdot \theta \cdot I_y \quad \dots\dots\dots (2.42)$$

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

$$c\theta = \rho g \theta \overline{\nabla M B_L} = \rho g \overline{\nabla M G_L} \theta \quad \dots\dots\dots (2.43)$$

untuk sudut kecil,

$$c = \rho g \overline{\nabla M G_L} = \Delta \overline{M G_L} \quad \dots\dots\dots (2.44)$$

dengan:

- $c$  : *Restoring moment coefficient*
- $I_y$  : Momen inersia dari beban *water plane area*
- $\rho$  : Massa jenis air laut (1025 kg/ m<sup>3</sup>)
- $g$  : Kecepatan gravitasi (9,81 m/s<sup>2</sup>)
- $\nabla$  : Volume *displacement* (m<sup>3</sup>)
- $\Delta$  : *Displacement* (ton) =  $\rho \cdot g \cdot \nabla$

- $\overline{MB}_L$  : Jari-jari *metacenter* melintang
- $\overline{MG}_L$  : Tinggi *metacenter* melintang

4. *Exciting Moment*

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

$$M_\theta = M_o \cos \omega_e t \dots\dots\dots (2.45)$$

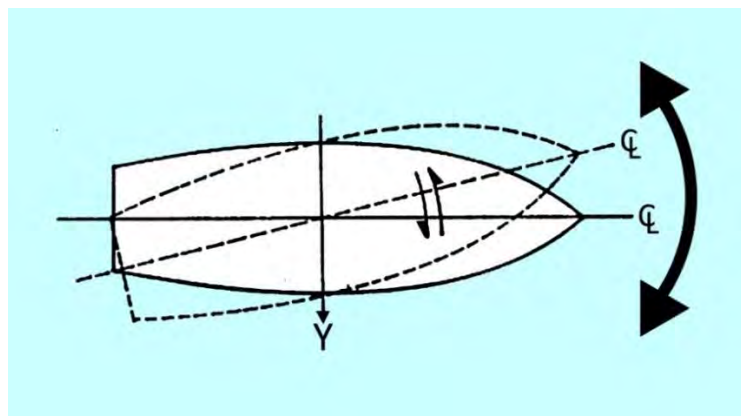
**2.2.14 Gerakan Yaw Murni (*Uncouple Yawing Motion*)**

Gerak *yaw* merupakan gerak *oscillasi rotational* kapal dengan sumbu *vertical* (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* dan ilustrasi dari gerak ini (Gambar 2.24) ialah:

$$a\ddot{\phi} + b\dot{\phi} + c\phi = M_o \cos \omega_e t \dots\dots\dots (2.46)$$

dengan:

- $M_o$  : Amplitudo momen eksitasi (m)
- $\omega_e$  : Frekuensi gelombang *encountering* (rad/sec)
- $a\ddot{\phi}$  : *Inertial Moment* (Nm)
- $b\dot{\phi}$  : *Damping Moment* (Nm)
- $c\phi$  : *Restoring Moment* (Nm)
- $M_o \cos \omega_e t$  : *Exciting Moment* (Nm)



Gambar 2.24 Ilustrasi Kondisi *Yawing* (Sumber: Murtedjo, 1990)

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

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

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

$$a = I_{zz} + \delta I_{zz} \dots\dots\dots (2.47)$$

$$a = \frac{\Delta}{g} k_{zz}^2 + \delta I_{zz} \dots\dots\dots (2.48)$$

dengan:

$\delta I_{zz}$  : Moment inertia massa tambah untuk gerakan *yawing* ( $\text{m}^4$ )

$k_{zz}^2$  : Kuadrat dari jari-jari girasi pada kondisi *yawing* ( $\text{m}^2$ )

$I_{zz}$  : Moment inersia massa kapal ( $\text{m}^4$ )

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

*Damping coefficient* adalah koefisien redaman dan  $b\frac{d\phi}{dt}$  merupakan momen redaman dimana  $\dot{\phi}$  adalah kecepatan sudut *yawing* atau turunan pertama dari sudut *yawing* ( $\text{rad/s}$ ). *Damping coefficient* untuk *yawing* dapat dicari dengan *experiment* ataupun pendekatan *strip theory* yang ditentukan oleh tiap *station* dan diintegrasikan sebanyak *station* di kapal.

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

*Restoring moment* adalah momen pengembali yang diakibatkan oleh kekakuan dari struktur atau dalam hal bangunan apung kekakuannya adalah kekakuan hidrostatis. Kekakuan hidrostatis muncul akibat adanya gangguan eksternal yang merubah nilai *buoyancy* secara tiba-tiba sehingga mengganggu keseimbangan sistem. Sistem yang tidak seimbang secara tiba-tiba pula akan mencari titik setimbangnya, hal inilah yang menyebabkan seolah-olah kembali ke posisi awal saat terjadi gerakan *yawing*. Variable  $c$  adalah koefisien momen pengembali sedangkan  $\phi$  adalah sudut gerakan *yawing* ( $\text{rad}$ ).



#### 4. *Exciting Moment*

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

$$M_{\theta} = M_o \cos \omega_e t \quad \dots\dots\dots (2.49)$$

#### 2.2.15 *Gerakan Couple Six Degree of Freedom*

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

$$\sum_{n=1}^6 [(M_{jk} + A_{jk}) \xi_k + B_{jk} \dot{\xi}_k + C_{jk} \ddot{\xi}_k] = F_j e^{i\omega t}, j = 1 \dots\dots (2.50)$$

dengan:

- $M_{jk}$  : Matriks massa dan momen inersia massa bangunan laut
- $A_{jk}$  : Matriks koefisien-koefisien massa tambah hidrodinamik
- $B_{jk}$  : Matriks koefisien-koefisien redaman hidrodinamik
- $C_{jk}$  : matriks koefisien-koefisien kekauan atau gaya dan momen hidrostatik

$F_j$  : Matriks gaya eksitasi dan momen eksitasi dalam fungsi kompleks

$F_1$  : Gaya eksitasi yang mengakibatkan *surge*

$F_2$  : Gaya eksitasi yang mengakibatkan *sway*

$F_3$  : Gaya eksitasi yang mengakibatkan *heave*

$F_4$  : Momen eksitasi yang mengakibatkan *roll*

$F_5$  : Momen eksitasi yang mengakibatkan *pitch*

$F_6$  : Momen eksitasi yang mengakibatkan *yaw*

$\xi_k$  : Elevasi gerakan pada mode ke k

$\dot{\xi}_k$  : Elevasi kecepatan gerak pada mode ke k

$\ddot{\xi}_k$  : Elevasi percepatan gerak pada mode ke k

Persamaan 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 *displacement* gerakan (Djatkiko, 2012).

## **2.2.16 Perilaku Bangunan Apung pada Gelombang Reguler**

### **2.2.16.1 Teori Gelombang Reguler**

Dalam penyederhanaan perumusan matematis gelombang yang dalam kondisi riilnya sangat kompleks maka ditetapkan asumsi-asumsi. Perumusan yang paling sederhana dari gelombang laut adalah dalam bentuk osilasi sinusoidal, seperti telah diperkenalkan oleh Airy pada tahun 1845. 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.

### **2.2.16.2 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 objek *floating body* pada mode tertentu,  $x_a; y_a; z_a$ , dengan amplitude gerakan gelombang,  $\zeta_a$ . Frekuensi yang dipakai sebagai absis dapat berupa frekuensi gelombang insiden,  $\omega$ , frekuensi gelombang papasan,  $\omega_e$ , atau frekuensi non-dimensi, disesuaikan dengan keperluan analisisnya.

Respon gerakan RAO, untuk gerakan *oscilasi translasi* seperti *surge*, *sway* dan *heave* merupakan perbandingan langsung antara amplitudo gerakan objek *floating body* dibanding dengan amplitudo gelombang (keduanya dalam satuan panjang):

$$RAO = \frac{x_a; y_a; z_a}{\zeta_a} \text{ (m/m)} \dots\dots\dots (2.51)$$

dengan:

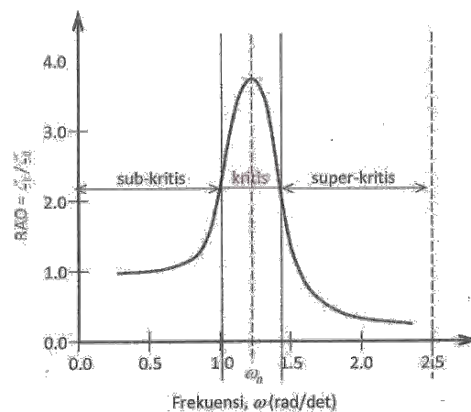
- $x_a$  : Amplitudo gerakan translasi struktur pada sumbu x (m)
- $y_a$  : Amplitudo gerakan translasi struktur pada sumbu y (m)
- $z_a$  : Amplitudo gerakan translasi struktur pada sumbu z (m)
- $\zeta_a$  : Amplitudo gerakan gelombang (m)

Sedangkan untuk respons gerakan RAO untuk gerakan *oscilasi rotational* (*roll, pitch, yaw*) merupakan perbandingan antara amplitudo gerakan rotasi (dalam radian) dengan amplitudo gelombang yang terjadi, yang dirumuskan sebagai berikut:

$$RAO = \frac{\phi_a; \theta_a; \varphi_a}{\zeta_a} \text{ (rad/m)} \dots\dots\dots (2.52)$$

dengan:

- $\phi_a$  : Amplitudo gerakan rotasi struktur pada sumbu x (rad)
- $\theta_a$  : Amplitudo gerakan rotasi struktur pada sumbu y (rad)
- $\varphi_a$  : Amplitudo gerakan rotasi struktur pada sumbu z (rad)
- $\zeta_a$  : Amplitudo gerakan gelombang (m)



Gambar 2.25 Bentuk Umum Grafik Respons Gerakan Bangunan Apung (Sumber: Djatmiko, 2012)

Berdasarkan Gambar 2.25, 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  $\omega^2$  kurang dari  $k/(m+a)$ , 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  $\omega^2$  kurang dari  $k/a$ , gerakan akan didominasi oleh faktor massa (Djatkiko, 2012).

### 2.2.16.3 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.

## 2.2.17 Perilaku Bangunan Apung pada Gelombang Acak

### 2.2.17.1 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   | $2,55\sqrt{m_0}$ | $1,25\sqrt{m_0}$ |
| Rata-rata 1/1000 Gelombang Tertinggi | $3,44\sqrt{m_0}$ | $1,25\sqrt{m_0}$ |

dengan:

$m_0$  : Luasan dibawah kurva spektrum (*zero moment*)

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 dimana FSO Arco Adjuna beroperasi. Persamaan spektrum JONSWAP dapat ditulis pada persamaan di bawah ini:

$$S_{\zeta}(\omega_e) = \alpha g^2 \omega^{-5} EXP \left[ -1,25 \left( \frac{\omega}{\omega_o} \right)^{-4} \right] \gamma^{EXP \left[ \frac{-(\omega - \omega_o)^2}{2\tau^2 \omega_o^2} \right]} \dots (2.53)$$

dengan :

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

$\omega_o = 2\pi \left( \frac{g}{U_{\omega}} \right) (X_o)^{-0,33}$

$X_o = \frac{gX}{U_{\omega}}$

$\tau$  = Parameter bentuk (*shape parameter*), 0,07 jika  $\omega \leq \omega_o$  dan 0,09 jika  $\omega \geq \omega_o$

$\gamma$  = Parameter ketinggian (*peakedness parameter*)

Sedang nilai dari parameter ketinggian ( $\gamma$ ) dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan Toursethaugen pada persamaan di bawah:

$$\gamma = EXP \left[ 3,4843 \left( 1 - 0,1975 \left( 0,036 - 0,0056 \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \right) \frac{T_p^4}{H_s^2} \right) \right] \dots (2.54)$$

dengan :

$T_p$  : Periode puncak spektra (detik)

$H_s$  : Tinggi gelombang signifikan (m)

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. Kriteria yang ada di DNV RP-

C205, bahwa spektrum JONSWAP dapat diaplikasikan untuk perairan dengan:

$$3,6 < \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} < 5 \quad \dots\dots\dots (2.55)$$

**2.2.17.2 Spektrum Respon Struktur Bangunan Apung**

Respons bangunan apung khususnya pada kapal yang diakibatkan oleh eksitasi gelombang acak telah diperkenalkan pertama kali oleh St. Denis dan Pierson pada tahun 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 (Djatkiko, 2012).

Dalam analisis respon bangunan apung pada gelombang reguler dapat diketahui pengaruh interaksi hidrodinamik pada massa tambah, *potential damping* dan gaya eksternal. Analisis tersebut menghasilkan respon struktur pada gelombang reguler. 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 2.56 dan Gambar 2.26.

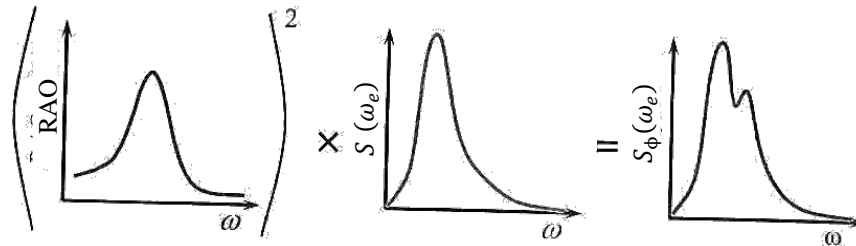
$$S_{\phi}(\omega_e) = RAO^2 \times S_{\zeta}(\omega_e) \quad \dots\dots\dots (2.56)$$

dengan:

$S_{\phi}(\omega_e)$  : Spektrum respon struktur ( $m^2$ -sec)

$S_{\zeta}(\omega_e)$  : Spektrum energi gelombang ( $m^2$ -sec)

$RAO^2$  : *Transfer function*



Gambar 2.26 Transformasi Spektra Gelombang menjadi Spektra Respons  
(Sumber: Djatmiko, 2012)

### 2.2.18 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, 1998), beban-baban yang harus dipertimbangkan dalam perancangan bangunan lepas pantai adalah sebagai berikut:

a. Beban mati (*Dead Load*)

Beban mati (*dead load*) adalah beban dari komponen-komponan kering serta beban-beban 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.

b. 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.



c. 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.

d. 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 dan Incecik (1996).

### **2.2.18.1 Beban Angin**

Beban angin yang digunakan dalam desain diukur pada ketinggian 10 m (33 ft) di atas permukaan laut. Angin merupakan beban dinamis, tapi

beberapa struktur akan meresponnya pada model statis yang paling mendekati. Menurut ABS pada sistem *tandem* SPM berlaku persamaan:

$$P_{wind} = 0,6100 \times C_s \times C_h \times V_{wind}^2 \dots\dots\dots (2.57)$$

dengan:

- $P_{wind}$  : Tekanan angin yang terjadi (N/m<sup>2</sup>)
- $C_s$  : Koefisien bentuk (dapat dilihat pada Tabel 3.2)
- $C_h$  : Koefisien tinggi
- $V_{wind}$  : Kecepatan angin (m/s<sup>2</sup>)

Koefisien tinggi ( $C_h$ ) dapat digunakan untuk memperhitungkan pengaruh kecepatan angin pada profil bidang vertikal. Persamaan koefisien tinggi ( $C_h$ ) adalah sebagai berikut:

$$C_h = \left( \frac{V_z}{V_{ref}} \right)^2 \dots\dots\dots (2.58)$$

Kecepatan angin pada ketinggian  $z$  tertentu adalah sebagai berikut:

$$V_z = V_{ref} \times \left( \frac{z}{Z_{ref}} \right)^\beta \dots\dots\dots (2.59)$$

dimana:

- $V_{ref}$  : Kecepatan angin dengan referensi pada ketinggian 10 m.
- $\beta$  : Faktor Eksponen (0,1)

Persamaan di atas dapat disederhanakan menjadi:

$$V_z = V_{10} \times \left( \frac{z}{10} \right)^{0,1} \dots\dots\dots (2.60)$$

dimana:

- $z$  : Ketinggian pada saat kecepatan angin tertentu (m)

Sehingga, persamaan gaya angin adalah

$$F_{wind} = P_{wind} \times A_{wind} \dots\dots\dots (2.61)$$

dimana:

- $F_{wind}$  : Gaya angin yang terjadi
- $P_{wind}$  : Tekanan angin yang terjadi
- $A_{wind}$  : Luas area yang dipengaruhi oleh angin

### 2.2.18.2 Beban Arus

Beban arus terjadi karena adanya pasang surut yang memberikan gaya terhadap struktur bangunan lepas pantai. Arus akibat pasang surut memiliki kecepatan yang semakin berkurang seiring dengan bertambahnya kedalaman sesuai fungsi *nonlinier*. Sedangkan arus yang disebabkan oleh angin memiliki karakter yang sama, tetapi dalam fungsi linier.

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).

$$F_{1C-Stat} = 0.5 \rho LTC_{1C} (\psi_{CR}) V_{CR}^2 \dots\dots\dots (2.62)$$

$$F_{2C-Stat} = 0.5 \rho LTC_{2C} (\psi_{CR}) V_{CR}^2 \dots\dots\dots (2.63)$$

$$F_{6C-Stat} = 0.5 \rho LTC_{6C} (\psi_{CR}) V_{CR}^2 \dots\dots\dots (2.64)$$

dengan:

- $\rho$  : Massa jenis air laut (kg/m<sup>3</sup>)
- L : Panjang *vessel* (m)
- T : Tinggi sarat *vessel* (m)
- C<sub>1C</sub> : Koefisien tahanan arah longitudinal
- C<sub>2C</sub> : Koefisien tahanan arah transversal
- C<sub>6C</sub> : Koefisien tahanan arah *yaw*

Pada sistem *tandem single point mooring* gerak yang paling berpengaruh adalah *surge* dan *pitch*. Sehingga untuk gaya arus berlaku persamaan:

$$F_{1C-Stat} = 0,5 \rho LTC_{1C} (\psi_{CR}) V_{CR}^2 \dots\dots\dots (2.65)$$

$$F_{5C-Stat} = 0,5 \rho LTC_{5C} (\psi_{CR}) V_{CR}^2 \dots\dots\dots (2.66)$$

dimana:

- C<sub>5C</sub> : Koefisien tahanan arah *pitch*

- $\psi_{CR}$  : Sudut Relatif ( $^{\circ}$ )
- $V_{CR}^2$  : Kecepatan Relatif (m/sec)

- Kecepatan relatif pada *vessel* berhubungan dengan arus

$$V_{CR} = \sqrt{(u_R^2 + v_R^2)} \dots\dots\dots (2.67)$$

- Sudut relatif pada arus

$$\psi_{CR} = \arctan(-v_R / u_R) \dots\dots\dots (2.68)$$

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

**2.2.18.3 Beban Gelombang**

Beban gelombang merupakan beban terbesar dari beban lingkungan. Sehingga menurut Indiyono (2010) perhitungan gaya gelombang pada struktur bangunan lepas pantai merupakan salah satu tahapan utama dalam proses perancangan. Kompleksitas aspek interaksi antara gelombang dengan struktur mengakibatkan perhitungan gaya gelombang lebih sulit dilakukan dibandingkan perhitungan gaya yang lain.

Syarat pemilihan teori untuk perhitungan gaya gelombang didasarkan pada perbandingan antara diameter struktur (D) dengan panjang gelombang ( $\lambda$ ) sebagai berikut (API, 2000):

- a.  $D/\lambda > 1$  = Gelombang mendekati pemantulan murni, persamaan Morison tidak *valid*.
- b.  $D/\lambda > 0,2$  = Difraksi gelombang perlu diperhitungkan, persamaan Morison tidak *valid*.
- c.  $D/\lambda < 0,2$  = Persamaan Morison *valid*.

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*:

$$F_{WV}^{(1)}(t) = \sum_{i=1}^N F_{WV}^{(1)}(\omega_i) \cos[\omega_i t + \varepsilon_i] a_i \dots\dots\dots (2.69)$$

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*:

$$F_{WV}^{(2)}(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N a_i a_j D_{ij} \cos[(\omega_i - \omega_j)t + (\varepsilon_i - \varepsilon_j)] \dots (2.70)$$

dengan:

$D_{ij}$  : *Drift force* per unit amplitudo gelombang (N/m)

#### 2.2.18.4 Wave Drift Forces

Bangunan apung dapat mengalami gaya *wave drift* atau osilasi orde kedua karena adanya perbedaan dalam frekuensi gelombang. Untuk kepadatan energi gelombang spektra, profil gelombang acak dapat dihasilkan dalam hal komponen pada frekuensi,  $\omega_i$  ( $i= 1, 2, \dots, N$ ) dan  $N$  biasanya besar.

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:

$$\bar{F} = 2 \int_0^\infty S_\zeta(\omega) \left[ \frac{F^2}{\zeta_1 \zeta_2}(\omega, \omega) \right] d\omega \dots\dots\dots (2.71)$$

dengan:

$$F^{(2)}(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \zeta_i \zeta_j P_{ij} \cos\{(\omega_i - \omega_j)t + (\varepsilon_i - \varepsilon_j)\} + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{1}{2} \zeta_i \zeta_j Q_{ij} \sin\{(\omega_i - \omega_j)t + (\varepsilon_i - \varepsilon_j)\} \dots (2.72)$$

dimana:

$\zeta$  : Fungsi tinggi gelombang terhadap waktu

$F(t)$  : *Wave drift force* (N)

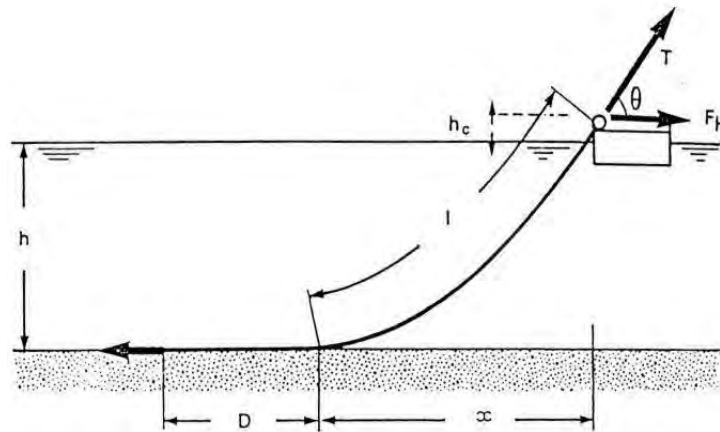
$P_{ij}$  dan  $Q_{ij}$  : Amplitudo fase (m)

$\varepsilon_i$  : Sudut fase komponen gelombang (deg)

$\omega$  : Frekuensi gelombang (rad/sec)

### 2.2.19 Penentuan *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 2.27 sebagai berikut:



Gambar 2.27 Panjang Minimum *Mooring Line* (Sumber: Faltinsen, 1990)

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

$$\frac{1}{h} = \sqrt{\frac{2F_H}{wh} + 1} \dots (2.73)$$

atau

$$\frac{1}{h} = \sqrt{\frac{2F_H}{wh} + 1} \dots\dots\dots (2.74)$$

dengan:

- l : Panjang minimum tali tambat (m)
- h : Jarak vertikal dari *fairlead* ke *seabed* = hm + hc (m)
- hm : Kedalaman air (m)
- hc : Tinggi *fairlead* di atas permukaan air (m)
- w : Berat tali tambat di dalam air per satuan panjang (kg/m)
- F<sub>H</sub> : *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*.

Pada analisis ini, data panjang dari *mooring line* telah diberikan oleh PT. Pertamina ONWJ yaitu sebesar 350 m. Untuk detailnya dapat dilihat pada bab metodologi penelitian, data dari *anchor legs* dan *pattern definition*.

Untuk jarak minimum *mooring line* dilakukan agar rantai jangkar tidak terlalu menegang sehingga *tension* yang dihasilkan tidak terlalu besar. Menurut Faltinsen (1990), perhitungan jarak minimum *mooring line* dapat dicari dengan persamaan:

$$x = l - h \left( 1 + 2 \frac{a}{h} \right)^{\frac{1}{2}} + a \cosh^{-1} \left( 1 + \frac{h}{a} \right) \dots\dots\dots (2.75)$$

dimana:

- x = Jarak minimum *mooring line* (m)
- l = Panjang keseluruhan *mooring line* (m)
- h = Jarak titik tumpu ke *seabed* (m)

$$a = \text{MBL} / W$$

W = Berat *mooring line* (kg)

### 2.2.20 Excursion

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

a. *Mean offset*

*Displacement* dari FSO dan *shuttle tanker* karena kombinasi dari pengaruh beban arus, *wave drift* rata-rata dan angin.

b. *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 :

$$S_{max} = S_{mean} + S_{lfmax} + S_{wfsig} \dots\dots\dots (2.76)$$

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

$$S_{max} = S_{mean} + S_{wfmax} + S_{lfsig} \dots\dots\dots (2.77)$$

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.

### 2.2.21 *Tension pada Hawser*

Gerakan pada FSO dan *shuttle tanker* saat *offloading* serta pengaruh lingkungan menyebabkan adanya tarikan pada *hawser*. Tarikan (*tension*) yang terjadi pada *hawser* dapat dibedakan menjadi 2, yaitu:

a. *Mean Tension*

*Tension* pada *hawser* yang berkaitan dengan *mean offset* pada FSO dan *shuttle tanker*.

b. *Maximum Tension*

*Mean Tension* yang mendapat pengaruh dari kombinasi frekuensi gelombang dan *low frequency tension*.

Menurut *API-RP2SK 3<sup>rd</sup> edition*, tarikan maksimum (*maximum tension*) dapat ditentukan dengan prosedur dibawah ini:

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

$$T_{max} = T_{mean} + T_{lfmax} + T_{wfsig} \dots\dots\dots (2.78)$$

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

$$T_{max} = T_{mean} + T_{wfmax} + T_{lfsig} \dots\dots\dots (2.79)$$

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 *hawser* dapat menggunakan persamaan di bawah ini.

$$T = wy \dots\dots\dots (2.80)$$

dimana,

- T : *Besar tension* pada *hawser* (N)

- w : Berat dari *hawser* (kg/m)
- y : Perpindahan posisi dari FSO dan *shuttle tanker* dengan jarak sejauh  $x$  meter setelah terkena gelombang atau *offset* (m)

Batasan *tension* pada *hawser* yang direkomendasikan oleh ABS (2004) disajikan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Kriteria *Tension Limit* dan Faktor Keamanan *Mooring*

| <i>Condition</i> | <i>Percent of MBS</i> | <i>Safety Factor</i> |
|------------------|-----------------------|----------------------|
| Intact (ULS)     | 55                    | 1,82                 |
| Damage (ALS)     | 70                    | 1,43                 |

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

$$Safety\ Factor = \frac{Minimum\ Breaking\ Load}{Maximum\ Tension} \dots\dots\dots (2.81)$$

### 2.2.22 Tegangan Aksial

Tegangan aksial (tegangan normal) adalah intensitas gaya pada suatu titik yang tegak lurus terhadap penampang dan dapat dihasilkan dari gaya tarik atau gaya tekan, yang didefinisikan sebagai:

$$\tau = \frac{F}{A} \dots\dots\dots (2.82)$$

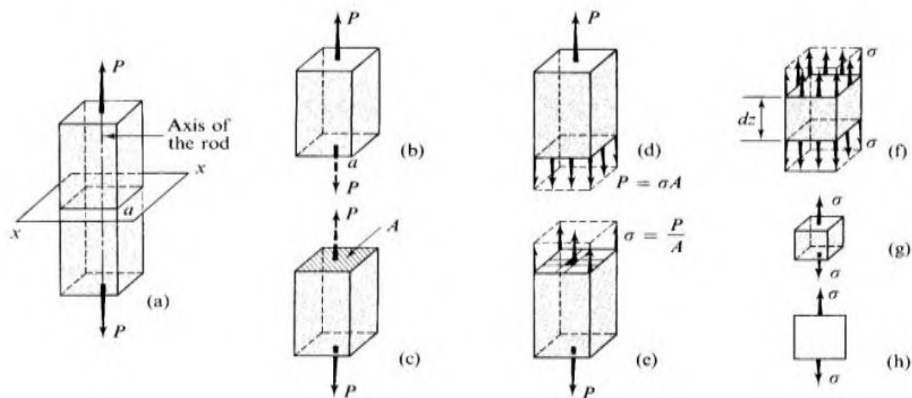
dengan:

F : Gaya yang bekerja dalam arah tegak lurus terhadap penampang *chock* (N)

A : Luas penampang *chock* (m<sup>2</sup>)

$\tau$  : Tegangan aksial (Pa)

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 2.28.



Gambar 2.28 Langkah Analisis Tegangan Sebuah Benda (Sumber: Popov, 1996)

### 2.2.23 Bending Stress

Momen luar diimbangi oleh momen dalam yang merupakan resultan tegangan lentur (*bending*) yang terlihat pada Gambar 2.29.

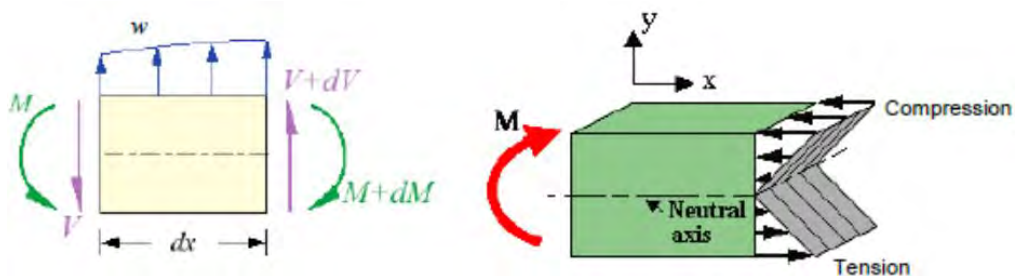
$$M = \int_A f \cdot dA \cdot y = \int_A \left( -\frac{y}{c} f_{\max} \right) dA \cdot y = -\frac{f_{\max}}{c} \int_A y^2 dA \dots (2.83)$$

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

$$M = -\frac{f_{\max}}{c} I \text{ atau } f_{\max} = -\frac{M c}{I} \dots (2.84)$$

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

$$f = -\frac{M y}{I} \dots (2.85)$$



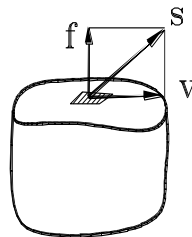
Gambar 2.29 Tegangan Lentur (*Bending*) pada Suatu Penampang (Sumber: Ronney, 2014)

### 2.2.24 Tegangan Geser

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

$$v = \frac{V}{A} \text{ atau } \frac{\text{gaya geser}}{\text{luas}} \left[ \frac{N}{m^2} \right] \dots\dots\dots (2.86)$$

Dengan V adalah gaya yang bekerja dalam arah sejajar terhadap penampang dan A adalah luas penampang. Ilustrasi tegangan geser dapat dilihat pada Gambar 2.30.



Gambar 2.30 Gaya yang Bekerja dalam Arah Sejajar terhadap Penampang (Sumber: Popov, 1996)

### 2.2.25 Tegangan Von Misses

Struktur harus mampu menahan beban-beban operasional tambahan yang terjadi dengan aman, yaitu tegangan yang terjadi tidak boleh melebihi tegangan yang diijinkan, serta pelat struktur, pelat bilah, agar tidak kehilangan stabilitasnya (tidak mengalami *buckling*).

Untuk menghitung tegangan kita memakai persamaan:

$$\sigma(x, y) = \frac{M_x \cdot Y}{I} \dots\dots\dots (2.87)$$

dengan:

- $M_x$  : Momen *bending* (ton.m)
- $Y$  : Jarak normal bidang (m)
- $I$  : Momen inersia bidang (m<sup>2</sup>)

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 ( $I = \frac{1}{12} b.h^3$ ) dan sebaiknya dilakukan dalam bentuk tabulasi. Seperti telah dijelaskan di depan, 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 di depan. 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):

$$\begin{bmatrix} \sigma_x - \sigma_0 & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} & \sigma_y - \sigma_0 & \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_z - \sigma_0 \end{bmatrix} = 0 \dots\dots\dots (2.88)$$

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 gabungan adalah dengan menggunakan formula tegangan *Von Mises*:

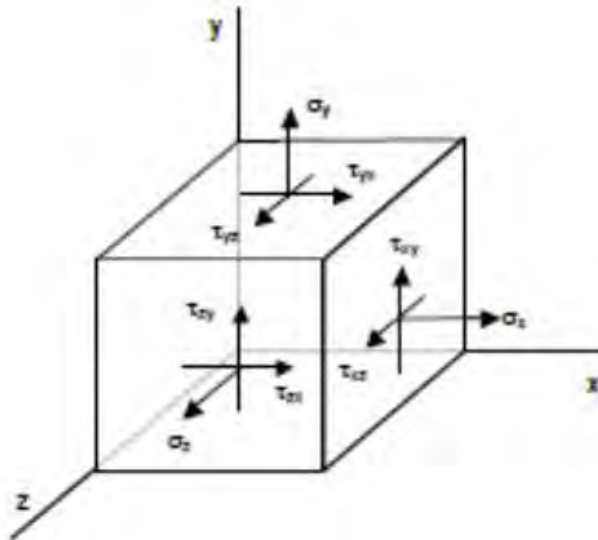
$$\sigma_{eq} = \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \dots (2.89)$$

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)

Untuk ilustrasi dari tegangan Von Mises dapat dilihat pada Gambar 2.31

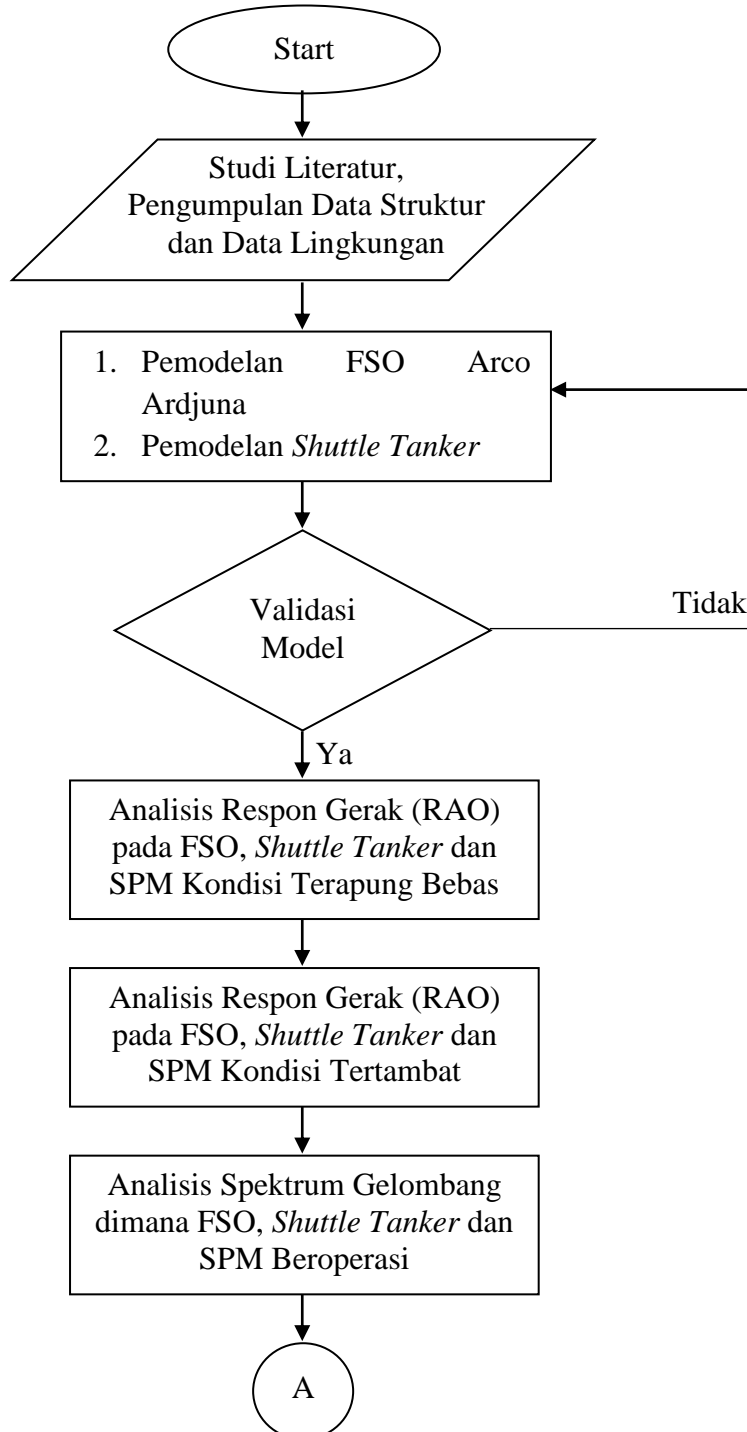


Gambar 2.31 *Von Mises Stress* suatu Penampang (Sumber: Rooney, 2014)

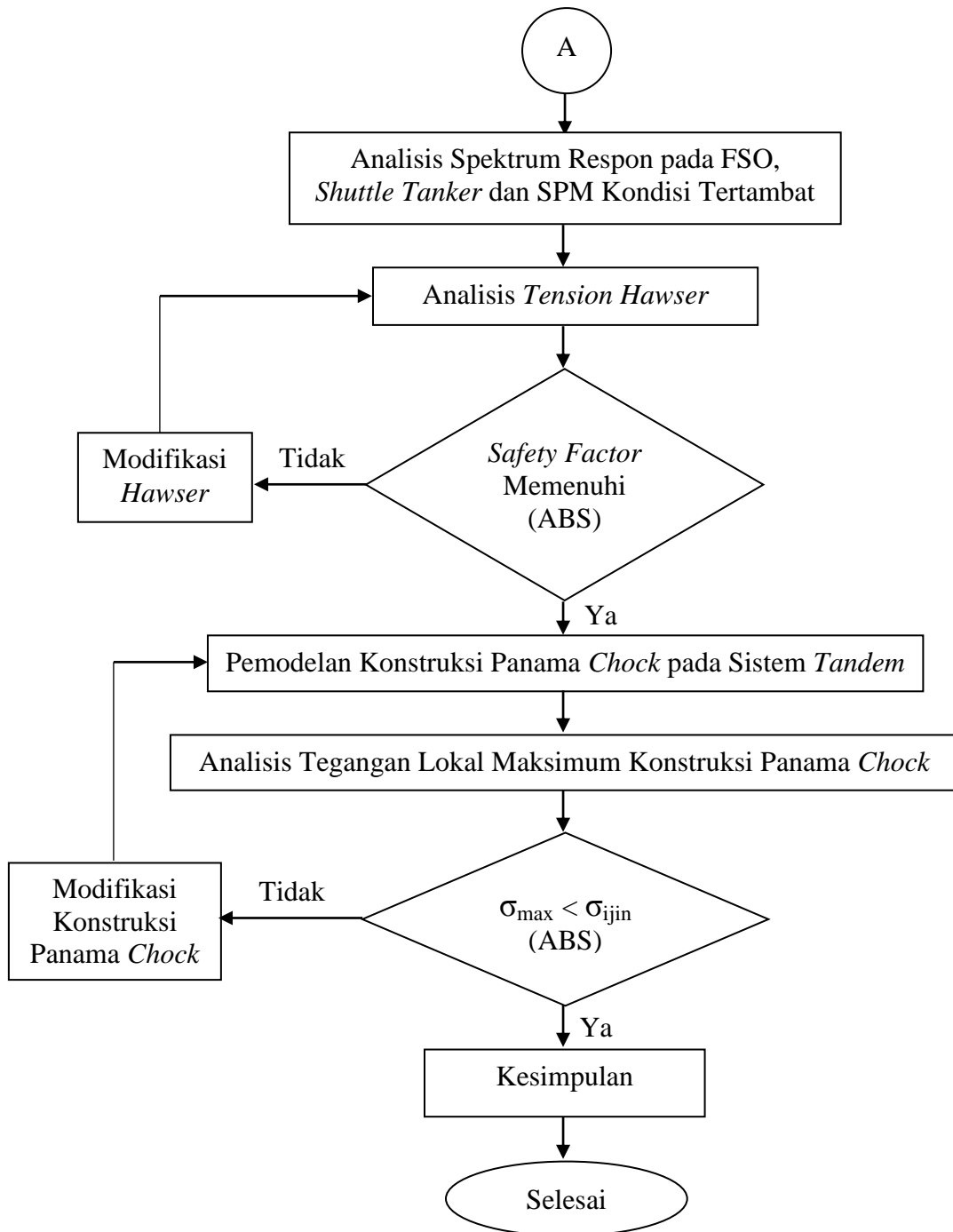
**BAB III**  
**METODOLOGI PENELITIAN**

**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* Pengerjaan Tugas Akhir



Gambar 3.1 Flowchart Pengerjaan Tugas Akhir (Lanjutan)

### 3.2 Prosedur Penelitian

Alur dalam pengerjaan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

#### 1. Studi Literatur

Informasi dan penelitian-penelitian yang telah dilakukan mengenai FSO, *shuttle tanker*, SPM dan konstruksi panama *chock* didapatkan dengan penelusuran



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

## 2. Data Struktur dan Data Lingkungan

Data struktur dan data lingkungan untuk FSO, *shuttle tanker*, SPM dan konstruksi *chock* didapatkan dari PT. PHE ONWJ dan PT. Citra Mas.

## 3. Pemodelan FSO, *Shuttle Tanker* dan SPM

Pemodelan SPM, pemodelan *shuttle tanker* dan pemodelan FSO Arco Ardjuna menggunakan *software* Maxsurf 20. Pemodelan disini bertujuan untuk mendapatkan *lines plan* dan data hidrostatis model.

## 4. Validasi Model

Model FSO, *shuttle tanker* dan SPM yang dibuat dengan menggunakan *software* Maxsurf 20 divalidasi berdasarkan data *lines plan* dan hidrostatis yang didapatkan dari PT. PHE ONWJ dan 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 Respon Gerak (RAO) Kondisi Terapung Bebas

Untuk mendapatkan RAO dari struktur FSO, *shuttle tanker* dan SPM kondisi terapung bebas (*free floating*) dilakukan *running* menggunakan Ansys AQWA, dimana sebelum melakukan *running* tersebut model struktur di-*meshing* terlebih dahulu. FSO dan *shuttle tanker* ditinjau saat kondisi *full load* dan *light load*. Tujuan dilakukannya analisa respon gerak pada kondisi terapung bebas ini adalah untuk melakukan pengecekan RAO, apakah arah datang gelombang dengan hasil yang dikeluarkan sudah sesuai atau belum.

## 6. Analisis Respon Gerak (RAO) Kondisi Tertambat

Selanjutnya memodelkan FSO, *shuttle tanker* dan SPM menggunakan *software* Ansys AQWA untuk kondisi tertambat sesuai data yang ada. Ada dua kondisi *offloading* dalam analisis ini, yaitu kondisi FSO *full load* – *Shuttle tanker light load* dan FSO *light load* – *Shuttle tanker full load*. Setelah itu didapatkan RAO pada masing-masing struktur tersebut dalam kondisi tertambat.

## 7. Analisis Spektrum Gelombang

Analisis spektrum gelombang menggunakan Ansys AQWA. Analisis ini telah disesuaikan dengan kondisi perairan dimana struktur tersebut beroperasi. FSO Arco Ardjuna, SPM dan *shuttle tanker* beroperasi di perairan Laut Jawa yang merupakan daerah perairan tertutup sehingga menggunakan spektrum JONSWAP.

## 8. Analisis Spektrum Respon Kondisi Tertambat

Analisis spektrum respon FSO, SPM dan *shuttle tanker* kondisi tertambat menggunakan *software* Ansys AQWA. Hasil dari analisis ini akan digunakan dalam analisis *tension* pada *hawser*.

## 9. Analisis *Tension* pada *Hawser*

Analisis tegangan pada *hawser* yang menghubungkan FSO dan *shuttle tanker* dilakukan menggunakan *software* Ansys AQWA dan bertujuan untuk mengetahui tegangan maksimum yang terjadi pada *hawser*. Perhitungan *safety factor* juga dilakukan untuk mengetahui apakah *safety factor* tersebut tidak kurang dari yang disyaratkan oleh ABS. Apabila *safety factor* kurang dari yang disyaratkan oleh ABS maka perlu dilakukan modifikasi dan analisis tegangan ulang pada *hawser*. Analisis ini berbasis *time domain* selama 3 jam.

## 10. Pemodelan Konstruksi Panama *Chock* pada Sistem *Tandem*

Untuk mempermudah pengerjaan, konstruksi panama *chock* dengan sistem *tandem* terlebih dahulu dimodelkan menggunakan 3D pada AutoCAD 2016. Setelah itu dilanjutkan dengan mengkonversi model agar menjadi *solid* dan juga dilakukan pemilihan material untuk model sesuai data.

## 11. Analisis Tegangan Lokal Maksimum Konstruksi Panama *Chock*

Tegangan lokal konstruksi panama *chock* dilakukan dengan *running* Ansys Mechanical. Pada tahap ini, konstruksi panama *chock* yang telah dimodelkan di AutoCAD 3D dilakukan *meshing* terlebih dahulu dan selanjutnya beban-beban dimasukkan yang pada akhirnya akan diketahui lokasi tegangan maksimum serta besar deformasi yang terjadi pada konstruksi panama *chock* tersebut. Kemudian dilakukan analisis terhadap hasil yang didapat. Analisis dilakukan dengan mengacu pada standar yang digunakan, yaitu *American Bureau of Shipping* (ABS) untuk mengetahui apakah struktur tersebut sesuai dengan kriteria atau tidak.

## 12. Kesimpulan

Kesimpulan diambil berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan, diantaranya adalah pergerakan struktur dan besar *tension* pada *hawser* yang menghubungkan SPM dengan FSO, serta tegangan lokal maksimum dari konstruksi panama *chock* yang mengacu pada ABS.

### 3.3 Pengumpulan Data

Data yang dibutuhkan untuk analisis ini adalah data struktur dan data lingkungan. Data struktur terdiri dari data FSO Arco Ardjuna, *shuttle tanker*, SPM dan konstruksi panama *chock*.

#### 3.3.1 Data Lingkungan

Data lingkungan yang digunakan adalah kondisi lingkungan pada perairan Laut Jawa. Data lingkungan yang ditunjukkan pada Tabel 3.1 merupakan data lingkungan yang nilainya sama untuk semua arah pembebanan. Dalam hal ini, pembebanan pada struktur adalah pada arah  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  dan  $180^\circ$ .

Tabel 3.1 Data Lingkungan Perairan Laut Jawa

| <i>Parameter</i>                  | <i>Unit</i> | <i>1-years<br/>return<br/>period</i> | <i>10-years<br/>return<br/>period</i> | <i>100-years<br/>return<br/>period</i> |
|-----------------------------------|-------------|--------------------------------------|---------------------------------------|--|
| Kedalaman                         | m           | 45                                   | 45                                    | 45                                     |
| Tinggi Gelombang Maksimum/Hm      | m           | 3,2                                  | -                                     | 6,4                                    |
| Periode Gelombang Maksimum /Tm    | s           | 6,6                                  | -                                     | 9,4                                    |
| Tinggi Gelombang Signifikan/Hs    | m           | 1,8                                  | -                                     | 3,6                                    |
| Periode Gelombang Signifikan/Ts   | s           | 6,3                                  | -                                     | 8,3                                    |
| Periode Puncak Gelombang (Tp)     | s           | 6,3                                  | -                                     | 9                                      |
| Kecepatan Angin                   | m/s         | 12,3                                 | -                                     | 25,7                                   |
| Spektrum                          |             | Jonswap                              |                                       |  |
| Kecepatan Arus pada 0% Kedalaman  | m/s         | 0,72                                 | 0,94                                  | 1,15                                   |
| Kecepatan Arus pada 10% Kedalaman | m/s         | 0,62                                 | 0,78                                  | 0,93                                   |

(Sumber: PT. PHE ONWJ, 2013)

Tabel 3.1 Data Lingkungan Perairan Laut Jawa (*Lanjutan*)

| <i>Parameter</i>                   | <i>Unit</i> | <i>1-years<br/>return<br/>period</i> | <i>10-years<br/>return<br/>period</i> | <i>100-years<br/>return<br/>period</i> |
|------------------------------------|-------------|--------------------------------------|---------------------------------------|--|
| Kecepatan Arus pada 20% Kedalaman  | m/s         | 0,54                                 | 0,66                                  | 0,77                                   |
| Kecepatan Arus pada 30% Kedalaman  | m/s         | 0,48                                 | 0,57                                  | 0,65                                   |
| Kecepatan Arus pada 40% Kedalaman  | m/s         | 0,44                                 | 0,50                                  | 0,56                                   |
| Kecepatan Arus pada 50% Kedalaman  | m/s         | 0,41                                 | 0,46                                  | 0,50                                   |
| Kecepatan Arus pada 60% Kedalaman  | m/s         | 0,39                                 | 0,42                                  | 0,45                                   |
| Kecepatan Arus pada 70% Kedalaman  | m/s         | 0,37                                 | 0,40                                  | 0,42                                   |
| Kecepatan Arus pada 80% Kedalaman  | m/s         | 0,36                                 | 0,38                                  | 0,39                                   |
| Kecepatan Arus pada 90% Kedalaman  | m/s         | 0,35                                 | 0,37                                  | 0,38                                   |
| Kecepatan Arus pada 100% Kedalaman | m/s         | 0,34                                 | 0,35                                  | 0,36                                   |

(Sumber: PT. PHE ONWJ, 2013)

Dalam analisis ini digunakan data lingkungan perairan Laut Jawa periode ulang 100 tahun.

### 3.3.2 Data FSO Arco Ardjuna

*Principle dimension* FSO Arco Ardjuna ditunjukkan pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 *Principle Dimension* FSO Arco Ardjuna

| <i>Designation</i>          | <i>Unit</i> | <i>Minimum<br/>Operating Draft</i> | <i>Maximum<br/>Operating Draft</i> |
|-----------------------------|-------------|------------------------------------|------------------------------------|
| <i>Length, LBP</i>          | m           | 142,6                              |                                    |
| <i>Breadth, B</i>           | m           | 48,2                               |                                    |
| <i>Depth, D</i>             | m           | 26,5                               |                                    |
| <i>Draft to Baseline, T</i> | m           | 2,5                                | 24                                 |
| <i>Displacement</i>         | t           | 15.529                             | 153.202                            |
| LCG                         | m           | 1,29                               | 2,17                               |
| KG (VCG)                    | m           | 14,04                              | 13,44                              |

(Sumber: PT. PHE ONWJ, 2013)

### 3.3.3 Data SPM

#### a. Single Point Mooring

Untuk *principle dimension* SPM dapat dilihat pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3 *Principle Dimension CALM Buoy*

| <i>Designation</i>            | <i>Unit</i> | <i>Data</i> |
|-------------------------------|-------------|-------------|
| <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        |
| <i>Displacement</i>           | t           | 255,34      |

(Sumber: PT. PHE ONWJ, 2013)

#### b. Mooring Hawsers

Karakteristik untuk *mooring hawser* ditunjukkan pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Karakteristik *Mooring Hawser*

| <i>Designation</i>                          | <i>Data</i>      |
|---|------------------|
| <i>Type</i>                                 | <i>Grommet</i>   |
| <i>Number of Lines</i>                      | <i>Twin Line</i> |
| <i>Material</i>                             | Nylon            |
| <i>Length</i>                               | 220 ft           |
| <i>Circumference</i>                        | 17"              |
| <i>Design Mooring Force</i>                 | 400 tonnes       |
| <i>New Dry Breaking Strength per Hawser</i> | 4094 kN          |

(Sumber: PT. PHE ONWJ, 2013)

Sesuai data yang didapat dari PT. Pertamina ONWJ, *hawser* yang menghubungkan FSO Arco Ardjuna dengan *shuttle tanker* pada sistem *tandem offloading* dianggap sama dengan *mooring hawser*. Sehingga karakteristik *hawser* untuk sistem *tandem offloading* juga menggunakan data *hawser* di atas.

c. *Anchor Legs* dan *Pattern Definition*

Karakteristik untuk *anchor legs* ditunjukkan pada Tabel 3.5.

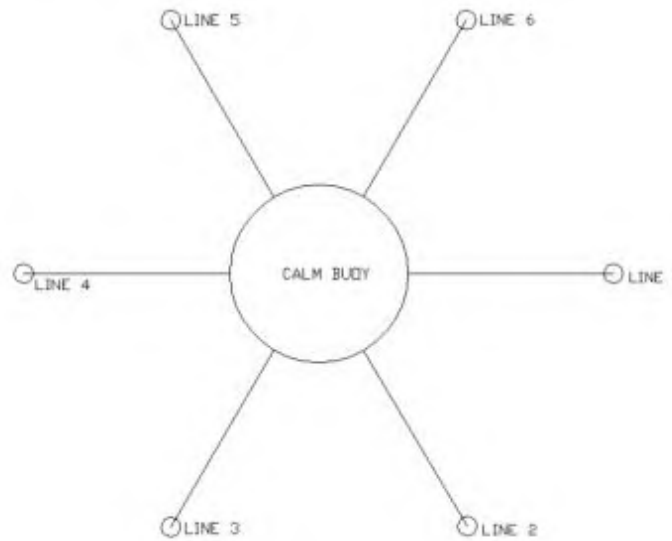
Tabel 3.5 Karakteristik *Anchor Legs*

| <i>Designation</i>                           | <i>Data</i>        |
|--|--------------------|
| <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 kg/m        |
| <i>Stiffness EA</i>                          | 868 MN             |
| <i>Anchoring radius</i>                      | 337,5 m            |

(Sumber: PT. PHE ONWJ, 2013)

d. *Anchor Legs* dan *Pattern Definition (Top View)*

Konfigurasi dari *anchor legs* tampak atas dapat dilihat pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Anchor Legs dan Pattern Definition (Top View) (Sumber: PT. PHE ONWJ, 2013)

### 3.3.4 Data Shuttle Tanker

Berikut ini merupakan *principle dimension* untuk *shuttle tanker* 85000 DWT yang ditunjukkan pada Tabel 3.6.

Tabel 3.6 Principle Dimension Shuttle Tanker 85000 DWT

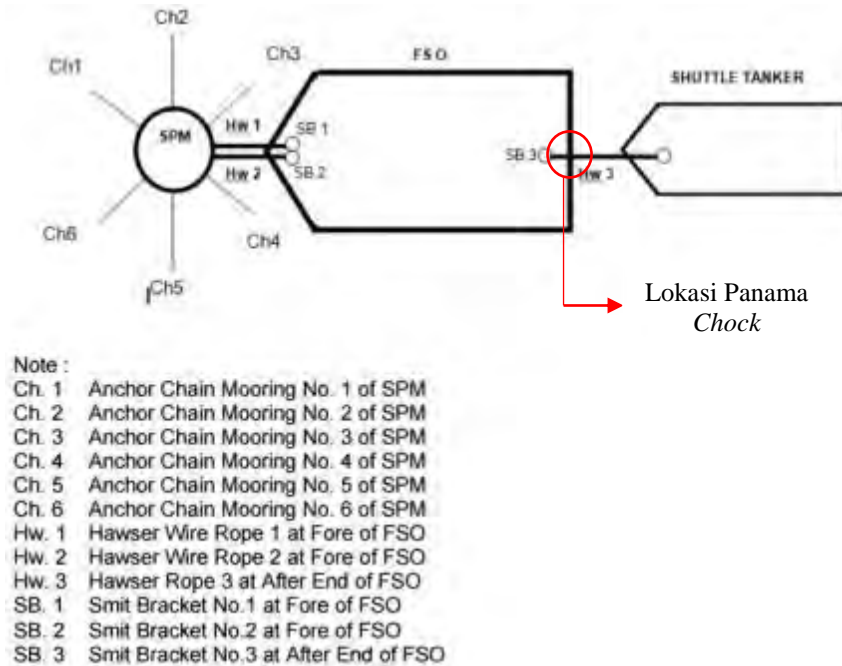
| <b>Designation</b>                                   | <b>Unit</b>    | <b>Data</b> |
|--|----------------|-------------|
| <i>Length Overall (L<sub>OA</sub>)</i>               | m              | 221,56      |
| <i>Length Between Perpendicular (L<sub>PP</sub>)</i> | m              | 213,36      |
| <i>Moulded Breath (B<sub>M</sub>)</i>                | m              | 38,289      |
| <i>Moulded Depth (D<sub>M</sub>)</i>                 | m              | 19,60       |
| <i>T (Full Load)</i>                                 | m              | 13,281      |
| <i>C<sub>B</sub></i>                                 | m              | 0,825       |
| <i>Volume Displacement (Full Load)</i>               | m <sup>3</sup> | 91822,536   |
| <i>Displacement (Full Load)</i>                      | t              | 94118,099   |
| <i>Volume Displacement (Lightship)</i>               | m <sup>3</sup> | 9871,32     |
| <i>Displacement (Lightship)</i>                      | t              | 10118,10    |
| LWT + 10%  | t              | 10510,35    |
| KG (LWT + 10%)                                       | m              | 9,8         |

(Sumber: PT. Citra Mas, 2013)

### 3.3.5 Data Offloading System

#### a. Tandem Arrangement

Pengaturan sistem *tandem* dideskripsikan pada Gambar 3.3. Skema di bawah sesuai dengan kondisi nyata.



Gambar 3.3 *Tandem Arrangement* (Sumber: PT. PHE ONWJ, 2013)

Untuk lokasi dan konstruksi panama *chock* yang lebih rinci dapat dilihat pada subbab 3.3.6 tentang data konstruksi panama *chock*.

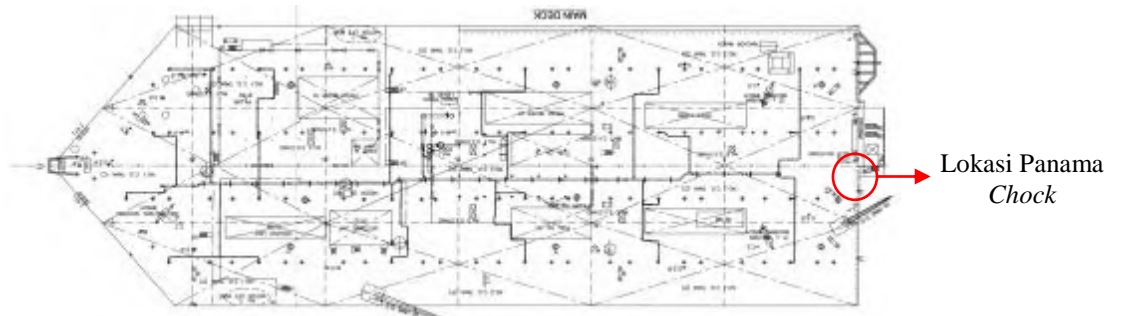
### 3.3.6 Data Konstruksi Panama Chock

Berikut ini adalah data konstruksi panama *chock* pada FSO Arco Ardjuna.

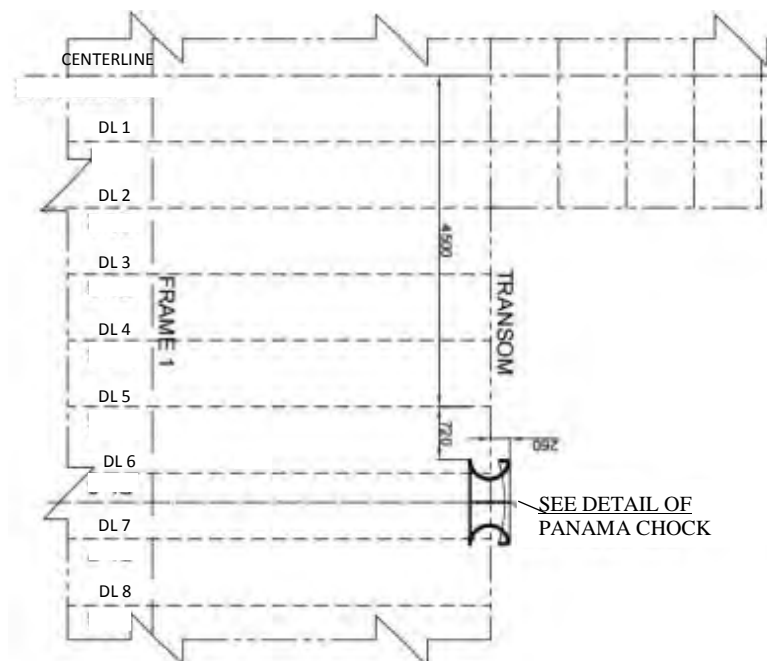
#### a. Lokasi Panama Chock

Lokasi Panama *Chock* pada FSO Arco Ardjuna dapat dilihat pada Gambar 3.4 dan 3.5.





Gambar 3.4 Lokasi Panama *Chock* pada FSO Arco Ardjuna (Sumber: PT. PHE ONWJ, 2013)



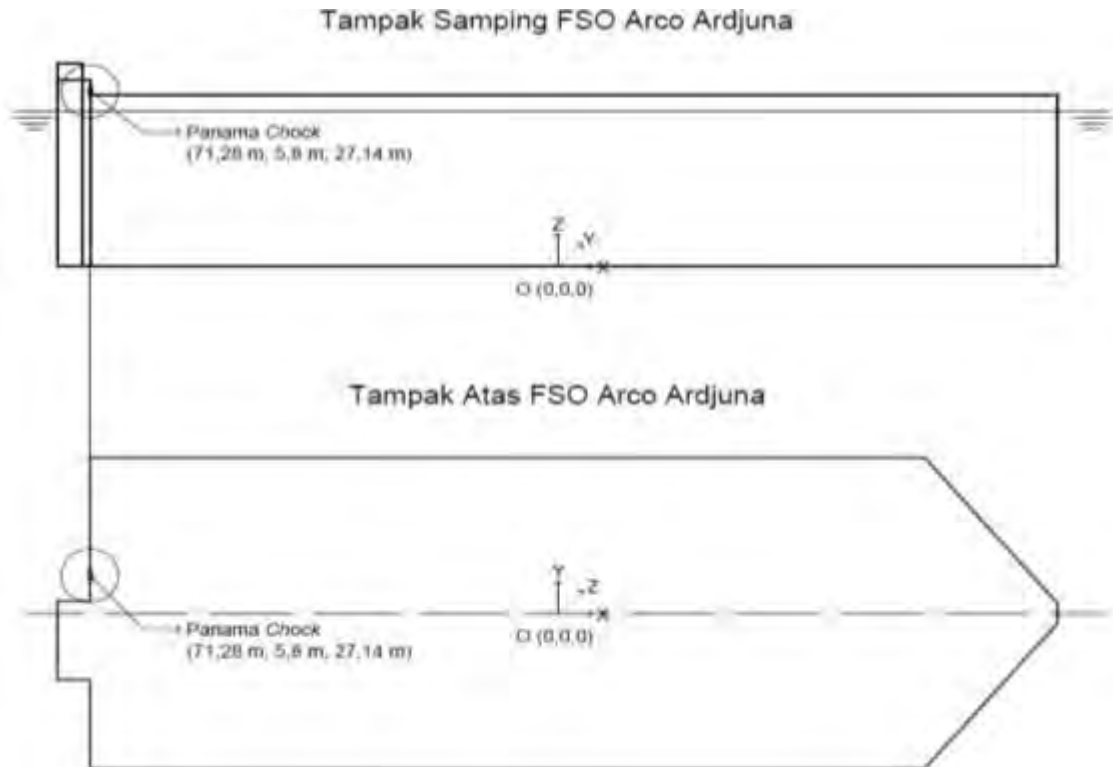
Gambar 3.5 Detail Lokasi Panama *Chock* pada FSO Arco Ardjuna (Sumber: PT. PHE ONWJ, 2013)

Letak titik koordinat untuk panama *chock* terhadap titik koordinat 0,0,0 dari FSO Arco Ardjuna ditunjukkan pada Gambar 3.6.

$$x = 71,28 \text{ m}$$

$$y = 5,8 \text{ m}$$

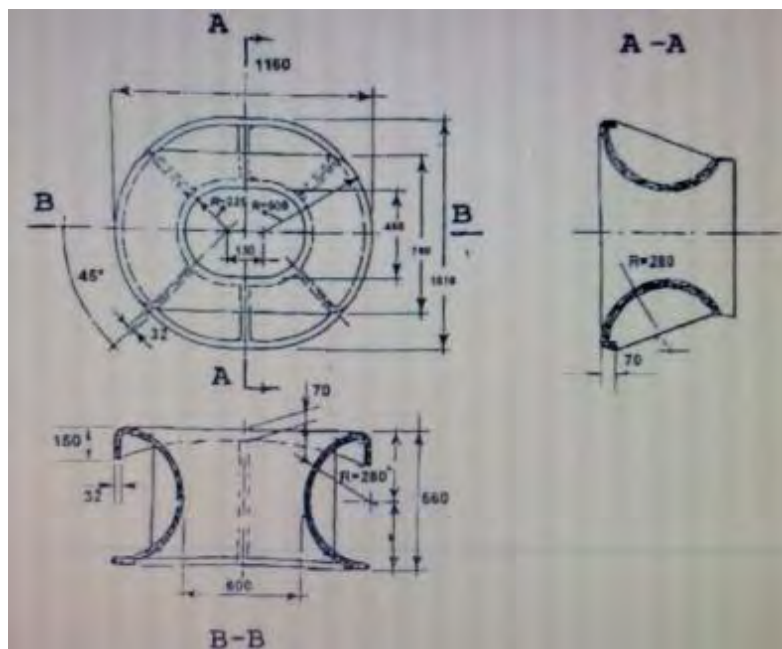
$$z = 27,14 \text{ m}$$



Gambar 3.6 Letak Titik Koordinat Panama Chock pada FSO Arco Ardjuna Tampak Samping dan Tampak Atas

b. Detail Panama Chock

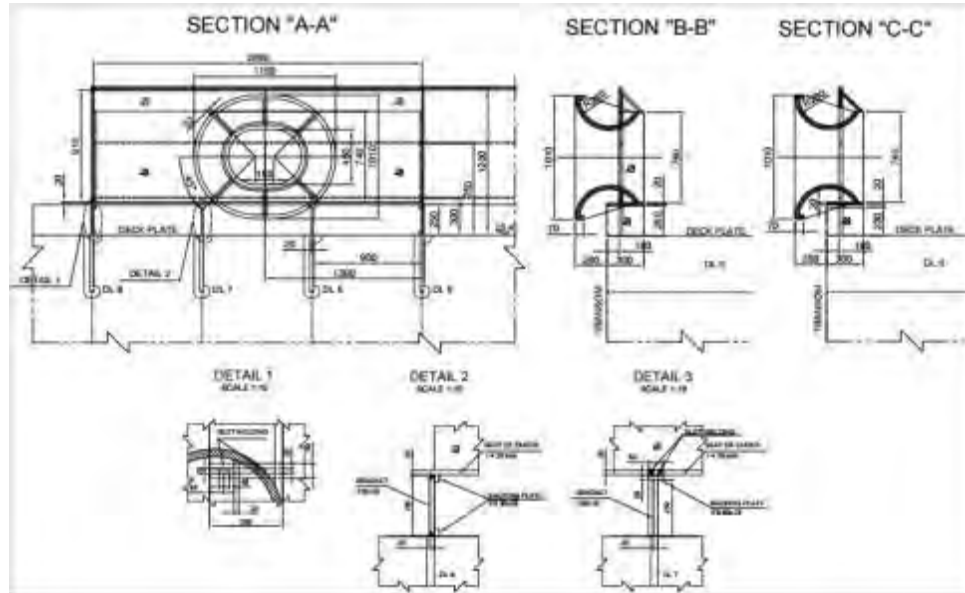
Untuk detail dari struktur *panama chock* dapat dilihat pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7 Detail Panama Chock (Sumber: PT. PHE ONWJ, 2013)

c. Detail Konstruksi Panama *Chock*

Untuk detail konstruksi panama *chock* yang terdiri dari struktur panama *chock* itu sendiri beserta *seat* atau dudukannya dapat dilihat pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8 Detail Kontruksi Panama *Chock* (Sumber: PT. PHE ONWJ, 2013)

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

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

**4.1 Pemodelan Struktur**

**4.1.1 *Floating Storage and Offloading (FSO)***

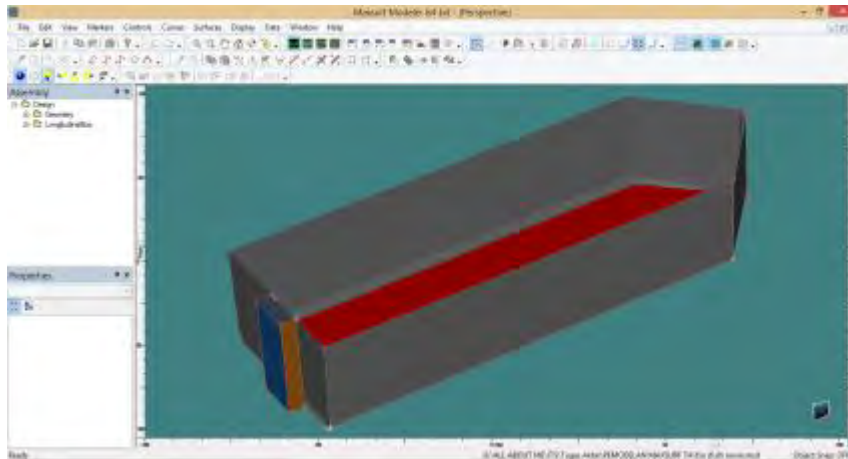
Pada FSO Arco Ardjuna yang beroperasi di perairan Laut Jawa, pemodelan *surface* dilakukan menggunakan *software* Maxsurf Modeler dimana tujuan dari pemodelan ini adalah untuk mendapatkan model dan data hidrostatis. Model dan data hidrostatis dari FSO Arco Ardjuna tersebut digunakan sebagai *input* untuk perhitungan *Response Amplitude Operator (RAO)* kondisi terapan bebas dan tertambat pada *software* Ansys AQWA. Pemodelan FSO ini dilakukan pada dua kondisi, yaitu kondisi *full load* dan *light load*. Data yang digunakan dalam pemodelan FSO Arco Ardjuna menggunakan *software* Maxsurf Modeler tertera pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 *Principle Dimension* FSO Arco Ardjuna

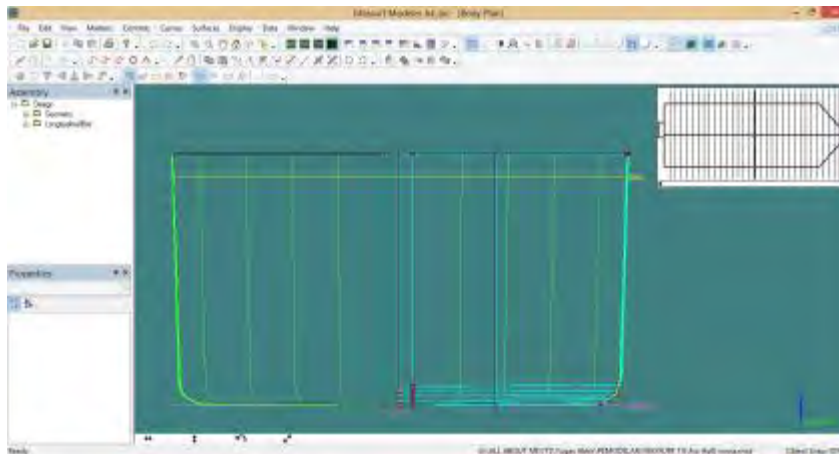
| <i>Designation</i>          | <i>Unit</i> | <i>Minimum Operating Draft</i> | <i>Maximum Operating Draft</i> |
|-----------------------------|-------------|--------------------------------|--------------------------------|
| <i>Length, LBP</i>          | m           | 142,6                          |                                |
| <i>Breadth, B</i>           | m           | 48,2                           |                                |
| <i>Depth, D</i>             | m           | 26,5                           |                                |
| <i>Draft to Baseline, T</i> | m           | 2,5                            | 24                             |
| <i>Displacement</i>         | t           | 15.529                         | 153.202                        |
| KG (VCG)                    | m           | 14,04                          | 13,44                          |

(Sumber: PT. PHE ONWJ, 2013)

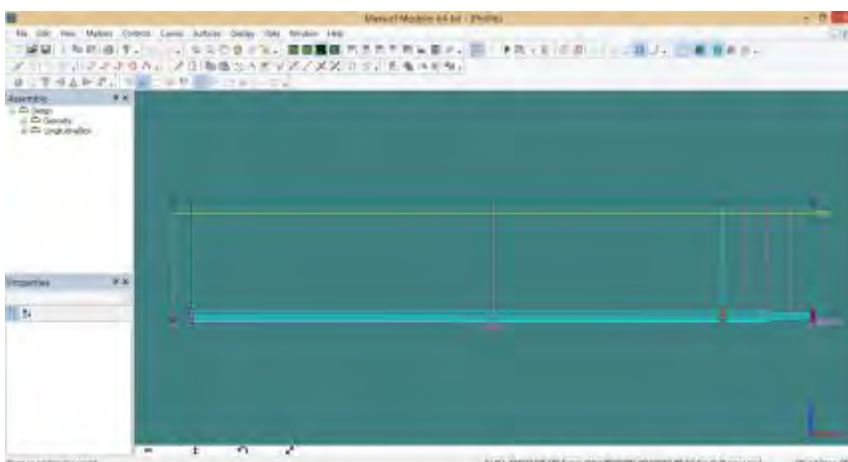
Hasil pemodelan pada *software* Maxsurf Modeler untuk FSO Arco Ardjuna kondisi *full load* dapat dilihat pada Gambar 4.1 – 4.4.



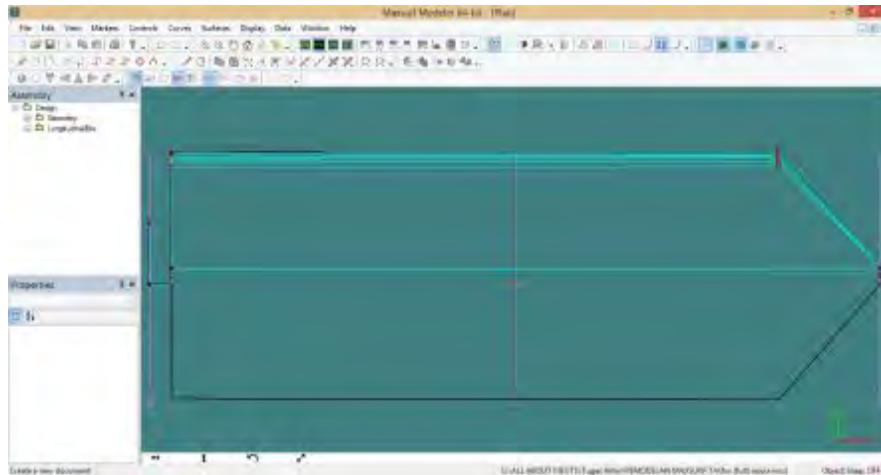
Gambar 4.1 Hasil Pemodelan FSO Arco Ardjuna Kondisi *Full Load* pada *Software Maxsurf Modeler* Tampak Isometri



Gambar 4.2 Hasil Pemodelan FSO Arco Ardjuna Kondisi *Full Load* pada *Software Maxsurf Modeler* Tampak Depan (*Body Plan*)



Gambar 4.3 Hasil Pemodelan FSO Arco Ardjuna Kondisi *Full Load* pada *Software Maxsurf Modeler* Tampak Samping (*Sheer Plan*)



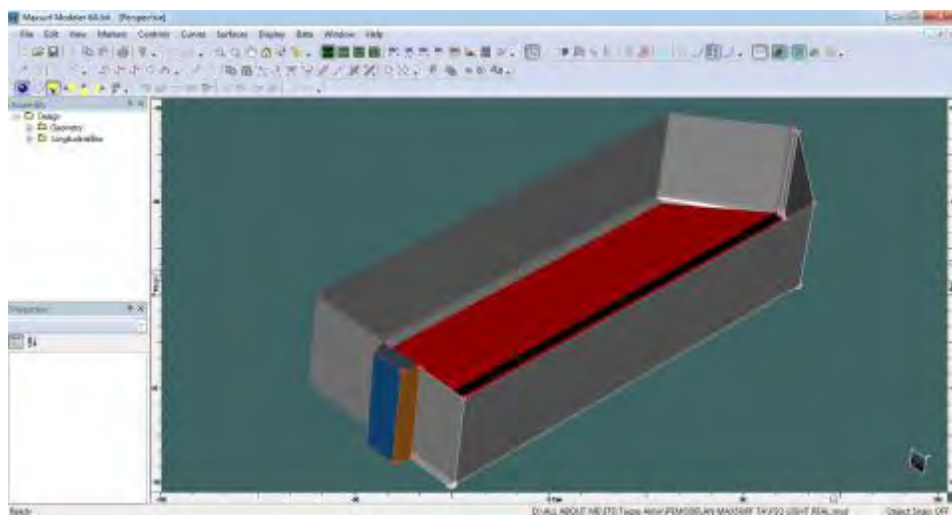
Gambar 4.4 Hasil Pemodelan FSO Arco Ardjuna Kondisi *Full Load* pada *Software* Maxsurf Modeler Tampak Atas (*Half Breadth Plan*)

Untuk kondisi *light load* pada FSO Arco Ardjuna dalam analisis ini dipengaruhi sistem *offloading*, dimana muatan minyak yang ada pada FSO saat *full load* ditransfer ke *shuttle tanker* yang muatannya kosong (*light load*) sehingga muatan yang ada pada *shuttle tanker* terisi penuh (*full load*). Muatan sisa dari proses transfer muatan tersebut yang menjadi acuan untuk kondisi *light load* pada FSO. Sehingga dilakukan perhitungan dan pemodelan untuk mendapatkan data hidrostatis pada FSO saat kondisi *light load*.

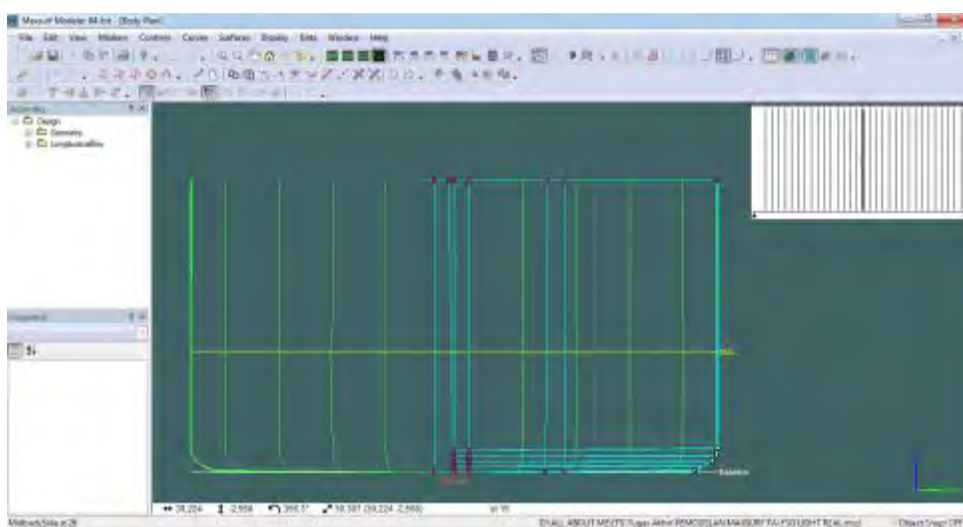
Pertama dilakukan perhitungan *displacement* untuk FSO kondisi *light load* yaitu sebagai berikut.

|   |                 |
|---|-----------------|
| <i>Displacement</i> FSO Arco Ardjuna saat kondisi <i>full load</i>  | = 153.202 t     |
| <i>Displacement</i> FSO Arco Ardjuna saat kondisi <i>lightship</i>  | = 15.529 t      |
| <i>DWT</i> FSO Arco Ardjuna saat kondisi <i>full load</i>           | = 137.673 t     |
| <br><i>DWT</i> FSO Arco Ardjuna saat kondisi <i>full load</i>       | <br>= 137.673 t |
| <i>DWT Shuttle Tanker</i> saat kondisi <i>full load</i>             | = 85.000 t      |
| <i>DWT</i> FSO Arco Ardjuna saat kondisi <i>light load</i>          | = 52.673 t      |
| <br><i>DWT</i> FSO Arco Ardjuna saat kondisi <i>light load</i>      | <br>= 52.673 t  |
| <i>Displacement</i> FSO Arco Ardjuna saat kondisi <i>lightship</i>  | = 15.529 t      |
| <i>Displacement</i> FSO Arco Ardjuna saat kondisi <i>light load</i> | = 68.202 t      |

Dari perhitungan di atas didapatkan nilai dari *displacement* untuk FSO kondisi *light load* yaitu sebesar 68.202 t. Setelah *displacement* diketahui, selanjutnya kita modelkan FSO kondisi *light load* menggunakan *software* Maxsurf Modeler dengan acuan *displacement* FSO *light load* tersebut. Dari hasil pemodelan tersebut, didapatkan data-data hidrostatik untuk FSO *light load* yang dapat digunakan untuk analisa selanjutnya. Berikut hasil pemodelan untuk FSO Arco Ardjuna kondisi *light load* dapat dilihat pada Gambar 4.5 – 4.8.

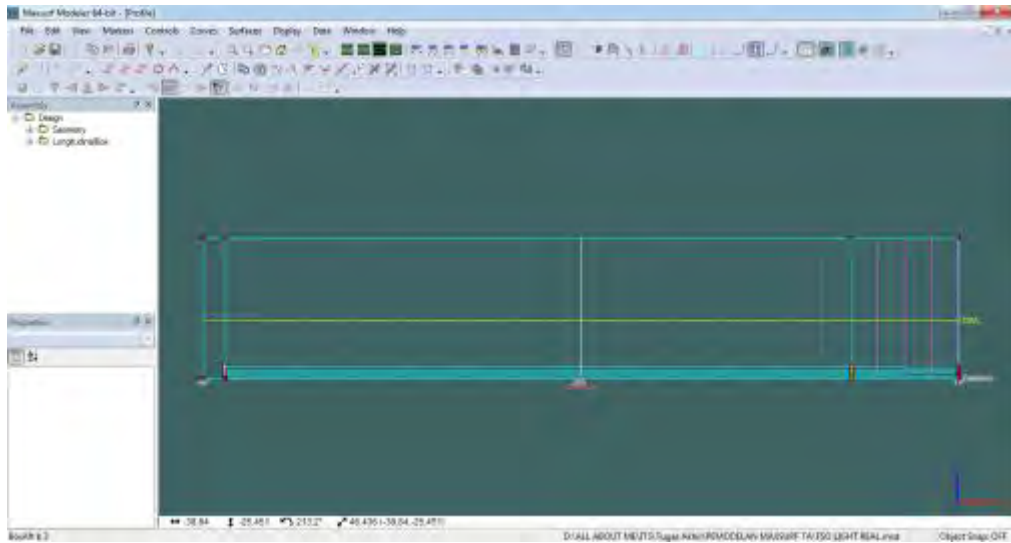


Gambar 4.5 Hasil Pemodelan FSO Arco Ardjuna Kondisi *Light Load* pada *Software* Maxsurf Modeler Tampak Isometri

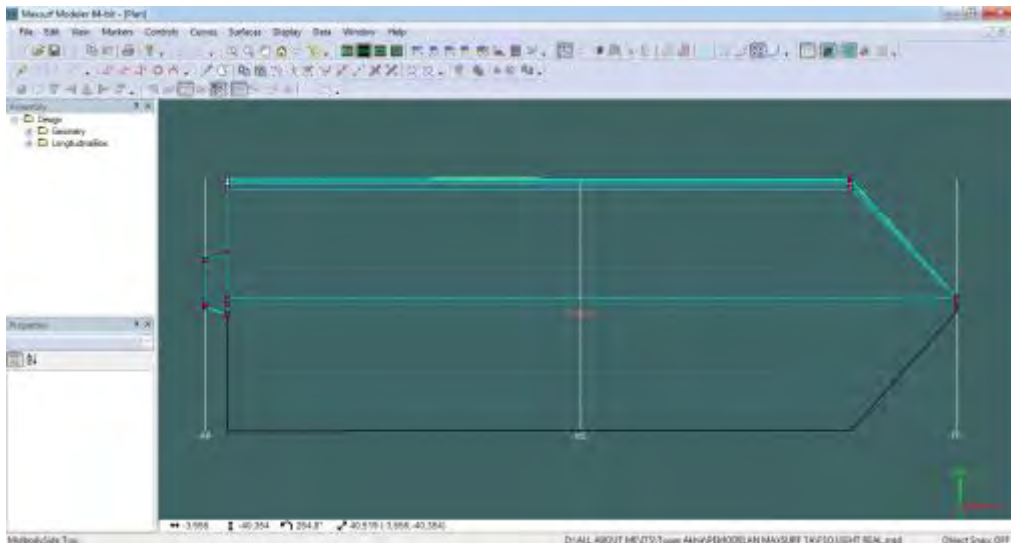


Gambar 4.6 Hasil Pemodelan FSO Arco Ardjuna Kondisi *Light Load* pada *Software* Maxsurf Modeler Tampak Depan (*Body Plan*)





Gambar 4.7 Hasil Pemodelan FSO Arco Ardjuna Kondisi *Light Load* pada *Software* Maxsurf Modeler Tampak Samping (*Sheer Plan*)



Gambar 4.8 Hasil Pemodelan FSO Arco Ardjuna Kondisi *Light Load* pada *Software* Maxsurf Modeler Tampak Atas (*Half Breadth Plan*)

#### 4.1.2 Single Point Mooring (SPM)

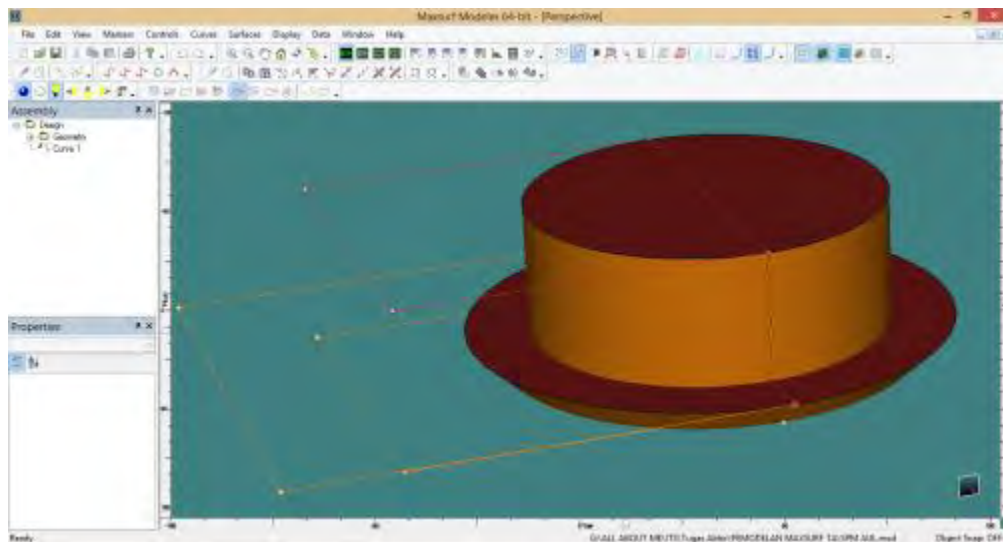
*Single Point Mooring* (SPM) yang digunakan untuk menambat FSO Arco Ardjuna adalah SPM 3. Pemodelan *surface* pada SPM ini menggunakan *software* Maxsurf Modeler yang akan menghasilkan model dan data hidrostatis. Data yang digunakan dalam pemodelan SPM 3 menggunakan *software* Maxsurf Modeler terdapat pada Tabel 4.2

Tabel 4.2 *Principle Dimention SPM 3*

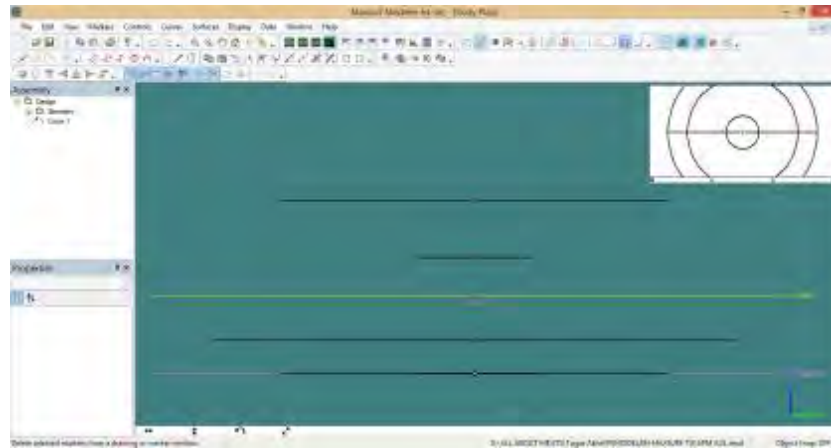
| <i>Designation</i>            | <i>Unit</i> | <i>Data</i> |
|-------------------------------|-------------|-------------|
| <i>Displacement</i>           | t           | 225,34      |
| <i>Shell Outer Diameter</i>   | m           | 12          |
| <i>Centre Well Diameter</i>   | m           | 3,57        |
| <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. PHE ONWJ, 2013)

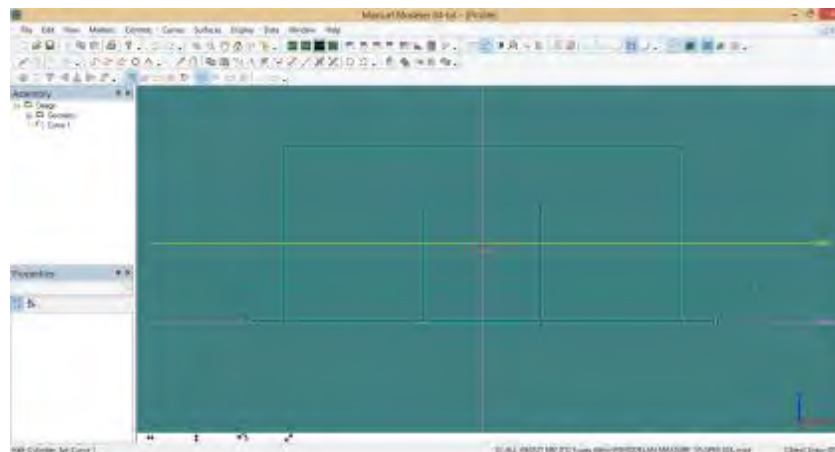
Hasil pemodelan pada *software* Maxsurf Modeler untuk SPM 3 dapat dilihat pada Gambar 4.9 - 4.12.



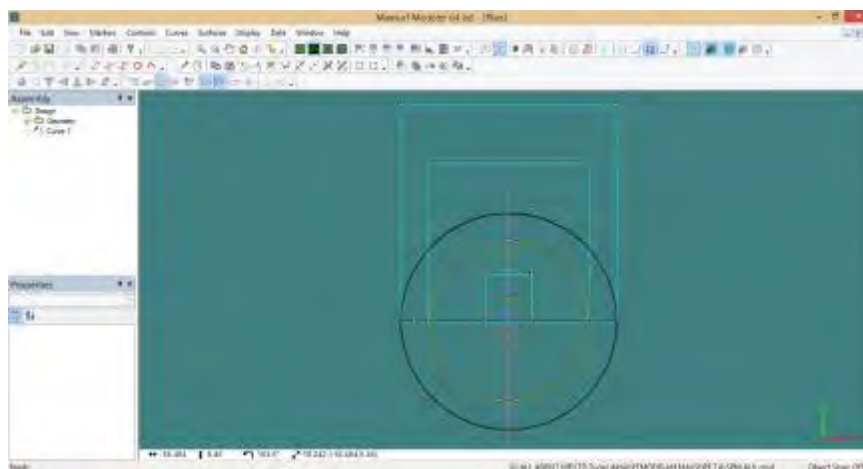
Gambar 4.9 Hasil Pemodelan SPM 3 pada *Software* Maxsurf Modeler Tampak Isometri



Gambar 4.10 Hasil Pemodelan SPM 3 pada *Software* Maxsurf Modeler Tampak Depan (*Body Plan*)



Gambar 4.11 Hasil Pemodelan SPM 3 pada *Software* Maxsurf Modeler Tampak Samping (*Sheer Plan*)



Gambar 4.12 Hasil Pemodelan SPM 3 pada *Software* Maxsurf Modeler Tampak Atas (*Half Breadth Plan*)

### 4.1.3 Shuttle Tanker

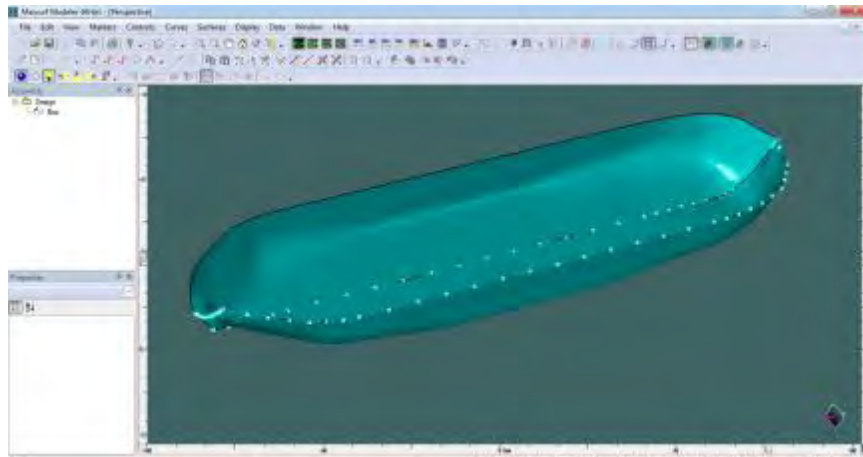
Pemodelan *surface* untuk *shuttle tanker* 85000 DWT dilakukan dengan menggunakan *software* Maxsurf Modeler yang bertujuan untuk mendapatkan model dan data hidrostatis. Sama halnya dengan FSO Arco Ardjuna, model dan data hidrostatis *shuttle tanker* juga digunakan sebagai *input* untuk perhitungan *Response Amplitude Operator* (RAO) kondisi terapan bebas dan tertambat pada *software* Ansys AQWA. Pemodelan *shuttle tanker* ini dilakukan pada dua kondisi, yaitu kondisi *full load* dan *light load*. Pemodelan *shuttle tanker* 85000 DWT dengan *software* Maxsurf Modeler menggunakan data yang ditunjukkan oleh Tabel 4.3.

Tabel 4.3 *Principle Dimension Shuttle Tanker 85000 DWT*

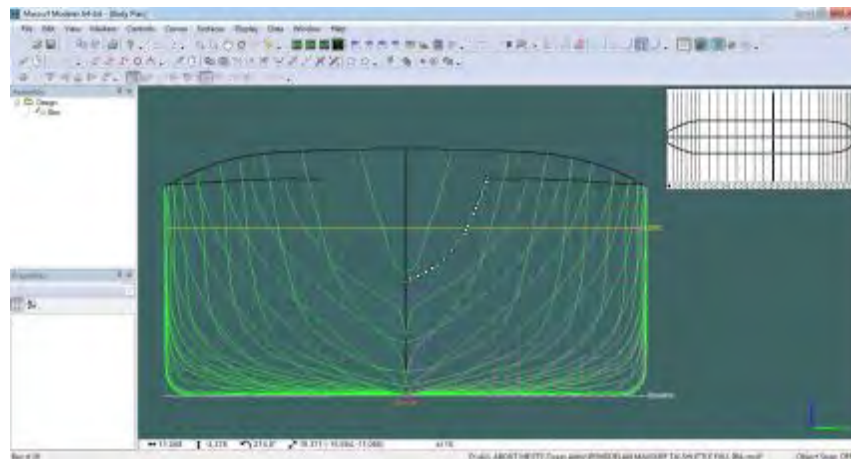
| <i>Designation</i>                        | <i>Unit</i> | <i>Lightship</i> | <i>Maximum Operating Draft</i> |
|---|-------------|------------------|--------------------------------|
| Length Overall ( $L_{OA}$ )               | m           | 221,56           |                                |
| Length Between Perpendicular ( $L_{PP}$ ) | m           | 213,36           |                                |
| Moulded Breadth ( $B_M$ )                 | m           | 38,29            |                                |
| Moulded Depth ( $D_M$ )                   | m           | 19,60            |                                |
| LWT + 10%                                 | t           | 10510,35         |                                |
| KG (LWT + 10%)                            | m           | 9,8              |                                |
| T   | m           | -                | 13,28                          |
| $C_B$                                     | m           | -                | 0,825                          |
| Volume Displacement                       | $m^3$       | 9871,32          | 91822,54                       |
| Displacement                              | t           | 10118,10         | 94118,10                       |

(Sumber: PT. Citra Mas, 2013)

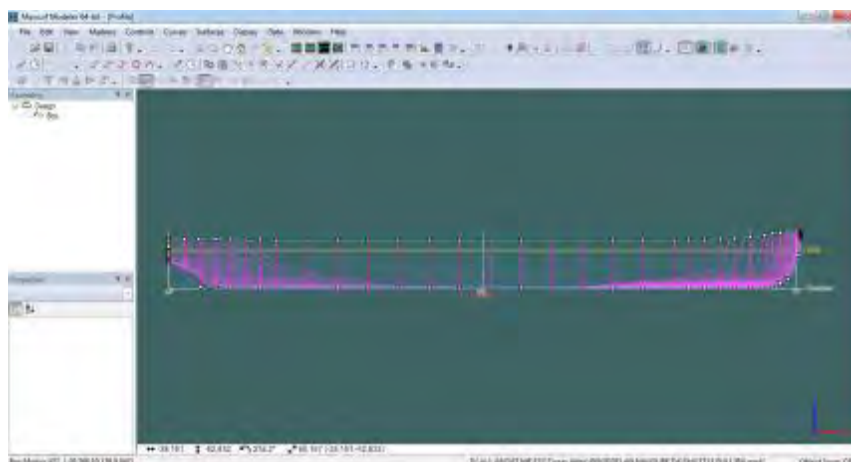
Hasil pemodelan *shuttle tanker* 85000 DWT kondisi *full load* pada *software* Maxsurf Modeler dapat dilihat pada Gambar 4.13 – 4.16.



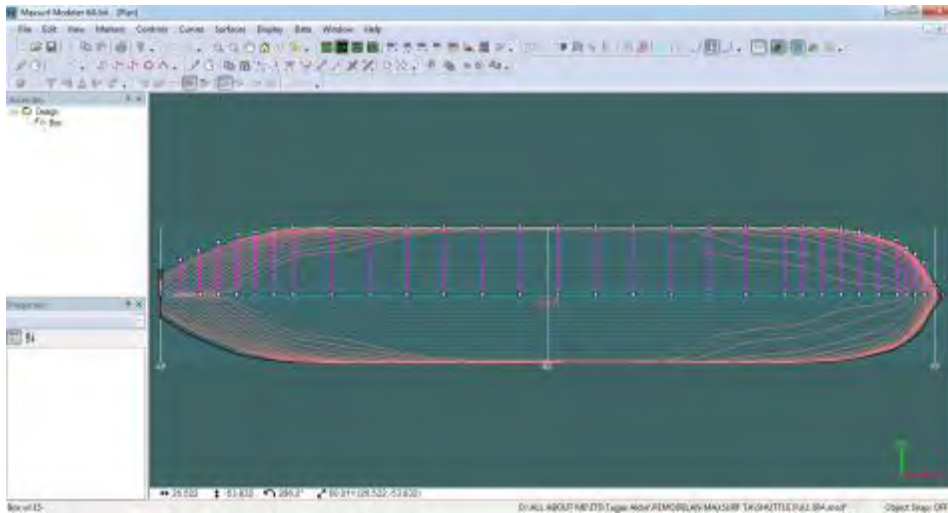
Gambar 4.13 Hasil Pemodelan *Shuttle Tanker* 85000 DWT Kondisi *Full Load* pada *Software* Maxsurf Modeler Tampak Isometri



Gambar 4.14 Hasil Pemodelan *Shuttle Tanker* 85000 DWT Kondisi *Full Load* pada *Software* Maxsurf Modeler Tampak Depan (*Body Plan*)



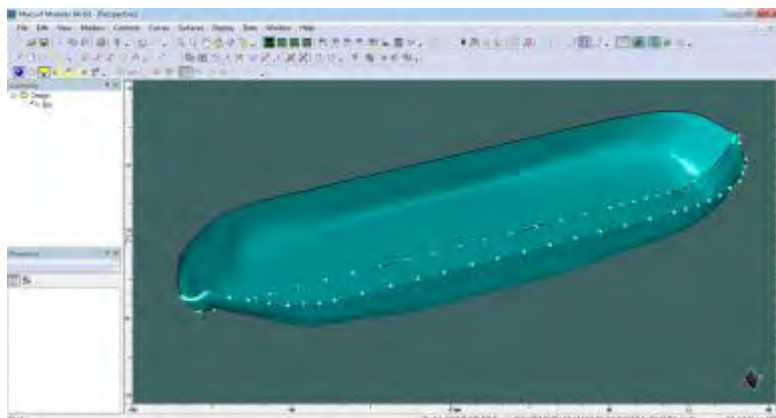
Gambar 4.15 Hasil Pemodelan *Shuttle Tanker* 85000 DWT Kondisi *Full Load* pada *Software* Maxsurf Modeler Tampak Samping (*Sheer Plan*)



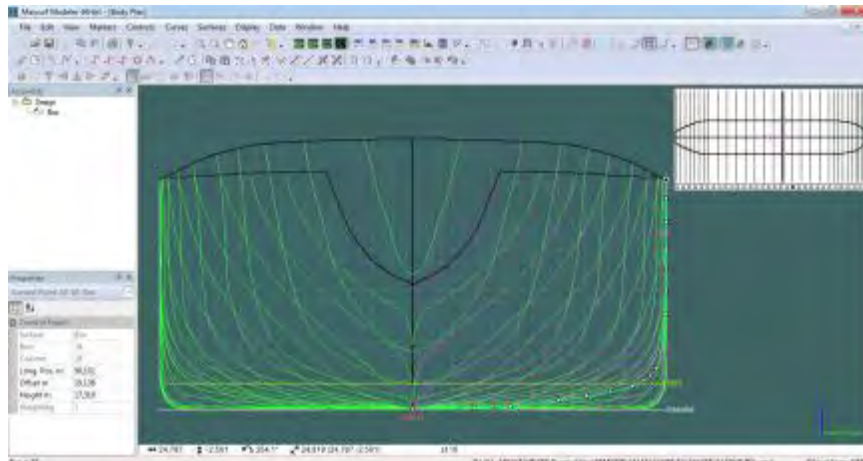
Gambar 4.16 Hasil Pemodelan *Shuttle Tanker* 85000 DWT Kondisi *Full Load* pada *Software* Maxsurf Modeler Tampak Atas (*Half Breadth Plan*)

Data-data untuk pemodelan *shuttle tanker* 85000 DWT kondisi *light load* hampir semua tidak diketahui. Data yang diberikan hanya data *displacement* sebesar 10510,35 t. Data-data hidrostatis seperti sarat kapal, titik berat, titik apung dibutuhkan dalam analisis selanjutnya. Sehingga perlu dilakukan perhitungan dan pemodelan pada *shuttle tanker* kondisi *light load*.

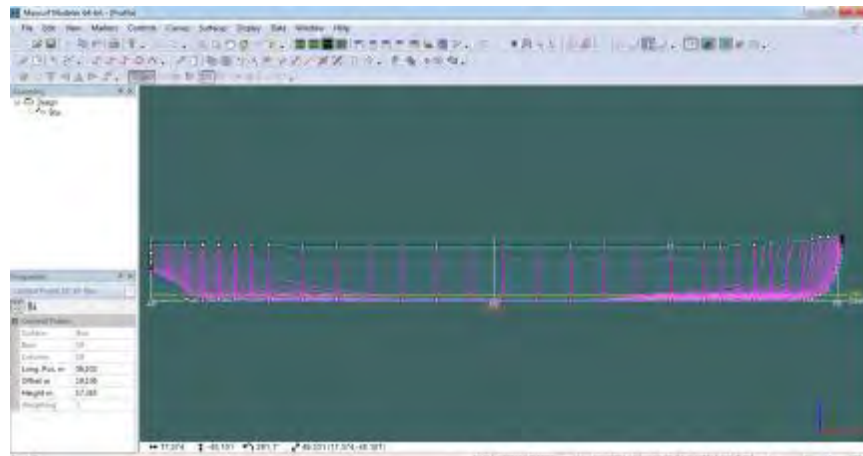
Dari nilai *displacement* yang diketahui, *shuttle tanker* dimodelkan pada *software* Maxsurf Modeler. Pada pemodelan tersebut dihasilkan data hidrostatis untuk *shuttle tanker* kondisi *light load*. Hasil pemodelan *shuttle tanker* 85000 DWT kondisi *light load* pada *software* Maxsurf Modeler dapat dilihat pada Gambar 4.17 – 4.20.



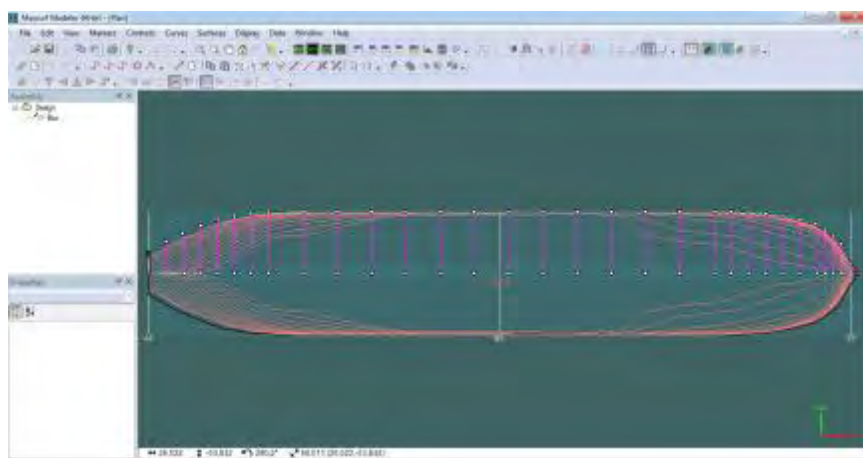
Gambar 4.17 Hasil Pemodelan *Shuttle Tanker* 85000 DWT Kondisi *Light Load* pada *Software* Maxsurf Modeler Tampak Isometri



Gambar 4.18 Hasil Pemodelan *Shuttle Tanker* 85000 DWT Kondisi *Light Load* pada *Software* Maxsurf Modeler Tampak Depan (*Body Plan*)



Gambar 4.19 Hasil Pemodelan *Shuttle Tanker* 85000 DWT Kondisi *Light Load* pada *Software* Maxsurf Modeler Tampak Samping (*Sheer Plan*)



Gambar 4.20 Hasil Pemodelan *Shuttle Tanker* 85000 DWT Kondisi *Light Load* pada *Software* Maxsurf Modeler Tampak Atas (*Half Breadth Plan*)

## 4.2 Validasi Pemodelan

### 4.2.1 *Floating Storage and Offloading (FSO)*

Setelah pemodelan dilakukan, maka didapatkan data hidrostatik. Data hidrostatik ini divalidasi agar didapatkan model struktur yang sama dengan keadaan sebenarnya. Validasi model dilakukan dengan membandingkan data hidrostatik yang dihasilkan *software* Maxsurf Modeler dengan data hidrostatik yang sudah ada. Dalam analisis ini, validasi model untuk FSO Arco Ardjuna dilakukan pada dua kondisi yaitu kondisi *full load* dan kondisi *light load*.

Faktor *error* atau toleransi yang diberikan untuk perbedaan data hidrostatik yang didapatkan dari *software* Maxsurf Modeler dengan data hidrostatik yang sudah ada adalah 5%. Apabila perbedaan data hidrostatik tersebut tidak melebihi faktor *error*, maka hasil perancangan *lines plan* pada FSO Arco Ardjuna *valid* digunakan sebagai *input* dalam analisis selanjutnya yaitu perhitungan *Response Amplitude Operator* (RAO) terapung bebas dan tertambat. Besaran hidrostatik yang dibandingkan terdapat pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Validasi Data Hidrostatik FSO Arco Ardjuna Kondisi *Full Load*

| <i>Data</i>                | <i>Unit</i>    | <b>FSO Arco Ardjuna</b> | <b>Maxsurf Modeler</b> | <b>Koreksi</b> | <b>Status</b> |
|----------------------------|----------------|-------------------------|------------------------|----------------|---------------|
| <i>Displacement</i>        | t              | 153202                  | 149876                 | 2.17%          | Memenuhi      |
| <i>Volume</i>              | m <sup>3</sup> | 149293.659              | 146220.718             | 2.06%          | Memenuhi      |
| <i>Draft to Baseline</i>   | m              | 24                      | 24                     | 0.00%          | Memenuhi      |
| <i>Immersed Depth</i>      | m              | 24                      | 24                     | 0.00%          | Memenuhi      |
| Lwl                        | m              | 142.6                   | 142.6                  | 0.00%          | Memenuhi      |
| <i>Beam wl</i>             | m              | 48.2                    | 48.055                 | 0.30%          | Memenuhi      |
| WSA                        | m <sup>2</sup> | 12841                   | 13420.084              | -4.51%         | Memenuhi      |
| <i>Max Cross Sect Area</i> | m <sup>2</sup> | 1150.63                 | 1131.688               | 1.65%          | Memenuhi      |
| <i>Waterplane Area</i>     | m <sup>2</sup> | 6239                    | 6219.604               | 0.31%          | Memenuhi      |
| Cp                         |                | 0.908                   | 0.906                  | 0.22%          | Memenuhi      |
| Cb                         |                | 0.9042                  | 0.889                  | 1.68%          | Memenuhi      |
| Cm                         |                | 0.9958                  | 0.981                  | 1.49%          | Memenuhi      |
| Cwp                        |                | 0.9077                  | 0.908                  | -0.03%         | Memenuhi      |
| <i>LCB from Midship</i>    | m              | -2.78                   | -2.811                 | -1.12%         | Memenuhi      |
| <i>LCF from Midship</i>    | m              | -2.79                   | -2.857                 | -2.40%         | Memenuhi      |
| KB                         | m              | 12.02                   | 12.123                 | -0.86%         | Memenuhi      |
| KMt                        | m              | 19.73                   | 19.871                 | -0.71%         | Memenuhi      |
| KMI                        | m              | 71.3                    | 72.741                 | -2.02%         | Memenuhi      |



Telah dijelaskan sebelumnya pada pemodelan FSO kondisi *light load*, untuk mendapatkan data hidrostatik terlebih dahulu dilakukan pemodelan FSO pada Maxsurf Modeler yang mengacu nilai *displacement* yang sebelumnya telah ditentukan untuk FSO kondisi *light load* yaitu sebesar 68202 t. Dari pemodelan tersebut didapatkan data-data hidrostatik yang ditunjukkan pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Data Hidrostatik FSO Arco Ardjuna Kondisi *Light Load*

| <i>Data</i>              | <i>Unit</i>    | <b>Maxsurf Modeler</b> |
|--------------------------|----------------|------------------------|
| <i>Displacement</i>      | t              | 68202                  |
| <i>Volume</i>            | m <sup>3</sup> | 66538,408              |
| <i>Draft to Baseline</i> | m              | 10,863                 |
| <i>Immersed Depth</i>    | m              | 10,863                 |
| Lwl                      | m              | 142,2                  |
| <i>Beam wl</i>           | m              | 47,99                  |
| WSA                      | m <sup>2</sup> | 9344,958               |
| Max Cross Sect Area      | m <sup>2</sup> | 514,964                |
| <i>Waterplane Area</i>   | m <sup>2</sup> | 6194,571               |
| Cp                       |                | 0,909                  |
| Cb                       |                | 0,897                  |
| Cm                       |                | 0,991                  |
| Cwp                      |                | 0,908                  |
| <i>LCB from Midship</i>  | m              | -2,825                 |
| <i>LCF from Midship</i>  | m              | -2,893                 |
| KB                       | m              | 5,491                  |
| KMt                      | m              | 22,472                 |
| KMI                      | m              | 137,056                |

Dari data hidrostatik di atas dilakukan validasi untuk FSO kondisi *light load*. Berikut hasil dari validasi yang diuraikan pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Validasi Data Hidrostatik FSO Arco Ardjuna Kondisi *Light Load*

| <i>Data</i>         | <i>Unit</i> | <b>FSO Arco Ardjuna</b> | <b>Maxsurf Modeler</b> | <b>Koreksi</b> | <b>Status</b> |
|---------------------|-------------|-------------------------|------------------------|----------------|---------------|
| <i>Displacement</i> | t           | 68202                   | 68202                  | 0,00%          | Memenuhi      |
| Lwl                 | m           | 142,6                   | 142,2                  | 0,28%          | Memenuhi      |

Tabel 4.6 Validasi Data Hidrostatik FSO Arco Ardjuna Kondisi *Light Load* (Lanjutan)

| <i>Data</i>            | <i>Unit</i>    | <b>FSO Arco Ardjuna</b> | <i>Maxsurf Modeler</i> | <b>Koreksi</b> | <b>Status</b> |
|------------------------|----------------|-------------------------|------------------------|----------------|---------------|
| <i>Beam wl</i>         | m              | 48,2                    | 47,99                  | 0,44%          | Memenuhi      |
| <i>Waterplane Area</i> | m <sup>2</sup> | 6239                    | 6194,571               | 0,71%          | Memenuhi      |
| <i>Cp</i>              |                | 0,908                   | 0,909                  | -0,11%         | Memenuhi      |
| <i>Cb</i>              |                | 0,9042                  | 0,897                  | 0,80%          | Memenuhi      |
| <i>Cm</i>              |                | 0,9958                  | 0,991                  | 0,48%          | Memenuhi      |
| <i>Cwp</i>             |                | 0,9077                  | 0,908                  | -0,03%         | Memenuhi      |

#### 4.2.2 Single Point Mooring (SPM)

Validasi data hidrostatik juga dilakukan pada *single point mooring* (SPM) antara model Maxsurf Modeler dengan model sebenarnya. Faktor *error* yang diberikan adalah 5%. Berikut hasil validasi data hidrostatik untuk SPM yang ditunjukkan pada tabel 4.7.

Tabel 4.7 Validasi Data Hidrostatik *Single Point Mooring*

| <i>Data</i>                   | <i>Unit</i> | <b>SPM</b> | <i>Maxsurf Modeler</i> | <b>Koreksi</b> | <b>Status</b> |
|-------------------------------|-------------|------------|------------------------|----------------|---------------|
| <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>           | t           | 255,34     | 258,17                 | -1,11%         | Memenuhi      |

#### 4.2.3 Shuttle Tanker

Validasi data hidrostatik pada *shuttle tanker* 85000 DWT dilakukan pada kondisi *full load* dan kondisi *light load*. Sama halnya dengan FSO Arco Ardjuna dan SPM, faktor *error* untuk perbedaan data hidrostatik hasil dari Maxsurf Modeler dengan data sebenarnya adalah 5%. Perancangan yang *valid* pada *lines plan shuttle tanker* digunakan sebagai *input* dalam menghitung

*Response Amplitude Operator* (RAO) terapan bebas dan tertambat. Tabel 4.8 merupakan validasi data hidrostatik untuk *shuttle tanker*.

Tabel 4.8 Validasi Data Hidrostatik *Shuttle Tanker* 85000 DWT Kondisi *Full Load*

| <i>Data</i>              | <i>Unit</i>    | <i>Shuttle Tanker</i> | <i>Maxsurf Modeler</i> | <b>Koreksi</b> | <b>Status</b> |
|--------------------------|----------------|-----------------------|------------------------|----------------|---------------|
| <i>Displacement</i>      | t              | 94118,01              | 93979                  | 0,15%          | Memenuhi      |
| <i>Volume</i>            | m <sup>3</sup> | 91822,54              | 91686,632              | 0,15%          | Memenuhi      |
| <i>Draft to Baseline</i> | m              | 13,28                 | 13,28                  | 0,00%          | Memenuhi      |
| <i>Immersed Depth</i>    | m              | 13,28                 | 13,28                  | 0,00%          | Memenuhi      |
| Lwl                      | m              | 219                   | 219,635                | -0,39%         | Memenuhi      |
| <i>Beam wl</i>           | m              | 38,29                 | 38,29                  | 0,00%          | Memenuhi      |
| Cb                       |                | 0,825                 | 0,821                  | 0,48%          | Memenuhi      |

Pemodelan *shuttle tanker* kondisi *light load* dilakukan untuk mendapatkan data-data hidrostatik. Pemodelan disini mengacu pada *displacement* yang telah diketahui dari data yaitu sebesar 10510,35 t. Sehingga didapatkan data hidrostatik pada Tabel 4.9.

Tabel 4.9 Data Hidrostatik *Shuttle Tanker* 85000 DWT Kondisi *Light Load*

| <i>Data</i>              | <i>Unit</i>    | <b>Maxsurf Modeler</b> |
|--------------------------|----------------|------------------------|
| <i>Displacement</i>      | t              | 10509                  |
| <i>Volume</i>            | m <sup>3</sup> | 10252,499              |
| <i>Draft to Baseline</i> | m              | 1,991                  |
| <i>Immersed Depth</i>    | m              | 1,980                  |
| Lwl                      | m              | 204,702                |
| <i>Beam wl</i>           | m              | 38,135                 |
| WSA                      | m <sup>2</sup> | 6457,94                |
| Max Cross Sect Area      | m <sup>2</sup> | 72,628                 |
| <i>Waterplane Area</i>   | m <sup>2</sup> | 6185,775               |
| Cp                       |                | 0,690                  |
| Cb                       |                | 0,663                  |
| Cm                       |                | 0,962                  |
| Cwp                      |                | 0,792                  |
| <i>LCB from Midship</i>  | m              | 1,797                  |
| <i>LCF from Midship</i>  | m              | 5,683                  |
| KB                       | m              | 1,098                  |

Tabel 4.9 Data Hidrostatik *Shuttle Tanker* 85000 DWT Kondisi *Light Load* (Lanjutan)

| <i>Data</i> | <i>Unit</i> | <b>Maxsurf Modeler</b> |
|-------------|-------------|------------------------|
| KMt         | m           | 60,224                 |
| KMI         | m           | 1499,787               |

Karena minimnya data dan pemodelan struktur yang dilakukan hanya mengacu pada *displacement* yang diketahui, maka untuk *shuttle tanker* kondisi *light load* hanya beberapa data hidrostatik yang dapat dilakukan validasi. Validasi data hidrostatik *shuttle tanker* 85000 DWT kondisi *light load* ditunjukkan pada Tabel 4.10.

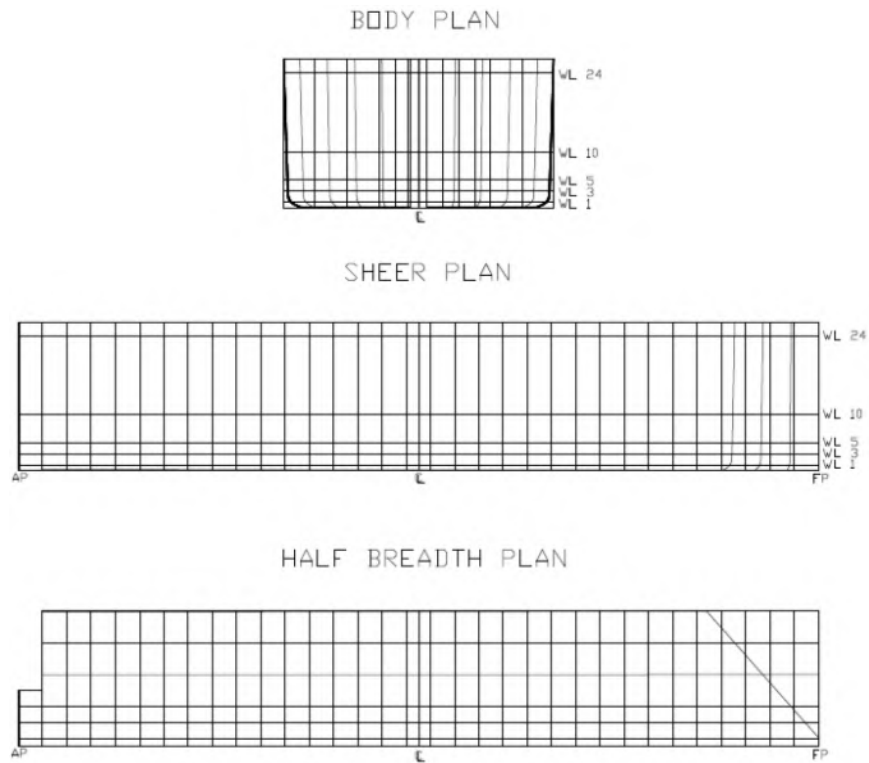
Tabel 4.10 Validasi Data Hidrostatik *Shuttle Tanker* 85000 DWT Kondisi *Light Load*

| <i>Data</i>         | <i>Unit</i> | <i>Shuttle Tanker</i> | <i>Maxsurf Modeler</i> | <b>Koreksi</b> | <b>Status</b> |
|---------------------|-------------|-----------------------|------------------------|----------------|---------------|
| <i>Displacement</i> | t           | 10510,35              | 10509                  | 0,01%          | Memenuhi      |

### 4.3 Lines Plan

#### 4.3.1 Floating Storage and Offloading (FSO)

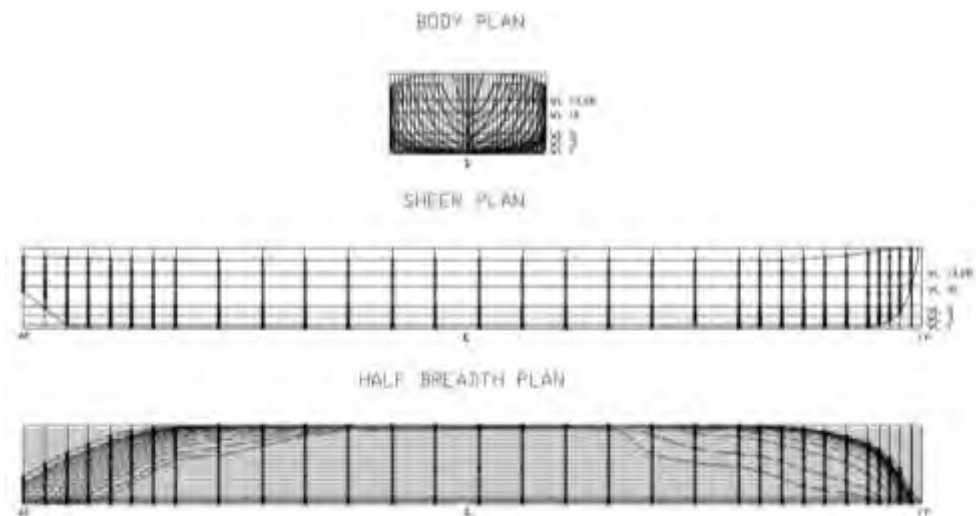
Setelah validasi model FSO Arco Ardjuna sebenarnya dan model Maxsurf memenuhi, langkah selanjutnya adalah membuat perancangan rencana garis atau *lines plan*. *Lines plan* dibuat dari data *offset* model yang sudah valid pada Maxsurf. Gambar 4.21 berikut merupakan gambar *lines plan* dari FSO Arco Ardjuna.



Gambar 4.21 *Lines Plan* FSO Arco Ardjuna

### 4.3.2 Shuttle Tanker

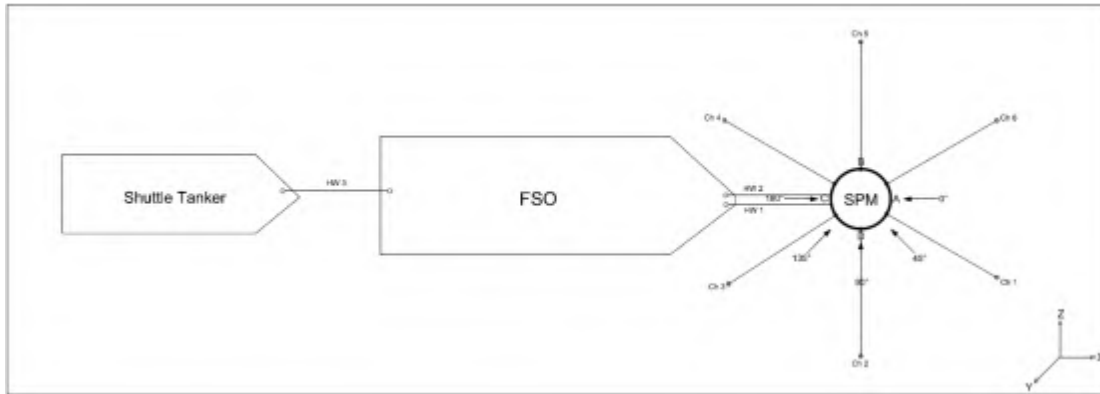
Pada *shuttle tanker* dibuat perancangan rencana garis atau *lines plan* setelah validasi model *shuttle tanker* sebenarnya dan model yang dibuat dimaxsurf memenuhi. Gambar 4.22 di bawah ini merupakan gambar *lines plan* dari *shuttle tanker* 85000 DWT.



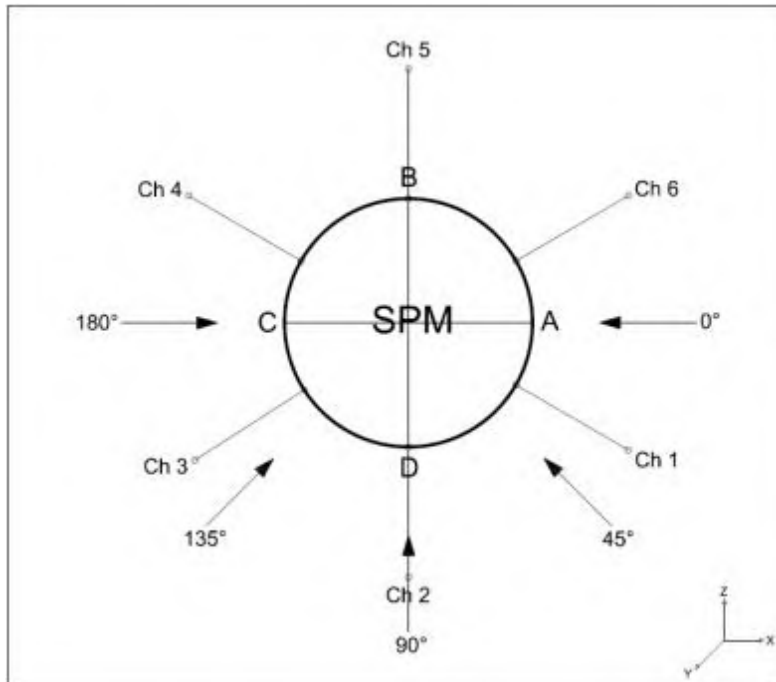
Gambar 4.22 *Lines Plan* Shuttle Tanker 85000 DWT

#### 4.4 Konfigurasi Arah Pembebanan Gelombang

Konfigurasi arah pembebanan gelombang dengan sudut  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$  dan  $180^\circ$  ditunjukkan pada Gambar 4.23 dan Gambar 4.24. Untuk analisis respon gerak struktur apung FSO, SPM dan *shuttle tanker* pada tugas akhir ini menggunakan arah pembebanan gelombang  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  dan  $180^\circ$ .



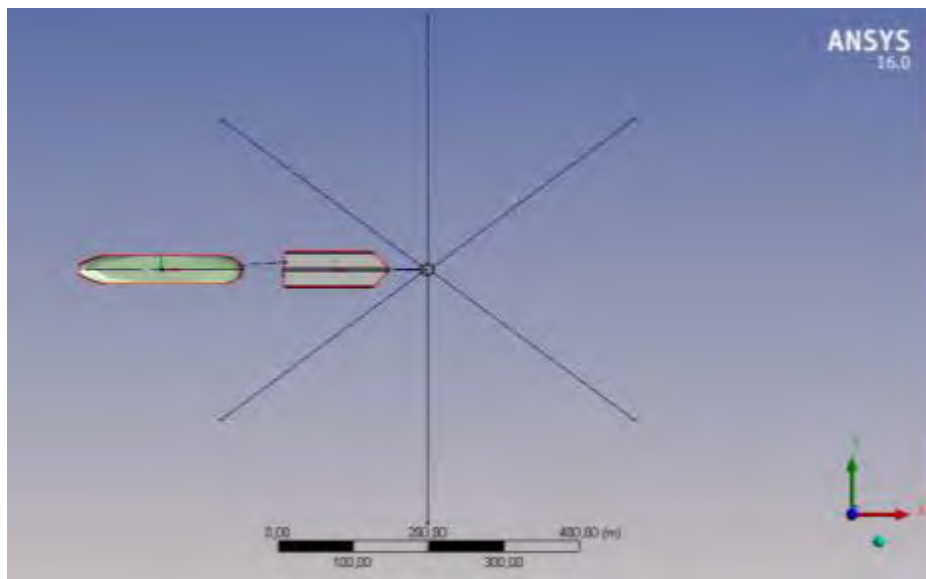
Gambar 4.23 Konfigurasi Arah Pembebanan Gelombang



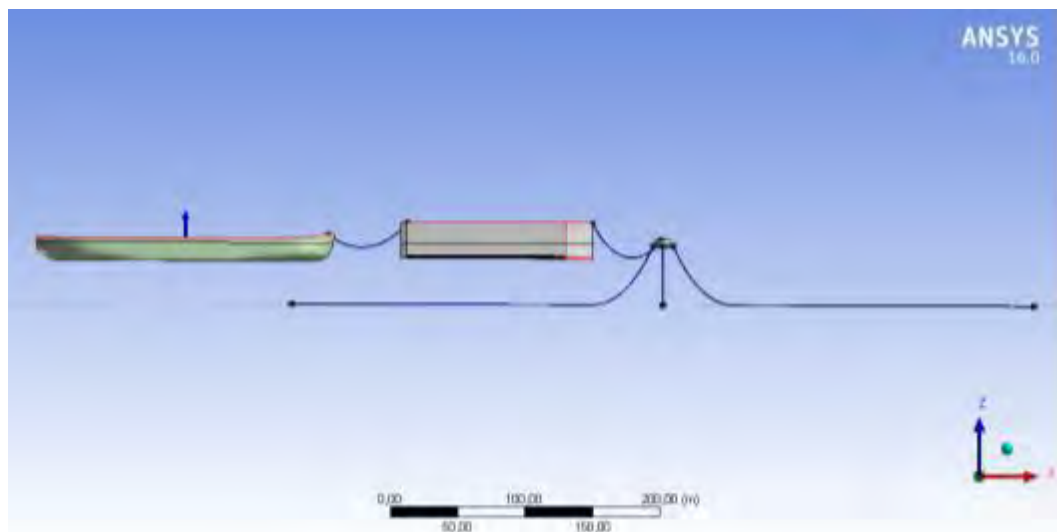
Gambar 4.24 Konfigurasi Arah Pembebanan Gelombang pada *Single Point Mooring*

#### 4.5 Konfigurasi *Anchor Legs* dan *Hawser*

Pada analisis ini, SPM dirancang dengan *anchor legs* sejumlah 6 buah yang dipasang secara menyebar dan simetris. Sedangkan FSO dirancang dengan *hawser* sejumlah 3 buah dimana 2 buah menghubungkan FSO dengan SPM dan 1 buah menghubungkan FSO dengan *shuttle tanker*. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 4.25 dan 4.26.



Gambar 4.25 Konfigurasi *Anchor Legs* dan *Hawser* pada Ansys AQWA (Tampak Atas)



Gambar 4.26 Konfigurasi *Anchor Legs* dan *Hawser* pada Ansys AQWA (Tampak Samping)

*Anchor legs* yang dipasang pada SPM didesain memiliki panjang yang sama. Panjang tali pada *anchor legs* dalam analisis ini telah diketahui dari data yaitu sebesar 350 m. Sama halnya dengan *anchor legs*, panjang tiap *hawser* juga didesain dengan panjang yang sama yaitu sebesar 220 ft (67,056 m).

Untuk jarak minimum pada *anchor legs* dilakukan perhitungan menurut Faltinsen (1990) dimana perhitungan tersebut akan dijabarkan sebagai berikut.

Diketahui:

$$\begin{aligned}
 l &= \text{Panjang keseluruhan } mooring \text{ line} &= 350 \text{ m} \\
 h &= \text{Jarak titik tumpu ke } seabed &= 45 \text{ m} \\
 W &= \text{Berat } mooring \text{ line} &= 182,72 \text{ kg/m} \\
 MBL &= 7051000 \text{ N} &= 719001,9 \text{ kg} \\
 a &= MBL / W = 719001,9 \text{ kg} / 182,72 \text{ kg/m} &= 3934,993 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Sehingga, jarak minimum *mooring line* adalah

$$\begin{aligned}
 x &= l - h \left( 1 + 2 \frac{a}{h} \right)^{\frac{1}{2}} + a \cosh^{-1} \left( 1 + \frac{h}{a} \right) \\
 x &= 350 - 45 \left( 1 + 2 \frac{3934,993}{45} \right)^{\frac{1}{2}} + 3934,993 \cosh^{-1} \left( 1 + \frac{45}{3934,993} \right) \\
 x &= 304,43 \text{ m}
 \end{aligned}$$

## 4.6 Analisis Respon Gerak Struktur

### 4.6.1 Floating Storage and Offloading System (FSO)

Analisis gerakan FSO dilakukan dengan menggunakan *software* Ansys AQWA. FSO yang telah dimodelkan pada Maxsurf Modeler di-*input* pada Ansys AQWA sehingga tidak perlu lagi memodelkan FSO dari awal untuk geometrinya.

Data lain yang di-*input* untuk analisis gerakan menggunakan Ansys AQWA antara lain arah sudut datang gelombang ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  dan  $180^\circ$ ), kondisi kapal menyangkut *draft*, titik berat, titik apung, *displacement*, volume *displacement*, jari-jari girasi dan data lingkungan Perairan Laut Jawa pada kondisi ekstrem 100 tahunan dimana FSO Arco Ardjuna beroperasi seperti tinggi gelombang, periode gelombang dan kedalaman perairan yang ditunjukkan pada tabel 4.11 dan 4.12.



Tabel 4.11 Data Lingkungan Perairan Laut Jawa

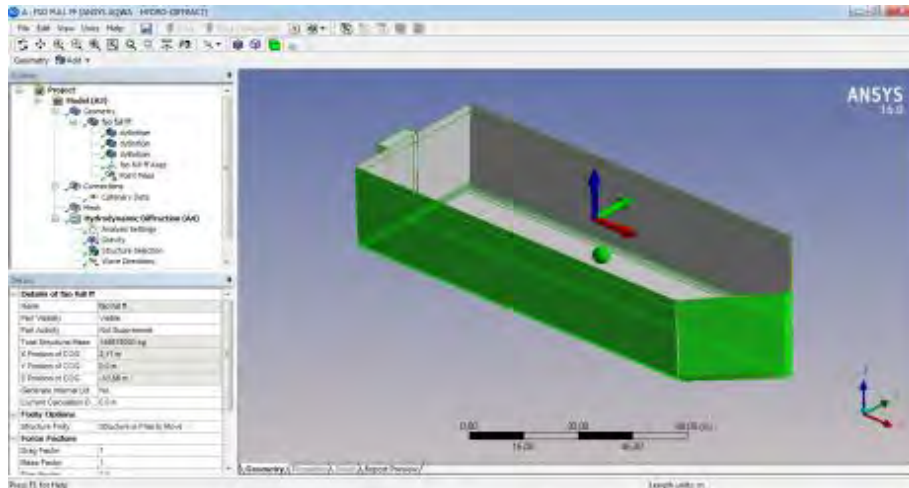
| <i>Parameter</i>                | <i>Unit</i> | <i>100-years return period</i> |
|---------------------------------|-------------|--------------------------------|
| Kedalaman                       | m           | 45                             |
| Tinggi Gelombang Signifikan/Hs  | m           | 3,6                            |
| Periode Gelombang Signifikan/Ts | s           | 8,3                            |
| Spektrum                        |             | Jonswap                        |

(Sumber: PT. PHE ONWJ, 2013)

Table 4.12 Data Titik Berat, Titik Apung dan Jari-jari Girasi FSO Arco Ardjuna

| <i>Parameter</i>           | <b>Unit</b>    | <b>FSO Kondisi<br/>Full Load</b> | <b>FSO Kondisi<br/>Light Load</b> |
|----------------------------|----------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| <i>Displacement</i>        | t              | 149876                           | 68202                             |
| <i>Volume Displacement</i> | m <sup>3</sup> | 146220,718                       | 66538,408                         |
| LCG (x)                    | m              | 2,17                             | 1,29                              |
| TCG (y)                    | m              | 0                                | 0                                 |
| VCG / KG (z)               | m              | 13,44                            | 14,04                             |
| KB                         | m              | 12,123                           | 5,491                             |
| Kxx                        | m              | 16,388                           |                                   |
| Kyy                        | m              | 35,65                            |                                   |
| Kzz                        | m              | 36,076                           |                                   |

Berikut ini adalah hasil model FSO Arco Ardjuna dari Ansys AQWA berdasarkan data yang telah dimasukkan yang ditunjukkan pada Gambar 4.27.



Gambar 4.27 Model FSO Arco Ardjuna pada Ansys AQWA

Setelah semua data dimasukkan dapat dilakukan analisis selanjutnya.

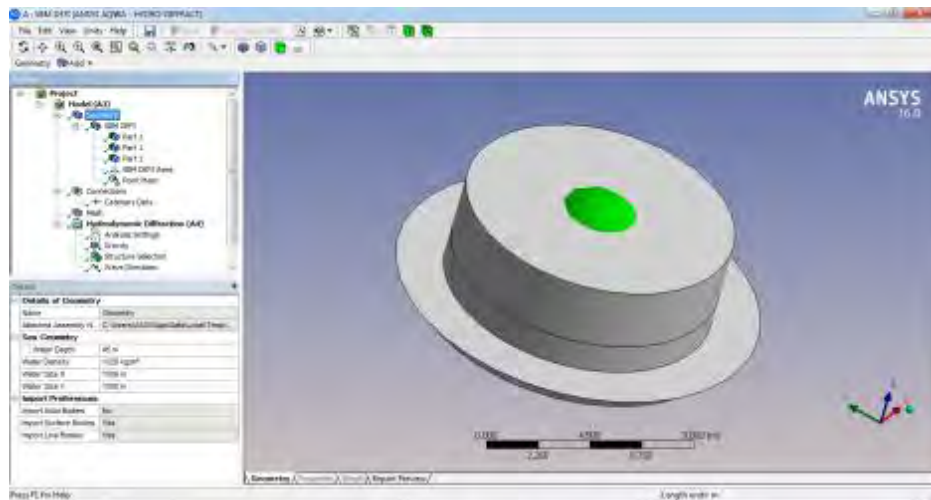
#### 4.6.2 Single Point Mooring

Analisis gerakan pada SPM yang dilakukan dengan menggunakan *software* Ansys AQWA sama dengan FSO. Model SPM yang telah dimodelkan pada Maxsurf Modeller di-*input* beserta data-data lain yang ada pada Tabel 4.13 seperti pada analisis gerakan FSO dan dilakukan analisis berikutnya.

Tabel 4.13 Data Titik Berat, Titik Apung dan Jari-jari Girasi *Single Point Mooring*

| <i>Parameter</i>           | <b>Unit</b>    | <b>SPM</b> |
|----------------------------|----------------|------------|
| <i>Displacement</i>        | t              | 258,17     |
| <i>Volume Displacement</i> | m <sup>3</sup> | 236,68     |
| LCG (x)                    | m              | 0          |
| TCG (y)                    | m              | 0          |
| VCG / KG (z)               | m              | 3,42       |
| KB                         | m              | 1,33       |
| Kxx                        | m              | 7,63       |
| Kyy                        | m              | 7,63       |
| Kzz                        | m              | 10,61      |

Gambar 4.28 merupakan hasil model SPM dari Ansys AQWA berdasarkan data yang diinputkan.



Gambar 4.28 Model SPM pada Ansys AQWA

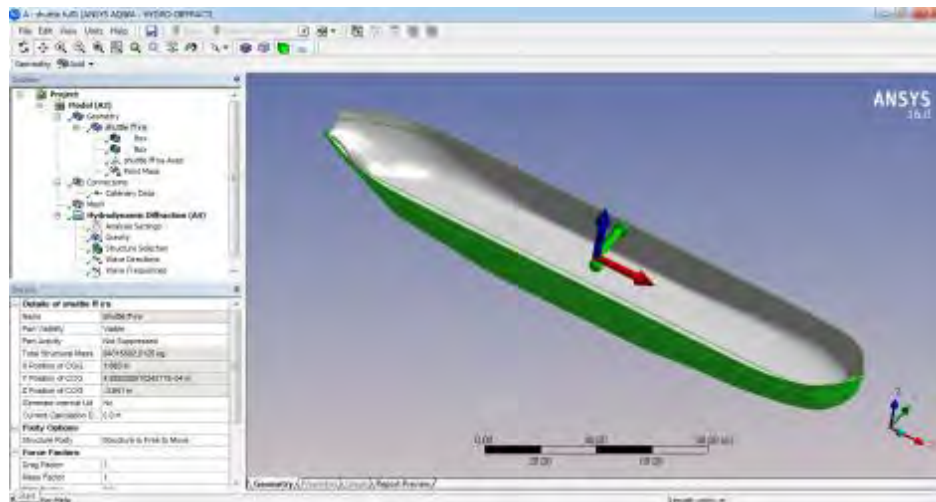
#### 4.6.3 Shuttle Tanker

Untuk *shuttle tanker* 85000 DWT juga dilakukan analisis gerakan dimana tahap yang dilakukan dan data lingkungan yang dimasukkan sama dengan analisis gerakan pada FSO dan SPM. Berikut data-data yang dibutuhkan pada analisis ini yang ditunjukkan pada tabel 4.14.

Tabel 4.14 Data Titik Berat, Titik Apung dan Jari-jari Girasi *Shuttle Tanker*

| <b><i>Parameter</i></b>    | <b><i>Unit</i></b> | <b><i>Shuttle Tanker<br/>Kondisi Full Load</i></b> | <b><i>Shuttle Tanker<br/>Kondisi Light Load</i></b> |
|----------------------------|--------------------|--|---|
| <i>Displacement</i>        | t                  | 93979  | 10509   |
| <i>Volume Displacement</i> | m <sup>3</sup>     | 91686,632  | 10252,499   |
| <i>LCG (x)</i>             | m                  | 1,67   | 1,04  |
| <i>TCG (y)</i>             | m                  | 0  | 0   |
| <i>VCG / KG (z)</i>        | m                  | 9,64   | 9,8   |
| <i>KB</i>                  | m                  | 7,034  | 1,098   |
| <i>Kxx</i>                 | m                  | 3,13   |   |
| <i>Kyy</i>                 | m                  | 35,12  |   |
| <i>Kzz</i>                 | m                  | 35,06  |   |

Gambar 4.29 merupakan hasil model *shuttle tanker* pada Ansys AQWA yang telah dimasukkan data-data.



Gambar 4.29 Model *Shuttle Tanker* pada Ansys AQWA

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

RAO yang didapatkan dari *software* Ansys AQWA digunakan untuk analisis respon gerak terhadap FSO, SPM dan *shuttle tanker*. Pada analisis respon ini, RAO diperhitungkan saat kondisi terapung bebas (*free floating*) maupun tertambat. Arah pembebanan (*heading angle*) yang digunakan adalah  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  dan  $180^\circ$ . Respon gerakan yang terjadi untuk masing-masing arah pembebanan dibagi menjadi 2, yaitu gerakan translasional dan gerakan rotasional. Gerakan ini masing-masing dibagi menjadi 3, yaitu *surge*, *sway*, *heave* (m/m) untuk gerakan translasional dan *roll*, *pitch*, *yaw* (deg/m) untuk gerakan rotasional. Amplitudo gerakan struktur dapat dilihat dari grafik RAO dimana grafik tersebut menunjukkan amplitudo gerakan yang terjadi per meter gelombang pada frekuensi tertentu.

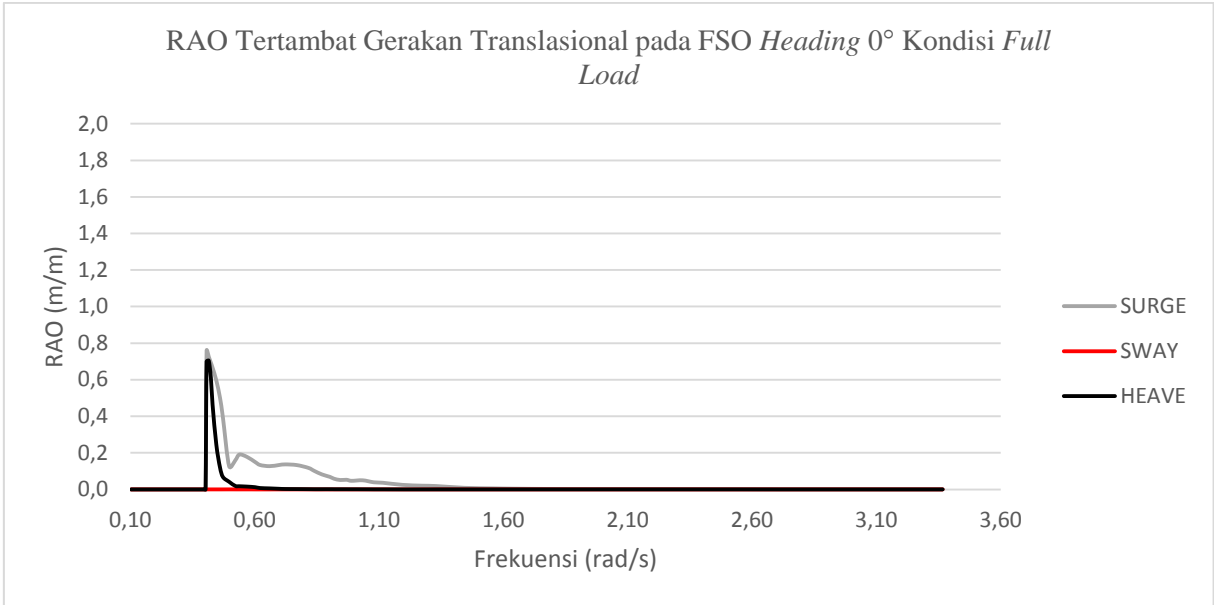
Pada analisis ini, untuk grafik RAO dimulai dari frekuensi gelombang ( $\omega$ ) 0,1 rad/sec sebagai acuan. Periode gelombang signifikan diketahui sebesar 8,3 s dan didapatkan frekuensi gelombang berdasarkan data lingkungan sebesar 0,757 rad/s. Sehingga RAO dengan frekuensi gelombang 0,1 rad/s dapat digunakan sebagai frekuensi gelombang awal untuk grafik RAO dari masing-masing gerakan.

Skenario muatan dan pembebanan yang dilakukan mengacu pada sistem *tandem offloading*. Berikut ini adalah penjelasan skenario untuk analisis respon gerak.

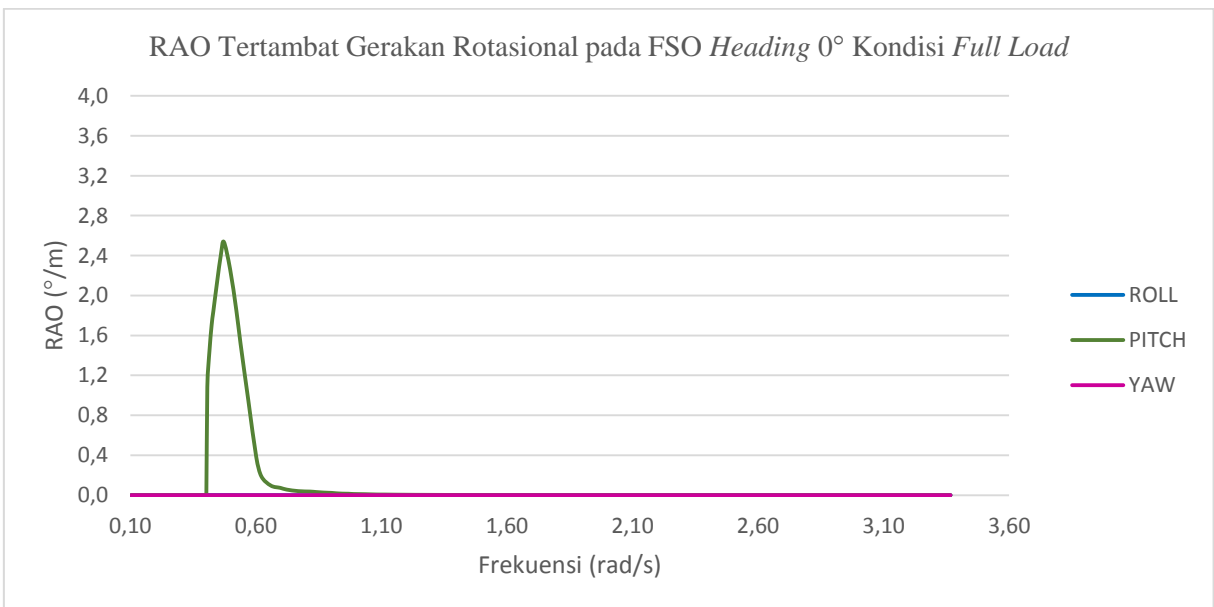
- a. Skenario muatan FSO dan *shuttle tanker* terdiri dari:
  1. FSO kondisi muatan 100% (*full load*)
  2. FSO kondisi muatan yang telah ditransfer ke *shuttle tanker* hingga terisi penuh (*light load*)
  3. *Shuttle tanker* muatan 100% (*full load*)
  4. *Shuttle tanker* muatan 0% (*light load*)
- b. Skenario pembebanan terdiri dari:
  1. Dikenai beban arah  $0^\circ$
  2. Dikenai beban arah  $45^\circ$
  3. Dikenai beban arah  $90^\circ$
  4. Dikenai beban arah  $180^\circ$

#### **4.6.4.1 Response Amplitude Operator (RAO) Tertambat pada FSO Kondisi Full Load**

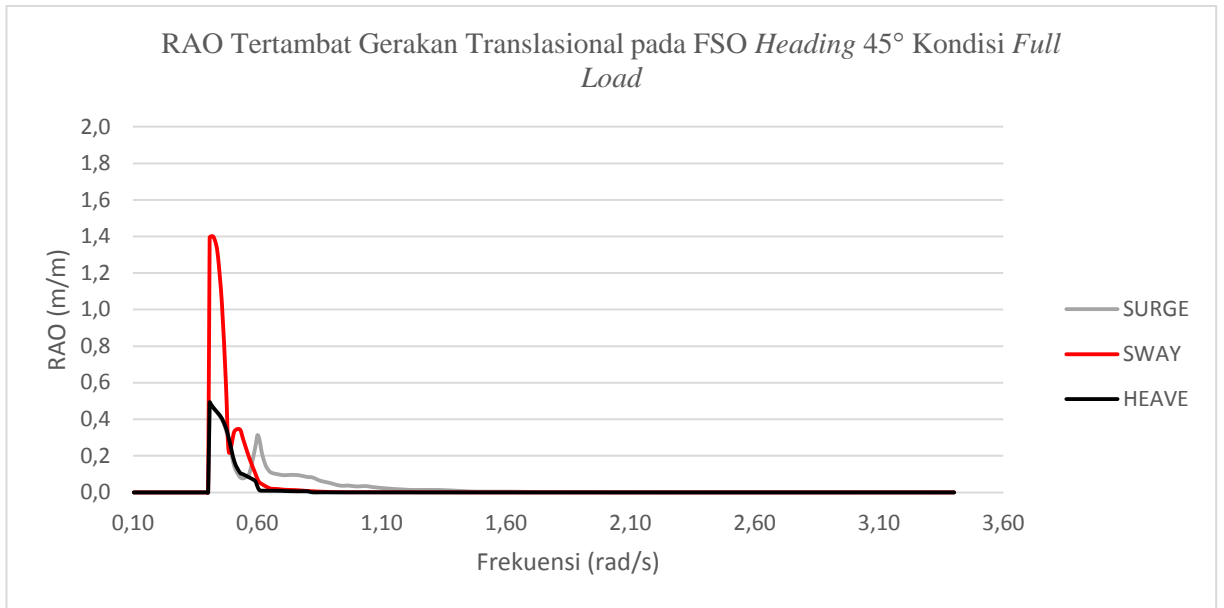
Perhitungan *motion* untuk kondisi *full load* pada FSO yang ditambat saat sistem *tandem offloading* SPM – FSO *Full Load* – *Shuttle Tanker Light Load* dilakukan pada sarat 24 m dengan kedalaman laut 45 m. Berikut adalah grafik RAO tertambat pada FSO kondisi *full load* untuk gerakan *surge*, *sway*, *heave*, *roll*, *pitch*, *yaw* dengan *heading angle*  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  dan  $180^\circ$ .



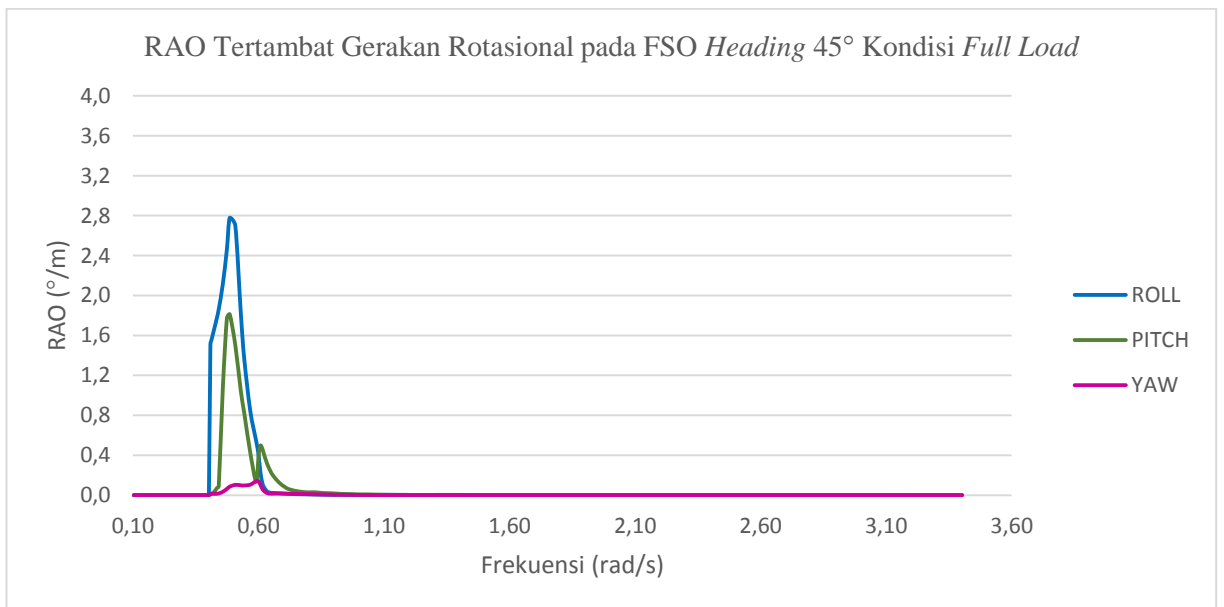
Gambar 4.30 Grafik RAO Tertambat Gerakan Translasional pada FSO Arco Ardjuna *Heading 0°* Kondisi *Full Load*



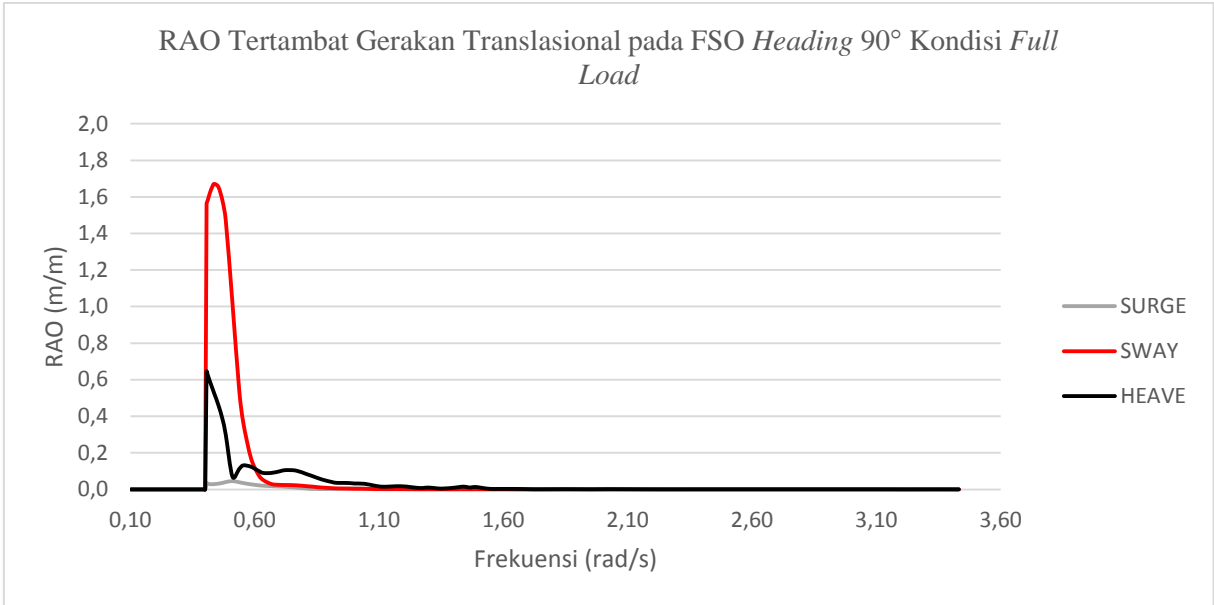
Gambar 4.31 Grafik RAO Tertambat Gerakan Rotasional pada FSO Arco Ardjuna *Heading 0°* Kondisi *Full Load*



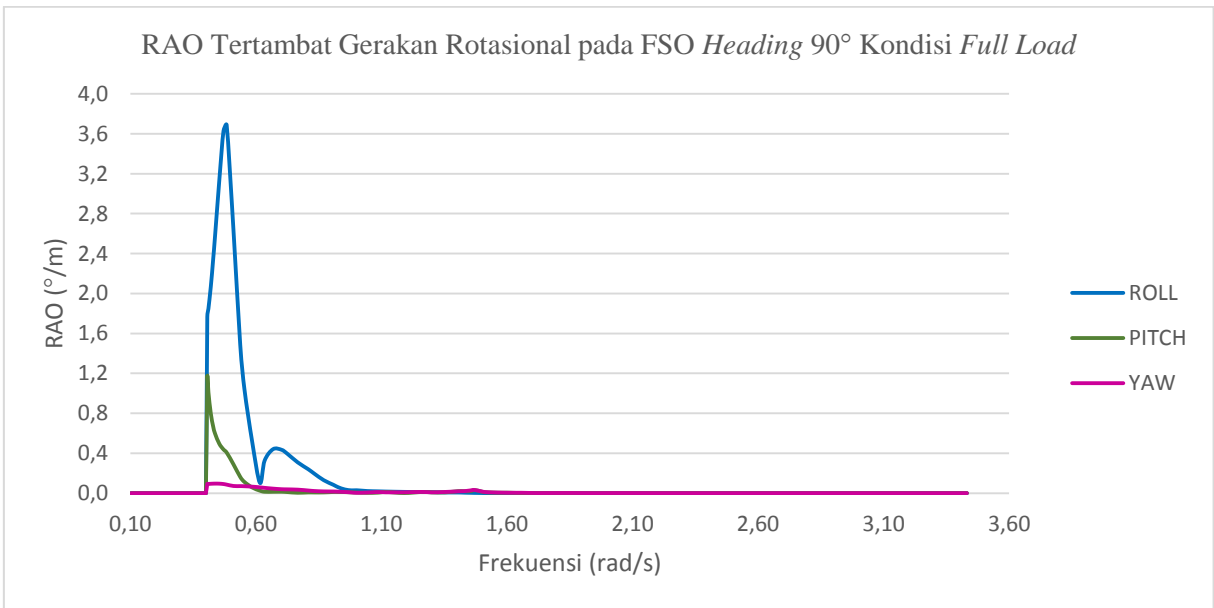
Gambar 4.32 Grafik RAO Tertambat Gerakan Translasional pada FSO Arco Ardjuna *Heading 45°* Kondisi *Full Load*



Gambar 4.33 Grafik RAO Tertambat Gerakan Rotasional pada FSO Arco Ardjuna *Heading 45°* Kondisi *Full Load*

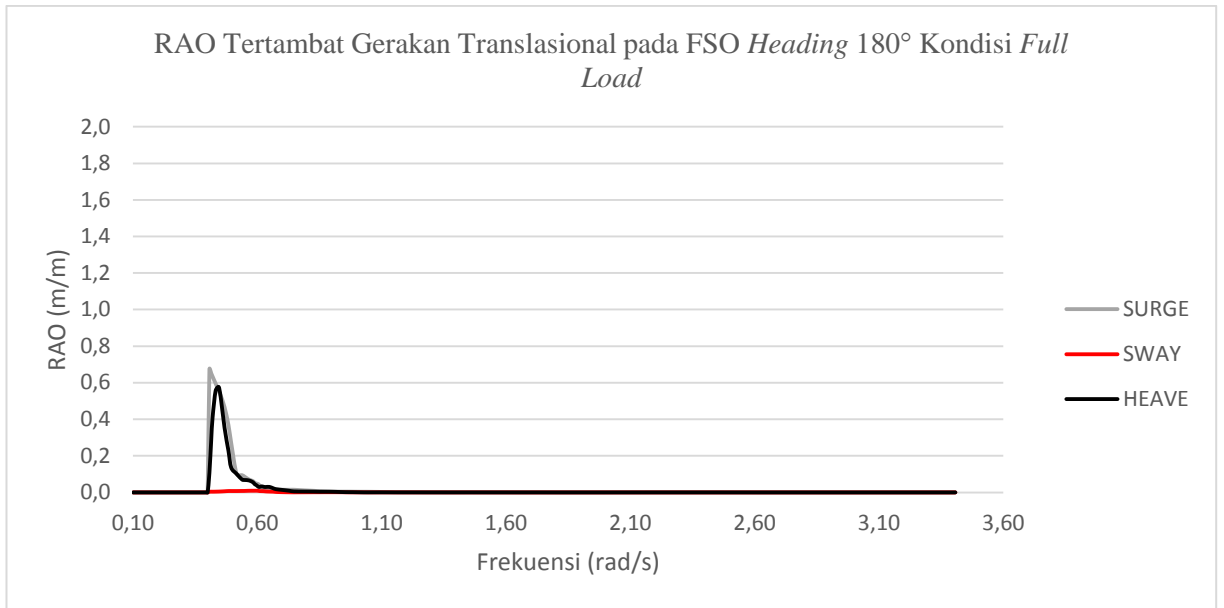


Gambar 4.34 Grafik RAO Tertambat Gerakan Translasional pada FSO Arco Ardjuna *Heading 90°* Kondisi *Full Load*

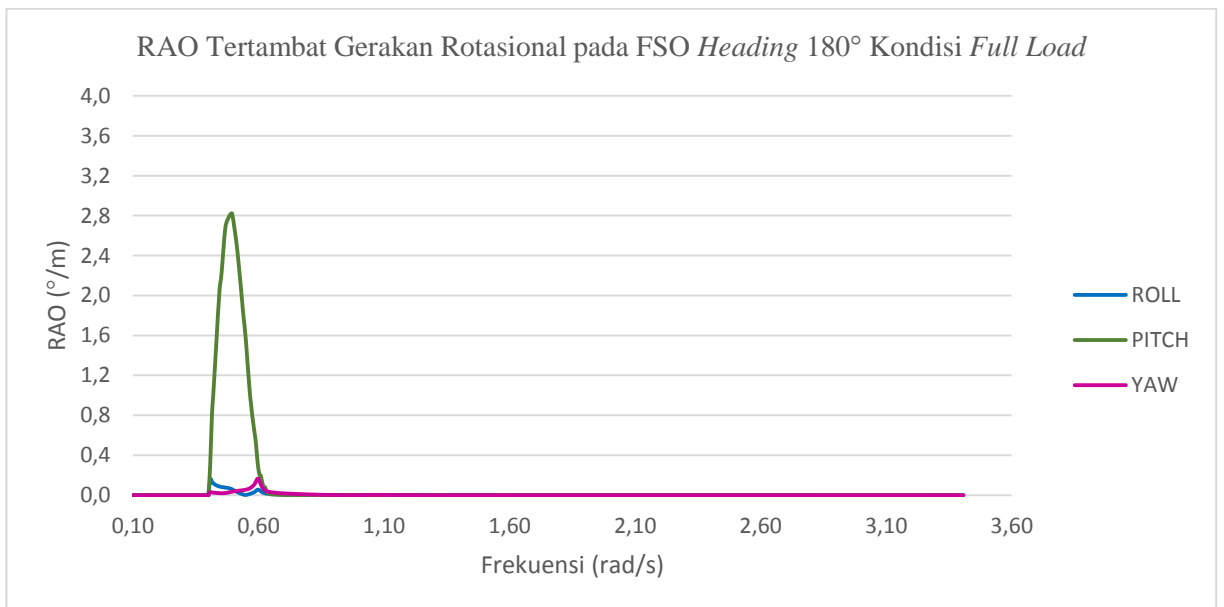


Gambar 4.35 Grafik RAO Tertambat Gerakan Rotasional pada FSO Arco Ardjuna *Heading 90°* Kondisi *Full Load*





Gambar 4.36 Grafik RAO Tertambat Gerakan Translasional pada FSO Arco Ardjuna *Heading 180°* Kondisi *Full Load*



Gambar 4.37 Grafik RAO Tertambat Gerakan Rotasional pada FSO Arco Ardjuna *Heading 180°* Kondisi *Full Load*

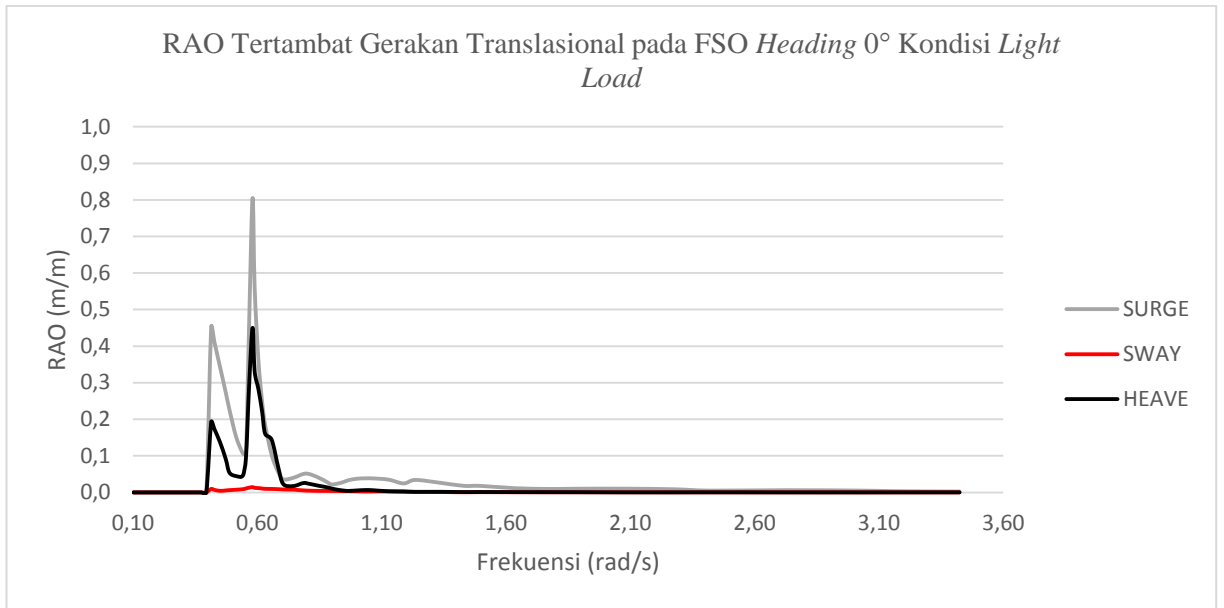
Tabel 4.15 Nilai RAO Tertinggi pada FSO Arco Ardjuna Kondisi *Full Load* saat Tertambat

| Heading (deg) | Kondisi Muatan   | Gerakan Translasional |            |             | Gerakan Rotasional |               |             |
|---------------|------------------|-----------------------|------------|-------------|--------------------|---------------|-------------|
|               |                  | Surge (m/m)           | Sway (m/m) | Heave (m/m) | Roll (deg/m)       | Pitch (deg/m) | Yaw (deg/m) |
| <b>FSO</b>    |                  |                       |            |             |                    |               |             |
| 0             | <i>Full Load</i> | 0,759                 | 0,000      | 0,705       | 0,001              | 2,537         | 0,000       |
| 45            |                  | 0,487                 | 1,401      | 0,493       | 2,777              | 1,812         | 0,141       |
| 90            |                  | 0,046                 | 1,671      | 0,645       | 3,686              | 1,161         | 0,096       |
| 180           |                  | 0,675                 | 0,009      | 0,577       | 0,161              | 2,819         | 0,166       |

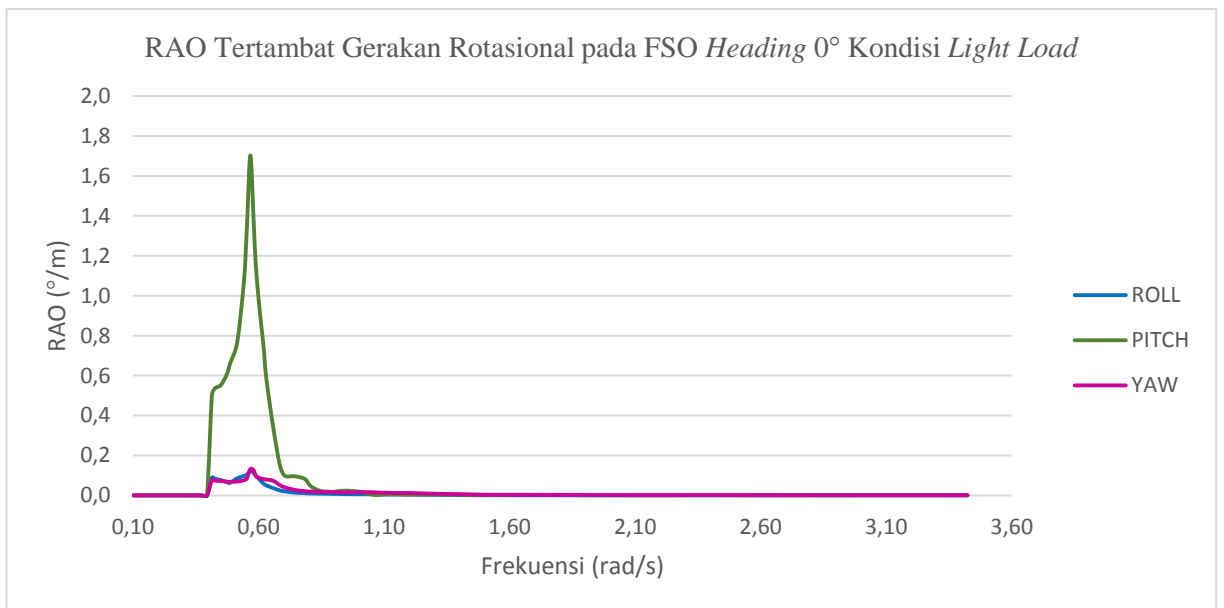
Berdasarkan grafik pada Gambar 4.30 sampai dengan Gambar 4.37 dan Tabel 4.15 dapat dilihat bahwa saat kondisi *full load* pada gerak osilasi translasional, RAO *surge* tertinggi sebesar 0,759 m/m pada heading 0°. Untuk RAO *sway* tertinggi pada heading 90° sebesar 1,671 m/m dan untuk RAO *heave* tertinggi sebesar 0,705 m/m pada heading 0°. Sedangkan pada gerak osilasi rotasional, RAO *roll* tertinggi sebesar 3,686 deg/m pada heading 90°, RAO *pitch* tertinggi sebesar 2,819 deg/m pada heading 180° dan RAO *yaw* tertinggi 0,166 deg/m pada heading 180°.

#### 4.6.4.2 Response Amplitude Operator (RAO) Tertambat pada FSO Kondisi *Light Load*

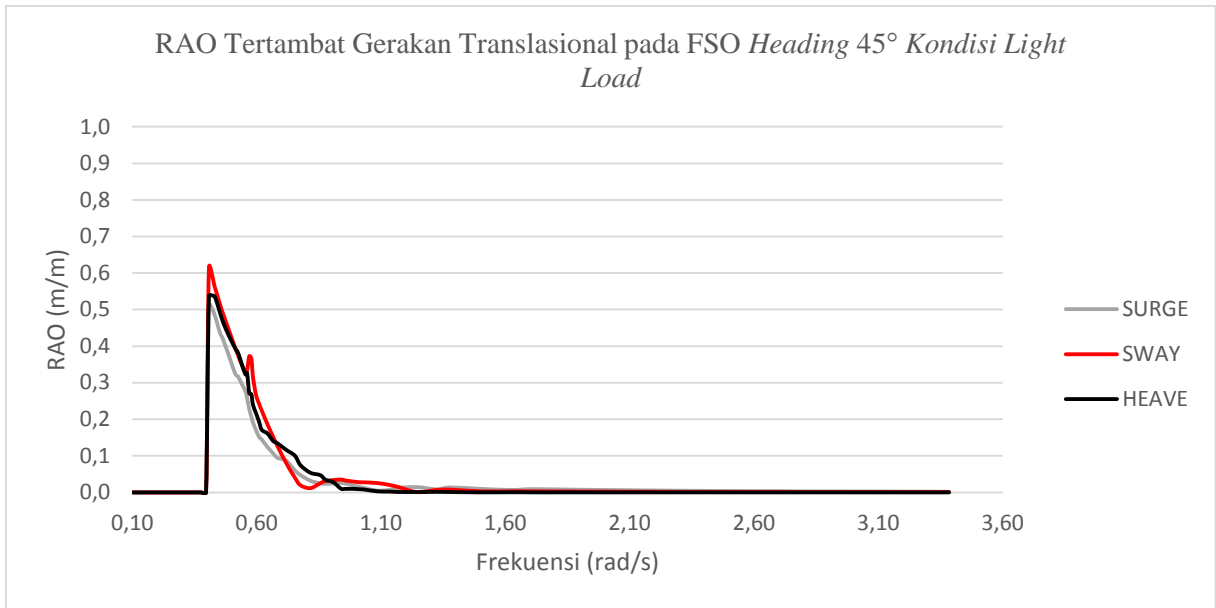
Perhitungan *motion* untuk kondisi *light load* pada FSO yang ditambat saat sistem *tandem offloading* SPM – FSO *Light Load* – *Shuttle Tanker Full Load* dilakukan pada sarat 10,863 m dengan kedalaman laut 45 m. Berikut adalah grafik RAO tertambat pada FSO kondisi *light load* untuk gerakan *surge*, *sway*, *heave*, *roll*, *pitch*, *yaw* dengan heading angel 0°, 45°, 90° dan 180°.



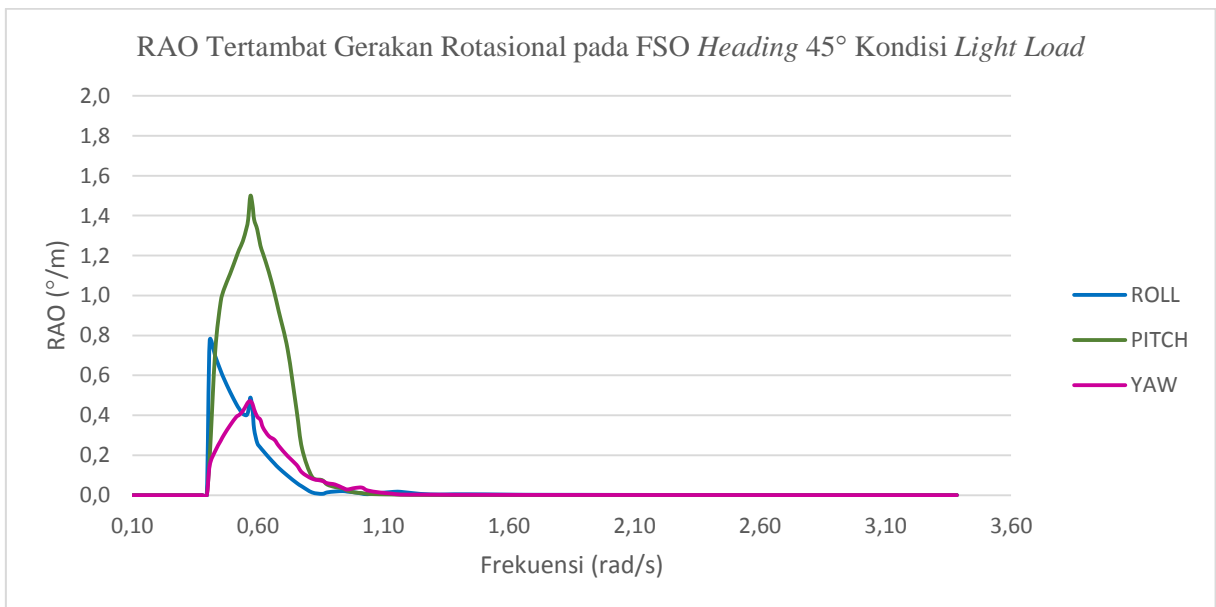
Gambar 4.38 Grafik RAO Tertambat Gerakan Translasional pada FSO Arco Ardjuna *Heading 0°* Kondisi *Light Load*



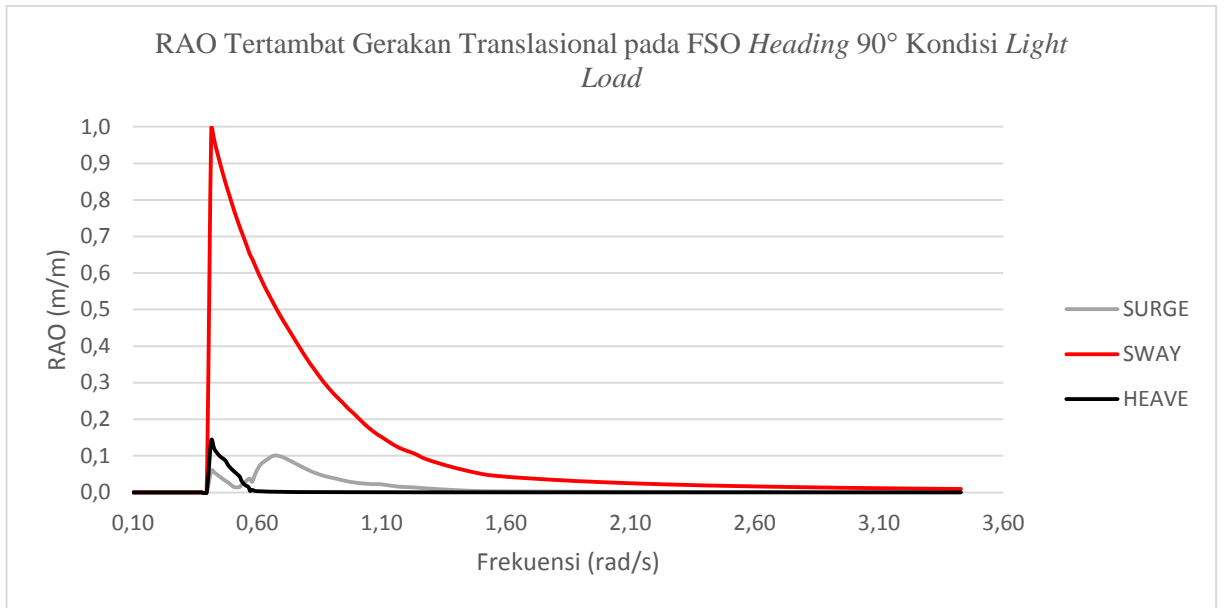
Gambar 4.39 Grafik RAO Tertambat Gerakan Rotasional pada FSO Arco Ardjuna *Heading 0°* Kondisi *Light Load*



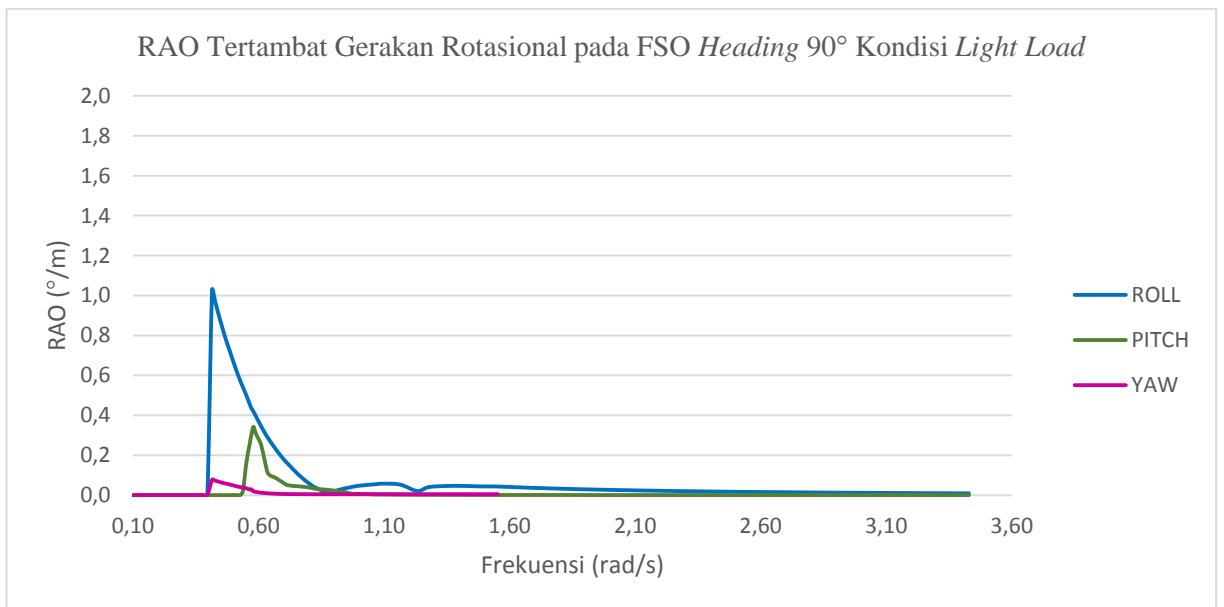
Gambar 4.40 Grafik RAO Tertambat Gerakan Translasional pada FSO Arco Ardjuna *Heading 45° Kondisi Light Load*



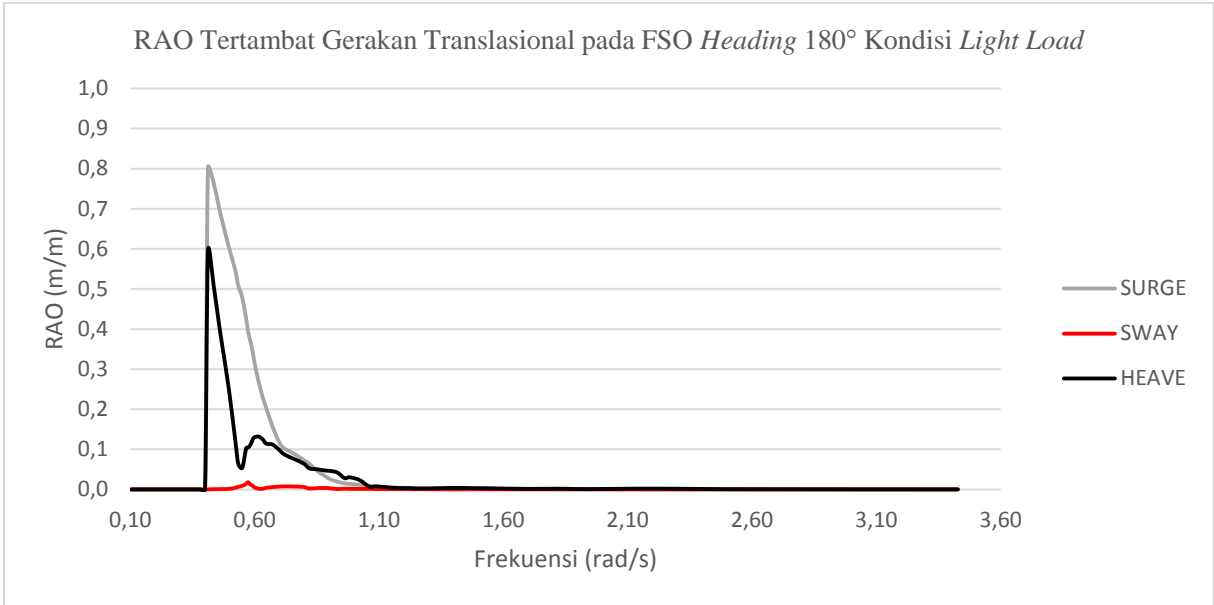
Gambar 4.41 Grafik RAO Tertambat Gerakan Rotasional pada FSO Arco Ardjuna *Heading 45° Kondisi Light Load*



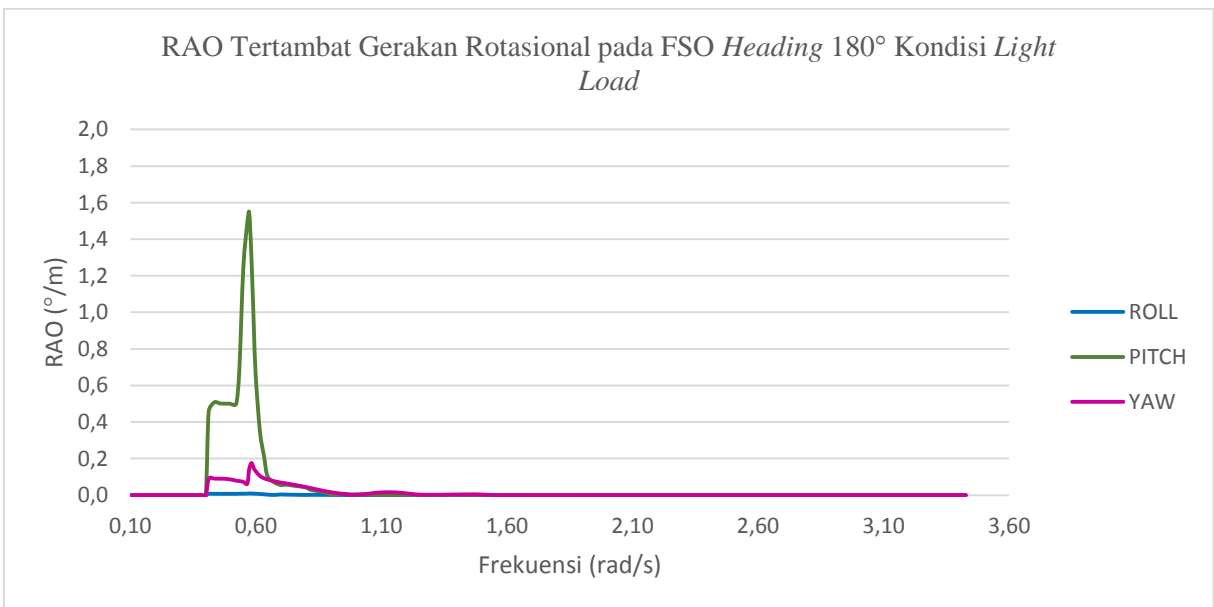
Gambar 4.42 Grafik RAO Tertambat Gerakan Translasional pada FSO Arco Ardjuna *Heading 90°* Kondisi *Light Load*



Gambar 4.43 Grafik RAO Tertambat Gerakan Rotasional pada FSO Arco Ardjuna *Heading 90°* Kondisi *Light Load*



Gambar 4.44 Grafik RAO Tertambat Gerakan Translasional pada FSO Arco Ardjuna *Heading* 180° Kondisi *Light Load*



Gambar 4.45 Grafik RAO Tertambat Gerakan Rotasional pada FSO Arco Ardjuna *Heading* 180° Kondisi *Light Load*

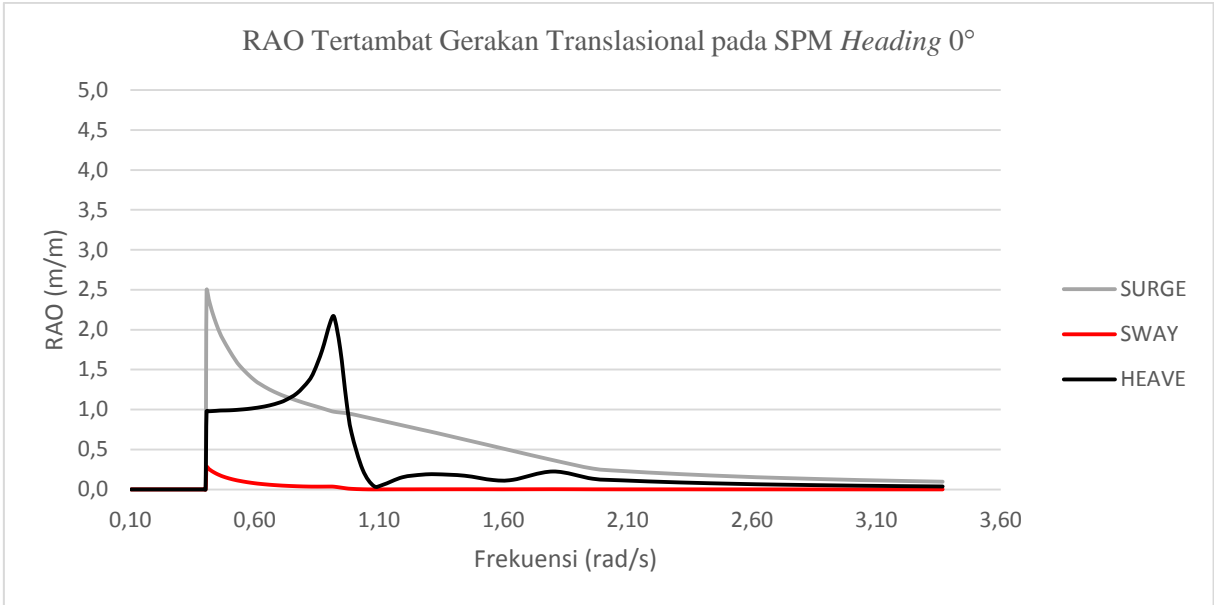
Tabel 4.16 Nilai RAO Tertinggi pada FSO Arco Ardjuna Kondisi *Light Load* saat Tertambat

| Heading (deg) | Kondisi Muatan    | Gerakan Translasional |            |             | Gerakan Rotasional |               |             |
|---------------|-------------------|-----------------------|------------|-------------|--------------------|---------------|-------------|
|               |                   | Surge (m/m)           | Sway (m/m) | Heave (m/m) | Roll (deg/m)       | Pitch (deg/m) | Yaw (deg/m) |
| <b>FSO</b>    |                   |                       |            |             |                    |               |             |
| 0             | <i>Light Load</i> | 0,804                 | 0,014      | 0,450       | 0,123              | 1,703         | 0,132       |
| 45            |                   | 0,512                 | 0,615      | 0,537       | 0,775              | 1,499         | 0,471       |
| 90            |                   | 0,101                 | 0,996      | 0,142       | 1,027              | 0,342         | 0,077       |
| 180           |                   | 0,802                 | 0,018      | 0,594       | 0,009              | 1,548         | 0,176       |

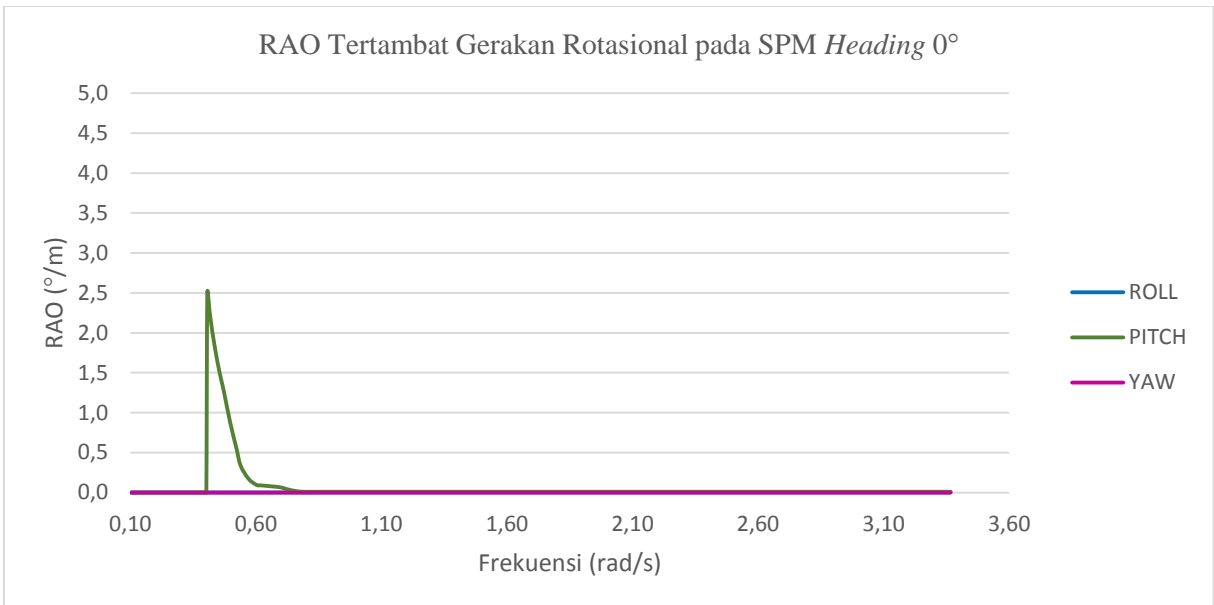
Berdasarkan grafik pada Gambar 4.38 sampai dengan Gambar 4.45 dan Tabel 4.16 dapat dilihat bahwa saat kondisi *full load* pada gerak osilasi translasional, RAO *surge* tertinggi sebesar 0,804 m/m pada *heading* 0°. Untuk RAO *sway* tertinggi pada *heading* 90° sebesar 0,996 m/m dan untuk RAO *heave* tertinggi sebesar 0,594 m/m pada *heading* 180°. Sedangkan pada gerak osilasi rotasional, RAO *roll* tertinggi sebesar 1,027 deg/m pada *heading* 90°, RAO *pitch* tertinggi sebesar 1,703 deg/m pada *heading* 0° dan RAO *yaw* tertinggi 0,471 deg/m pada *heading* 45°.

#### 4.6.4.3 Response Amplitude Operator (RAO) Tertambat pada SPM saat Sistem Tandem Offloading SPM – FSO Full Load – Shuttle Tanker Light Load

Perhitungan *motion* untuk SPM tertambat saat sistem *tandem offloading* SPM – FSO Full Load – Shuttle Tanker Light Load dilakukan pada sarat 2,38 m dengan kedalaman laut 45 m. Berikut adalah grafik RAO tertambat pada SPM dengan mempertimbangkan kondisi *offloading* yang telah ditentukan untuk gerakan *surge*, *sway*, *heave*, *roll*, *pitch*, *yaw* dengan *heading* *angel* 0°, 45°, 90° dan 180°.

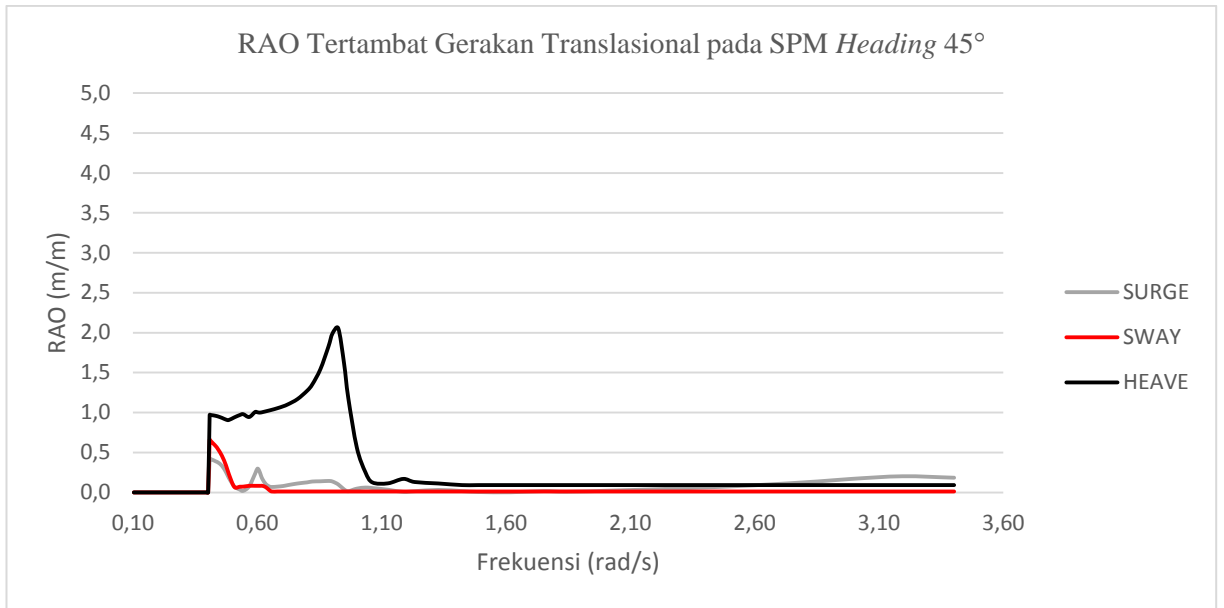


Gambar 4.46 Grafik RAO Tertambat Gerakan Translasional pada SPM *Heading* 0° saat Sistem *Tandem Offloading SPM – FSO Full Load – Shuttle Tanker Light Load*

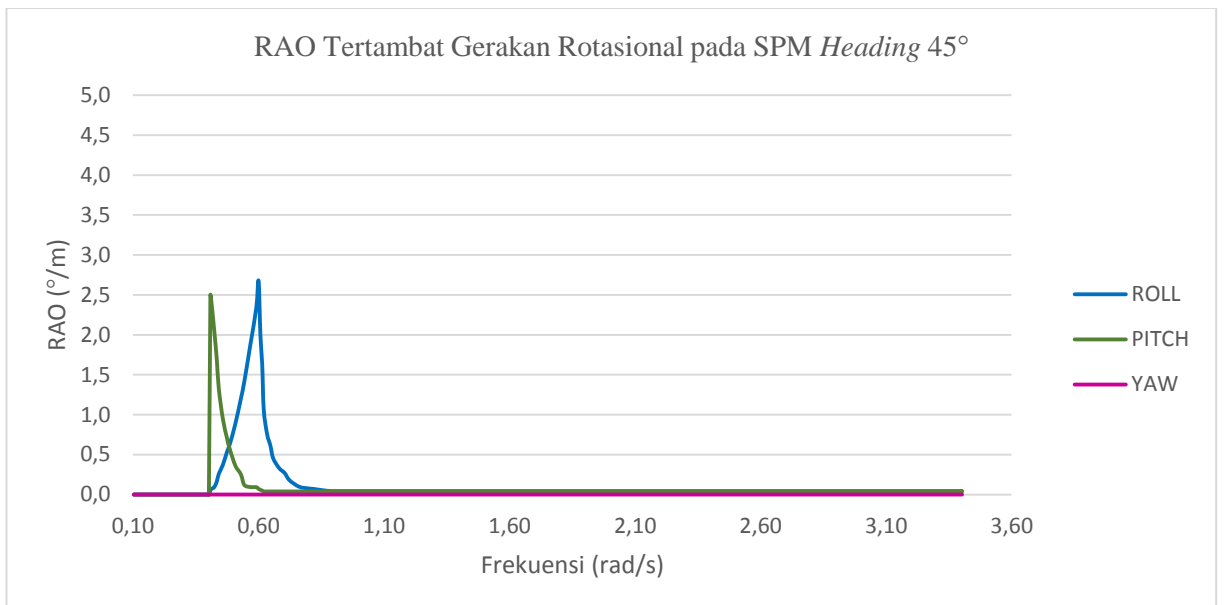


Gambar 4.47 Grafik RAO Tertambat Gerakan Rotasional pada SPM *Heading* 0° saat Sistem *Tandem Offloading SPM – FSO Full Load – Shuttle Tanker Light Load*

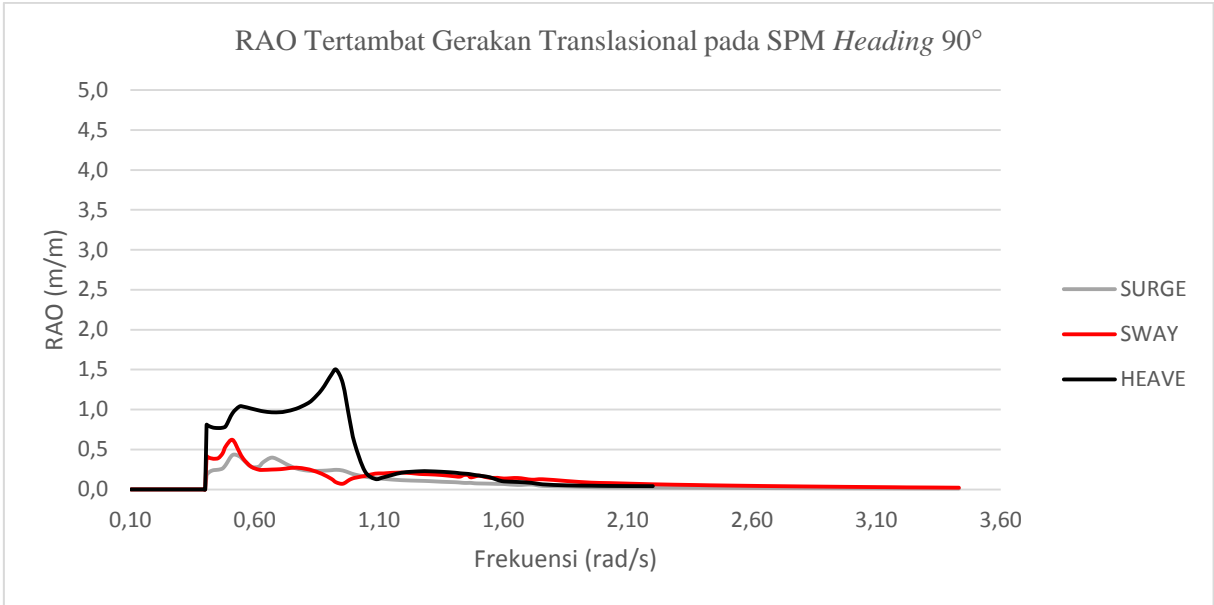




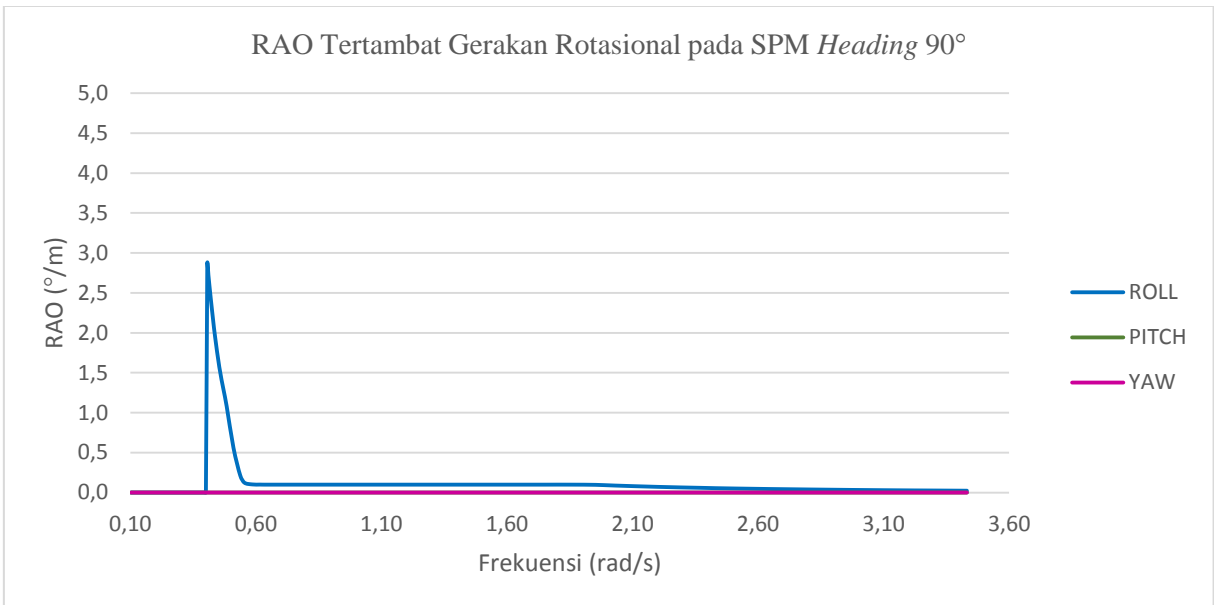
Gambar 4.48 Grafik RAO Tertambat Gerakan Translasional pada SPM Heading 45° saat Sistem Tandem Offloading SPM – FSO Full Load – Shuttle Tanker Light Load



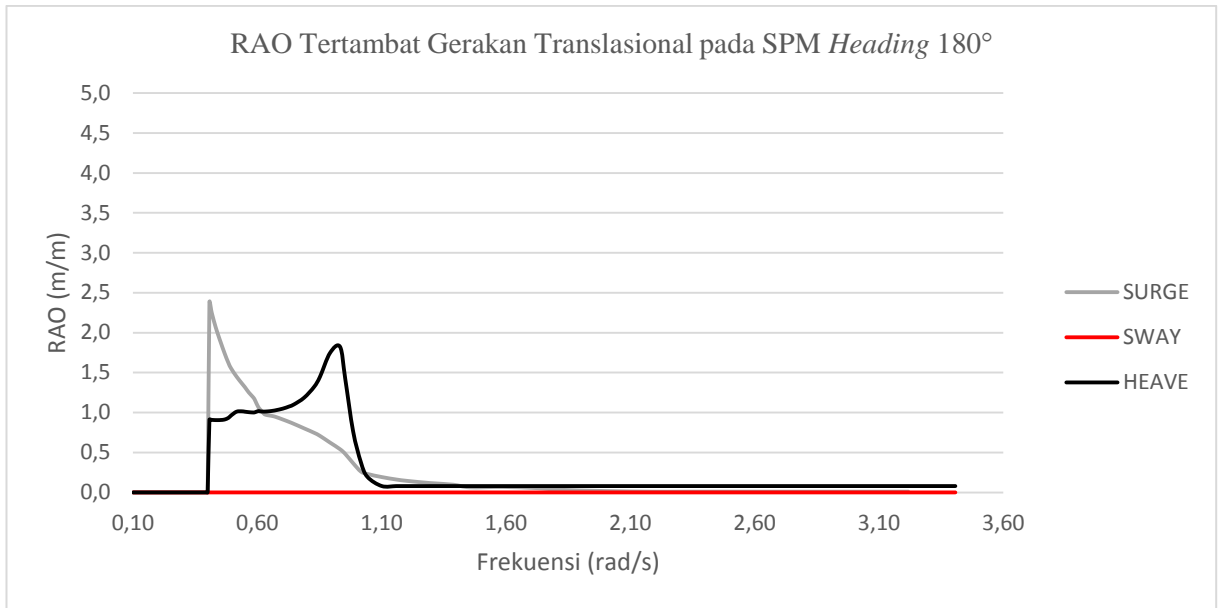
Gambar 4.49 Grafik RAO Tertambat Gerakan Rotasional pada SPM Heading 45° saat Sistem Tandem Offloading SPM – FSO Full Load – Shuttle Tanker Light Load



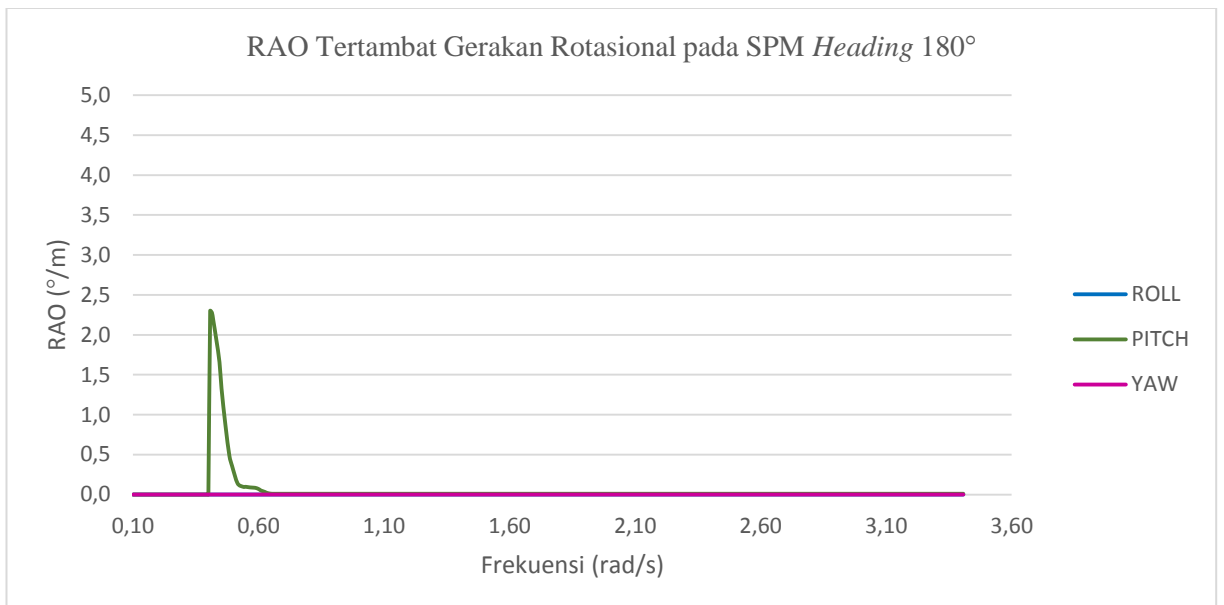
Gambar 4.50 Grafik RAO Tertambat Gerakan Translasional pada SPM *Heading* 90° saat Sistem *Tandem Offloading* SPM – FSO *Full Load* – Shuttle Tanker *Light Load*



Gambar 4.51 Grafik RAO Tertambat Gerakan Rotasional pada SPM *Heading* 90° saat Sistem *Tandem Offloading* SPM – FSO *Full Load* – Shuttle Tanker *Light Load*



Gambar 4.52 Grafik RAO Tertambat Gerakan Translasional pada SPM Heading 180° saat Sistem *Tandem Offloading SPM – FSO Full Load – Shuttle Tanker Light Load*



Gambar 4.53 Grafik RAO Tertambat Gerakan Rotasional pada SPM Heading 180° saat Sistem *Tandem Offloading SPM – FSO Full Load – Shuttle Tanker Light Load*

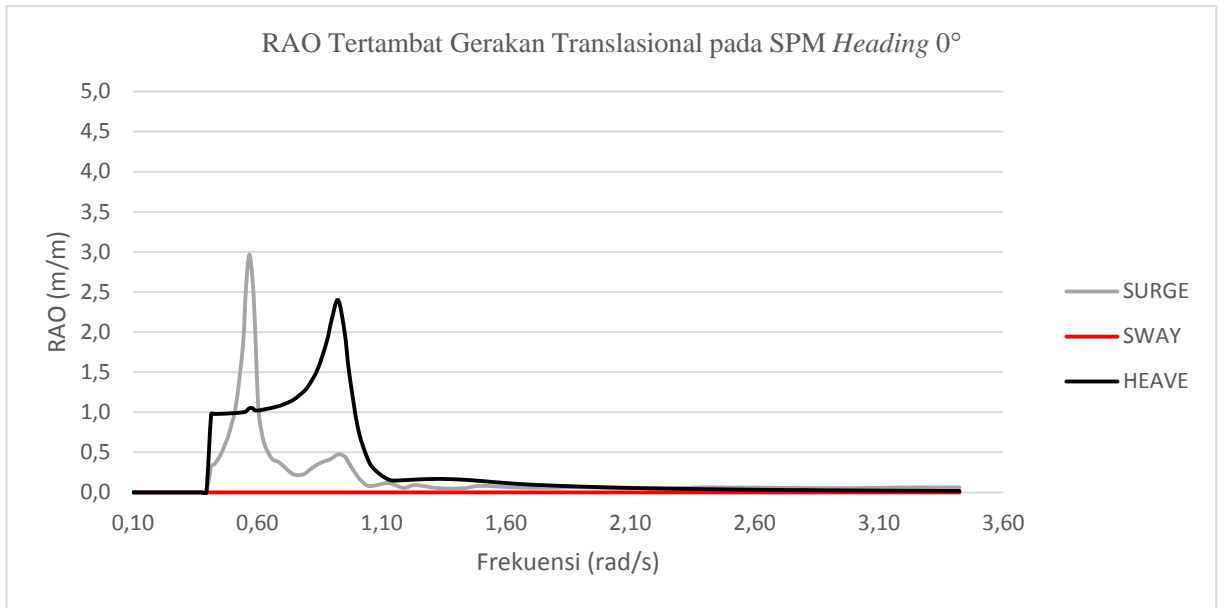
Tabel 4.17 Nilai RAO Tertinggi pada SPM Kondisi Tertambat saat Sistem *Tandem Offloading* SPM – FSO *Full Load* – Shuttle Tanker *Light Load*

| Heading (deg) | Kondisi Muatan  | Gerakan Translasional |            |             | Gerakan Rotasional |               |             |
|---------------|---|-----------------------|------------|-------------|--------------------|---------------|-------------|
|               |   | Surge (m/m)           | Sway (m/m) | Heave (m/m) | Roll (deg/m)       | Pitch (deg/m) | Yaw (deg/m) |
| <b>SPM</b>    |   |                       |            |             |                    |               |             |
| 0             | FSO <i>Full Load</i> dan Shuttle Tanker <i>Light Load</i> | 2,493                 | 0,279      | 2,163       | 0,000              | 2,503         | 0,000       |
| 45            |   | 0,422                 | 0,657      | 2,055       | 2,674              | 2,492         | 0,000       |
| 90            |   | 0,430                 | 0,621      | 1,501       | 2,867              | 0,000         | 0,000       |
| 180           |   | 2,382                 | 0,000      | 1,824       | 0,000              | 2,299         | 0,000       |

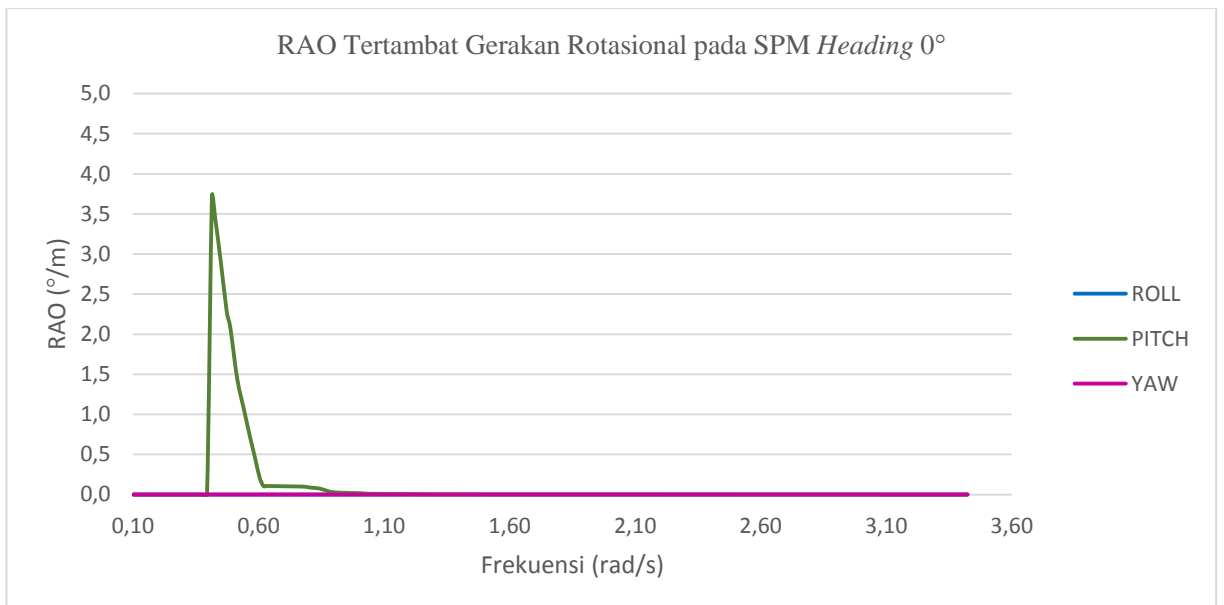
Berdasarkan grafik pada Gambar 4.46 sampai dengan Gambar 4.53 dan Tabel 4.17 dapat dilihat bahwa pada gerak osilasi translasional, RAO *surge* tertinggi sebesar 2,493 m/m pada *heading* 0°. Untuk RAO *sway* tertinggi pada *heading* 45° sebesar 0,657 m/m dan untuk RAO *heave* tertinggi sebesar 2,163 m/m pada *heading* 0°. Sedangkan pada gerak osilasi rotasional, RAO *roll* tertinggi sebesar 2,867 deg/m pada *heading* 90°, RAO *pitch* tertinggi sebesar 2,503 deg/m pada *heading* 0° dan RAO *yaw* tertinggi 0,0000168 deg/m pada *heading* 0°.

#### 4.6.4.4 Response Amplitude Operator (RAO) Tertambat pada SPM saat Sistem *Tandem Offloading* SPM – FSO *Light Load* – Shuttle Tanker *Full Load*

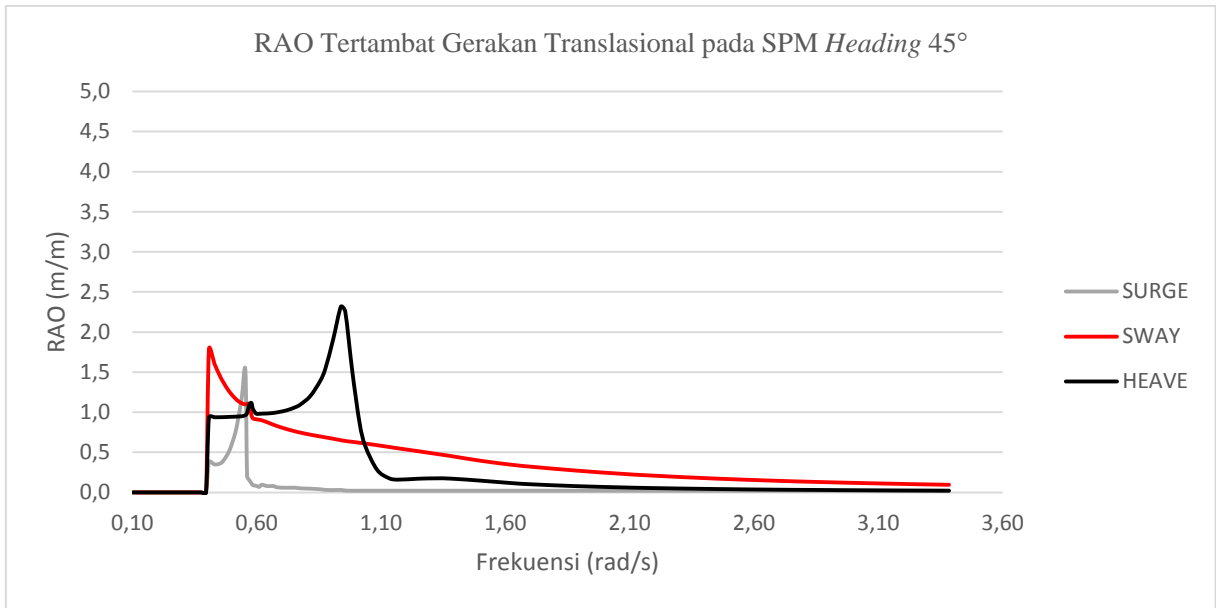
Perhitungan *motion* untuk SPM tertambat saat sistem *tandem offloading* SPM – FSO *Light Load* – Shuttle Tanker *Full Load* dilakukan pada sarat 2,38 m dengan kedalaman laut 45 m. Berikut adalah grafik RAO tertambat pada SPM dengan mempertimbangkan kondisi *offloading* yang telah ditentukan untuk gerakan *surge*, *sway*, *heave*, *roll*, *pitch*, *yaw* dengan *heading* *angel* 0°, 45°, 90° dan 180°.



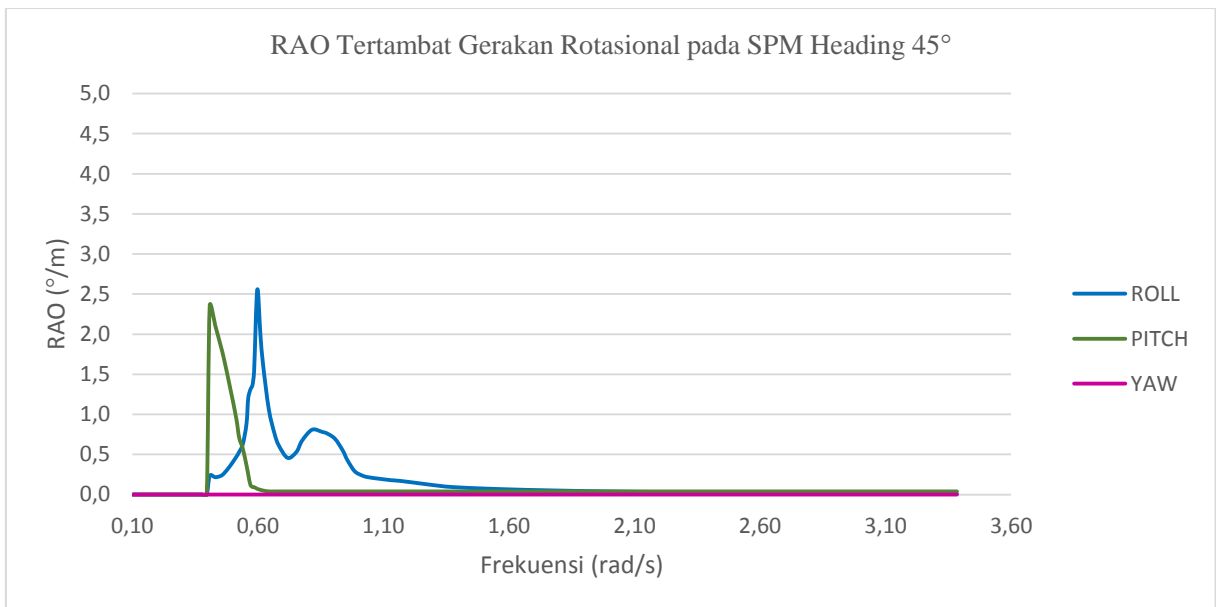
Gambar 4.54 Grafik RAO Tertambat Gerakan Translasional pada SPM *Heading* 0° saat Sistem *Tandem Offloading* SPM – FSO *Light Load* – Shuttle Tanker *Full Load*



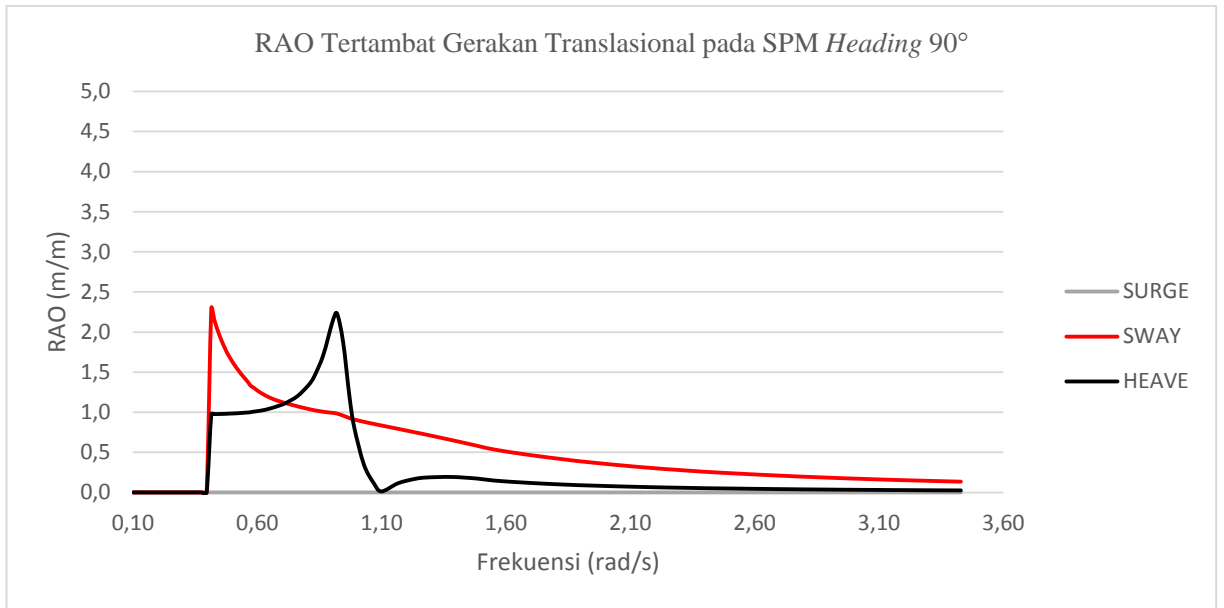
Gambar 4.55 Grafik RAO Tertambat Gerakan Rotasional pada SPM *Heading* 0° saat Sistem *Tandem Offloading* SPM – FSO *Light Load* – Shuttle Tanker *Full Load*



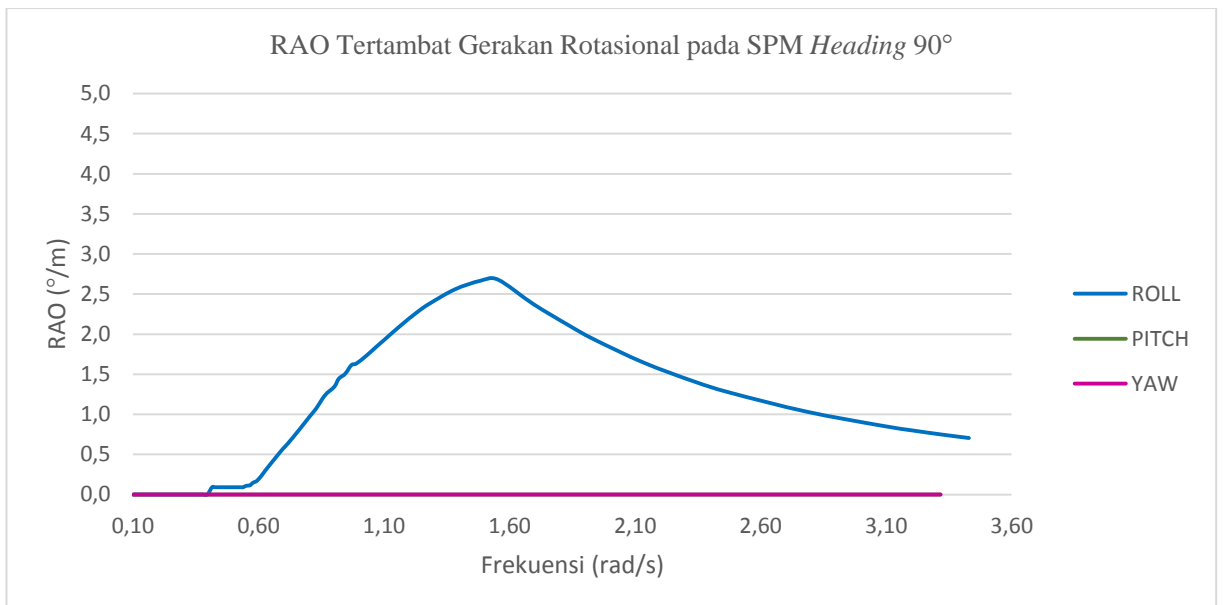
Gambar 4.56 Grafik RAO Tertambat Gerakan Translasional pada SPM Heading 45° saat Sistem *Tandem Offloading* SPM – FSO *Light Load* – Shuttle Tanker *Full Load*



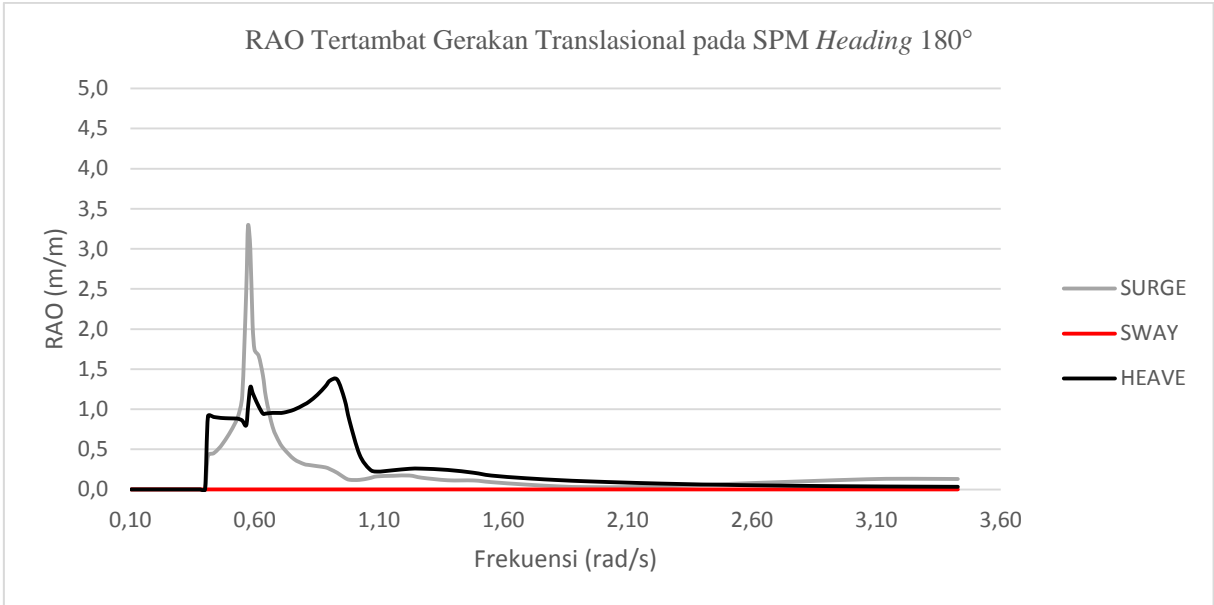
Gambar 4.57 Grafik RAO Tertambat Gerakan Rotasional pada SPM Heading 45° saat Sistem *Tandem Offloading* SPM – FSO *Light Load* – Shuttle Tanker *Full Load*



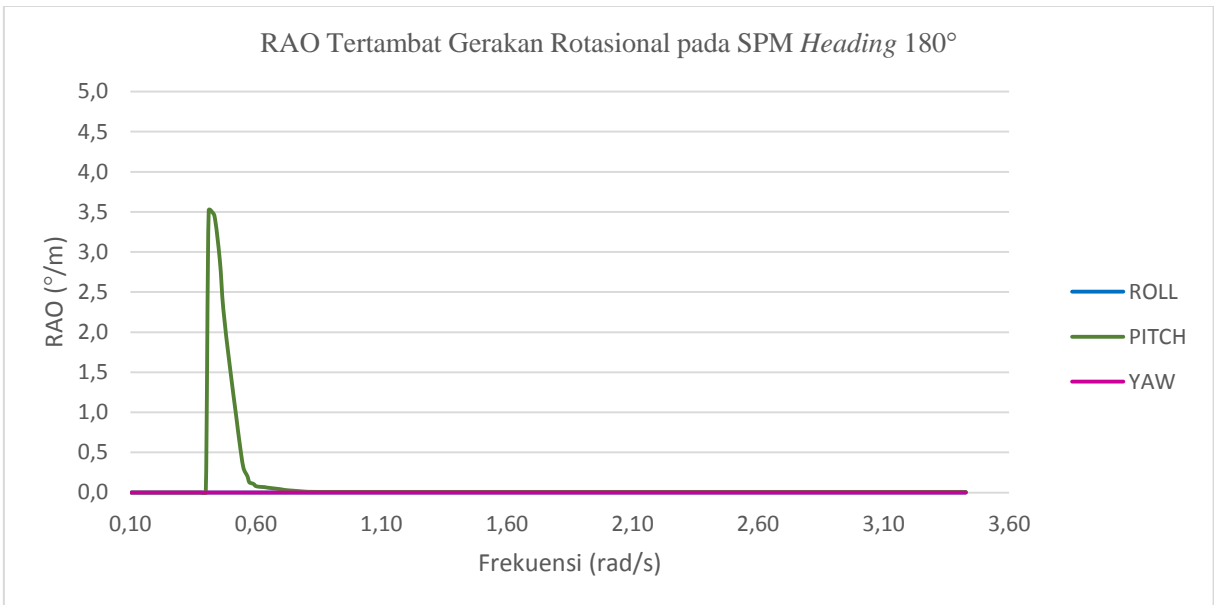
Gambar 4.58 Grafik RAO Tertambat Gerakan Translasional pada SPM *Heading* 90° saat Sistem *Tandem Offloading* SPM – FSO *Light Load* – Shuttle Tanker *Full Load*



Gambar 4.59 Grafik RAO Tertambat Gerakan Rotasional pada SPM *Heading* 90° saat Sistem *Tandem Offloading* SPM – FSO *Light Load* – Shuttle Tanker *Full Load*



Gambar 4.60 Grafik RAO Tertambat Gerakan Translasional pada SPM *Heading* 180° saat Sistem *Tandem Offloading* SPM – FSO *Light Load* – Shuttle Tanker *Full Load*



Gambar 4.61 Grafik RAO Tertambat Gerakan Rotasional pada SPM *Heading* 180° saat Sistem *Tandem Offloading* SPM – FSO *Light Load* – Shuttle Tanker *Full Load*



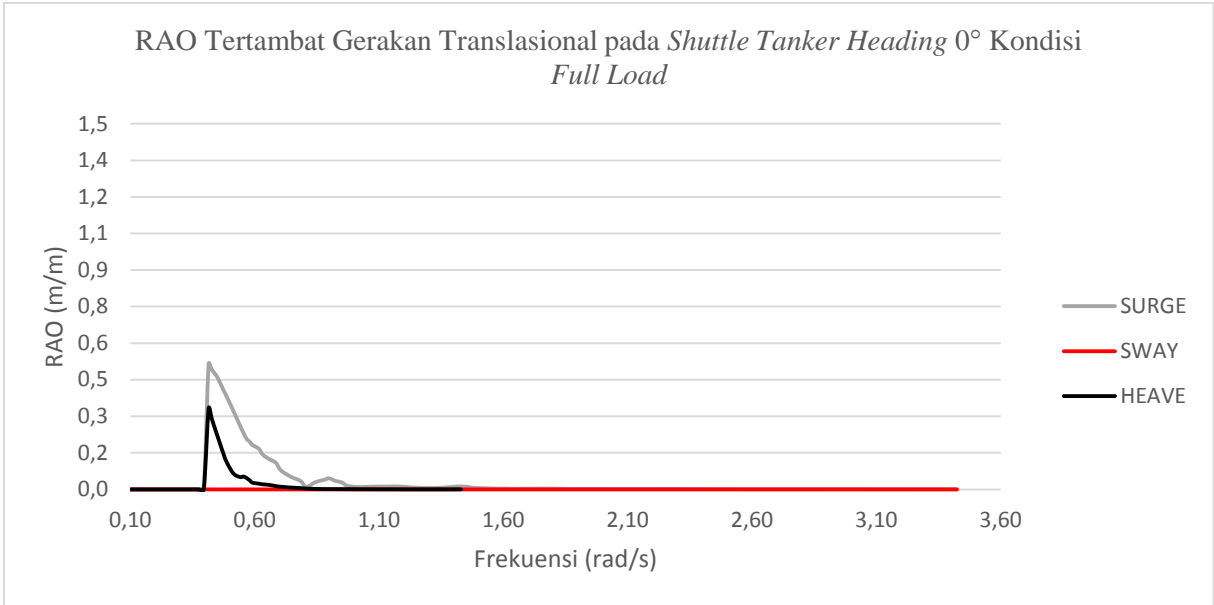
Tabel 4.18 Nilai RAO Tertinggi pada SPM Kondisi Tertambat saat Sistem *Tandem Offloading* SPM – FSO *Light Load* – Shuttle Tanker *Full Load*

| Heading (deg) | Kondisi Muatan                              | Gerakan Translasional |            |             | Gerakan Rotasional |               |             |
|---------------|---|-----------------------|------------|-------------|--------------------|---------------|-------------|
|               |   | Surge (m/m)           | Sway (m/m) | Heave (m/m) | Roll (deg/m)       | Pitch (deg/m) | Yaw (deg/m) |
| <b>SPM</b>    |   |                       |            |             |                    |               |             |
| 0             | FSO Light Load dan Shuttle Tanker Full Load | 2,965                 | 0,000      | 2,399       | 0,000              | 3,719         | 0,000       |
| 45            |   | 1,520                 | 1,787      | 2,318       | 2,553              | 2,350         | 0,000       |
| 90            |   | 0,000                 | 2,296      | 2,235       | 2,680              | 0,000         | 0,000       |
| 180           |   | 3,290                 | 0,000      | 1,369       | 0,000              | 3,519         | 0,000       |

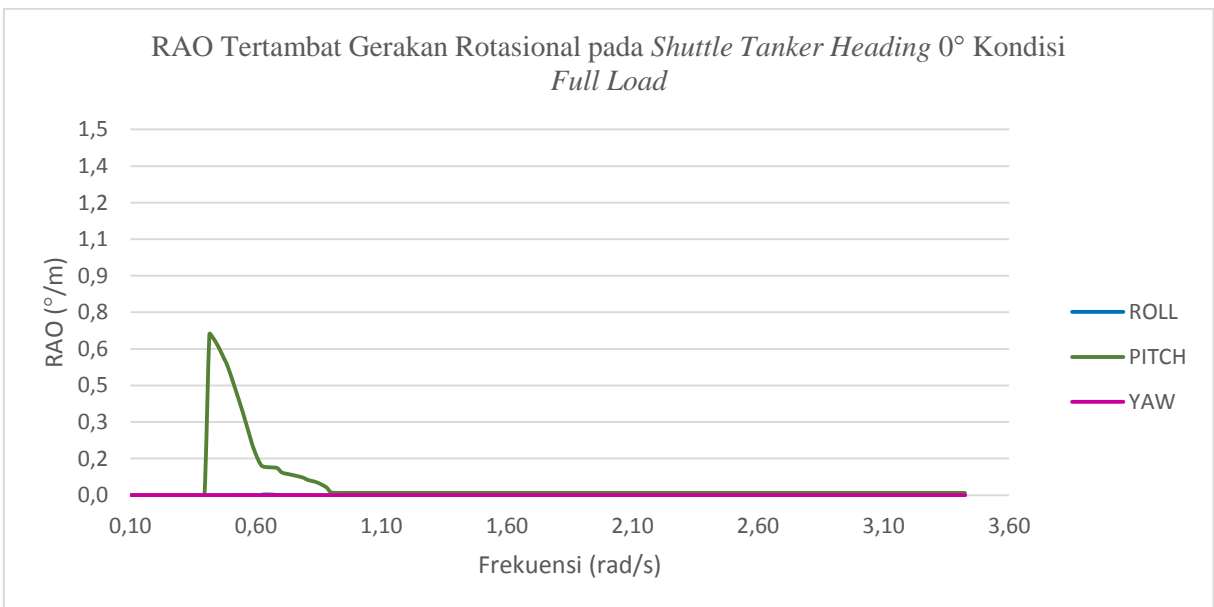
Berdasarkan grafik pada Gambar 4.54 sampai dengan Gambar 4.61 dan Tabel 4.18 dapat dilihat bahwa pada gerak osilasi translasional, RAO *surge* tertinggi sebesar 3,290 m/m pada *heading* 180°. Untuk RAO *sway* tertinggi pada *heading* 90° sebesar 2,296 m/m dan untuk RAO *heave* tertinggi sebesar 2,399 m/m pada *heading* 0°. Sedangkan pada gerak osilasi rotasional, RAO *roll* tertinggi sebesar 2,680 deg/m pada *heading* 90°, RAO *pitch* tertinggi sebesar 3,719 deg/m pada *heading* 0° dan RAO *yaw* tertinggi 0,000166 deg/m pada *heading* 45°.

#### 4.6.4.5 Response Amplitude Operator (RAO) Tertambat pada Shuttle Tanker Kondisi Full Load

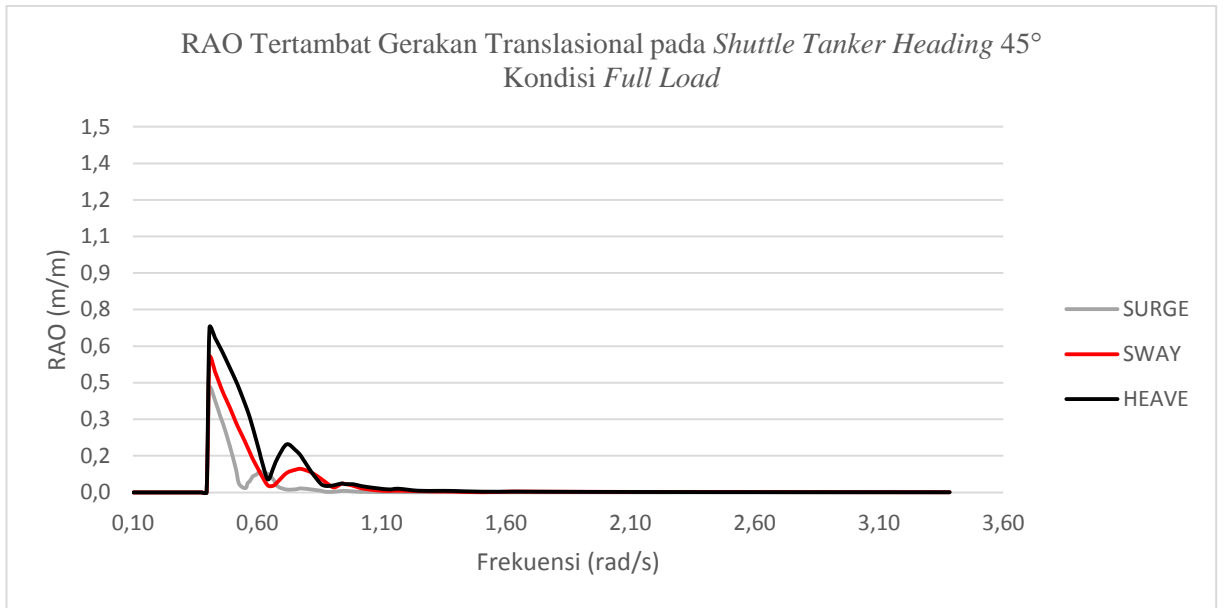
Perhitungan *motion* untuk kondisi *full load* pada *shuttle tanker* yang ditambat saat sistem *tandem offloading* SPM – FSO *Light Load* – Shuttle Tanker *Full Load* dilakukan pada sarat 13,28 m dengan kedalaman laut 45 m. Berikut adalah grafik RAO tertambat pada *shuttle tanker* kondisi *full load* untuk gerakan *surge*, *sway*, *heave*, *roll*, *pitch*, *yaw* dengan *heading* angel 0°, 45°, 90° dan 180°.



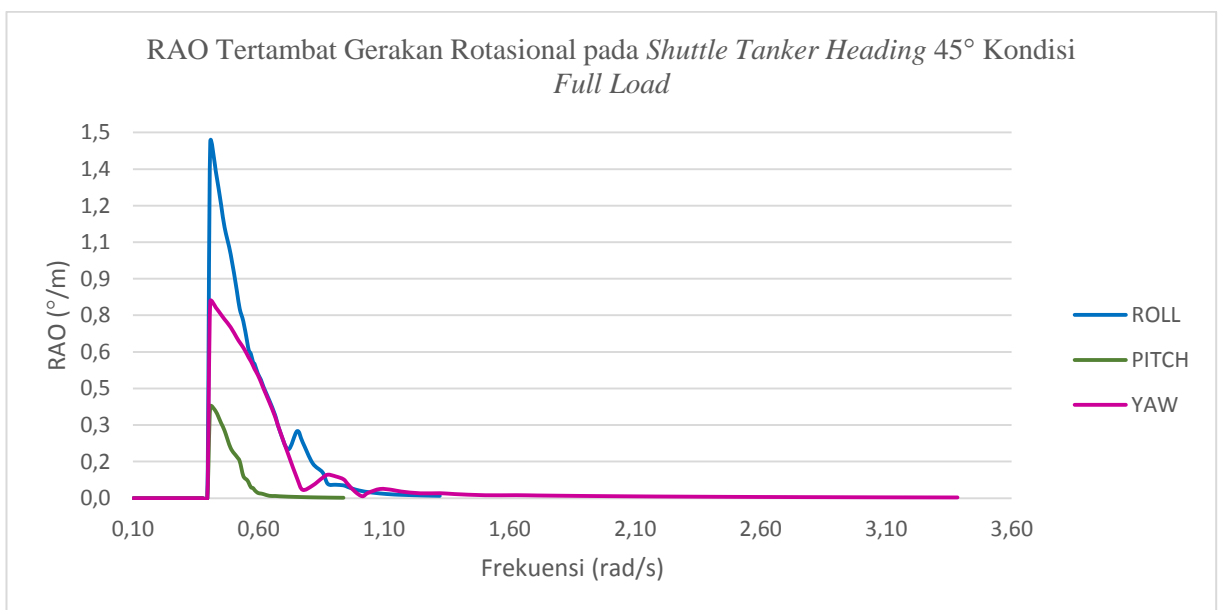
Gambar 4.62 Grafik RAO Tertambat Gerakan Translasional pada *Shuttle Tanker* 85000 DWT *Heading 0°* Kondisi *Full Load*



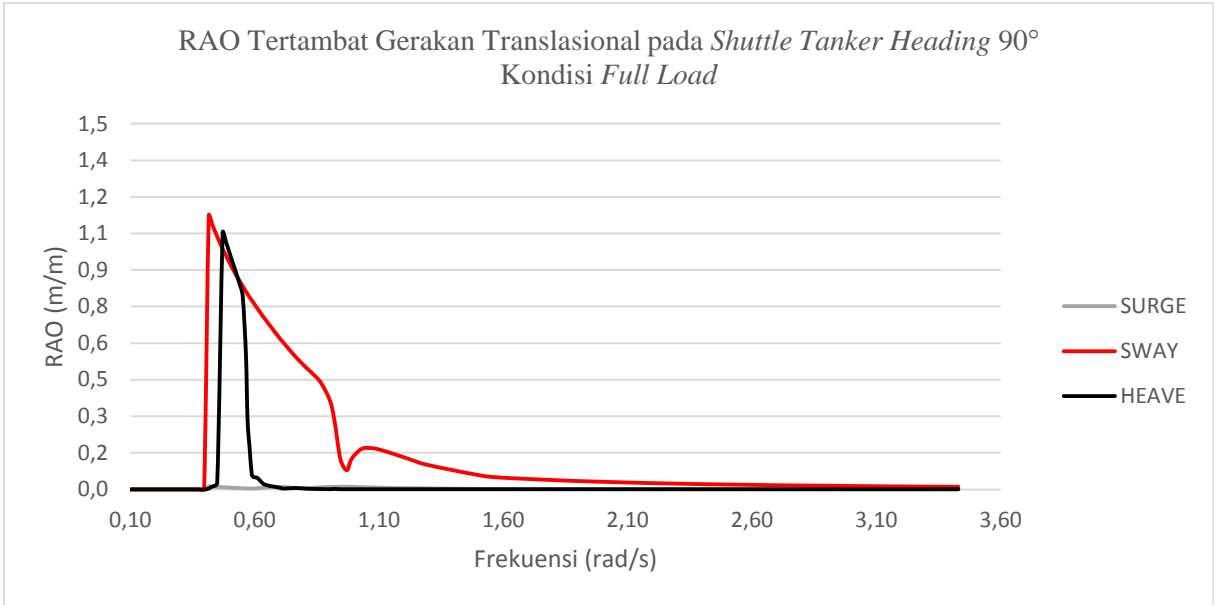
Gambar 4.63 Grafik RAO Tertambat Gerakan Rotasional pada *Shuttle Tanker* 85000 DWT *Heading 0°* Kondisi *Full Load*



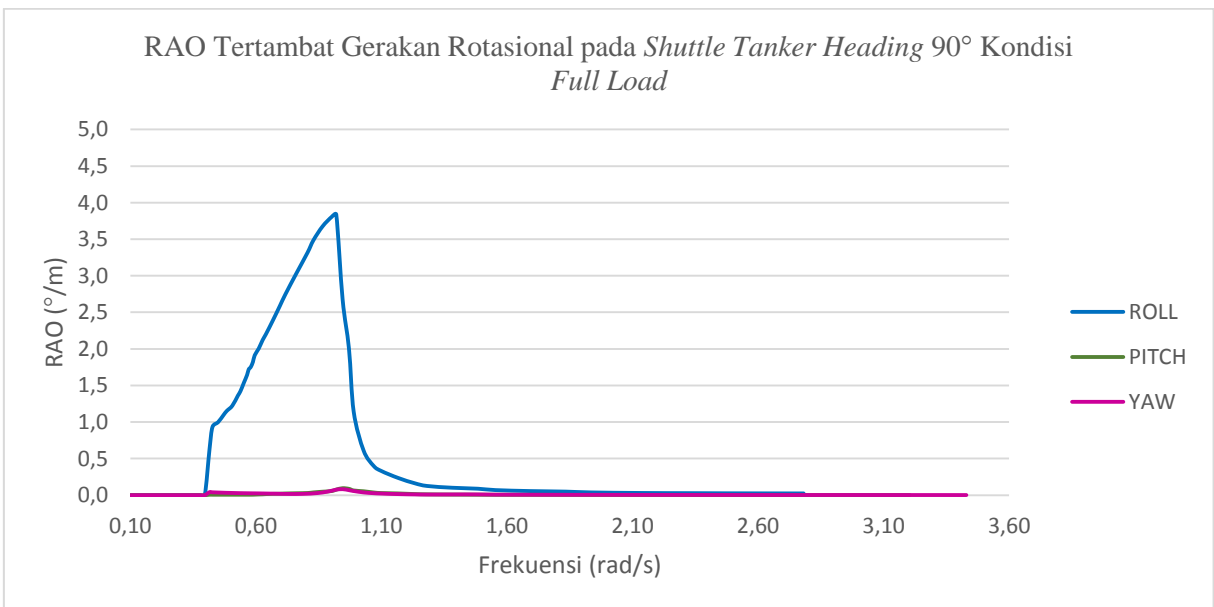
Gambar 4.64 Grafik RAO Tertambat Gerakan Translasional pada *Shuttle Tanker* 85000 DWT *Heading 45°* Kondisi *Full Load*



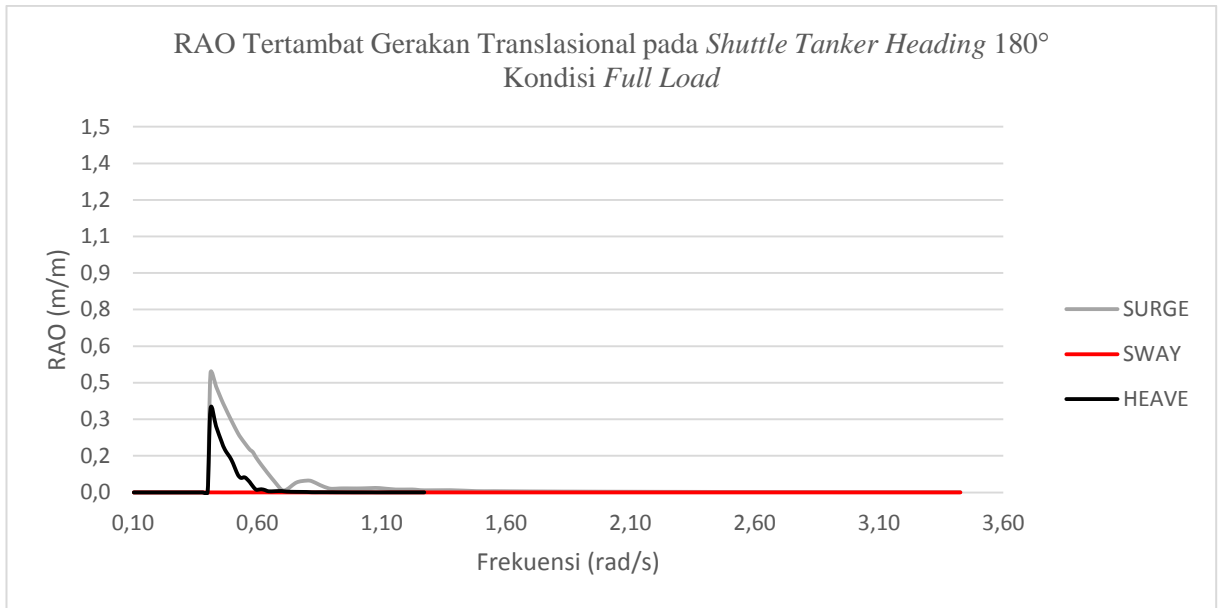
Gambar 4.65 Grafik RAO Tertambat Gerakan Rotasional pada *Shuttle Tanker* 85000 DWT *Heading 45°* Kondisi *Full Load*



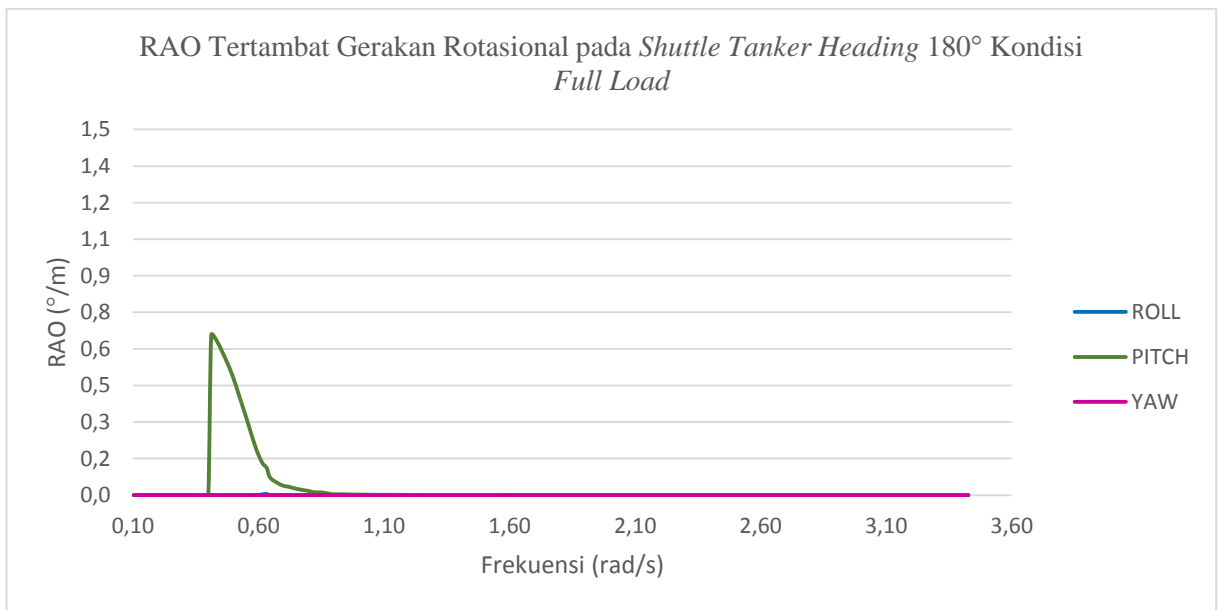
Gambar 4.66 Grafik RAO Tertambat Gerakan Translasional pada *Shuttle Tanker* 85000 DWT *Heading 90°* Kondisi *Full Load*



Gambar 4.67 Grafik RAO Tertambat Gerakan Rotasional pada *Shuttle Tanker* 85000 DWT *Heading 90°* Kondisi *Full Load*



Gambar 4.68 Grafik RAO Tertambat Gerakan Translasional pada *Shuttle Tanker* 85000 DWT *Heading 180°* Kondisi *Full Load*



Gambar 4.69 Grafik RAO Tertambat Gerakan Rotasional pada *Shuttle Tanker* 85000 DWT *Heading 180°* Kondisi *Full Load*

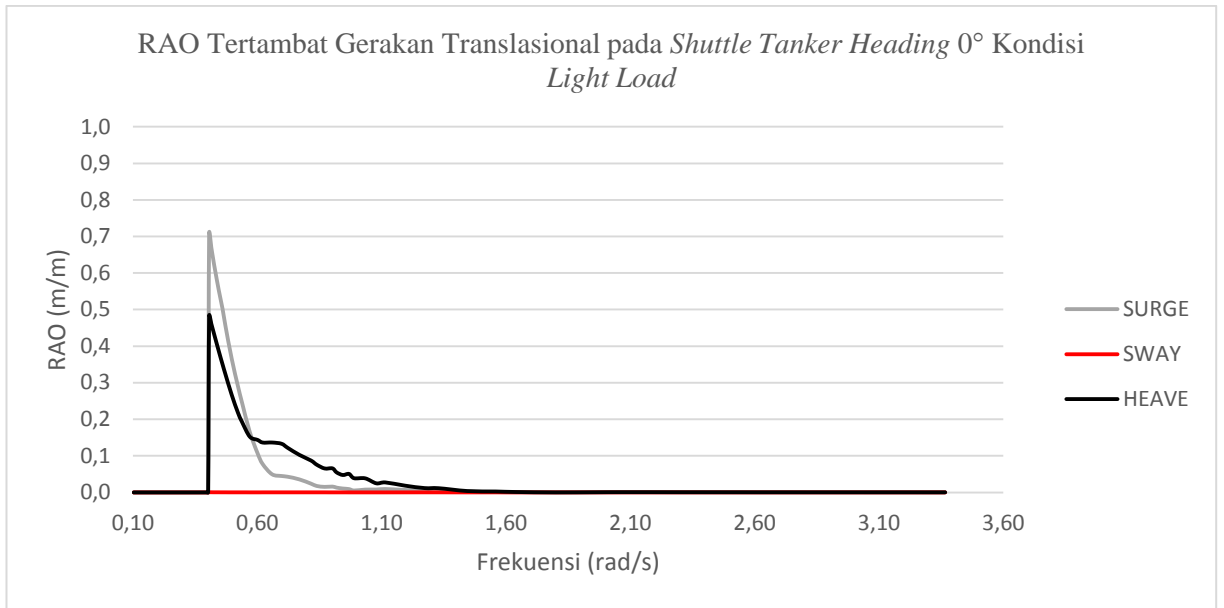
Tabel 4.19 Nilai RAO Tertinggi pada *Shuttle Tanker* 85000 DWT Kondisi *Full Load* saat Tertambat

| <i>Heading</i><br>(deg)      | Kondisi Muatan   | Gerakan Translasiional |                      |                       | Gerakan Rotasiional    |                         |                       |
|------------------------------|------------------|------------------------|----------------------|-----------------------|------------------------|-------------------------|-----------------------|
|                              |                  | <i>Surge</i><br>(m/m)  | <i>Sway</i><br>(m/m) | <i>Heave</i><br>(m/m) | <i>Roll</i><br>(deg/m) | <i>Pitch</i><br>(deg/m) | <i>Yaw</i><br>(deg/m) |
| <b><i>Shuttle Tanker</i></b> |                  |                        |                      |                       |                        |                         |                       |
| 0                            | <i>Full Load</i> | 0,516                  | 0,000                | 0,332                 | 0,003                  | 0,661                   | 0,000                 |
| 45                           |                  | 0,426                  | 0,552                | 0,676                 | 1,458                  | 0,376                   | 0,808                 |
| 90                           |                  | 0,012                  | 1,124                | 1,054                 | 3,838                  | 0,095                   | 0,082                 |
| 180                          |                  | 0,490                  | 0,000                | 0,344                 | 0,005                  | 0,657                   | 0,001                 |

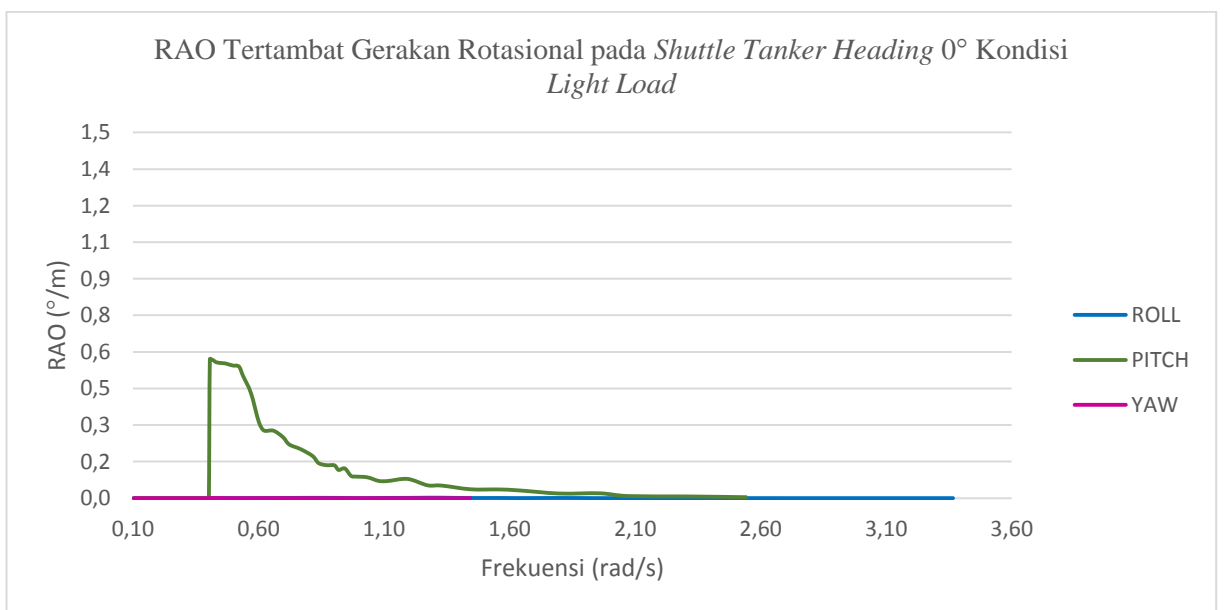
Berdasarkan grafik pada Gambar 4.62 sampai dengan Gambar 4.69 dan Tabel 4.19 dapat dilihat bahwa saat kondisi *full load* pada gerak osilasi translasiional, RAO *surge* tertinggi sebesar 0,516 m/m pada *heading* 0°. Untuk RAO *sway* tertinggi pada *heading* 90° sebesar 1,124 m/m dan untuk RAO *heave* tertinggi sebesar 1,054 m/m pada *heading* 90°. Sedangkan pada gerak osilasi rotasiional, RAO *roll* tertinggi sebesar 3,838 deg/m pada *heading* 90°, RAO *pitch* tertinggi sebesar 0,661 deg/m pada *heading* 0° dan RAO *yaw* tertinggi 0,808 deg/m pada *heading* 45°.

#### 4.6.4.6 *Response Amplitude Operator (RAO) Tertambat pada Shuttle Tanker Kondisi Light Load*

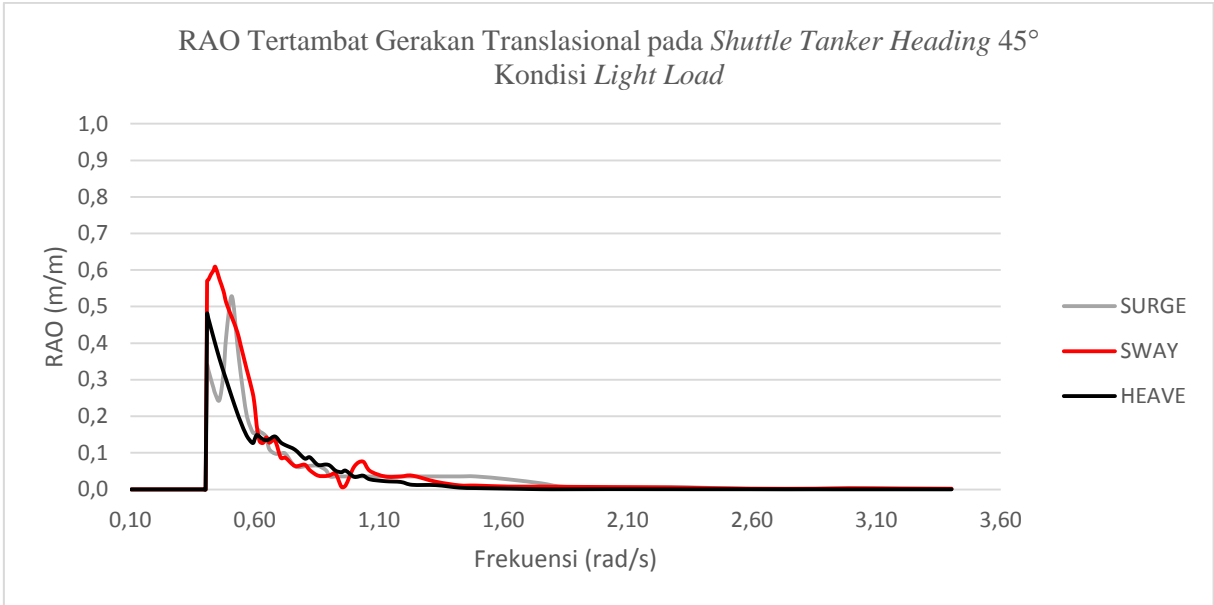
Perhitungan *motion* untuk kondisi *light load* pada *shuttle tanker* yang ditambat saat sistem *tandem offloading* SPM – FSO *Full Load – Shuttle Tanker Light Load* dilakukan pada sarat 1,991 m dengan kedalaman laut 45 m. Berikut adalah grafik RAO tertambat pada *shuttle tanker* kondisi *light load* untuk gerakan *surge*, *sway*, *heave*, *roll*, *pitch*, *yaw* dengan *heading* *angel* 0°, 45°, 90° dan 180°.



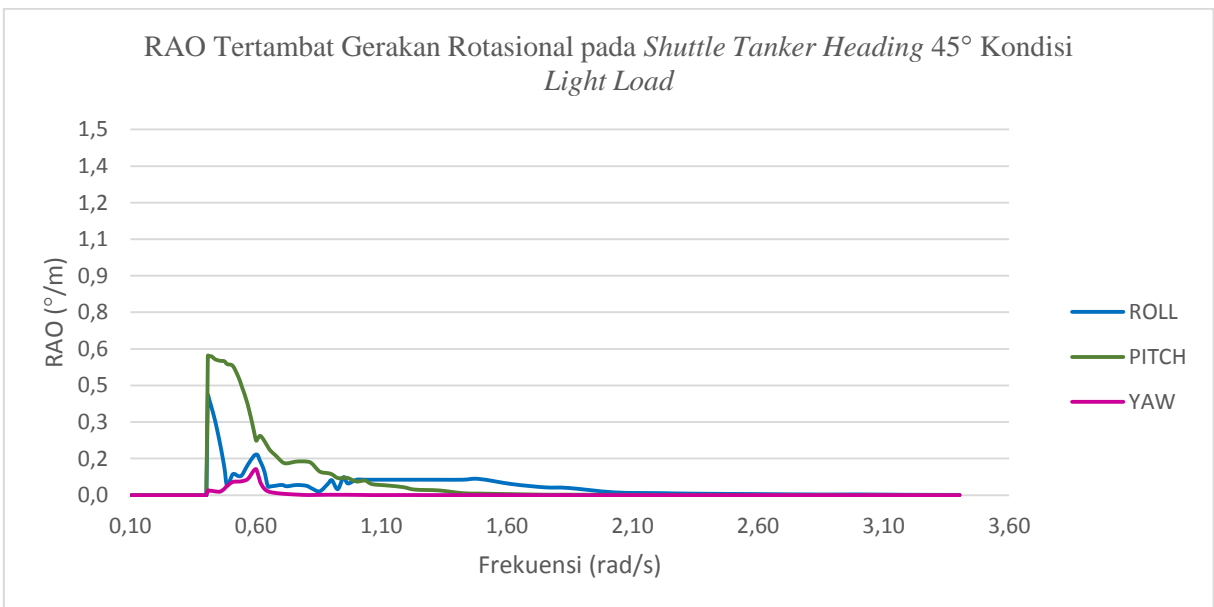
Gambar 4.70 Grafik RAO Tertambat Gerakan Translasional pada *Shuttle Tanker* 85000 DWT *Heading 0°* Kondisi *Light Load*



Gambar 4.71 Grafik RAO Tertambat Gerakan Rotasional pada *Shuttle Tanker* 85000 DWT *Heading 0°* Kondisi *Light Load*

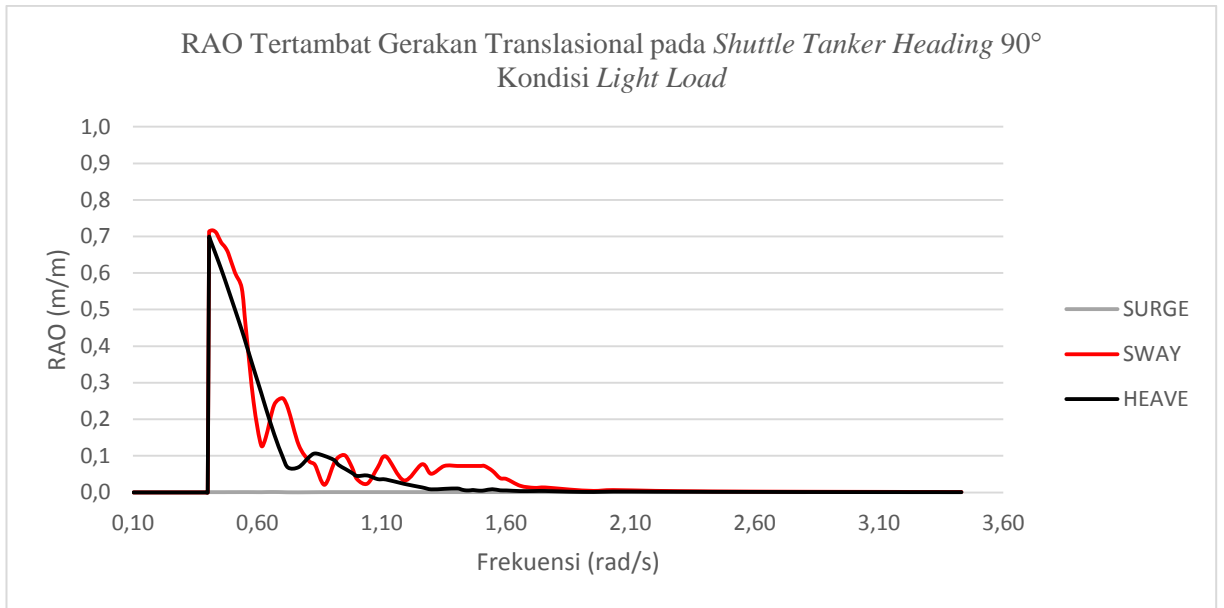


Gambar 4.72 Grafik RAO Tertambat Gerakan Translasional pada *Shuttle Tanker* 85000 DWT *Heading 45°* Kondisi *Light Load*

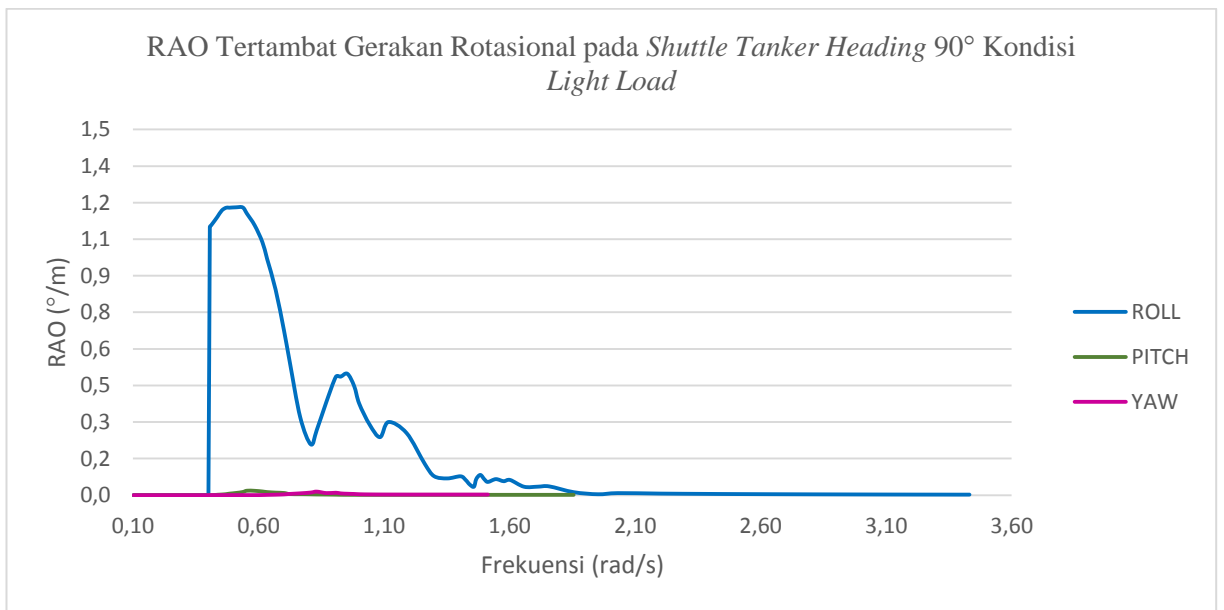


Gambar 4.73 Grafik RAO Tertambat Gerakan Rotasional pada *Shuttle Tanker* 85000 DWT *Heading 45°* Kondisi *Light Load*

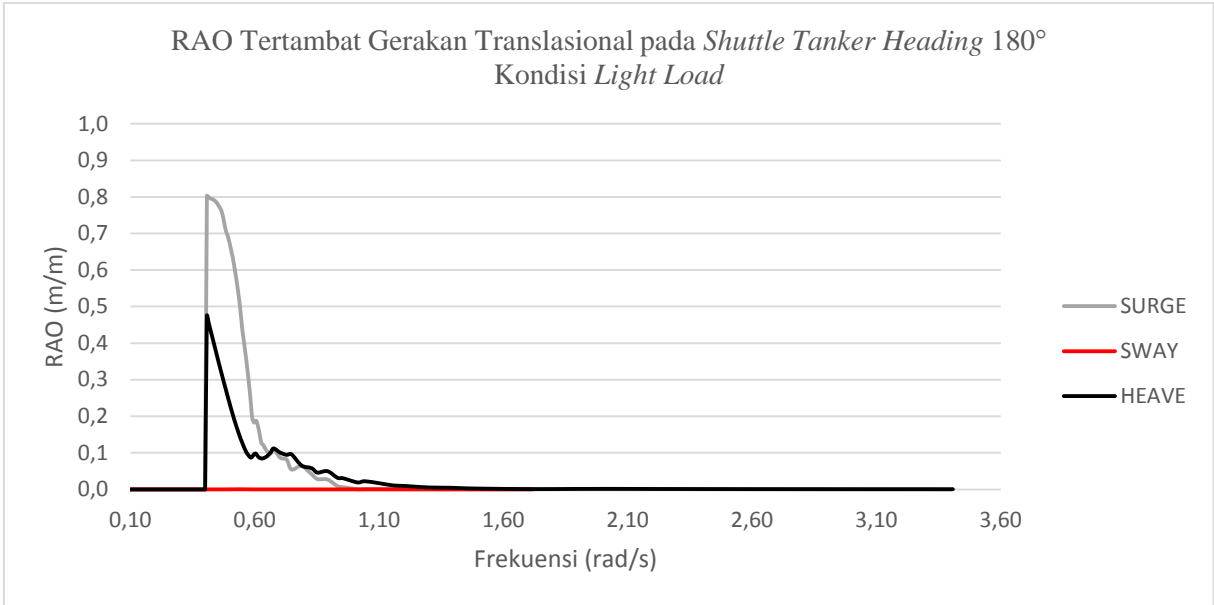




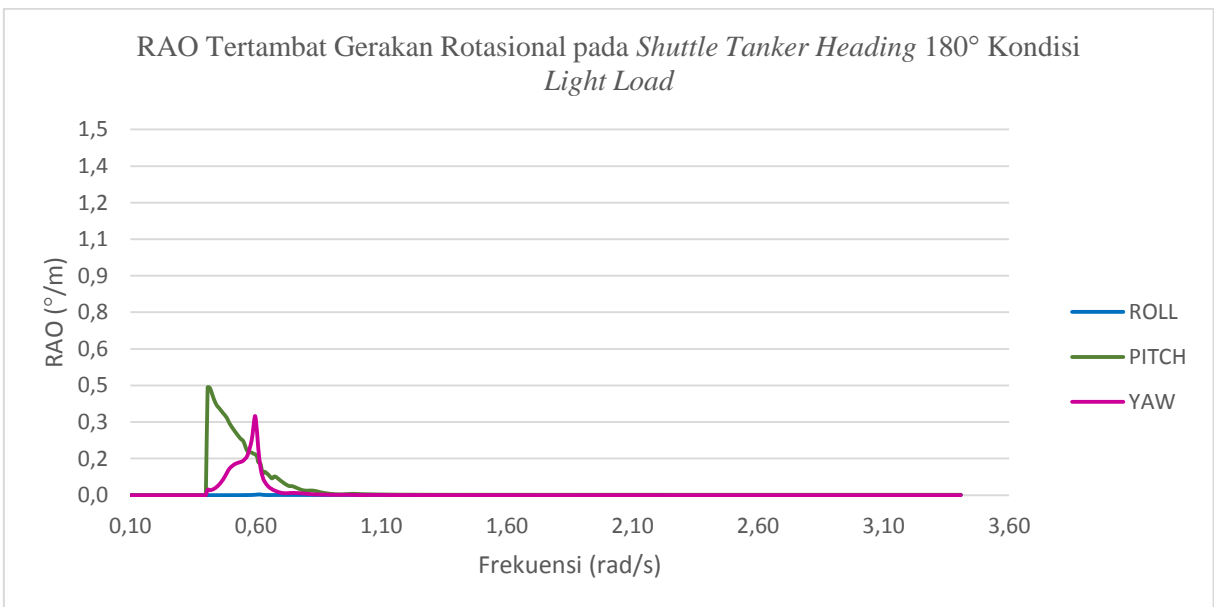
Gambar 4.74 Grafik RAO Tertambat Gerakan Translasional pada *Shuttle Tanker* 85000 DWT *Heading 90°* Kondisi *Light Load*



Gambar 4.75 Grafik RAO Tertambat Gerakan Rotasional pada *Shuttle Tanker* 85000 DWT *Heading 90°* Kondisi *Light Load*



Gambar 4.76 Grafik RAO Tertambat Gerakan Translasional pada *Shuttle Tanker* 85000 DWT *Heading 180°* Kondisi *Light Load*



Gambar 4.77 Grafik RAO Tertambat Gerakan Rotasional pada *Shuttle Tanker* 85000 DWT *Heading 180°* Kondisi *Light Load*

Tabel 4.20 Nilai RAO Tertinggi pada *Shuttle Tanker* 85000 DWT Kondisi *Light Load* saat Tertambat

| Heading (deg)                | Kondisi Muatan    | Gerakan Translasiional |            |             | Gerakan Rotasiional |               |             |
|------------------------------|-------------------|------------------------|------------|-------------|---------------------|---------------|-------------|
|                              |                   | Surge (m/m)            | Sway (m/m) | Heave (m/m) | Roll (deg/m)        | Pitch (deg/m) | Yaw (deg/m) |
| <b><i>Shuttle Tanker</i></b> |                   |                        |            |             |                     |               |             |
| 0                            | <i>Light Load</i> | 0,709                  | 0,000      | 0,483       | 0,002               | 0,570         | 0,001       |
| 45                           |                   | 0,528                  | 0,608      | 0,481       | 0,410               | 0,572         | 0,107       |
| 90                           |                   | 0,001                  | 0,717      | 0,699       | 1,181               | 0,018         | 0,015       |
| 180                          |                   | 0,803                  | 0,000      | 0,474       | 0,003               | 0,442         | 0,325       |

Berdasarkan grafik pada Gambar 4.70 sampai dengan Gambar 4.77 dan Tabel 4.20 dapat dilihat bahwa saat kondisi *light load* pada gerak osilasi translasiional, RAO *surge* tertinggi sebesar 0,803 m/m pada *heading* 180°. Untuk RAO *sway* tertinggi pada *heading* 90° sebesar 0,717 m/m dan untuk RAO *heave* tertinggi sebesar 0,699 m/m pada *heading* 90°. Sedangkan pada gerak osilasi rotasiional, RAO *roll* tertinggi sebesar 1,181 deg/m pada *heading* 90°, RAO *pitch* tertinggi sebesar 0,572 deg/m pada *heading* 45° dan RAO *yaw* tertinggi 0,325 deg/m pada *heading* 180°.

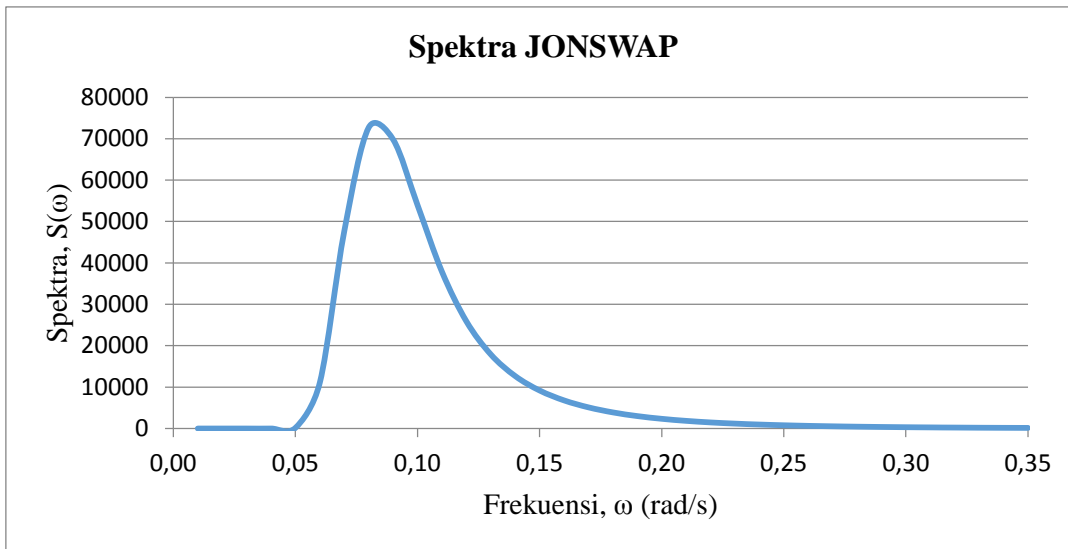
#### 4.7 Analisis Spektrum Gelombang

Dalam pemilihan spektrum gelombang untuk analisis respon gerak struktur pada gelombang acak didasarkan pada kondisi *real* laut yang ditinjau. Spektrum gelombang yang digunakan dalam analisis ini adalah Spektrum JONSWAP yang didasarkan pada kondisi lingkungan dimana FSO Arco Ardjuna beroperasi yaitu Perairan Laut Jawa yang termasuk dalam daerah perairan tertutup.

Perhitungan untuk menentukan nilai  $\gamma$  yang sesuai dengan kondisi lingkungan dibahas dalam Chakrabarti (1987). Periode puncak gelombang ( $T_p$ ) kondisi ekstrem 100 tahunan pada perairan Laut Jawa adalah 9 s dan tinggi gelombang signifikan ( $H_s$ ) adalah 3,6 m. Sehingga  $\frac{T_p}{\sqrt{H_s}} = 4,74$ , maka untuk nilai  $\gamma$  menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\gamma = \exp\left(5,75 - 1,15 \frac{T_p}{\sqrt{H_s}}\right) \text{ untuk } \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} > 3,6 \quad \dots\dots\dots(4.1)$$

Dari perhitungan di atas didapatkan nilai  $\gamma$  sebesar 1,34. Berikut adalah grafik spektrum gelombang JONSWAP untuk perairan Laut Jawa dimana FSO, SPM dan *shuttle tanker* beroperasi.



Gambar 4.78 Grafik Spektrum Gelombang JONSWAP ( $H_s = 3,6$  m,  $T_p = 9$  s)

Selanjutnya akan dihitung respon struktur dari FSO, SPM dan *shuttle tanker* sebagai respon kerapatan energi pada struktur akibat gelombang. Spektra respon didapatkan dengan cara mengkalikan harga spektra gelombang pada daerah struktur beroperasi dengan RAO kuadrat.

$$S_{\phi}(\omega_e) = RAO^2 \times S_{\zeta}(\omega_e) \quad \dots\dots\dots(4.2)$$

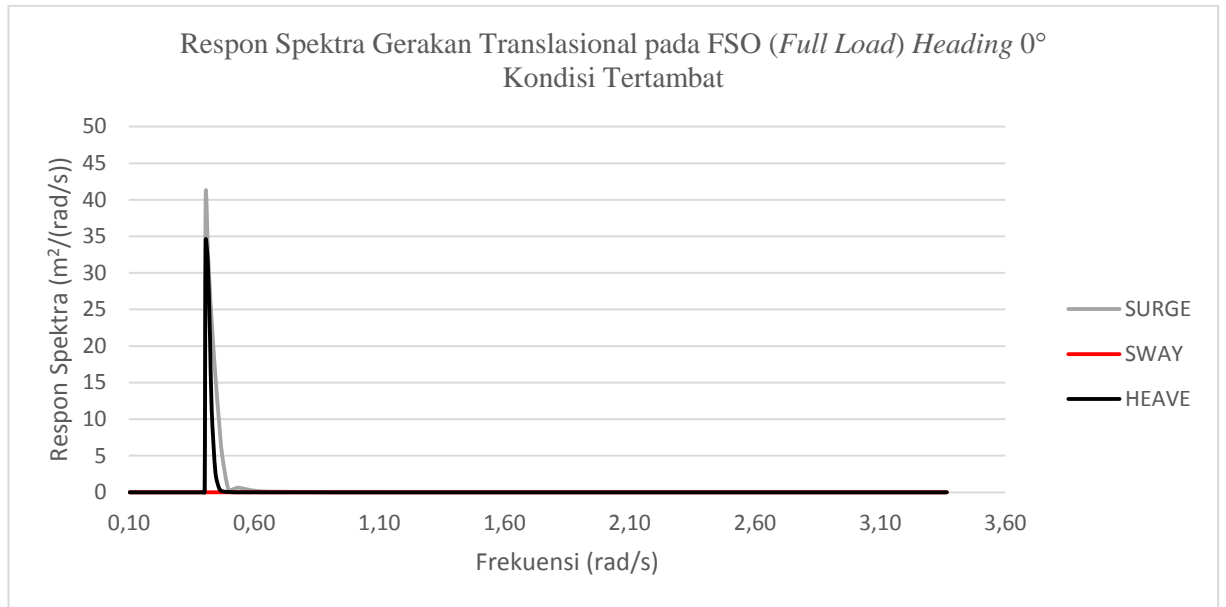
Hasil analisis perilaku gerak pada gelombang acak yang akan dijabarkan di bawah ini, sama halnya dengan penjabaran analisis perilaku gerak pada gelombang reguler (RAO) dan disesuaikan dengan kondisi sistem *tandem offloading* serta muatan yang ditinjau.

#### 4.8 Analisis Spektrum Respon Struktur

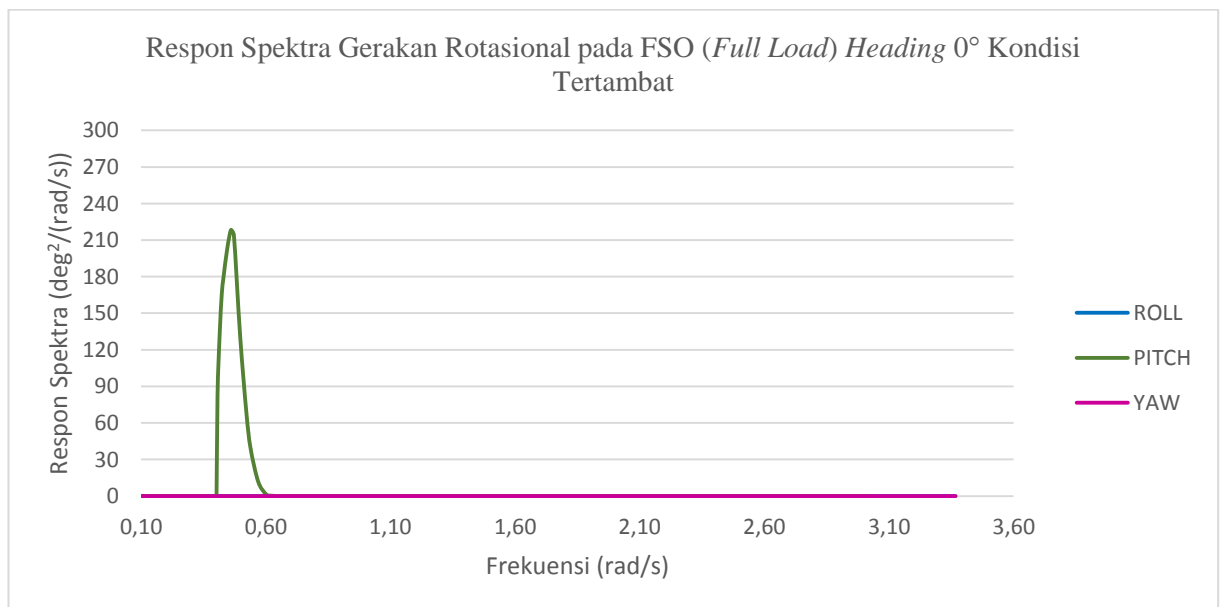
##### 4.8.1 Analisis Spektrum Respon FSO (*Full Load*) Kondisi Tertambat

Perhitungan respon spektra untuk kondisi *full load* pada FSO Arco Ardjuna yang ditambat saat sistem *tandem offloading* SPM – FSO *Full Load* – *Shuttle Tanker Light Load* dilakukan pada sarat 24 m dengan kedalaman laut

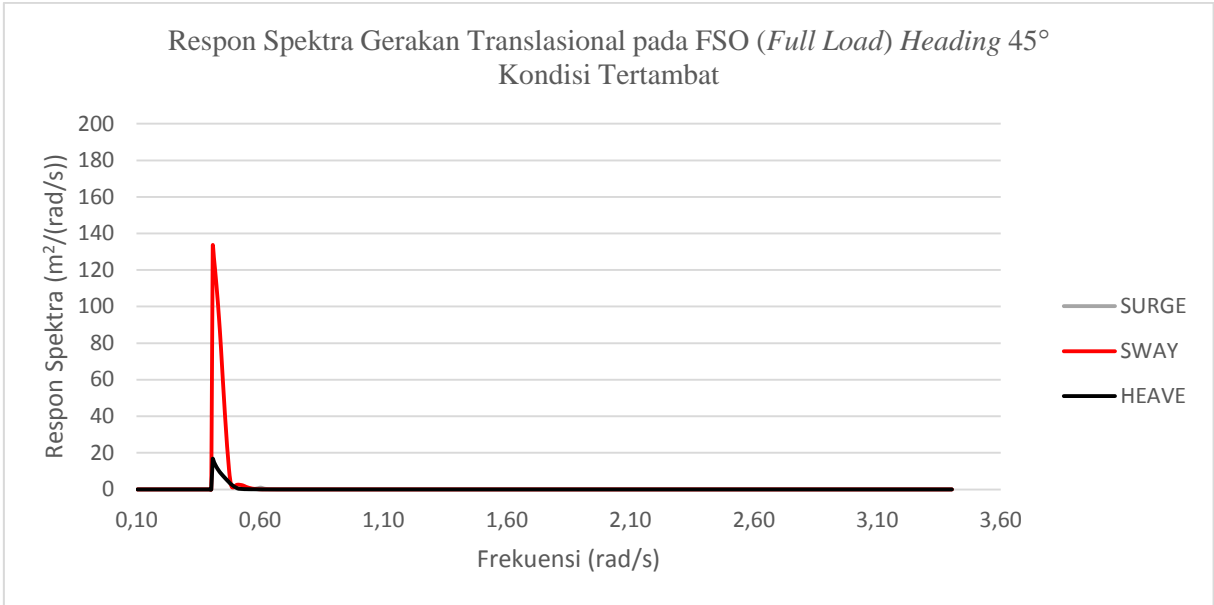
45 m. Berikut adalah grafik respon spektra pada FSO Arco Ardjuna (*full load*) kondisi tertambat untuk gerakan *surge*, *sway*, *heave*, *roll*, *pitch*, *yaw* dengan *heading angle*  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  dan  $180^\circ$ .



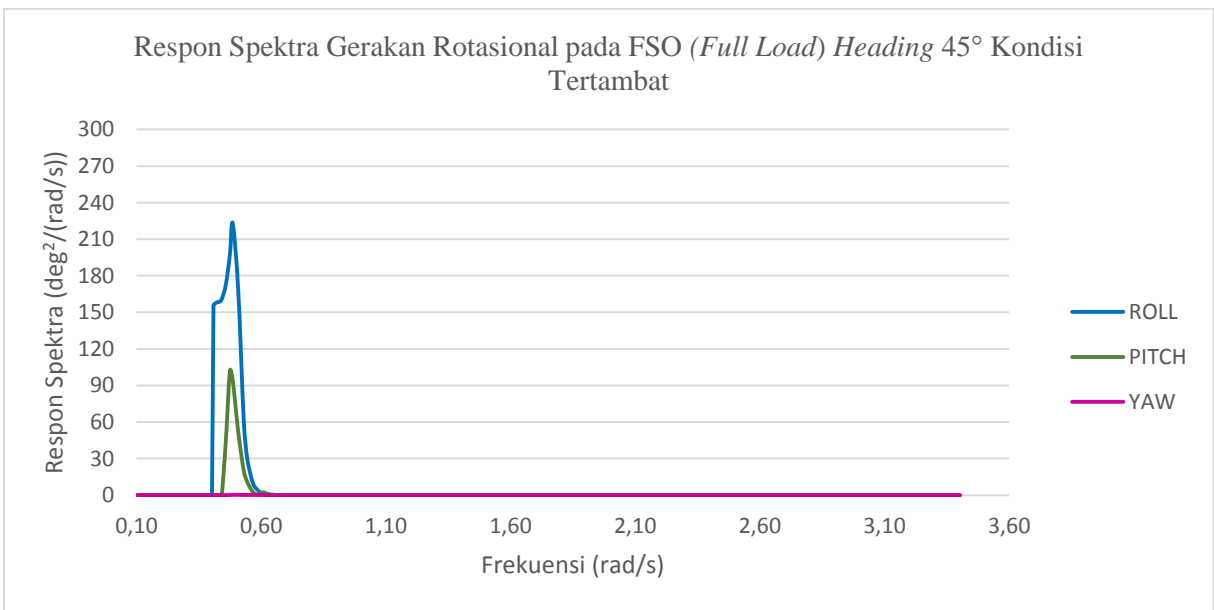
Gambar 4.79 Grafik Respon Spektra Gerakan Translasional pada FSO Arco Ardjuna (*Full Load*) *Heading*  $0^\circ$  Kondisi Tertambat



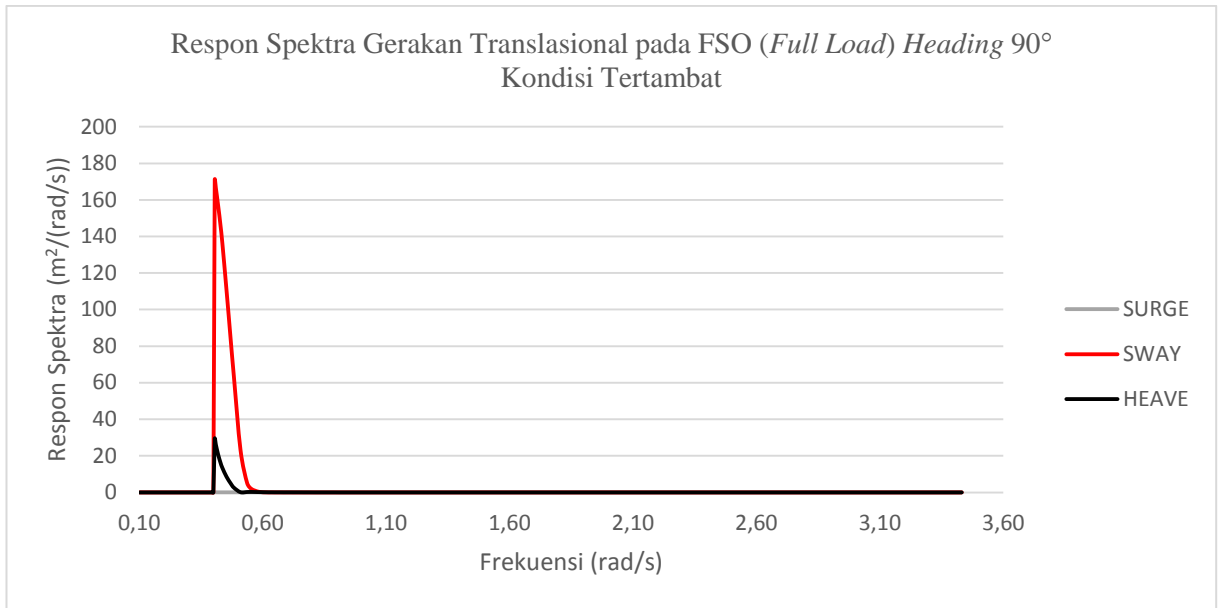
Gambar 4.80 Grafik Respon Spektra Gerakan Rotasional pada FSO Arco Ardjuna (*Full Load*) *Heading*  $0^\circ$  Kondisi Tertambat



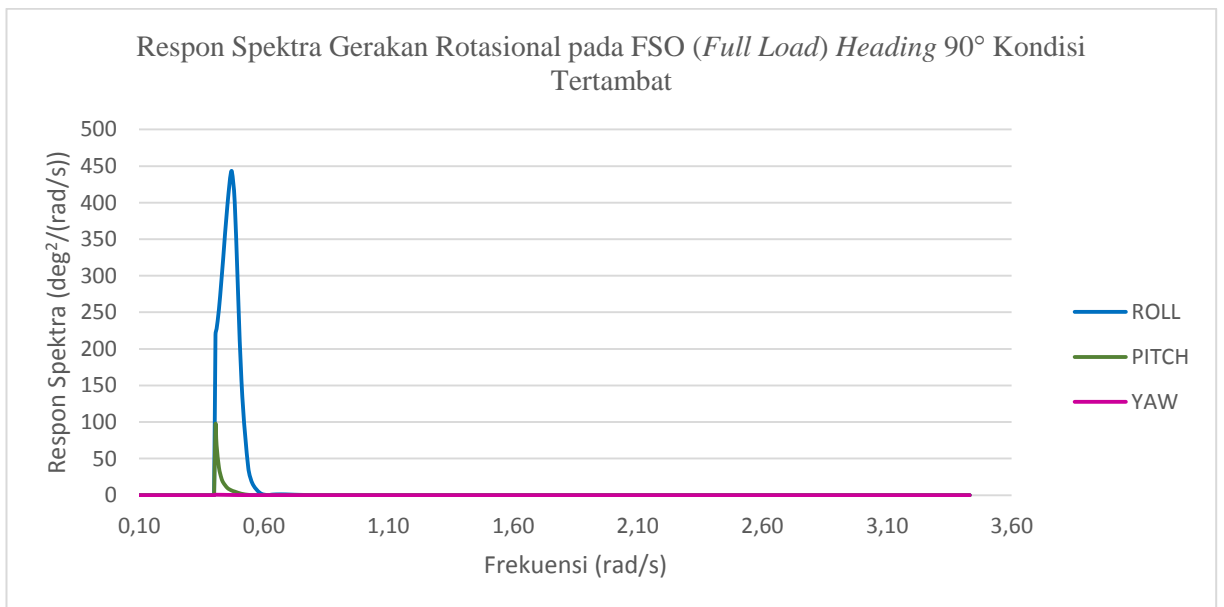
Gambar 4.81 Grafik Respon Spektra Gerakan Translasional pada FSO Arco Ardjuna (*Full Load*) *Heading* 45° Kondisi Tertambat



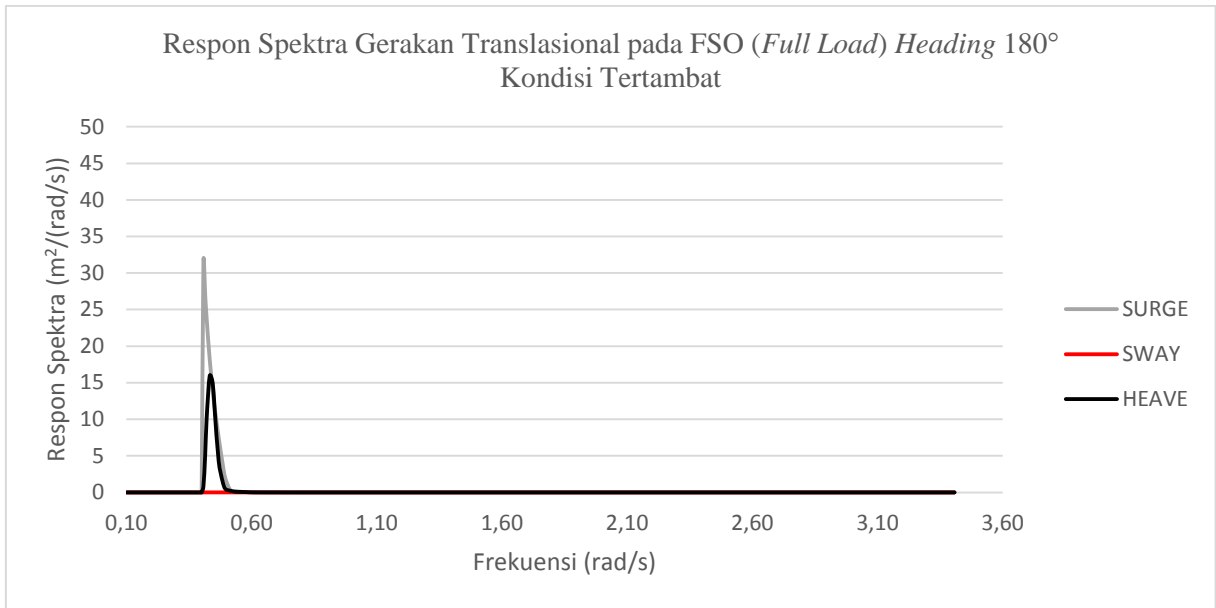
Gambar 4.82 Grafik Respon Spektra Gerakan Rotasional pada FSO Arco Ardjuna (*Full Load*) *Heading* 45° Kondisi Tertambat



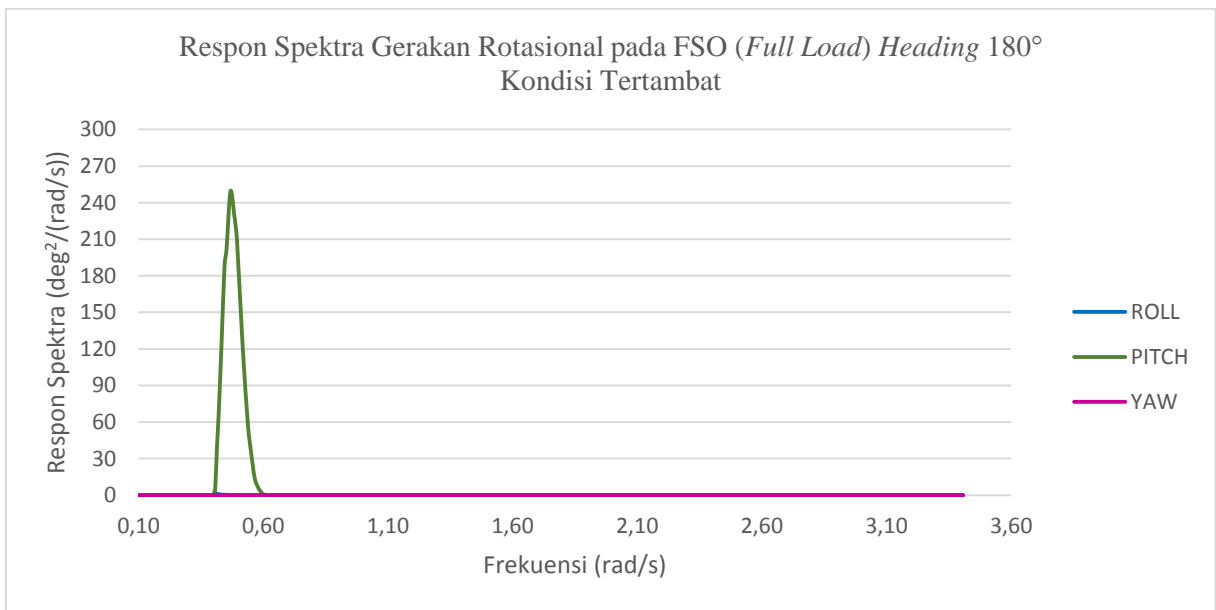
Gambar 4.83 Grafik Respon Spektra Gerakan Translasional pada FSO Arco Ardjuna (*Full Load*) *Heading* 90° Kondisi Tertambat



Gambar 4.84 Grafik Respon Spektra Gerakan Rotasional pada FSO Arco Ardjuna (*Full Load*) *Heading* 90° Kondisi Tertambat



Gambar 4.85 Grafik Respon Spektra Gerakan Translasional pada FSO Arco Ardjuna (*Full Load*) Heading 180° Kondisi Tertambat



Gambar 4.86 Grafik Respon Spektra Gerakan Rotasional pada FSO Arco Ardjuna (*Full Load*) Heading 180° Kondisi Tertambat



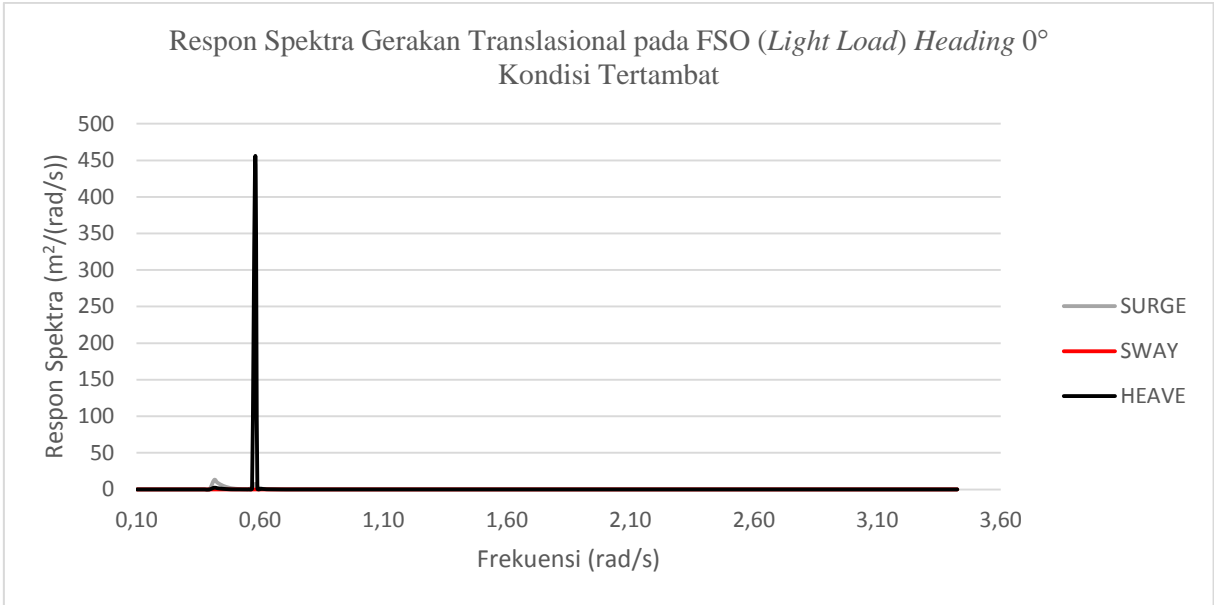
Tabel 4.21 Nilai Respon Struktur Tertinggi pada FSO Arco Ardjuna Kondisi *Full Load* saat Tertambat

| Heading<br>(deg) | Kondisi<br>Muatan    | Gerakan Translasiional  |             |              | Gerakan Rotasiional       |              |            |
|------------------|----------------------|-------------------------|-------------|--------------|---------------------------|--------------|------------|
|                  |                      | <i>Surge</i>            | <i>Sway</i> | <i>Heave</i> | <i>Roll</i>               | <i>Pitch</i> | <i>Yaw</i> |
|                  |                      | m <sup>2</sup> /(rad/s) |             |              | deg <sup>2</sup> /(rad/s) |              |            |
| <b>FSO</b>       |                      |                         |             |              |                           |              |            |
| 0                | <i>Full<br/>Load</i> | 40,516                  | 0,0000015   | 34,312       | 0,000154                  | 218,409      | 0,0000033  |
| 45               |                      | 16,271                  | 133,082     | 16,650       | 223,123                   | 101,993      | 0,246      |
| 90               |                      | 0,082                   | 170,974     | 29,255       | 443,534                   | 94,898       | 0,592      |
| 180              |                      | 31,568                  | 0,00167     | 15,908       | 1,791                     | 249,168      | 0,284      |

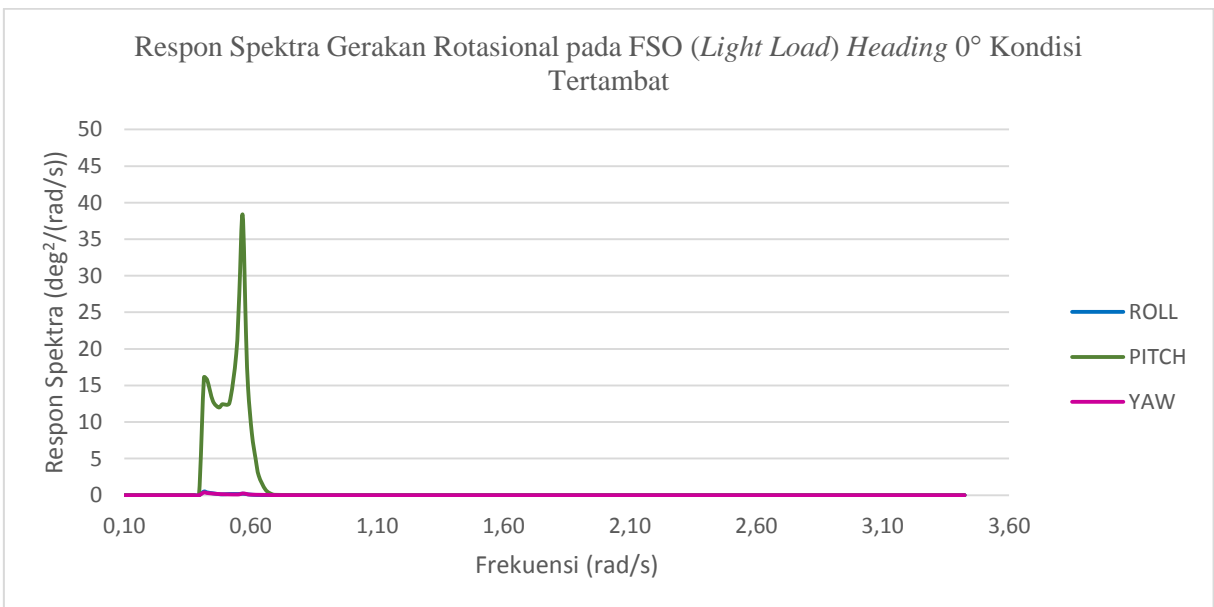
Dari Gambar 4.79 sampai dengan Gambar 4.86 dan Tabel 4.21 maka dapat disimpulkan bahwa respon struktur FSO Arco Ardjuna (*full load*) pada kondisi ekstrem (100 tahunan) di perairan Laut Jawa untuk gerakan *surge* terjadi paling besar akibat *heading* 0°, yaitu dengan nilai  $S_{\phi}(\omega_e)_{surge} = 40,516$  m<sup>2</sup>/(rad/s). Respon struktur untuk gerakan *sway* terjadi paling besar akibat *heading* 90°, yaitu dengan nilai  $S_{\phi}(\omega_e)_{sway} = 170,974$  m<sup>2</sup>/(rad/s). Respon struktur untuk gerakan *heave* terjadi paling besar akibat *heading* 90°, yaitu dengan nilai  $S_{\phi}(\omega_e)_{heave} = 29,255$  m<sup>2</sup>/(rad/s). Respon struktur untuk gerakan *roll* terjadi paling besar akibat *heading* 90°, yaitu dengan nilai  $S_{\phi}(\omega_e)_{roll} = 443,534$  deg<sup>2</sup>/(rad/s). Respon struktur untuk gerakan *pitch* terjadi paling besar akibat *heading* 180°, yaitu dengan nilai  $S_{\phi}(\omega_e)_{pitch} = 249,168$  deg<sup>2</sup>/(rad/s). Respon struktur untuk gerakan *yaw* terjadi paling besar akibat *heading* 90°, yaitu dengan nilai  $S_{\phi}(\omega_e)_{yaw} = 0,592$  deg<sup>2</sup>/(rad/s).

#### 4.8.2 Analisis Spektrum Respon FSO (*Light Load*) Kondisi Tertambat

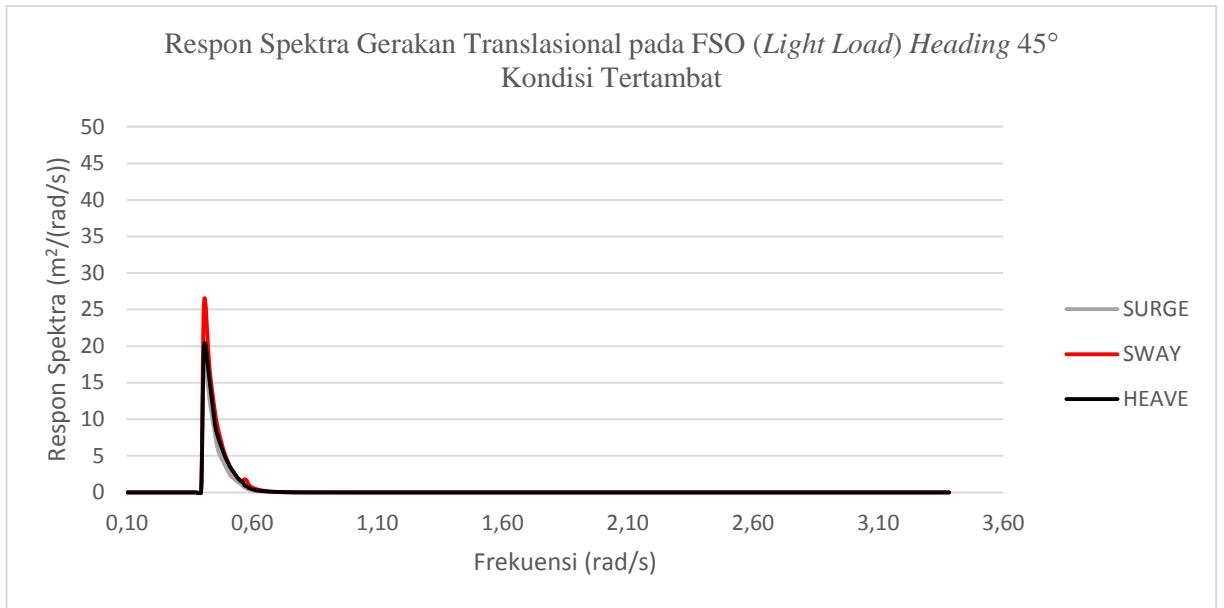
Perhitungan respon spektra untuk kondisi *light load* pada FSO Arco Ardjuna yang ditambat saat sistem *tandem offloading* SPM – FSO *Light Load* – *Shuttle Tanker Full Load* dilakukan pada sarat 10,863 m dengan kedalaman laut 45 m. Berikut adalah grafik respon spektra pada FSO Arco Ardjuna (*light load*) kondisi tertambat untuk gerakan *surge*, *sway*, *heave*, *roll*, *pitch*, *yaw* dengan *heading* *angel* 0°, 45°, 90° dan 180°.



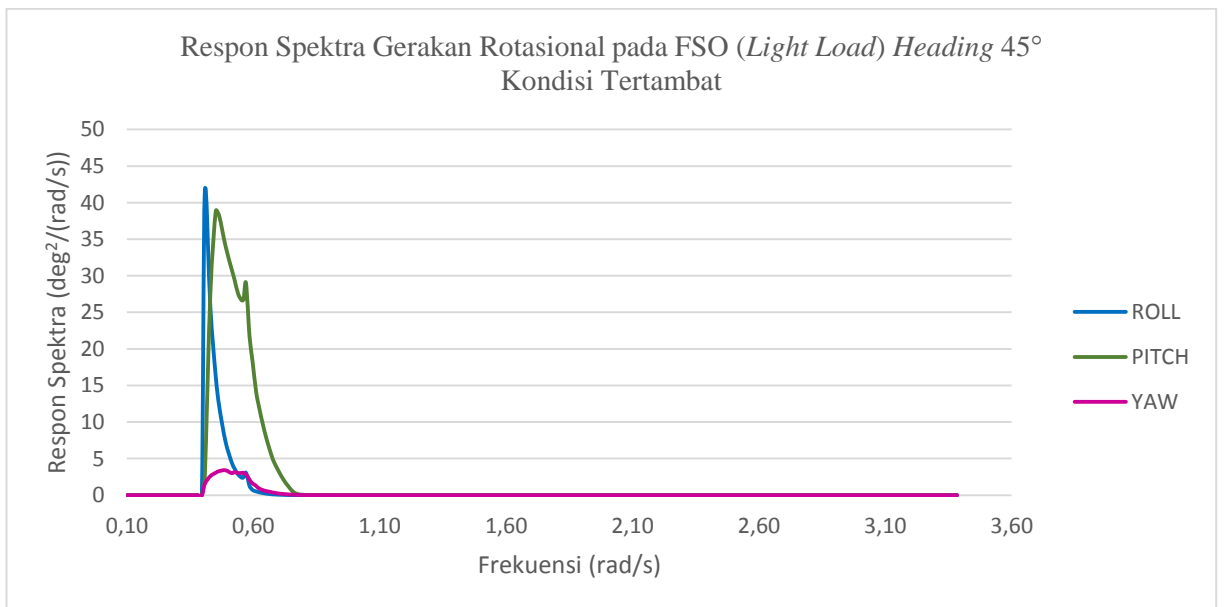
Gambar 4.87 Grafik Respon Spektra Gerakan Translasional pada FSO Arco Ardjuna (*Light Load*) Heading 0° Kondisi Tertambat



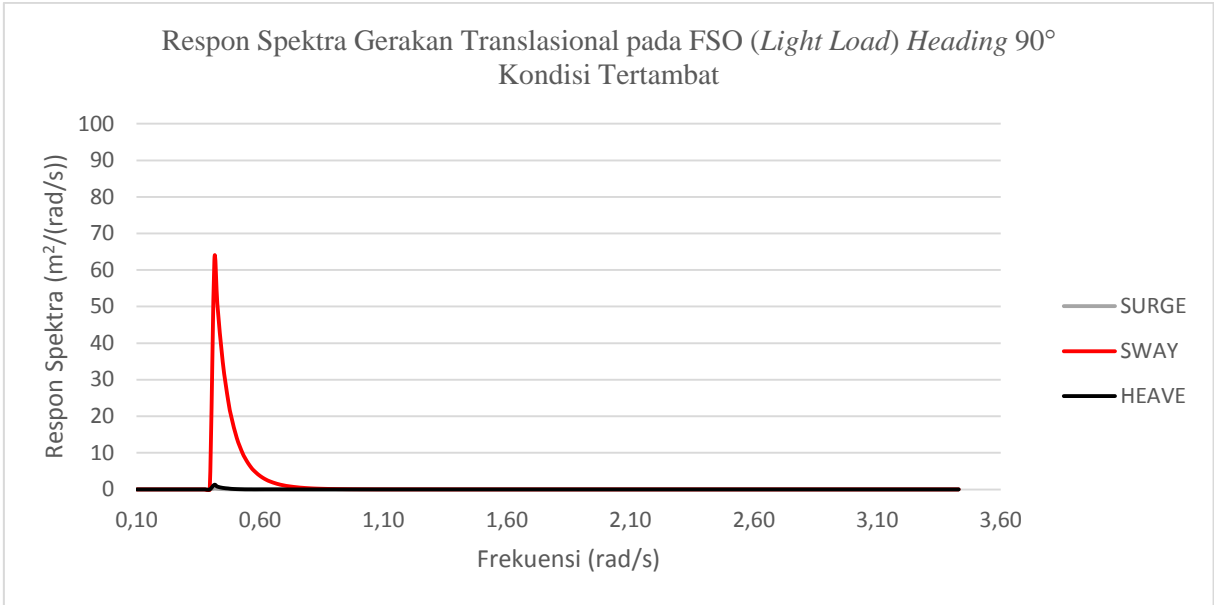
Gambar 4.88 Grafik Respon Spektra Gerakan Rotasional pada FSO Arco Ardjuna (*Light Load*) Heading 0° Kondisi Tertambat



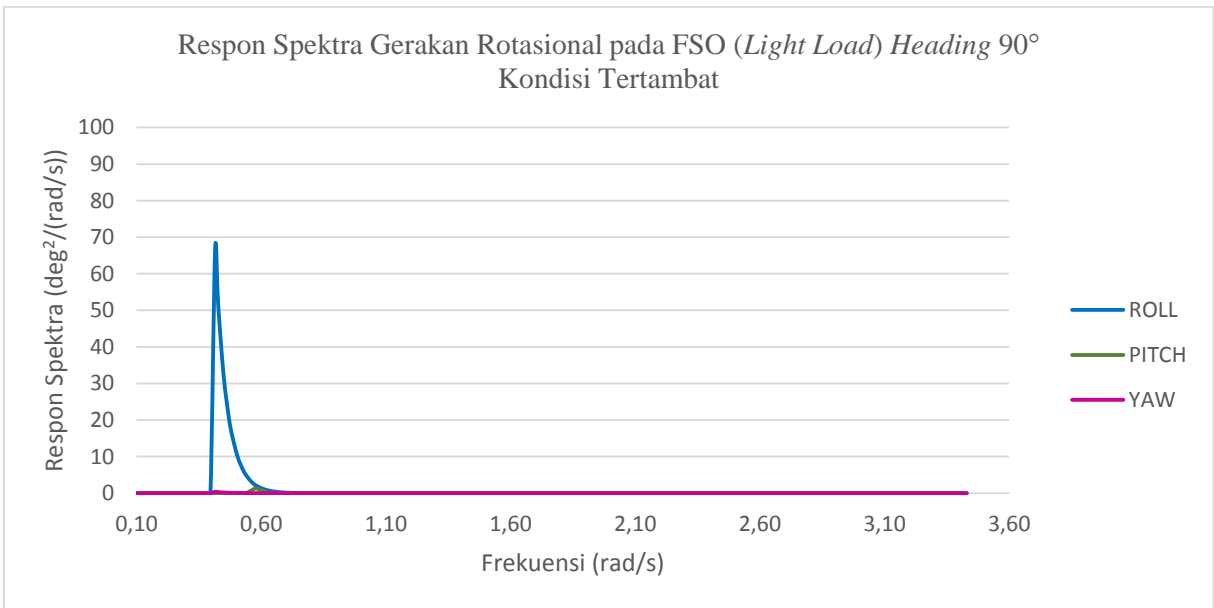
Gambar 4.89 Grafik Respon Spektra Gerakan Translasional pada FSO Arco Ardjuna (*Light Load*) Heading 45° Kondisi Tertambat



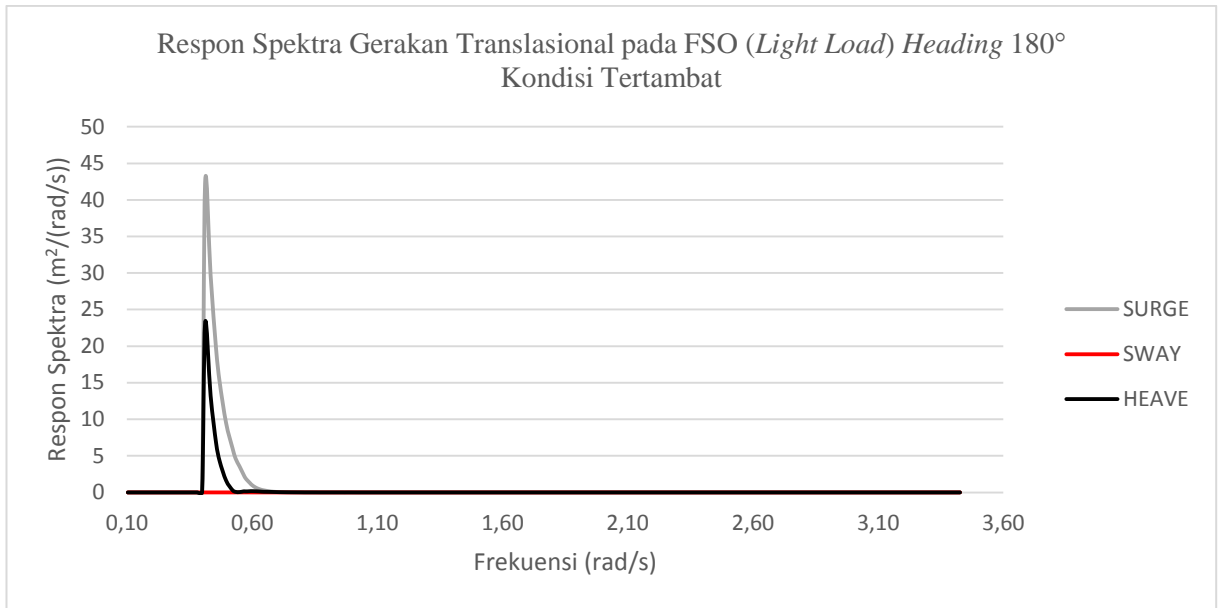
Gambar 4.90 Grafik Respon Spektra Gerakan Rotasional pada FSO Arco Ardjuna (*Light Load*) Heading 45° Kondisi Tertambat



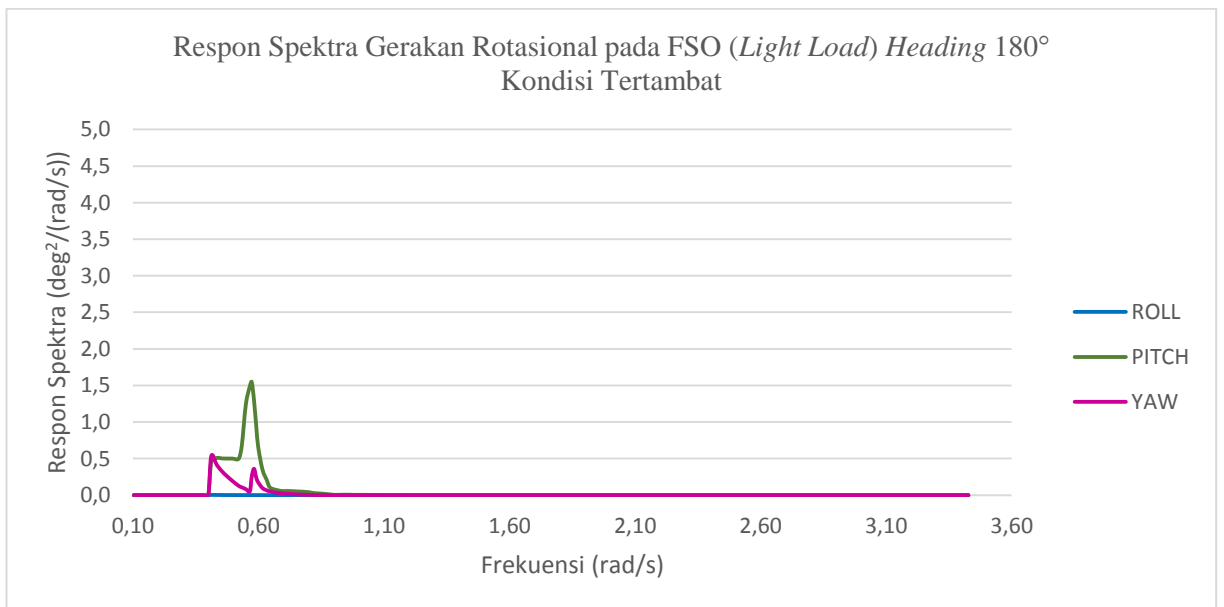
Gambar 4.91 Grafik Respon Spektra Gerakan Translasional pada FSO Arco Ardjuna (*Light Load*) Heading 90° Kondisi Tertambat



Gambar 4.92 Grafik Respon Spektra Gerakan Rotasional pada FSO Arco Ardjuna (*Light Load*) Heading 90° Kondisi Tertambat



Gambar 4.93 Grafik Respon Spektra Gerakan Translasional pada FSO Arco Ardjuna (*Light Load*) Heading 180° Kondisi Tertambat



Gambar 4.94 Grafik Respon Spektra Gerakan Rotasional pada FSO Arco Ardjuna (*Light Load*) Heading 180° Kondisi Tertambat

Tabel 4.22 Nilai Respon Struktur Tertinggi pada FSO Arco Ardjuna Kondisi *Light Load* saat Tertambat

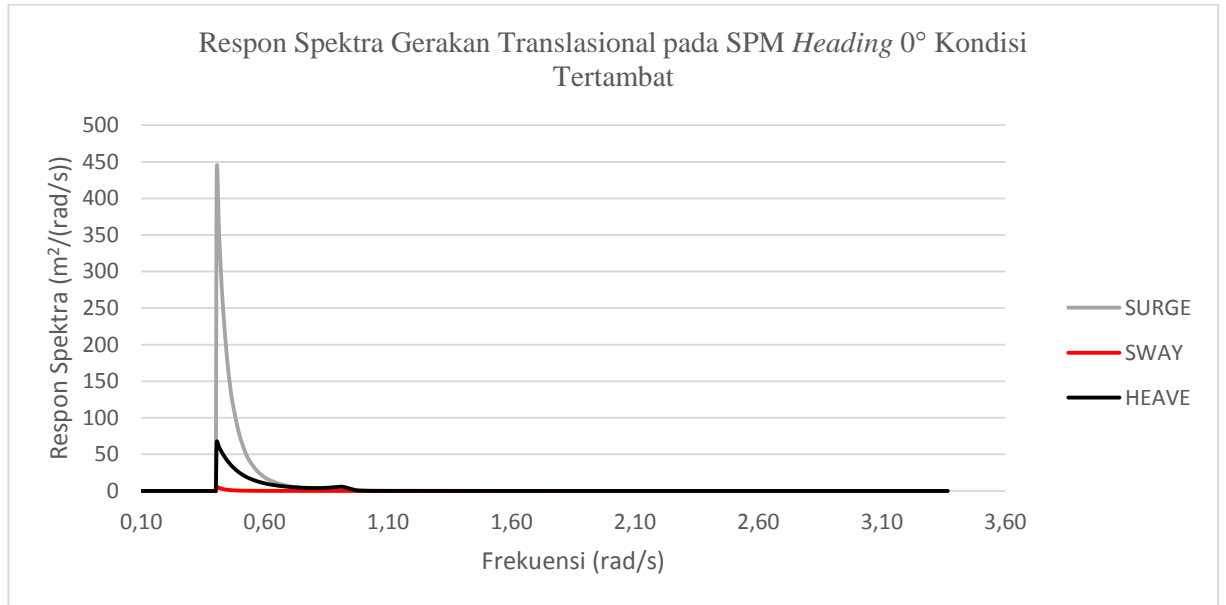
| Heading<br>(deg) | Kondisi<br>Muatan     | Gerakan Translasional   |             |              | Gerakan Rotasional        |              |            |
|------------------|-----------------------|-------------------------|-------------|--------------|---------------------------|--------------|------------|
|                  |                       | <i>Surge</i>            | <i>Sway</i> | <i>Heave</i> | <i>Roll</i>               | <i>Pitch</i> | <i>Yaw</i> |
|                  |                       | m <sup>2</sup> /(rad/s) |             |              | deg <sup>2</sup> /(rad/s) |              |            |
| <b>FSO</b>       |                       |                         |             |              |                           |              |            |
| 0                | <i>Light<br/>Load</i> | 12,972                  | 0,006       | 456,100      | 0,495                     | 38,336       | 0,374      |
| 45               |                       | 18,052                  | 26,093      | 19,863       | 41,380                    | 38,877       | 3,407      |
| 90               |                       | 0,228                   | 62,681      | 1,277        | 66,638                    | 1,394        | 0,372      |
| 180              |                       | 42,229                  | 0,004       | 23,122       | 0,003                     | 30,226       | 0,534      |

Dari Gambar 4.87 sampai dengan Gambar 4.94 dan Tabel 4.22 maka dapat disimpulkan bahwa respon struktur FSO Arco Ardjuna (*light load*) pada kondisi ekstrem (100 tahunan) di perairan Laut Jawa untuk gerakan *surge* terjadi paling besar akibat *heading* 180°, yaitu dengan nilai  $S_{\phi}(\omega_e)_{surge} = 42,229 \text{ m}^2/(\text{rad/s})$ . Respon struktur untuk gerakan *sway* terjadi paling besar akibat *heading* 90°, yaitu dengan nilai  $S_{\phi}(\omega_e)_{sway} = 62,681 \text{ m}^2/(\text{rad/s})$ . Respon struktur untuk gerakan *heave* terjadi paling besar akibat *heading* 0°, yaitu dengan nilai  $S_{\phi}(\omega_e)_{heave} = 456,100 \text{ m}^2/(\text{rad/s})$ . Respon struktur untuk gerakan *roll* terjadi paling besar akibat *heading* 90°, yaitu dengan nilai  $S_{\phi}(\omega_e)_{roll} = 66,638 \text{ deg}^2/(\text{rad/s})$ . Respon struktur untuk gerakan *pitch* terjadi paling besar akibat *heading* 45°, yaitu dengan nilai  $S_{\phi}(\omega_e)_{pitch} = 38,877 \text{ deg}^2/(\text{rad/s})$ . Respon struktur untuk gerakan *yaw* terjadi paling besar akibat *heading* 45°, yaitu dengan nilai  $S_{\phi}(\omega_e)_{yaw} = 3,407 \text{ deg}^2/(\text{rad/s})$ .

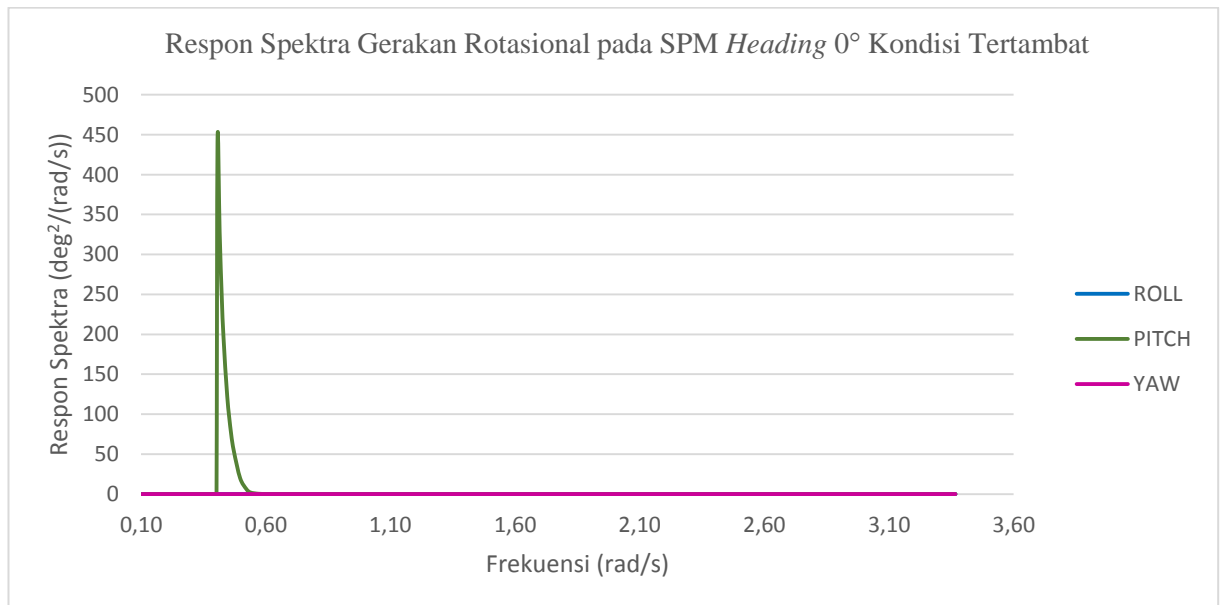
#### 4.8.3 Analisis Spektrum Respon SPM Kondisi Tertambat saat Sistem *Tandem Offloading SPM – FSO Full Load – Shuttle Tanker Light Load*

Perhitungan respon spektra untuk SPM tertambat saat sistem *tandem offloading SPM – FSO Full Load – Shuttle Tanker Light Load* dilakukan pada sarat 2,38 m dengan kedalaman laut 45 m. Berikut adalah grafik respon spektra pada SPM tertambat dengan mempertimbangkan kondisi *offloading*

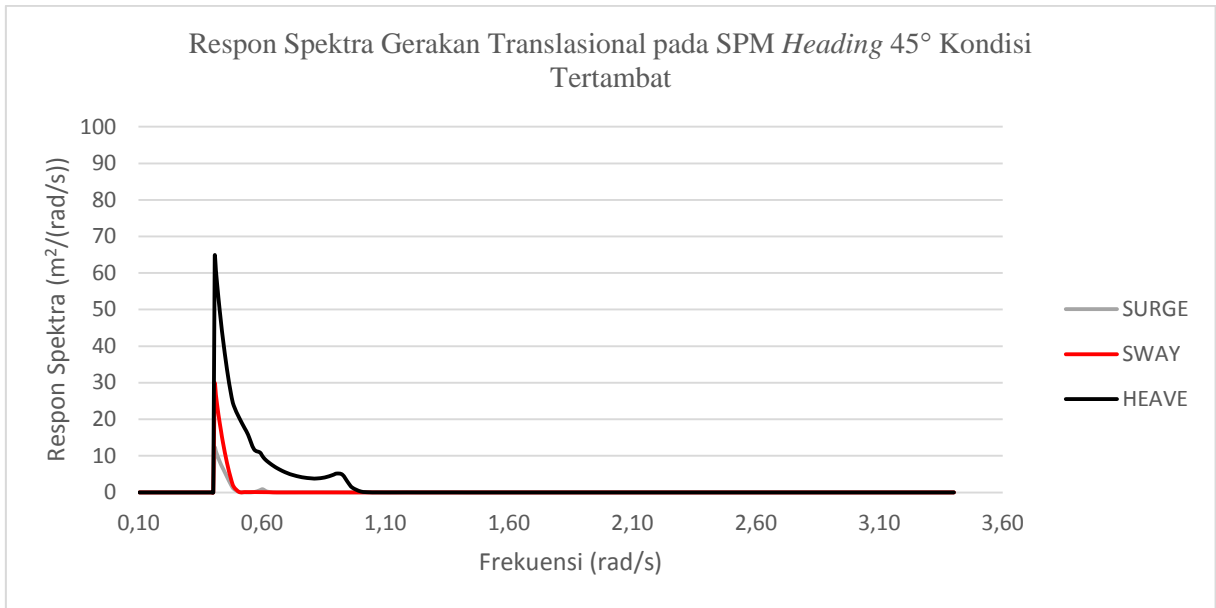
yang telah ditentukan untuk gerakan *surge*, *sway*, *heave*, *roll*, *pitch*, *yaw* dengan *heading angle*  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  dan  $180^\circ$ .



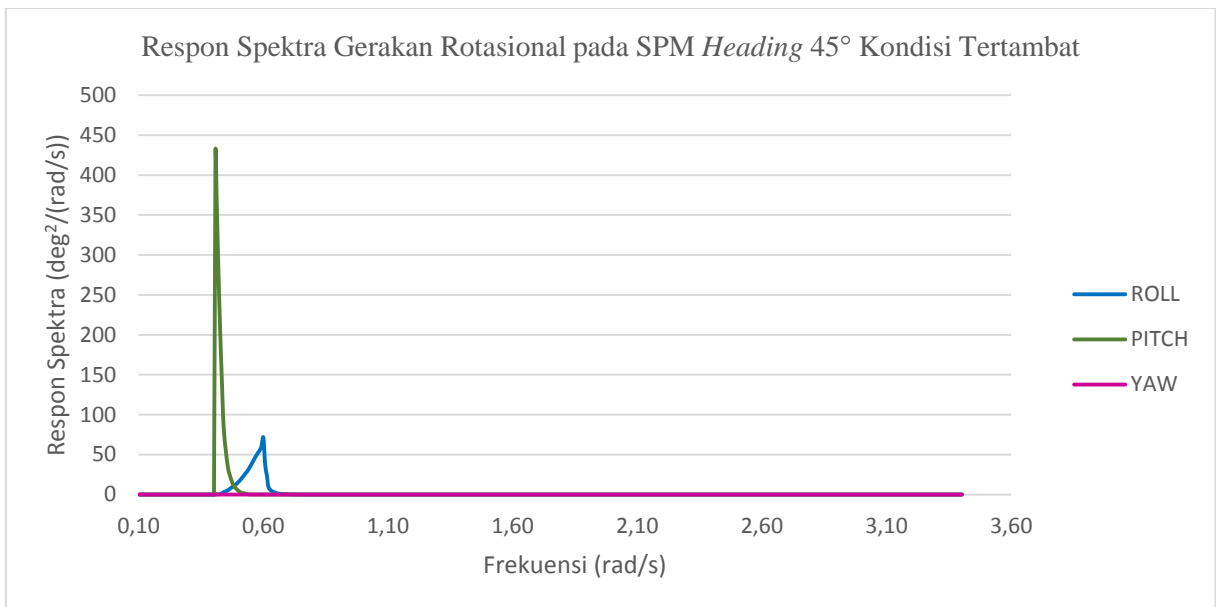
Gambar 4.95 Grafik Respon Spektra Gerakan Translasional pada SPM *Heading*  $0^\circ$  Kondisi Tertambat saat Sistem *Tandem Offloading* SPM – FSO *Full Load* – *Shuttle Tanker Light Load*



Gambar 4.96 Grafik Respon Spektra Gerakan Rotasional pada SPM *Heading*  $0^\circ$  Kondisi Tertambat saat Sistem *Tandem Offloading* SPM – FSO *Full Load* – *Shuttle Tanker Light Load*

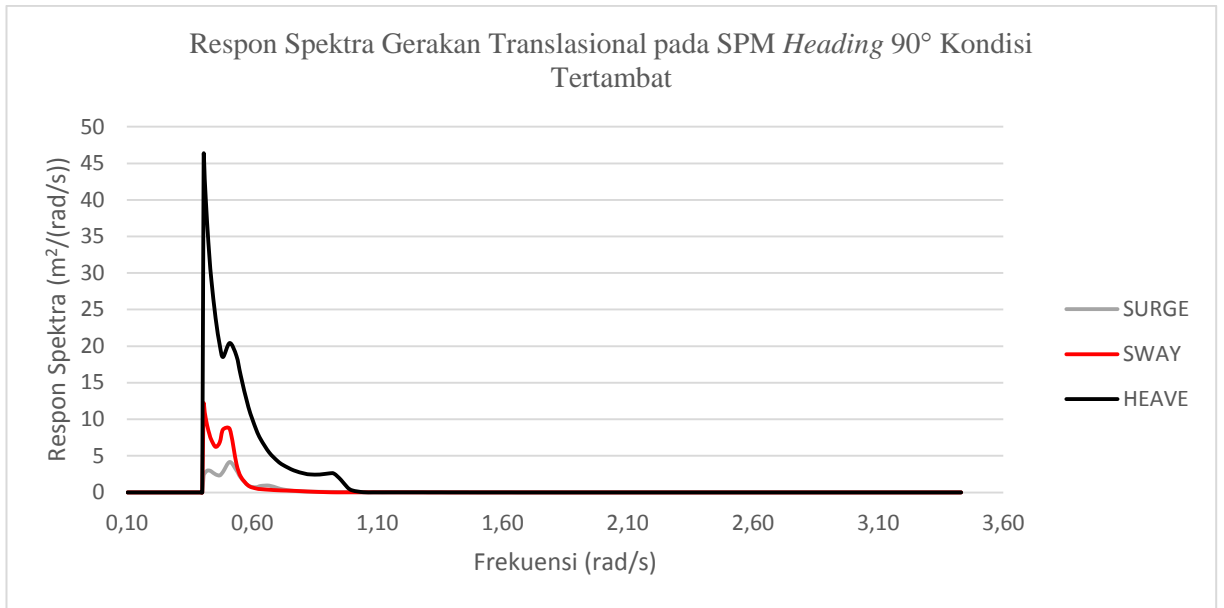


Gambar 4.97 Grafik Respon Spektra Gerakan Translasional pada SPM *Heading* 45° Kondisi Tertambat saat Sistem *Tandem Offloading* SPM – FSO *Full Load* – *Shuttle Tanker Light Load*

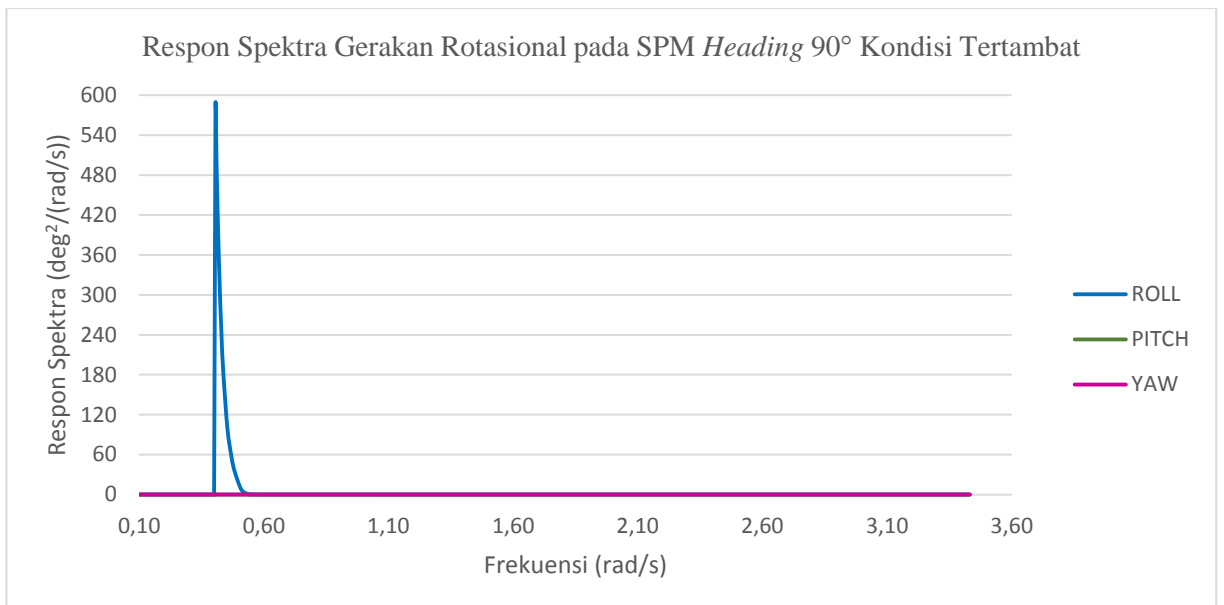


Gambar 4.98 Grafik Respon Spektra Gerakan Rotasional pada SPM *Heading* 45° Kondisi Tertambat saat Sistem *Tandem Offloading* SPM – FSO *Full Load* – *Shuttle Tanker Light Load*

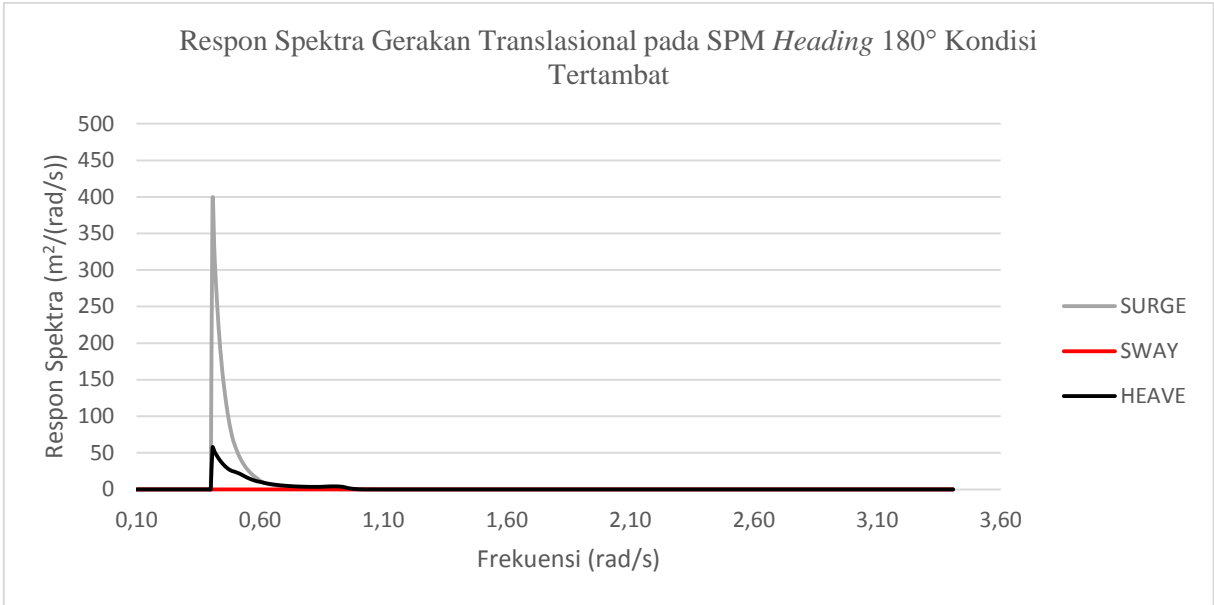




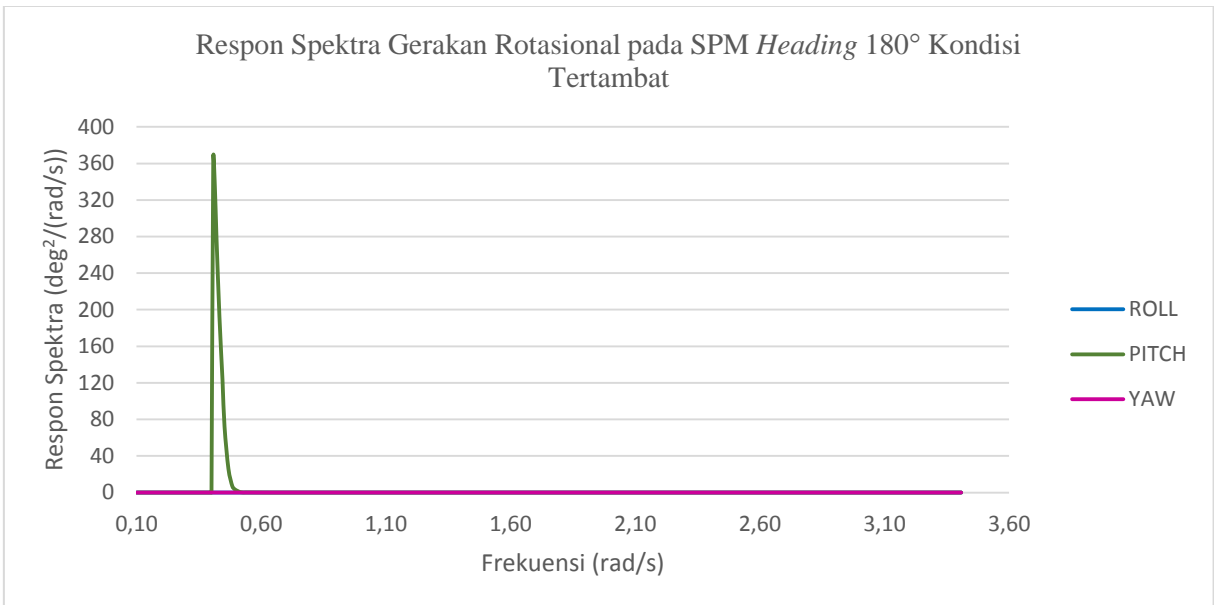
Gambar 4.99 Grafik Respon Spektra Gerakan Translasional pada SPM *Heading* 90° Kondisi Tertambat saat Sistem *Tandem Offloading* SPM – FSO *Full Load* – *Shuttle Tanker Light Load*



Gambar 4.100 Grafik Respon Spektra Gerakan Rotasional pada SPM *Heading* 90° Kondisi Tertambat saat Sistem *Tandem Offloading* SPM – FSO *Full Load* – *Shuttle Tanker Light Load*



Gambar 4.101 Grafik Respon Spektra Gerakan Translasional pada SPM *Heading* 180° Kondisi Tertambat saat Sistem *Tandem Offloading SPM – FSO Full Load – Shuttle Tanker Light Load*



Gambar 4.102 Grafik Respon Spektra Gerakan Rotasional pada SPM *Heading* 180° Kondisi Tertambat saat Sistem *Tandem Offloading SPM – FSO Full Load – Shuttle Tanker Light Load*

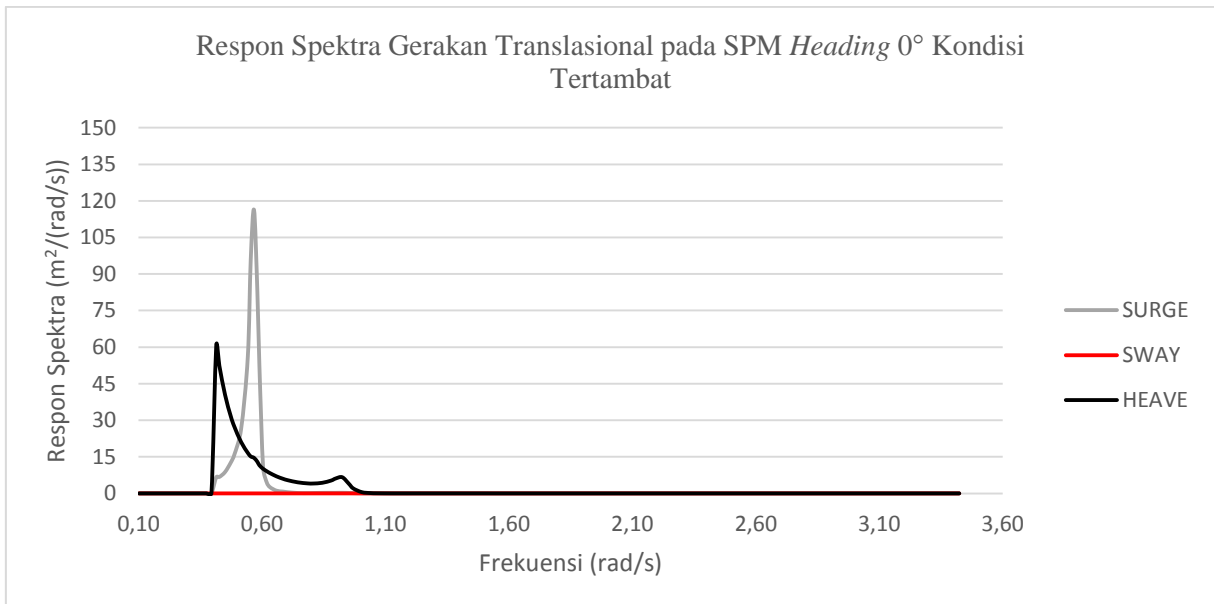
Tabel 4.23 Nilai Respon Struktur Tertinggi pada SPM Kondisi Tertambat saat Sistem *Tandem Offloading* SPM – FSO *Full Load* – Shuttle Tanker *Light Load*

| Heading<br>(deg) | Kondisi<br>Muatan                   | Gerakan Translasional   |             |              | Gerakan Rotasional        |              |            |
|------------------|-------------------------------------|-------------------------|-------------|--------------|---------------------------|--------------|------------|
|                  |                                     | <i>Surge</i>            | <i>Sway</i> | <i>Heave</i> | <i>Roll</i>               | <i>Pitch</i> | <i>Yaw</i> |
|                  |                                     | m <sup>2</sup> /(rad/s) |             |              | deg <sup>2</sup> /(rad/s) |              |            |
| <b>SPM</b>       |                                     |                         |             |              |                           |              |            |
| 0                | FSO <i>Full Load</i>                | 436,794                 | 5,488       | 67,139       | 6,8E-08                   | 440,191      | 2,0E-08    |
| 45               | dan Shuttle<br>Tanker Light<br>Load | 12,224                  | 29,624      | 64,532       | 71,443                    | 425,747      | 1,4E-08    |
| 90               |                                     | 4,162                   | 12,100      | 46,043       | 578,518                   | 6,5E-08      | 1,1E-08    |
| 180              |                                     | 392,922                 | 3,3E-10     | 57,439       | 5,2E-08                   | 365,868      | 8,8E-09    |

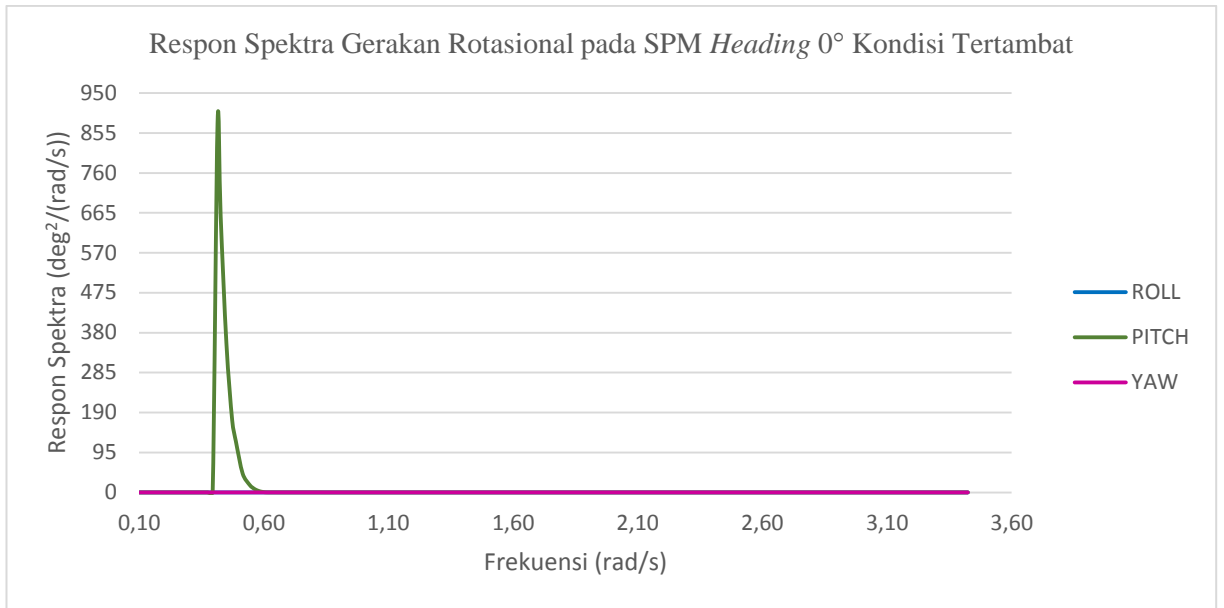
Dari Gambar 4.95 sampai dengan Gambar 4.102 dan Tabel 4.23 maka dapat disimpulkan bahwa respon struktur SPM pada kondisi ekstrem (100 tahunan) di perairan Laut Jawa untuk gerakan *surge* terjadi paling besar akibat *heading* 0°, yaitu dengan nilai  $S_{\phi}(\omega_e)_{surge} = 436,794 \text{ m}^2/(\text{rad/s})$ . Respon struktur untuk gerakan *sway* terjadi paling besar akibat *heading* 45°, yaitu dengan nilai  $S_{\phi}(\omega_e)_{sway} = 29,624 \text{ m}^2/(\text{rad/s})$ . Respon struktur untuk gerakan *heave* terjadi paling besar akibat *heading* 0°, yaitu dengan nilai  $S_{\phi}(\omega_e)_{heave} = 67,139 \text{ m}^2/(\text{rad/s})$ . Respon struktur untuk gerakan *roll* terjadi paling besar akibat *heading* 90°, yaitu dengan nilai  $S_{\phi}(\omega_e)_{roll} = 578,518 \text{ deg}^2/(\text{rad/s})$ . Respon struktur untuk gerakan *pitch* terjadi paling besar akibat *heading* 0°, yaitu dengan nilai  $S_{\phi}(\omega_e)_{pitch} = 440,191 \text{ deg}^2/(\text{rad/s})$ . Respon struktur untuk gerakan *yaw* terjadi paling besar akibat *heading* 0°, yaitu dengan nilai  $S_{\phi}(\omega_e)_{yaw} = 0,000000020 \text{ deg}^2/(\text{rad/s})$ .

#### 4.8.4 Analisis Spektrum Respon SPM Kondisi Tertambat saat Sistem *Tandem Offloading SPM – FSO Light Load – Shuttle Tanker Full Load*

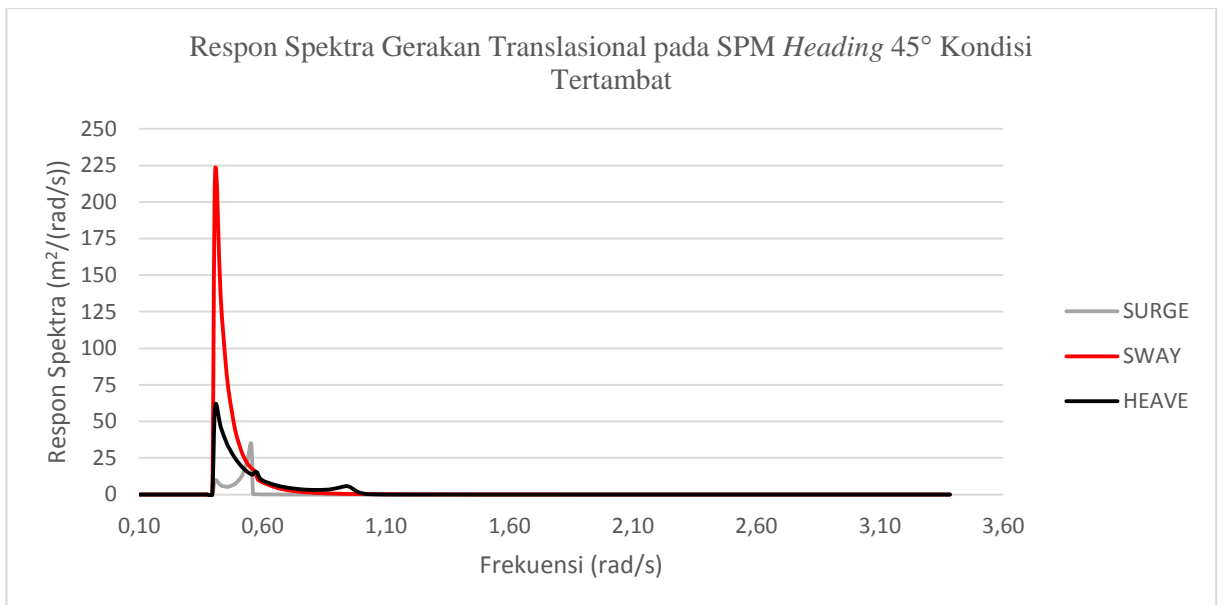
Perhitungan respon spektra untuk SPM tertambat saat sistem *tandem offloading SPM – FSO Light Load – Shuttle Tanker Full Load* dilakukan pada sarat 2,38 m dengan kedalaman laut 45 m. Berikut adalah grafik respon spektra pada SPM tertambat dengan mempertimbangkan kondisi *offloading* yang telah ditentukan untuk gerakan *surge, sway, heave, roll, pitch, yaw* dengan *heading angle*  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  dan  $180^\circ$ .



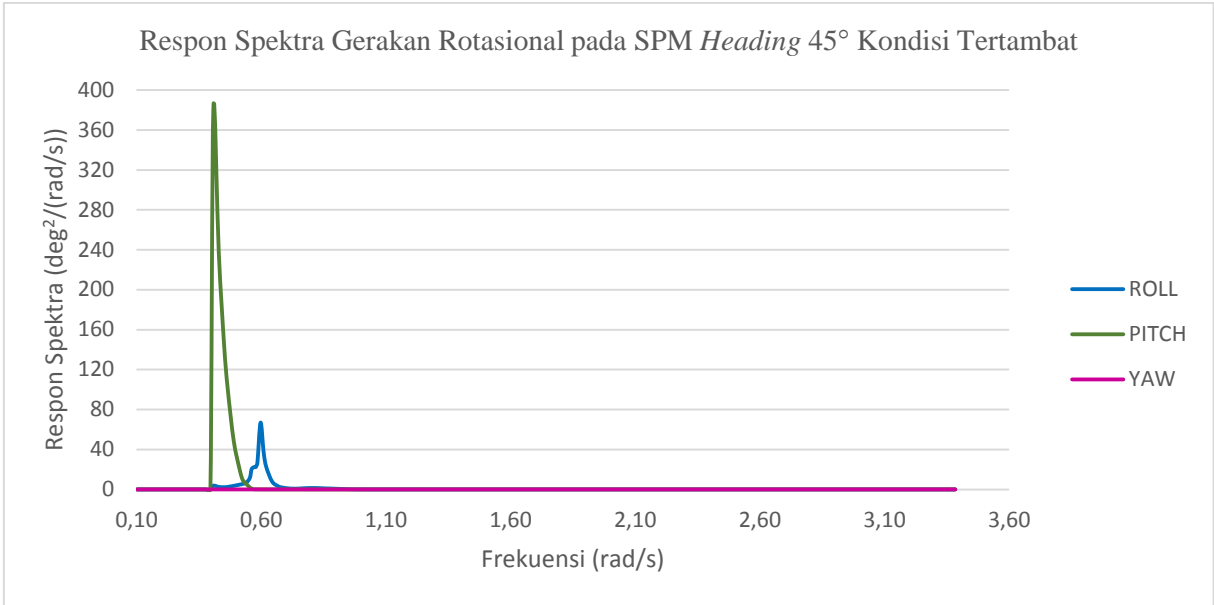
Gambar 4.103 Grafik Respon Spektra Gerakan Translasional pada SPM *Heading*  $0^\circ$  Kondisi Tertambat saat Sistem *Tandem Offloading SPM – FSO Light Load – Shuttle Tanker Full Load*



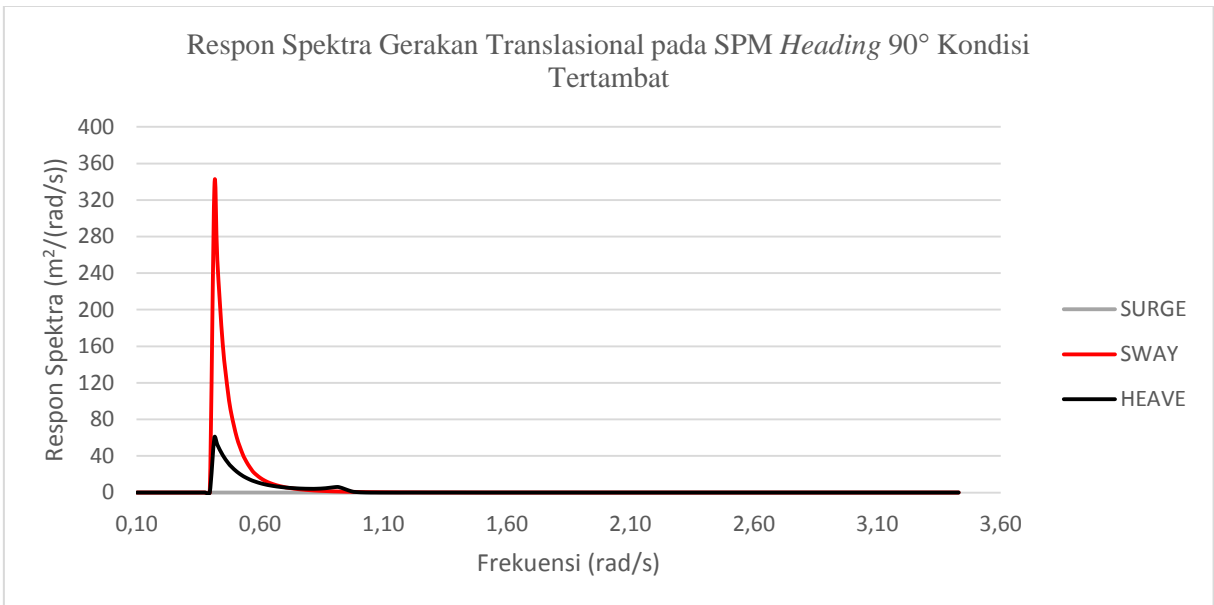
Gambar 4.104 Grafik Respon Spektra Gerakan Rotasional pada SPM *Heading* 0° Kondisi Tertambat saat Sistem *Tandem Offloading* SPM – FSO *Light Load* – *Shuttle Tanker Full Load*



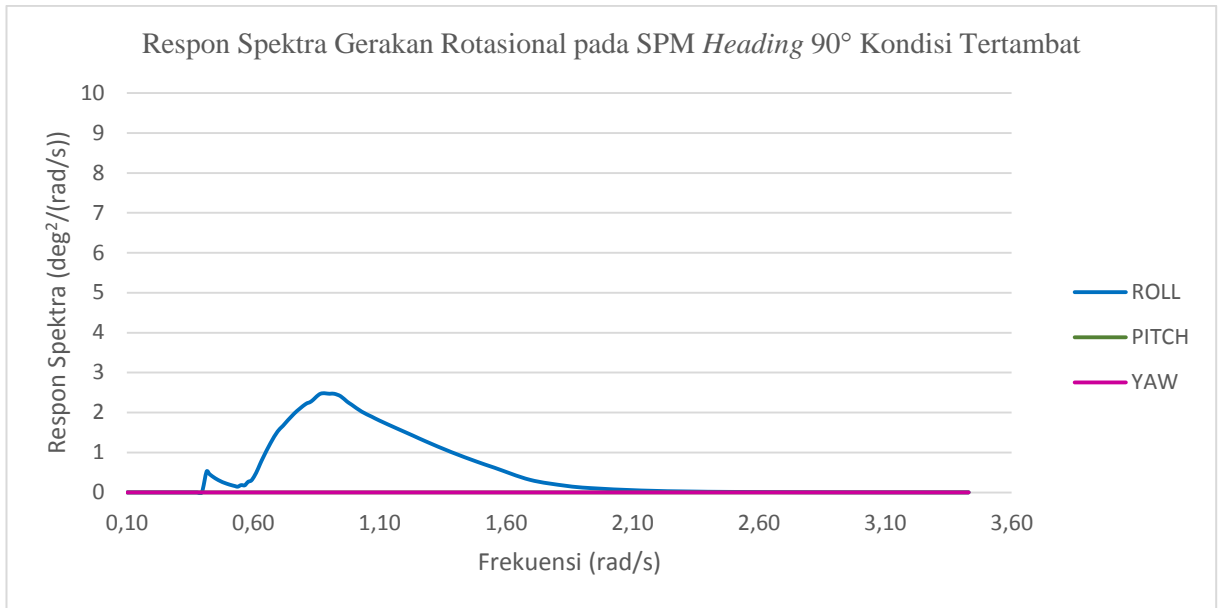
Gambar 4.105 Grafik Respon Spektra Gerakan Translasiional pada SPM *Heading* 45° Kondisi Tertambat saat Sistem *Tandem Offloading* SPM – FSO *Light Load* – *Shuttle Tanker Full Load*



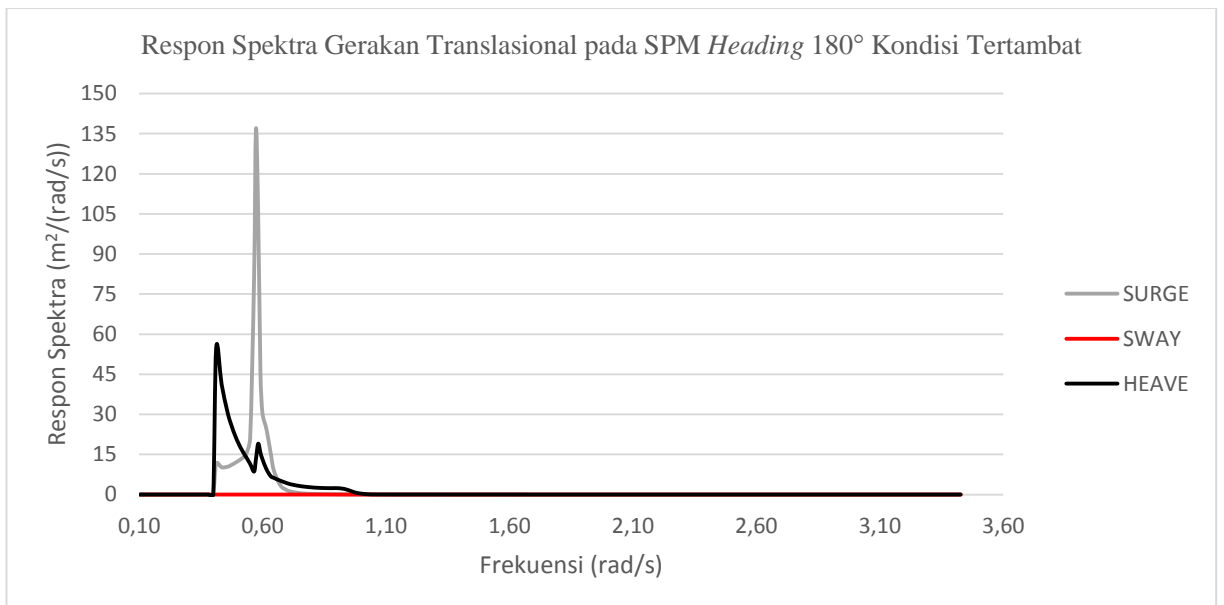
Gambar 4.106 Grafik Respon Spektra Gerakan Rotasional pada SPM *Heading* 45° Kondisi Tertambat saat Sistem *Tandem Offloading* SPM – FSO *Light Load* – *Shuttle Tanker Full Load*



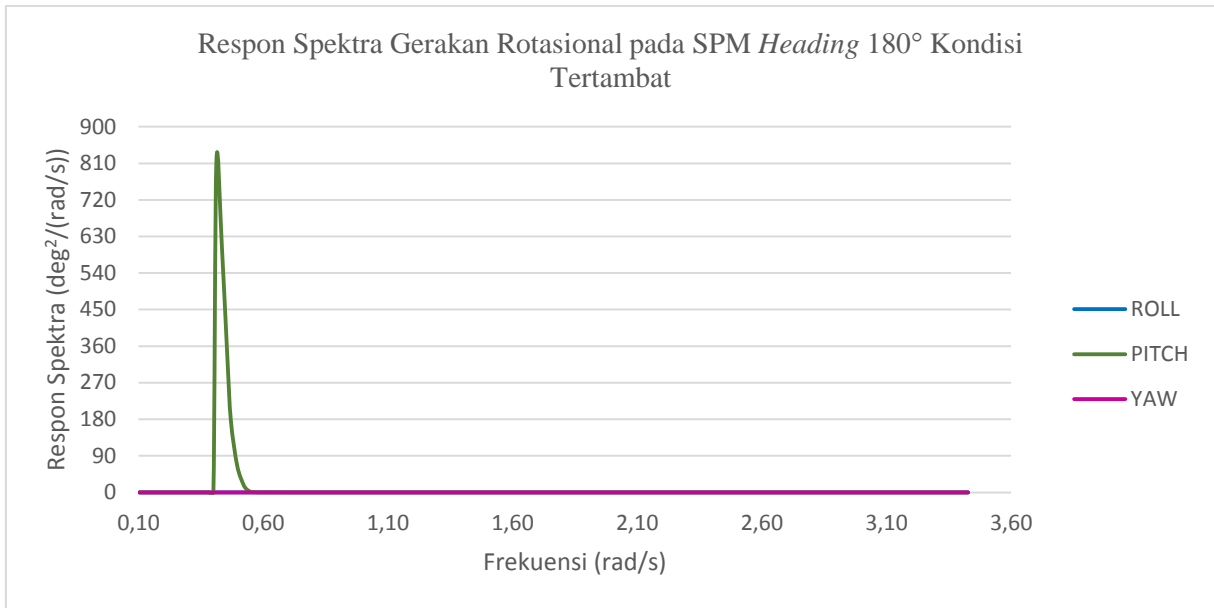
Gambar 4.107 Grafik Respon Spektra Gerakan Translasional pada SPM *Heading* 90° Kondisi Tertambat saat Sistem *Tandem Offloading* SPM – FSO *Light Load* – *Shuttle Tanker Full Load*



Gambar 4.108 Grafik Respon Spektra Gerakan Rotasional pada SPM *Heading* 90° Kondisi Tertambat saat Sistem *Tandem Offloading* SPM – FSO *Light Load* – *Shuttle Tanker Full Load*



Gambar 4.109 Grafik Respon Spektra Gerakan Translasional pada SPM *Heading* 180° Kondisi Tertambat saat Sistem *Tandem Offloading* SPM – FSO *Light Load* – *Shuttle Tanker Full Load*



Gambar 4.110 Grafik Respon Spektra Gerakan Rotasional pada SPM *Heading* 180° Kondisi Tertambat saat Sistem *Tandem Offloading* SPM – FSO *Light Load* – *Shuttle Tanker Full Load*

Tabel 4.24 Nilai Respon Struktur Tertinggi pada SPM Kondisi Tertambat saat Sistem *Tandem Offloading* SPM – FSO *Light Load* – *Shuttle Tanker Full Load*

| <i>Heading</i><br>(deg) | Kondisi Muatan        | Gerakan Translasional   |             |              | Gerakan Rotasional        |              |            |
|-------------------------|-----------------------|-------------------------|-------------|--------------|---------------------------|--------------|------------|
|                         |                       | <i>Surge</i>            | <i>Sway</i> | <i>Heave</i> | <i>Roll</i>               | <i>Pitch</i> | <i>Yaw</i> |
|                         |                       | m <sup>2</sup> /(rad/s) |             |              | deg <sup>2</sup> /(rad/s) |              |            |
| <b>SPM</b>              |                       |                         |             |              |                           |              |            |
| 0                       | FSO <i>Light</i>      | 116,245                 | 1,6E-10     | 60,601       | 5,9E-08                   | 879,401      | 1,0E-08    |
| 45                      | <i>Load</i> dan       | 34,377                  | 220,299     | 60,444       | 66,867                    | 380,893      | 1,9E-08    |
| 90                      | <i>Shuttle Tanker</i> | 1,0E-09                 | 333,260     | 60,197       | 2,470                     | 8,4E-08      | 1,2E-08    |
| 180                     | <i>Full Load</i>      | 136,583                 | 4,1E-10     | 54,761       | 4,9E-08                   | 812,485      | 8,6E-09    |

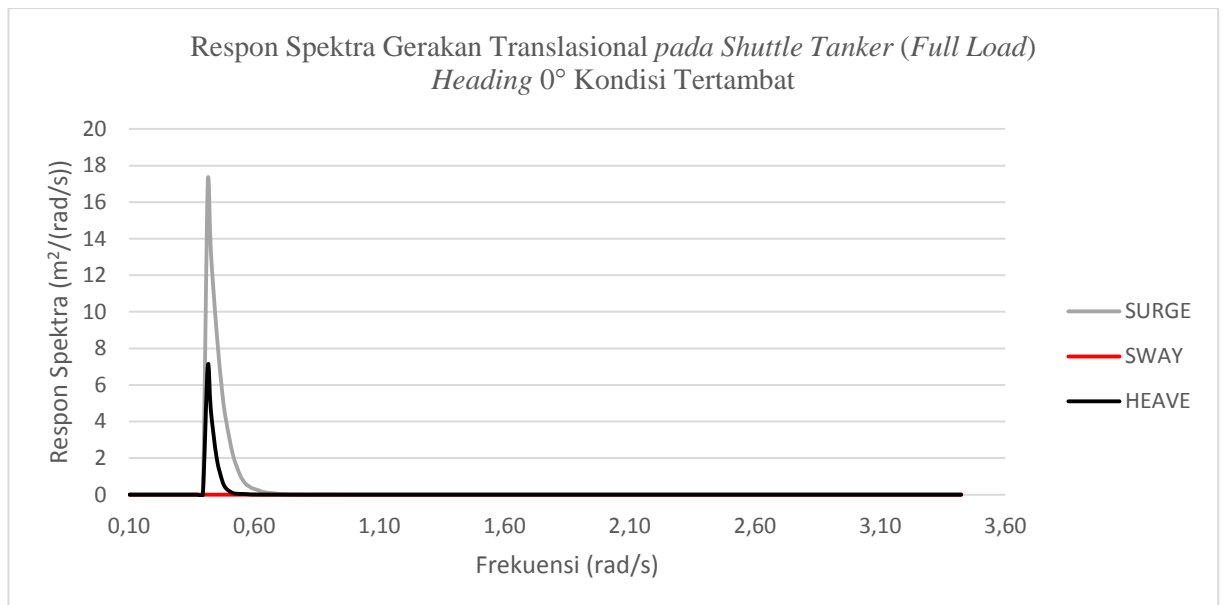
Dari Gambar 4.103 sampai dengan Gambar 4.110 dan Tabel 4.24 maka dapat disimpulkan bahwa respon struktur SPM pada kondisi ekstrem (100 tahunan) di perairan Laut Jawa untuk gerakan *surge* terjadi paling besar akibat *heading* 180°, yaitu dengan nilai  $S_{\phi}(\omega_e)_{surge} = 136,583 \text{ m}^2/(\text{rad/s})$ . Respon struktur untuk gerakan *sway* terjadi paling besar akibat *heading* 90°, yaitu



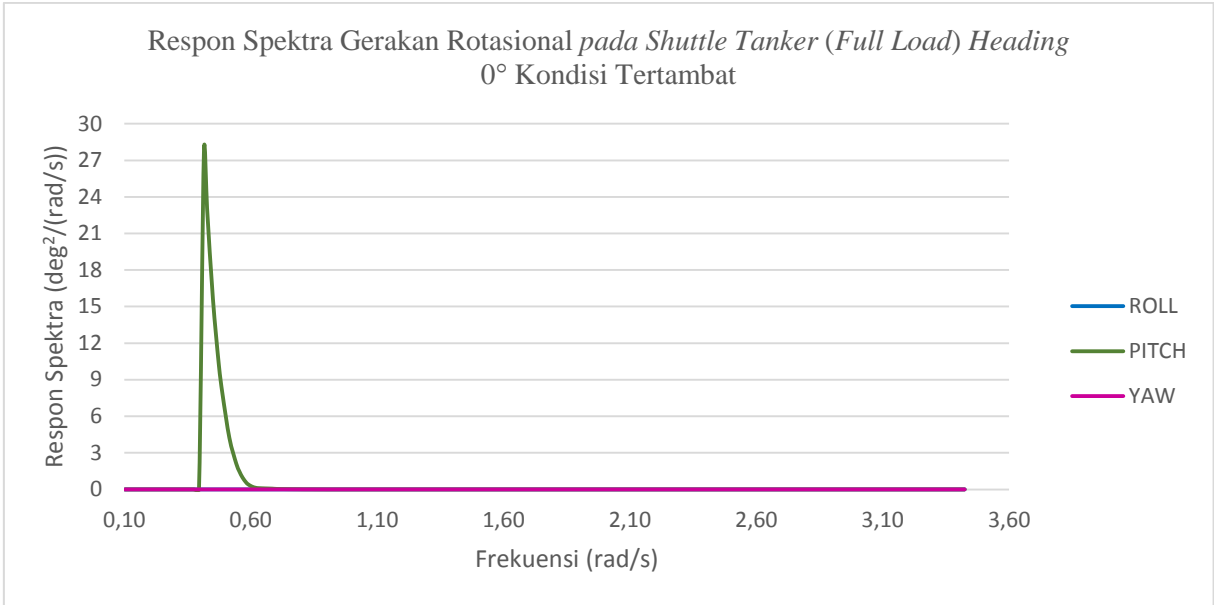
dengan nilai  $S_{\phi}(\omega_e)_{sway} = 333,260 \text{ m}^2/(\text{rad/s})$ . Respon struktur untuk gerakan *heave* terjadi paling besar akibat *heading*  $0^\circ$ , yaitu dengan nilai  $S_{\phi}(\omega_e)_{heave} = 60,601 \text{ m}^2/(\text{rad/s})$ . Respon struktur untuk gerakan *roll* terjadi paling besar akibat *heading*  $45^\circ$ , yaitu dengan nilai  $S_{\phi}(\omega_e)_{roll} = 66,867 \text{ deg}^2/(\text{rad/s})$ . Respon struktur untuk gerakan *pitch* terjadi paling besar akibat *heading*  $0^\circ$ , yaitu dengan nilai  $S_{\phi}(\omega_e)_{pitch} = 879,401 \text{ deg}^2/(\text{rad/s})$ . Respon struktur untuk gerakan *yaw* terjadi paling besar akibat *heading*  $45^\circ$ , yaitu dengan nilai  $S_{\phi}(\omega_e)_{yaw} = 0,000000019 \text{ deg}^2/(\text{rad/s})$ .

#### 4.8.5 Analisis Spektrum Respon Shuttle Tanker (Full Load) Kondisi Tertambat

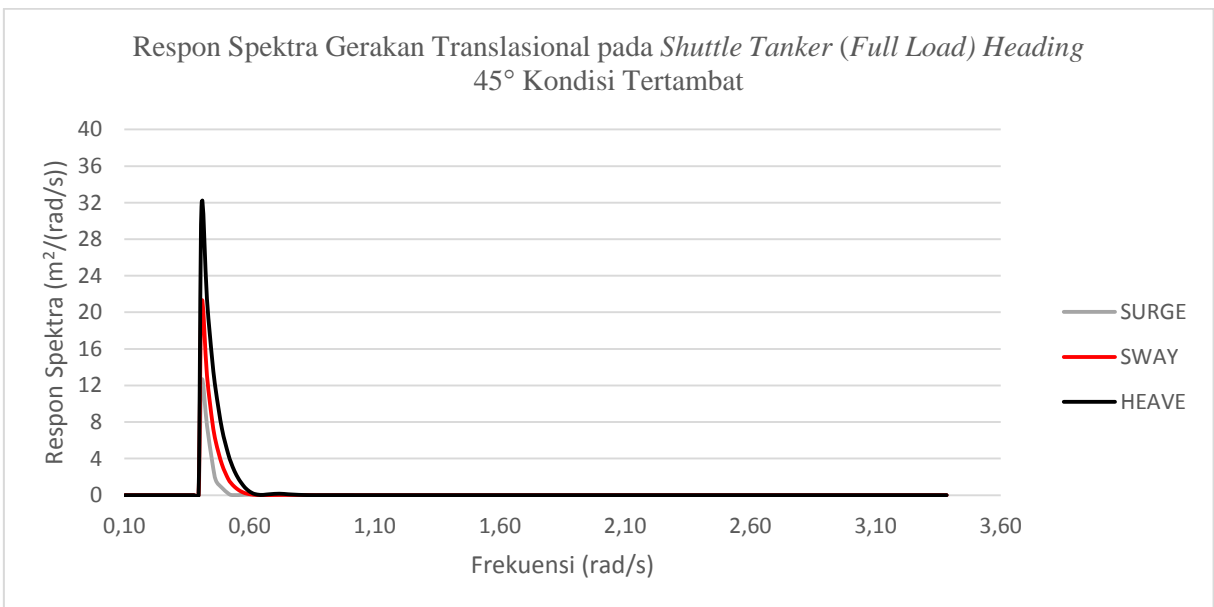
Perhitungan respon spektra untuk kondisi *full load* pada *Shuttle Tanker* 85000 DWT yang ditambat saat sistem *tandem offloading* SPM – FSO *Light Load – Shuttle Tanker Full Load* dilakukan pada sarat 13,28 m dengan kedalaman laut 45 m. Berikut adalah grafik respon spektra pada *Shuttle Tanker* 85000 DWT (*full load*) kondisi tertambat untuk gerakan *surge*, *sway*, *heave*, *roll*, *pitch*, *yaw* dengan *heading*  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  dan  $180^\circ$ .



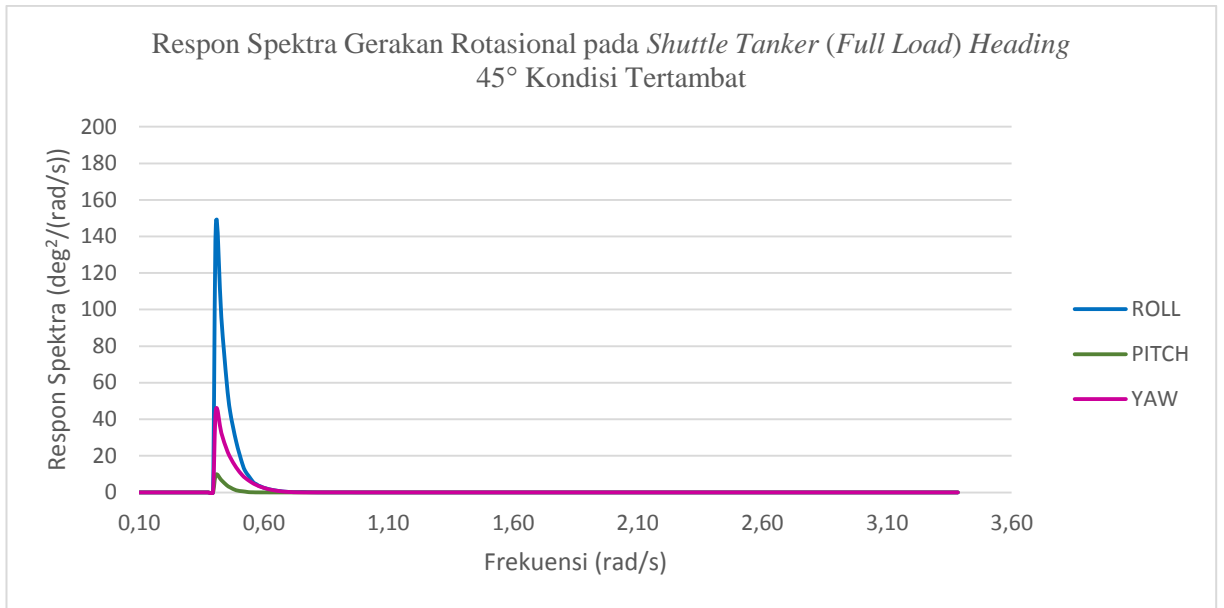
Gambar 4.111 Grafik Respon Spektra Gerakan Translasional pada *Shuttle Tanker* 85000 DWT (*Full Load*) *Heading*  $0^\circ$  Kondisi Tertambat



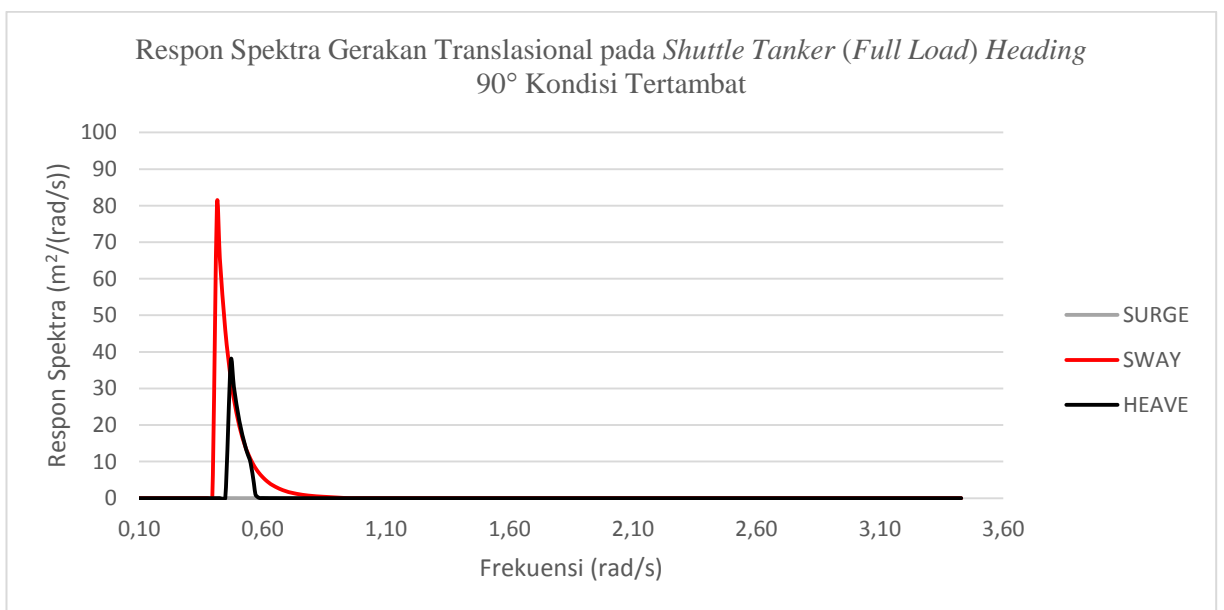
Gambar 4.112 Grafik Respon Spektra Gerakan Rotasional pada *Shuttle Tanker* 85000 DWT (Full Load) Heading 0° Kondisi Tertambat



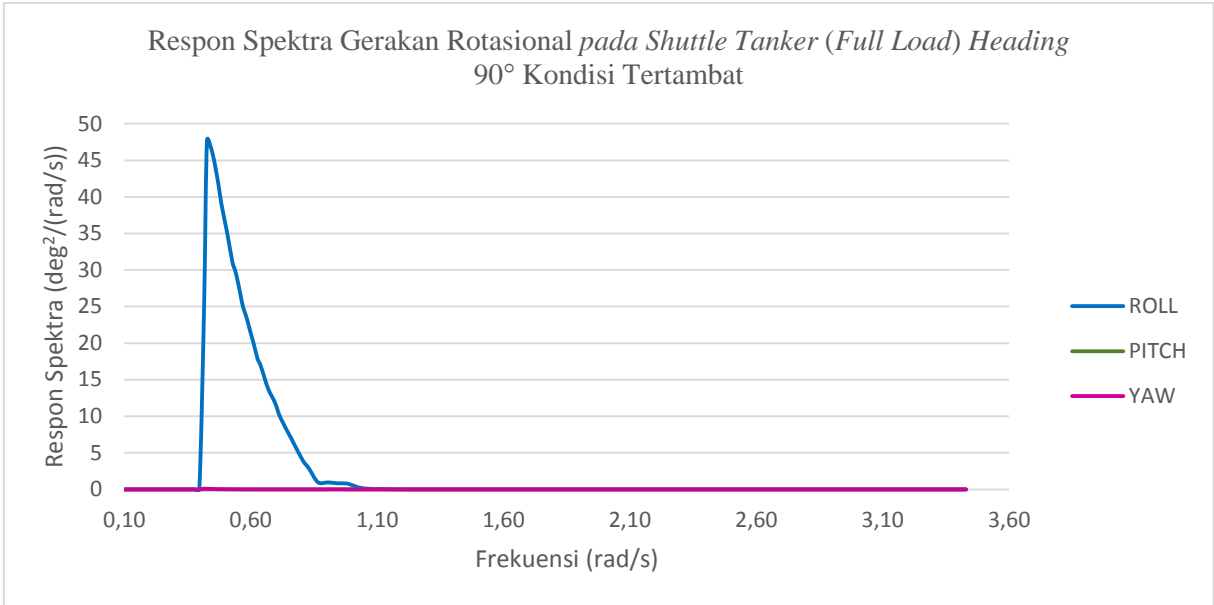
Gambar 4.113 Grafik Respon Spektra Gerakan Translasional pada *Shuttle Tanker* 85000 DWT (Full Load) Heading 45° Kondisi Tertambat



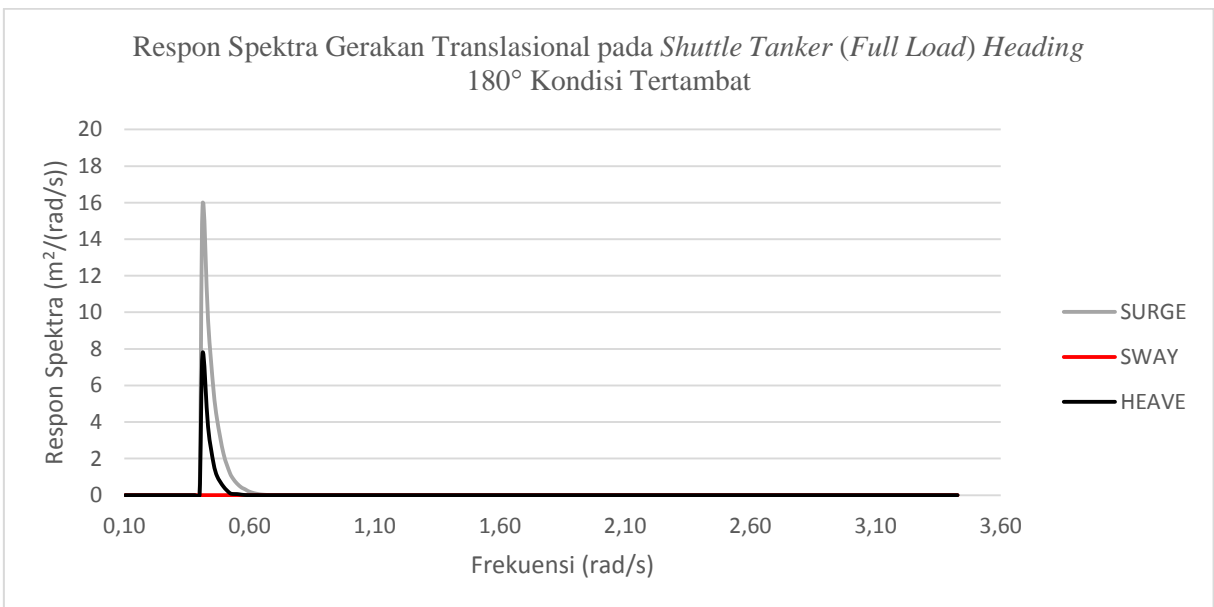
Gambar 4.114 Grafik Respon Spektra Gerakan Rotasional pada *Shuttle Tanker* 85000 DWT (*Full Load*) *Heading 45°* Kondisi Tertambat



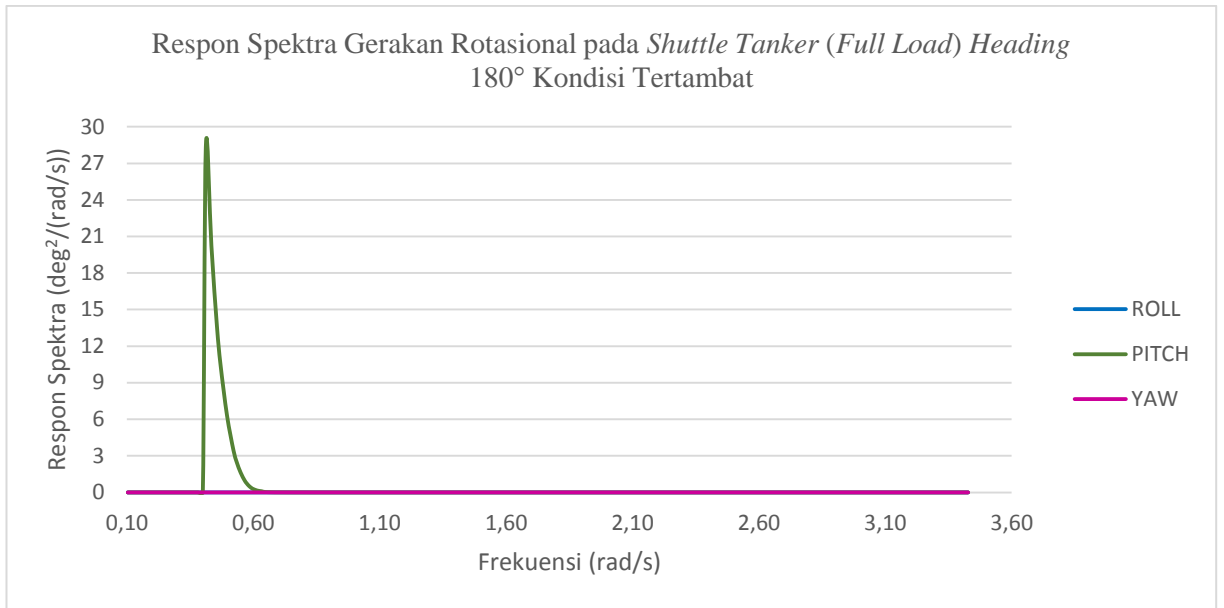
Gambar 4.115 Grafik Respon Spektra Gerakan Translasional pada *Shuttle Tanker* 85000 DWT (*Full Load*) *Heading 90°* Kondisi Tertambat



Gambar 4.116 Grafik Respon Spektra Gerakan Rotasional pada *Shuttle Tanker* 85000 DWT (Full Load) Heading 90° Kondisi Tertambat



Gambar 4.117 Grafik Respon Spektra Gerakan Translasional pada *Shuttle Tanker* 85000 DWT (Full Load) Heading 180° Kondisi Tertambat



Gambar 4.118 Grafik Respon Spektra Gerakan Rotasional pada *Shuttle Tanker* 85000 DWT (*Full Load*) *Heading* 180° Kondisi Tertambat

Tabel 4.25 Nilai Respon Struktur Tertinggi pada *Shuttle Tanker* 85000 DWT Kondisi *Full Load* saat Tertambat

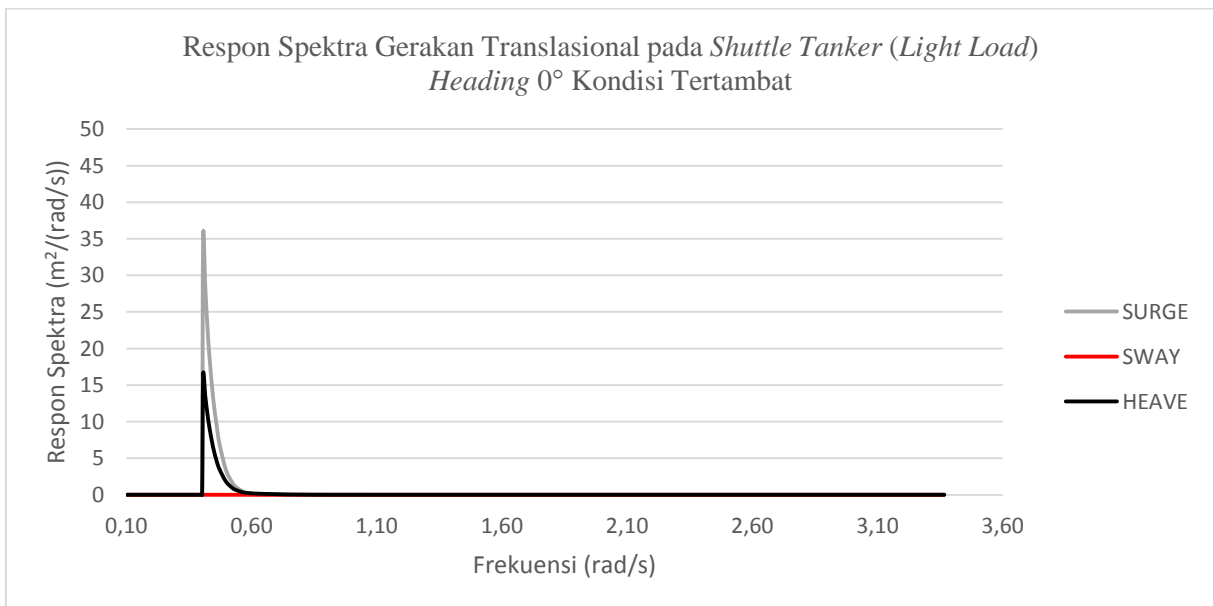
| Heading<br>(deg)      | Kondisi<br>Muatan    | Gerakan Translasional   |         |        | Gerakan Rotasional        |        |          |
|-----------------------|----------------------|-------------------------|---------|--------|---------------------------|--------|----------|
|                       |                      | Surge                   | Sway    | Heave  | Roll                      | Pitch  | Yaw      |
|                       |                      | m <sup>2</sup> /(rad/s) |         |        | deg <sup>2</sup> /(rad/s) |        |          |
| <b>Shuttle Tanker</b> |                      |                         |         |        |                           |        |          |
| 0                     | <i>Full<br/>Load</i> | 16,935                  | 6,5E-08 | 7,007  | 0,000                     | 27,747 | 1,9E-08  |
| 45                    |                      | 12,512                  | 21,017  | 31,561 | 146,622                   | 9,728  | 45,018   |
| 90                    |                      | 0,010                   | 79,850  | 37,364 | 47,738                    | 0,009  | 0,105    |
| 180                   |                      | 15,771                  | 6,7E-08 | 7,746  | 1,72E-04                  | 28,344 | 3,72E-05 |

Dari Gambar 4.111 sampai dengan Gambar 4.118 dan Tabel 4.25 maka dapat disimpulkan bahwa respon struktur *Shuttle Tanker* 85000 DWT (*full load*) pada kondisi ekstrem (100 tahunan) di perairan Laut Jawa untuk gerakan *surge* terjadi paling besar akibat *heading* 0°, yaitu dengan nilai  $S_{\phi}(\omega_e)_{surge} = 16,935 \text{ m}^2/(\text{rad/s})$ . Respon struktur untuk gerakan *sway* terjadi paling besar akibat *heading* 90°, yaitu dengan nilai  $S_{\phi}(\omega_e)_{sway} = 79,850 \text{ m}^2/(\text{rad/s})$ . Respon struktur untuk gerakan *heave* terjadi paling besar akibat *heading* 90°, yaitu

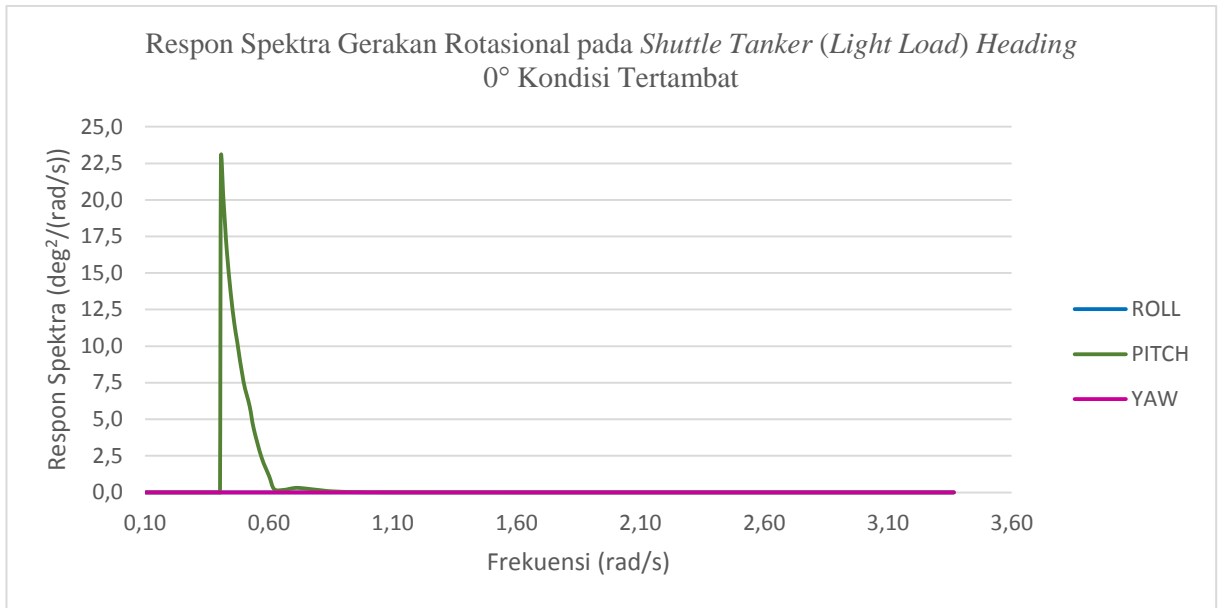
dengan nilai  $S_{\phi}(\omega_e)_{heave} = 37,364 \text{ m}^2/(\text{rad/s})$ . Respon struktur untuk gerakan *roll* terjadi paling besar akibat *heading*  $45^\circ$ , yaitu dengan nilai  $S_{\phi}(\omega_e)_{roll} = 146,622 \text{ deg}^2/(\text{rad/s})$ . Respon struktur untuk gerakan *pitch* terjadi paling besar akibat *heading*  $180^\circ$ , yaitu dengan nilai  $S_{\phi}(\omega_e)_{pitch} = 28,344 \text{ deg}^2/(\text{rad/s})$ . Respon struktur untuk gerakan *yaw* terjadi paling besar akibat *heading*  $45^\circ$ , yaitu dengan nilai  $S_{\phi}(\omega_e)_{yaw} = 45,018 \text{ deg}^2/(\text{rad/s})$ .

#### 4.8.6 Analisis Spektrum Respon Shuttle Tanker (Light Load) Kondisi Tertambat

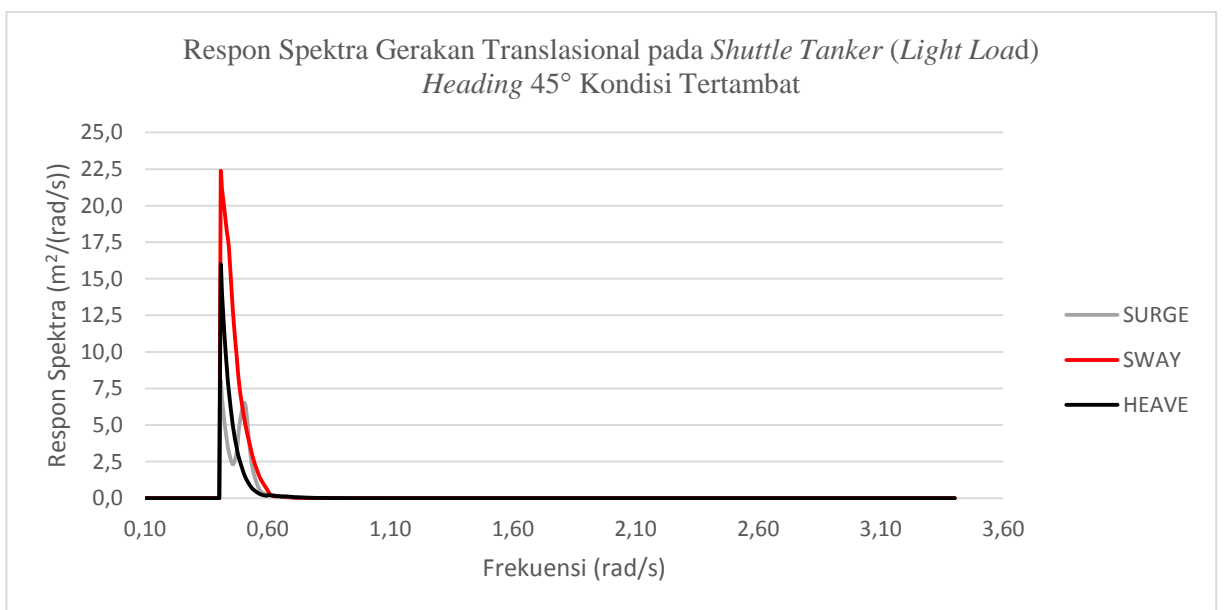
Perhitungan respon spektra untuk kondisi *light load* pada *Shuttle Tanker* 85000 DWT yang ditambat saat sistem *tandem offloading* SPM – FSO Full Load – *Shuttle Tanker Light Load* dilakukan pada sarat 1,991 m dengan kedalaman laut 45 m. Berikut adalah grafik respon spektra pada *Shuttle Tanker* 85000 DWT (*light load*) kondisi tertambat untuk gerakan *surge*, *sway*, *heave*, *roll*, *pitch*, *yaw* dengan *heading*  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  dan  $180^\circ$ .



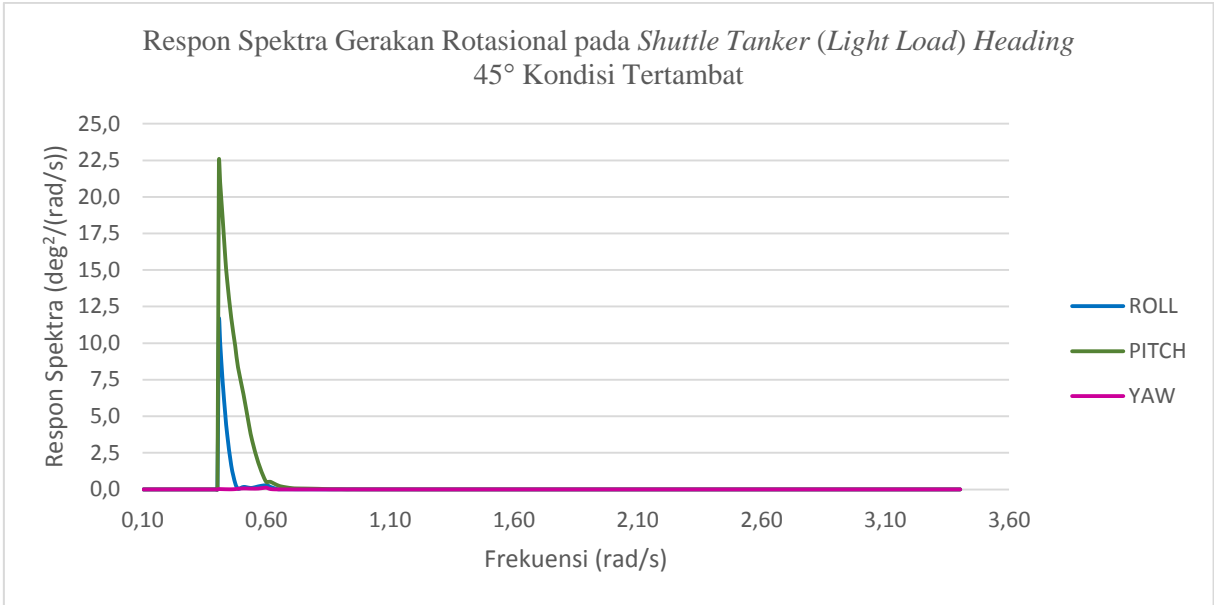
Gambar 4.119 Grafik Respon Spektra Gerakan Translasiional pada *Shuttle Tanker* 85000 DWT (*Light Load*) *Heading*  $0^\circ$  Kondisi Tertambat



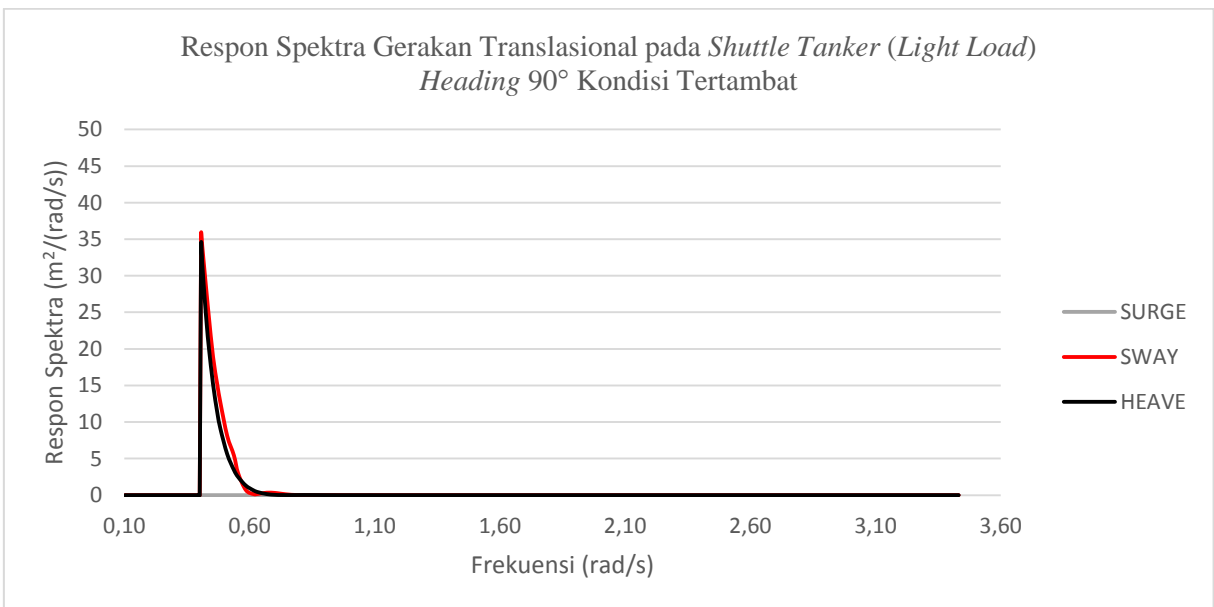
Gambar 4.120 Grafik Respon Spektra Gerakan Rotasional pada *Shuttle Tanker* 85000 DWT (*Light Load*) *Heading 0°* Kondisi Tertambat



Gambar 4.121 Grafik Respon Spektra Gerakan Translasional pada *Shuttle Tanker* 85000 DWT (*Light Load*) *Heading 45°* Kondisi Tertambat

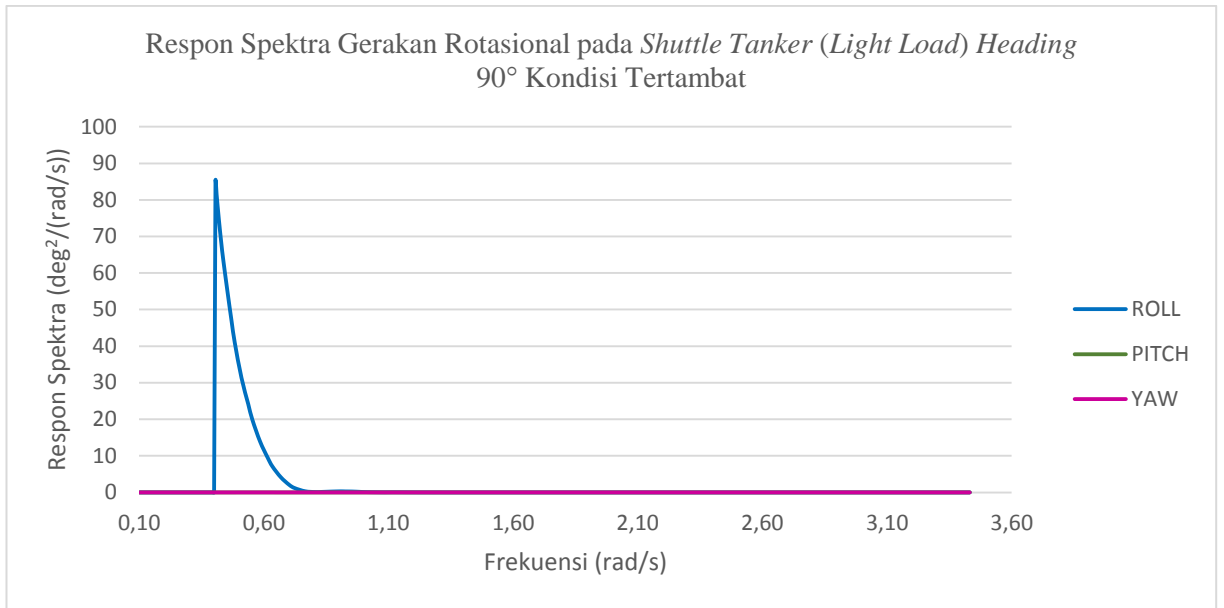


Gambar 4.122 Grafik Respon Spektra Gerakan Rotasional pada *Shuttle Tanker* 85000 DWT (*Light Load*) *Heading 45°* Kondisi Tertambat

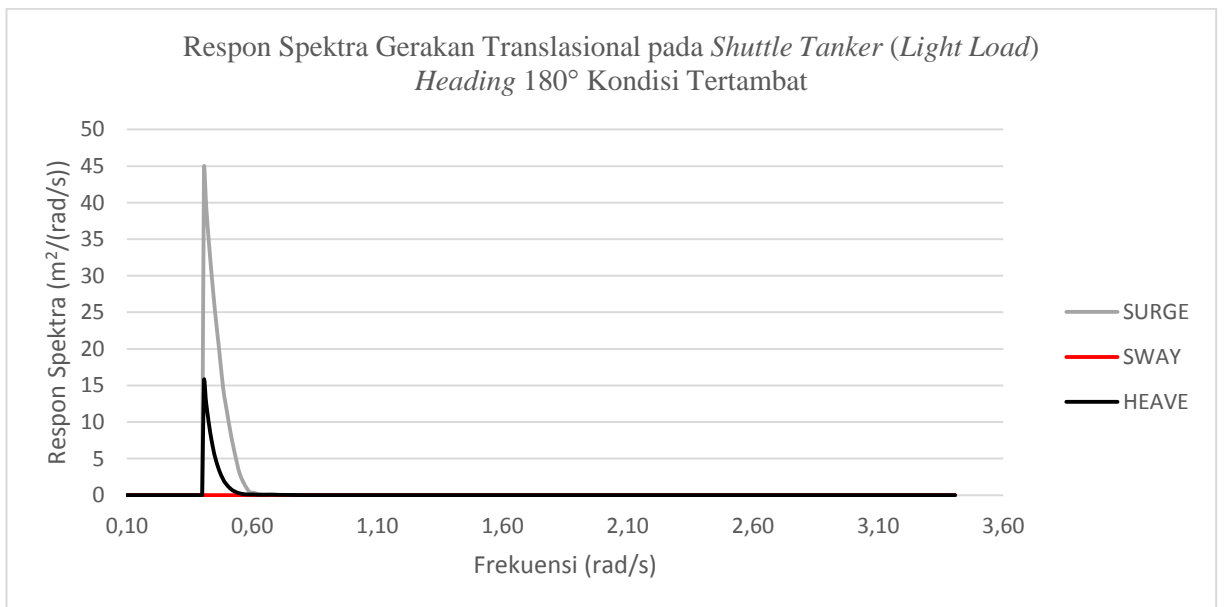


Gambar 4.123 Grafik Respon Spektra Gerakan Translasional pada *Shuttle Tanker* 85000 DWT (*Light Load*) *Heading 90°* Kondisi Tertambat

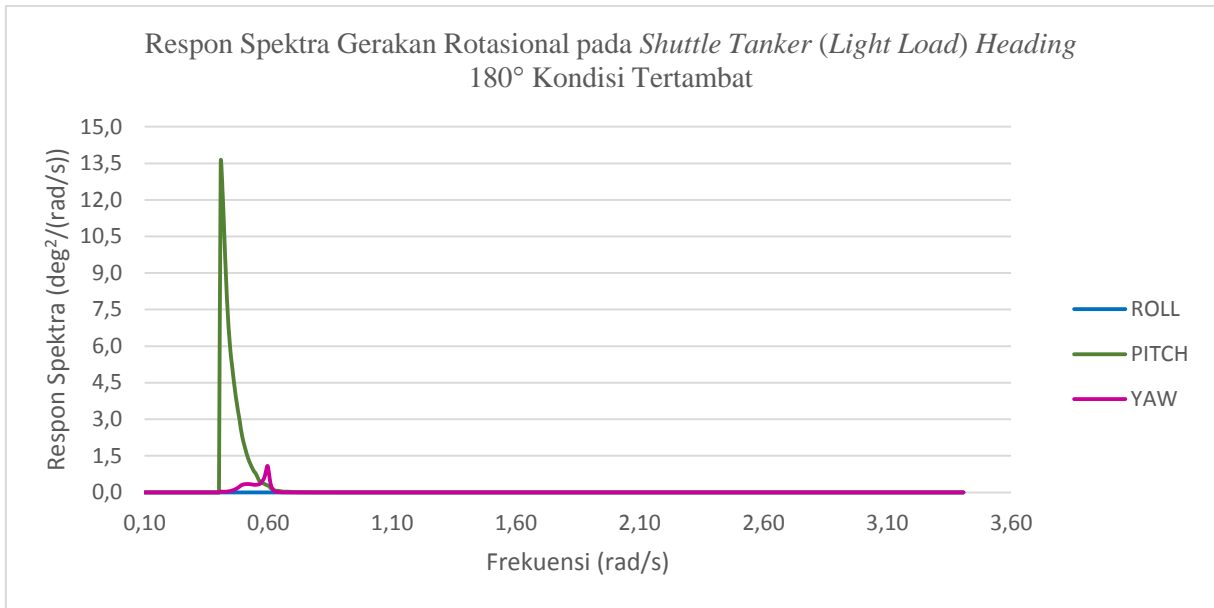




Gambar 4.124 Grafik Respon Spektra Gerakan Rotasional pada *Shuttle Tanker* 85000 DWT (*Light Load*) *Heading 90° Kondisi Tertambat*



Gambar 4.125 Grafik Respon Spektra Gerakan Translasional pada *Shuttle Tanker* 85000 DWT (*Light Load*) *Heading 180° Kondisi Tertambat*



Gambar 4.126 Grafik Respon Spektra Gerakan Rotasional pada *Shuttle Tanker* 85000 DWT (*Light Load*) *Heading* 180° Kondisi Tertambat

Tabel 4.26 Nilai Respon Struktur Tertinggi pada *Shuttle Tanker* 85000 DWT Kondisi *Light Load* saat Tertambat

| <i>Heading</i><br>(deg)      | Kondisi Muatan    | Gerakan Translasional   |             |              | Gerakan Rotasional        |              |            |
|------------------------------|-------------------|-------------------------|-------------|--------------|---------------------------|--------------|------------|
|                              |                   | <i>Surge</i>            | <i>Sway</i> | <i>Heave</i> | <i>Roll</i>               | <i>Pitch</i> | <i>Yaw</i> |
|                              |                   | m <sup>2</sup> /(rad/s) |             |              | deg <sup>2</sup> /(rad/s) |              |            |
| <b><i>Shuttle Tanker</i></b> |                   |                         |             |              |                           |              |            |
| 0                            | <i>Light Load</i> | 35,311                  | 1,3E-05     | 16,413       | 4,0E-06                   | 22,856       | 4,2E-05    |
| 45                           |                   | 7,898                   | 22,275      | 15,828       | 11,539                    | 22,448       | 0,114      |
| 90                           |                   | 3,4E-05                 | 35,785      | 34,359       | 85,155                    | 0,005        | 4,1E-04    |
| 180                          |                   | 44,603                  | 2,6E-06     | 15,586       | 7,6E-05                   | 13,528       | 1,085      |

Dari Gambar 4.119 sampai dengan Gambar 4.126 dan Tabel 4.26 maka dapat disimpulkan bahwa respon struktur *Shuttle Tanker* 85000 DWT (*light load*) pada kondisi ekstrem (100 tahunan) di perairan Laut Jawa untuk gerakan *surge* terjadi paling besar akibat *heading* 180°, yaitu dengan nilai  $S_{\phi}(\omega_e)_{surge} = 44,603 \text{ m}^2/(\text{rad/s})$ . Respon struktur untuk gerakan *sway* terjadi paling besar akibat *heading* 90°, yaitu dengan nilai  $S_{\phi}(\omega_e)_{sway} = 35,785 \text{ m}^2/(\text{rad/s})$ . Respon struktur untuk gerakan *heave* terjadi paling besar akibat *heading* 90°, yaitu

dengan nilai  $S_{\phi}(\omega_e)_{heave} = 34,359 \text{ m}^2/(\text{rad/s})$ . Respon struktur untuk gerakan *roll* terjadi paling besar akibat *heading*  $90^\circ$ , yaitu dengan nilai  $S_{\phi}(\omega_e)_{roll} = 85,155 \text{ deg}^2/(\text{rad/s})$ . Respon struktur untuk gerakan *pitch* terjadi paling besar akibat *heading*  $0^\circ$ , yaitu dengan nilai  $S_{\phi}(\omega_e)_{pitch} = 22,856 \text{ deg}^2/(\text{rad/s})$ . Respon struktur untuk gerakan *yaw* terjadi paling besar akibat *heading*  $180^\circ$ , yaitu dengan nilai  $S_{\phi}(\omega_e)_{yaw} = 1,085 \text{ deg}^2/(\text{rad/s})$ .

#### 4.9 Analisis *Tension* pada *Anchor Legs* dan *Hawser*

Tegangan yang terjadi pada *anchor legs* yang menambat SPM dan *hawser* yang menghubungkan SPM dengan FSO serta FSO dengan *shuttle tanker* perlu dilakukan analisis untuk mengetahui dan mendapatkan tegangan maksimum dari *anchor legs* dan *hawser* yang akan digunakan sebagai *input* pada analisis selanjutnya.

Perhitungan secara mendetail tentang desain panjang *anchor legs* dan *hawser* terlebih dahulu dilakukan sebelum menganalisis *tension* pada *anchor legs* dan *hawser*. Semakin besar nilai *tension* yang terjadi dibandingkan dengan nilai batas kapasitas tegangan (*breaking strength*) yang diterima, maka akan semakin rentan *anchor legs* dan *hawser* tersebut untuk putus. *Anchor legs* dan *hawser* memiliki *safety factor* minimum jika menerima *tension* maksimum. *Tension* yang didapatkan dari analisis ini akan disesuaikan atau koreksi dengan suatu kriteria *safety factor* yang direkomendasikan oleh ABS.

Dengan berbasis *time domain* menggunakan *software* Ansys AQWA, analisis dilakukan selama 3 jam (10800 s) dan kondisi pembebanan dilakukan pada kondisi *ultimate limit state* (ULS) serta mengacu pada konfigurasi arah pembebanan gelombang yang ditunjukkan pada Gambar 4.127. Skenario analisis *tension* pada *anchor legs* dan *hawser* dilakukan dalam 2 kondisi sistem *tandem offloading* yaitu:

- a. SPM – FSO *Full Load* – *Shuttle Tanker Light Load*
- b. SPM – FSO *Light Load* – *Shuttle Tanker Full Load*

Sebelumnya terlebih dahulu dilakukan perhitungan nilai *tension* maksimum yang diijinkan oleh ABS. Perhitungannya adalah sebagai berikut:

a. Untuk *Hawser*

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

$$1,82 = \frac{4094000 \text{ N}}{\text{Maximum Tension}}$$

$$\begin{aligned} \text{Maximum Tension} &= 2249450,55 \text{ N} \\ &= 2249,45055 \text{ kN} \end{aligned}$$

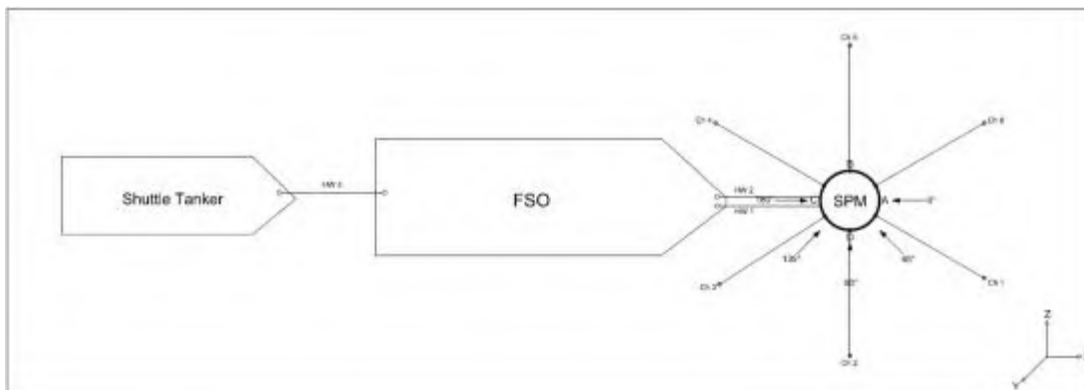
b. Untuk *Anchor Legs*

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

$$1,67 = \frac{7051000 \text{ N}}{\text{Maximum Tension}}$$

$$\begin{aligned} \text{Maximum Tension} &= 4222155,69 \text{ N} \\ &= 4222,15569 \text{ kN} \end{aligned}$$

Dari perhitungan di atas dapat disimpulkan bahwa nilai *tension* maksimum pada kondisi ULS untuk material *steel wire* pada *hawser* tidak boleh melebihi 2249,45055 kN dan pada *anchor legs* tidak boleh melebihi 4222,15569 kN.



Gambar 4.127 Konfigurasi Arah Pembebanan Gelombang

#### 4.9.1 Analisis *Tension* pada *Anchor Legs* dan *Hawser* saat Sistem *Tandem Offloading SPM – FSO Full Load – Shuttle Tanker Light Load*

Setelah dilakukan analisis menggunakan *software* Ansys AQWA selama 10800 s, didapatkan nilai *tension* maksimum untuk *anchor legs* dan *hawser* saat sistem *tandem offloading SPM – FSO full load – Shuttle tanker light load* yang terdapat pada Tabel 4.27.

Tabel 4.27 *Tension* Maksimum dari Hasil Analisis *Tension* pada *Anchor Legs* dan *Hawser* saat Sistem *Tandem Offloading* SPM – FSO *Full Load* – *Shuttle Tanker Light Load* Berdasarkan Arah Pembebanan dan *Safety Factor*

| Heading (deg) | Chain 1 (kN) | Chain 2 (kN) | Chain 3 (kN) | Chain 4 (kN) | Chain 5 (kN) | Chain 6 (kN) | Hawser 1 (kN) | Hawser 2 (kN) | Hawser 3 (kN) |
|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|
| 0             | 1362,695     | 222,846      | 209,266      | 209,941      | 222,394      | 1361,511     | 1220,124      | 1220,010      | 1538,454      |
| 45            | 1216,422     | 914,833      | 280,408      | 261,175      | 189,343      | 303,960      | 1269,906      | 1269,869      | 2087,890      |
| 90            | 1420,868     | 1662,235     | 1429,477     | 201,849      | 224,309      | 201,821      | 1558,174      | 1558,447      | 2156,817      |
| 180           | 208,840      | 217,958      | 1284,129     | 1283,648     | 217,346      | 208,468      | 2127,973      | 2127,502      | 1653,244      |
| Max           | 1420,868     | 1662,235     | 1429,477     | 1283,648     | 224,309      | 1361,511     | 2127,973      | 2127,502      | 2156,817      |
| SF            | 4,962        | 4,242        | 4,933        | 5,493        | 31,434       | 5,179        | 1,858         | 1,924         | 1,898         |
| Status        | Memenuhi     | Memenuhi     | Memenuhi     | Memenuhi     | Memenuhi     | Memenuhi     | Memenuhi      | Memenuhi      | Memenuhi      |

Berdasarkan tabel di atas diketahui bahwa *anchor legs* SPM dan *hawser* yang menghubungkan SPM dengan FSO serta FSO dengan *shuttle tanker* memiliki *safety factor* terkecil 4,242 untuk *anchor legs* dan 1,858 untuk *hawser* yang berarti nilai tersebut lebih besar dari *safety factor* yang direkomendasikan oleh ABS. Dari sini dapat diketahui bahwa *anchor legs* dan *hawser* aman untuk beroperasi.

Selain itu analisis ini juga meninjau nilai *tension* yang terjadi pada *anchor legs* dan *hawser* yang menghubungkan SPM dengan FSO dimana waktu dari nilai *tension* maksimum *hawser* yang menghubungkan FSO dengan *shuttle tanker* (*hawser 3*) menjadi acuan dikarenakan *hawser* ini yang akan digunakan untuk analisis selanjutnya. Dengan mengacu pada waktu untuk nilai *tension* maksimum *hawser 3* didapatkan nilai *tension* pada *anchor legs* dan *hawser* yang menghubungkan SPM dengan FSO yang dapat dilihat pada Tabel 4.28.

Tabel 4.28 *Tension* pada *Anchor Legs*, *Hawser 1* dan *Hawser 2* yang Mengacu pada Waktu dari *Tension* Maksimum *Hawser 3* saat Sistem *Tandem Offloading* SPM – FSO *Full Load* – *Shuttle Tanker Light Load* Berdasarkan Arah Pembebanan dan *Safety Factor*

| Heading (deg) | Hawser 3 (kN) | Time (s) | Chain 1 (kN) | Chain 2 (kN) | Chain 3 (kN) | Chain 4 (kN) | Chain 5 (kN) | Chain 6 (kN) | Hawser 1 (kN) | Hawser 2 (kN) |
|---------------|---------------|----------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|
| 0             | 1538,454      | 9094,5   | 123,534      | 93,029       | 96,185       | 99,287       | 101,205      | 122,190      | 148,283       | 143,287       |
| 45            | 2087,890      | 2571     | 195,890      | 96,504       | 69,394       | 22,137       | 16,255       | 52,533       | 52,668        | 207,661       |
| 90            | 2156,817      | 8298,25  | 209,431      | 171,773      | 208,522      | 34,045       | 12,817       | 36,429       | 145,843       | 338,053       |
| 180           | 1653,244      | 1456,5   | 13,914       | 4,777        | 45,096       | 182,889      | 188,115      | 125,145      | 26,947        | 0,441         |
| Max           | 2156,817      | -        | 209,431      | 171,773      | 208,522      | 182,889      | 188,115      | 125,145      | 148,283       | 338,053       |
| SF            | 1,898         | -        | 33,667       | 41,048       | 33,814       | 38,553       | 37,482       | 56,343       | 27,609        | 12,111        |
| Status        | Memenuhi      | -        | Memenuhi     | Memenuhi     | Memenuhi     | Memenuhi     | Memenuhi     | Memenuhi     | Memenuhi      | Memenuhi      |

#### 4.9.2 Analisis *Tension* pada *Anchor Legs* dan *Hawser* saat Sistem *Tandem Offloading SPM – FSO Light Load – Shuttle Tanker Full Load*

Nilai *tension* maksimum untuk *anchor legs* dan *hawser* saat sistem *tandem offloading SPM – FSO light load – Shuttle tanker full load* ditunjukkan pada Tabel 4.29.

Tabel 4.29 *Tension* Maksimum dari Hasil Analisis *Tension* pada *Anchor Legs* dan *Hawser* saat Sistem *Tandem Offloading SPM – FSO Light Load – Shuttle Tanker Full Load* Berdasarkan Arah Pembebanan dan *Safety Factor*

| Heading (deg) | Chain 1 (kN) | Chain 2 (kN) | Chain 3 (kN) | Chain 4 (kN) | Chain 5 (kN) | Chain 6 (kN) | Hawser 1 (kN) | Hawser 2 (kN) | Hawser 3 (kN) |
|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|
| 0             | 1361,975     | 221,146      | 209,676      | 209,841      | 222,624      | 1361,941     | 1219,394      | 1219,510      | 1537,424      |
| 45            | 1217,162     | 915,383      | 280,578      | 260,865      | 189,343      | 304,580      | 1269,546      | 1269,459      | 2086,680      |
| 90            | 1421,578     | 1661,795     | 1429,767     | 202,069      | 224,309      | 202,061      | 1557,364      | 1557,697      | 2155,017      |
| 180           | 209,670      | 218,168      | 1284,129     | 1283,828     | 217,346      | 209,098      | 2127,123      | 2127,062      | 1655,354      |
| Max           | 1421,578     | 1661,795     | 1429,767     | 1283,828     | 224,309      | 1361,941     | 2127,123      | 2127,062      | 2155,017      |
| SF            | 4,960        | 4,243        | 4,932        | 5,492        | 31,434       | 5,177        | 1,925         | 1,925         | 1,900         |
| Status        | Memenuhi     | Memenuhi     | Memenuhi     | Memenuhi     | Memenuhi     | Memenuhi     | Memenuhi      | Memenuhi      | Memenuhi      |

Dari tabel di atas dapat dilihat bahwa *anchor legs* SPM dan *hawser* yang menghubungkan SPM dengan FSO serta FSO dengan *shuttle tanker* memiliki *safety factor* terkecil 4,243 untuk *anchor legs* dan 1,9 untuk *hawser* yang berarti nilai tersebut lebih besar dari *safety factor* yang direkomendasikan oleh ABS. Dapat disimpulkan bahwa *anchor legs* dan *hawser* aman untuk beroperasi.

Untuk nilai *tension* pada *anchor legs*, *hawser* 1 dan *hawser* 2 dimana waktu dari nilai *tension* maksimum *hawser* 3 menjadi acuan dapat dilihat pada Tabel 4.30.

Tabel 4.30 *Tension* pada *Anchor Legs*, *Hawser 1* dan *Hawser 2* yang Mengacu pada Waktu dari *Tension* Maksimum *Hawser 3* saat Sistem *Tandem Offloading* SPM – FSO *Light Load* – *Shuttle Tanker Full Load* Berdasarkan Arah Pembebanan dan *Safety Factor*

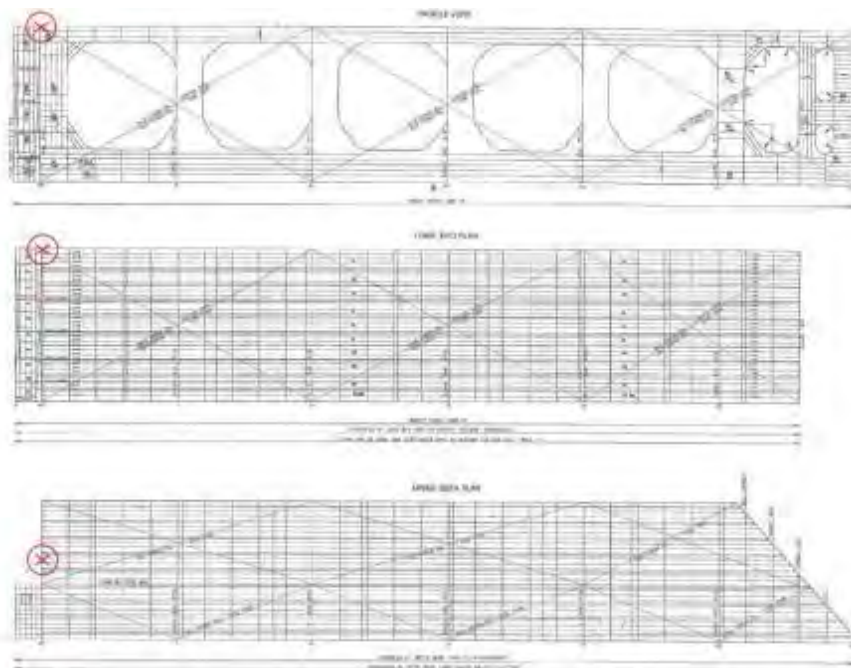
| <i>Heading</i><br>(deg) | <i>Hawser 3</i><br>(kN) | <i>Time</i><br>(s) | <i>Chain 1</i><br>(kN) | <i>Chain 2</i><br>(kN) | <i>Chain 3</i><br>(kN) | <i>Chain 4</i><br>(kN) | <i>Chain 5</i><br>(kN) | <i>Chain 6</i><br>(kN) | <i>Hawser 1</i><br>(kN) | <i>Hawser 2</i><br>(kN) |
|-------------------------|-------------------------|--------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 0                       | 1537,424                | 9094,25            | 123,304                | 92,889                 | 96,315                 | 99,067                 | 101,325                | 122,290                | 148,183                 | 143,487                 |
| 45                      | 2086,680                | 2571,75            | 196,200                | 97,094                 | 69,564                 | 22,497                 | 16,255                 | 53,453                 | 52,868                  | 208,061                 |
| 90                      | 2155,017                | 8298,75            | 209,581                | 171,503                | 208,692                | 34,185                 | 12,817                 | 37,239                 | 145,543                 | 338,353                 |
| 180                     | 1655,354                | 1456               | 0,210                  | 4,877                  | 45,096                 | 183,079                | 188,115                | 126,065                | 26,447                  | 1,141                   |
| Max                     | 2155,017                | -                  | 209,581                | 171,503                | 208,692                | 183,079                | 188,115                | 126,065                | 148,183                 | 338,353                 |
| SF                      | 1,900                   | 0,000              | 33,643                 | 41,113                 | 33,787                 | 38,513                 | 37,482                 | 55,931                 | 27,628                  | 12,100                  |
| Status                  | Memenuhi                | Memenuhi           | Memenuhi               | Memenuhi               | Memenuhi               | Memenuhi               | Memenuhi               | Memenuhi               | Memenuhi                | Memenuhi                |

Dari analisis *tension* di atas, menunjukkan bahwa *anchor legs* dan *hawser* untuk kondisi sistem *tandem offloading* SPM – FSO *full load* – *Shuttle tanker light load* dan kondisi sistem *tandem offloading* SPM – FSO *light load* – *Shuttle tanker full load* untuk semua kondisi pembebanan aman untuk beroperasi dimana nilai dari *tension* di atas memenuhi standar keamanan yang disyaratkan oleh ABS. Hasil *tension* yang terjadi pada kondisi sistem *tandem offloading* SPM – FSO *full load* – *Shuttle tanker light load* lebih besar dibandingkan saat kondisi sistem *tandem offloading* SPM – FSO *light load* – *Shuttle tanker full load*. Nilai *tension* maksimum terbesar dari kedua kondisi yang telah dijabarkan di atas untuk *hawser* yang menghubungkan FSO dengan *shuttle tanker* (*hawser 3*) yaitu sebesar 2156,817 kN yang terjadi ketika simulasi detik ke-8298,25 s dengan arah pembebanan 90° akan digunakan sebagai *input* pembebanan pada analisis tegangan lokal maksimum konstruksi panama *chock* dengan menggunakan Ansys Mechanical.

#### 4.10 Pemodelan Konstruksi Panama Chock

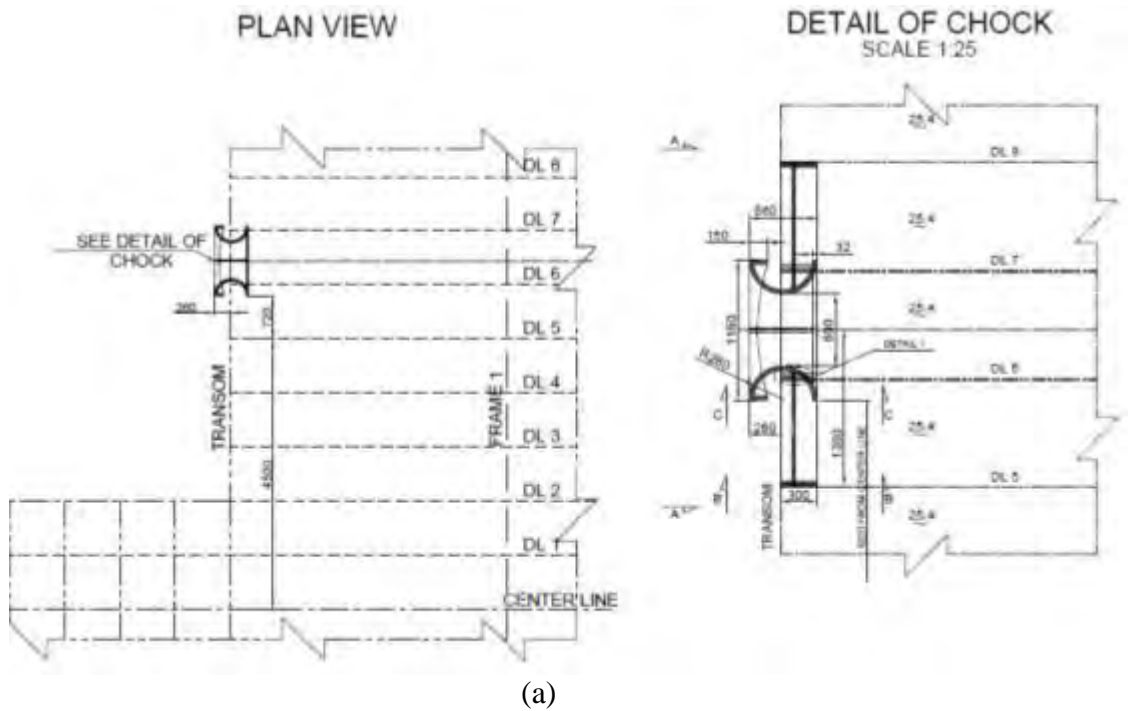
Pemodelan konstruksi panama *chock* dilakukan menggunakan bantuan *software* AutoCAD 3D dengan memperhatikan letak dari konstruksi panama *chock* pada FSO Arco Ardjuna (Gambar 4.128) dan detail dari konstruksi panama *chock* itu sendiri (Gambar 4.129). Untuk analisis lokal, konstruksi panama *chock* yang akan dimodelkan dan dianalisis terdiri dari panama *chock*, *skit* atau *seat* dan *deck* beserta *stiffner-stiffner* yang berada disekitar konstruksi panama *chock*

ditempatkan. Dikarenakan FSO Arco Ardjuna yang telah lama beroperasi, sehingga pemodelan untuk *deck* beserta *stiffner*-nya mengacu pada *rule* BKI Vol.II “*Rules for Hull Construction*” tahun 2009 dengan memodelkan dimensi-dimensi ketebalannya sesuai dengan kondisi 80% dari desain awal sebagai toleransi korosi. Dimensi untuk *deck* dan *stiffner* tersebut dapat dilihat pada data *construction profile* FSO Arco Ardjuna. Sedangkan untuk pemodelan panama *chock* dan dudukannya (*skit/seat*), dimensi-dimensinya disesuaikan dengan data yang ada.

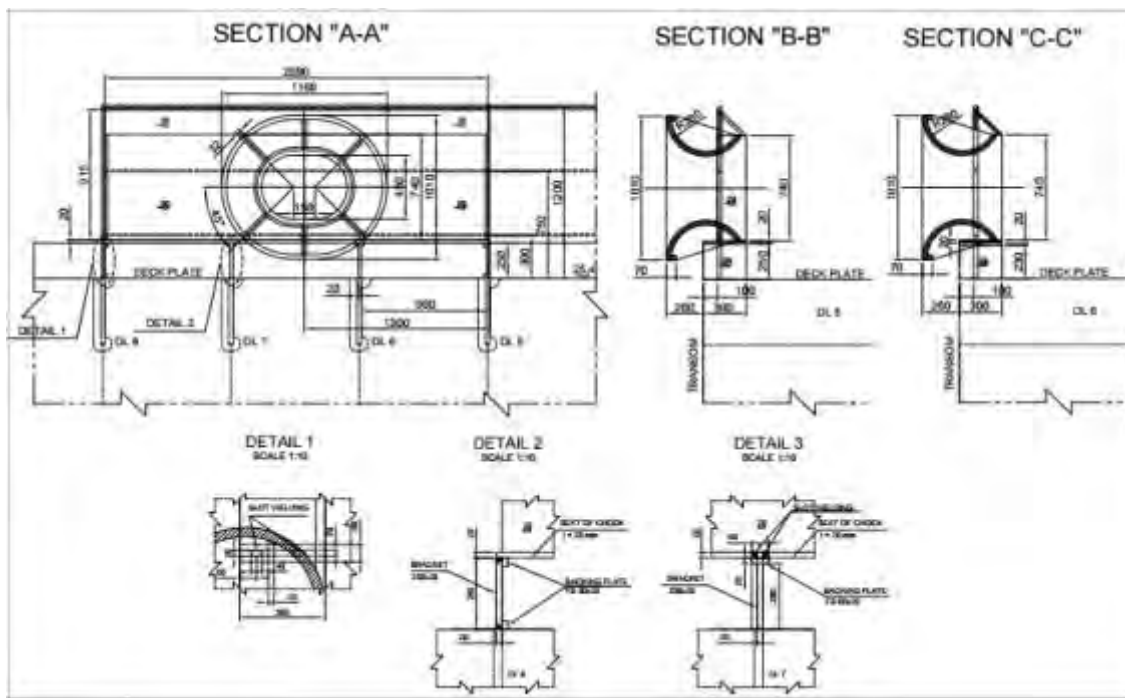


Gambar 4.128 Letak Konstruksi Panama *Chock* pada *Construction Profile* FSO Arco Ardjuna





(a)



(b)

Gambar 4.129 Detail Konstruksi Panama Chock (Sumber: PT. PHE ONWJ, 2013)

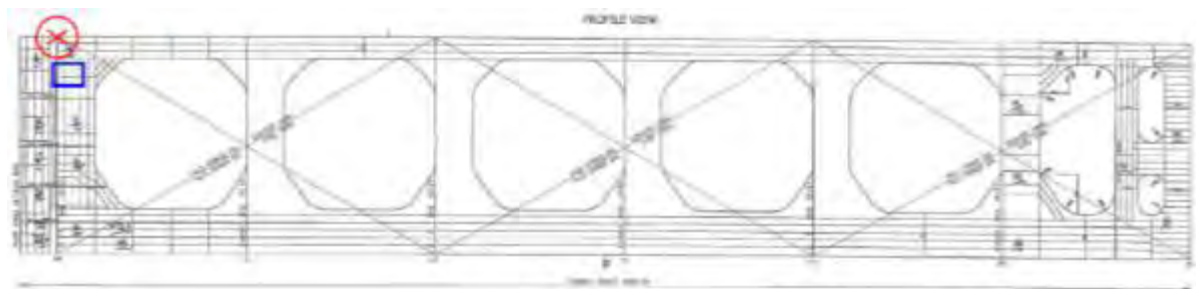
Pemodelan lokal konstruksi panama *chock* terletak pada *main deck* bagian belakang (*stern*) FSO Arco Ardjuna dengan ketebalan panama *chock* 32 mm, ketebalan *skit / seat* 20 mm dan *deck longitudinal* 540 x 12,7. Material konstruksi

*girder* dan pelat pada FSO Arco Ardjuna menggunakan Baja ASTM A36 dengan *yield strength* sebesar 250 MPa.

Menurut ABS “*Safehull-Dynamic Loading Approach for Floating Production, Storage and Offloading (FPSO) Systems*” tahun 2001, pemodelan lokal dilakukan dengan kondisi batas 3 *frame* disekitar panama *chock* hingga struktur penegar yang terkuat untuk pendistribusian gayanya. Sehingga luasan struktur yang dimodelkan baik *deck* maupun *stiffner* pada analisa lokal ini mengacu pada ketentuan tersebut. Dari *construction profile* FSO Arco Ardjuna dapat diketahui bahwa pemodelan dalam analisis ini dilakukan dari *deck longitudinal* 3 – 13 (DL 3 – DL 13) dan 3 *deck vertical* pada bagian belakang FSO (*stern*) di *main deck* yang dapat dilihat pada Gambar 4.130 dan 4.131.

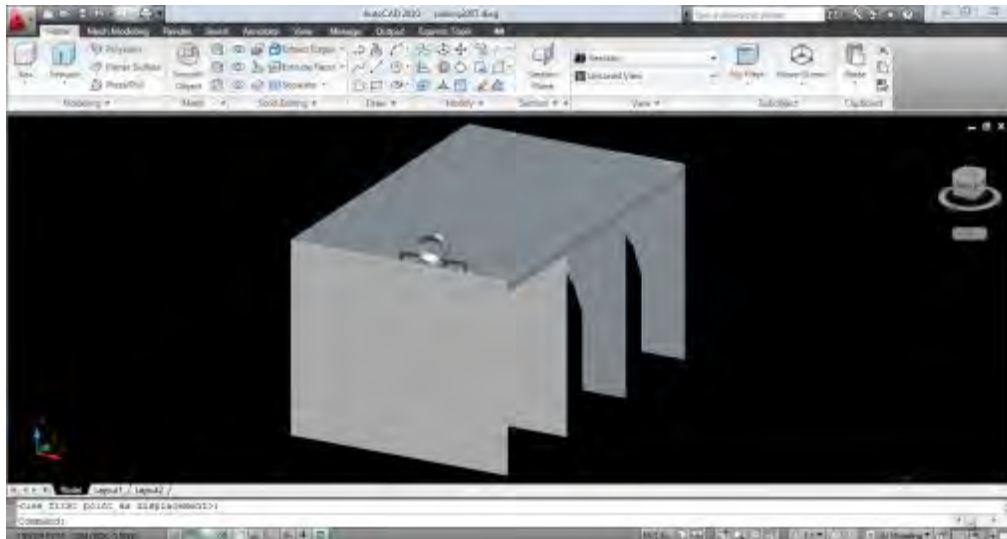


Gambar 4.130 Pemilihan *Deck Longitudinal* (Kotak Biru) untuk Pemodelan Lokal Konstruksi Panama *Chock*

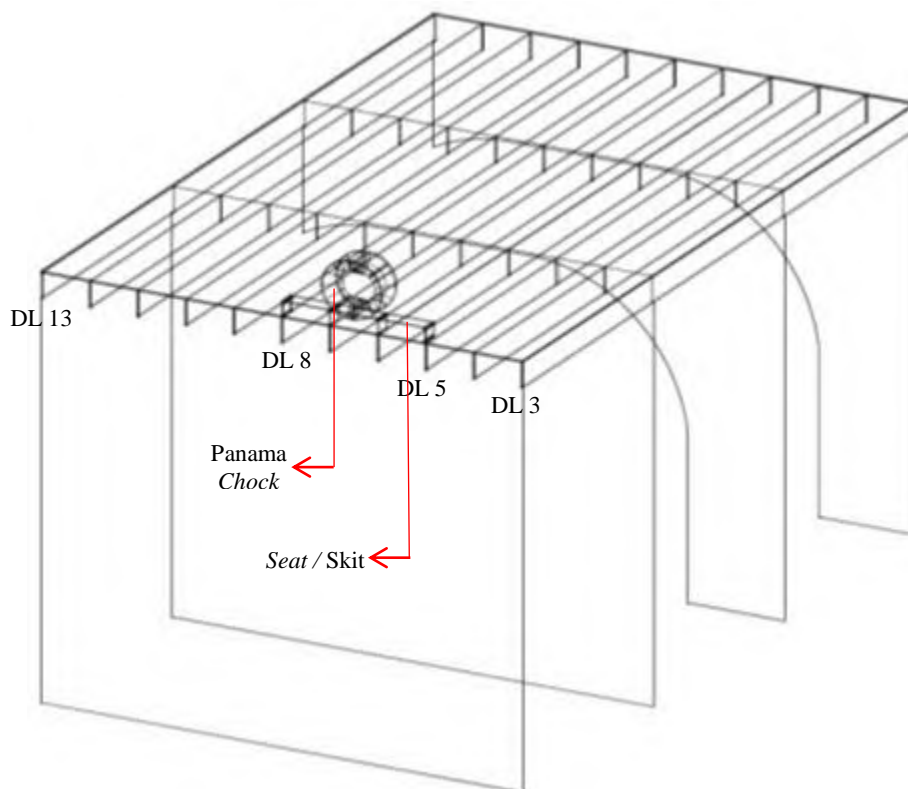


Gambar 4.131 Pemilihan *Deck Vertical* (Kotak Biru) untuk Pemodelan Lokal Konstruksi Panama *Chock*

Setelah luasan struktur ditentukan, dilakukan pemodelan konstruksi panama *chock* menggunakan *software* AutoCAD 3D yang mana hasil dari pemodelan ini dapat dilihat pada Gambar 4.132 dan 4.133.



Gambar 4.132 Pemodelan Konstruksi Panama *Chock* menggunakan *Software* AutoCAD 3D



Gambar 4.133 Hasil Pemodelan 3D Konstruksi Panama *Chock*

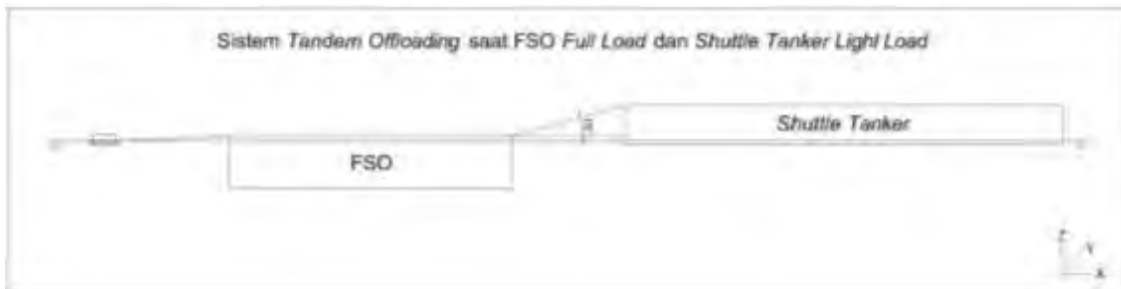
#### 4.11 Pembebanan pada Analisis Lokal

Analisis lokal yang dilakukan pada konstruksi panama *chock* dengan *software* Ansys Mechanical menggunakan satu beban, yaitu beban gaya tarik

(*tension*) *hawser* 3 yang menghubungkan antara FSO Arco Ardjuna dengan *Shuttle Tanker* 85000 DWT.

Pada Tugas Akhir ini pembebanan dilakukan dengan dua metode, yaitu

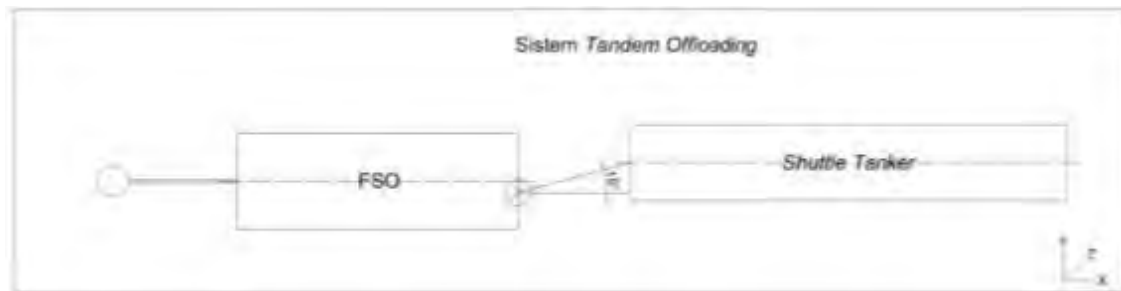
- a. Variasi sudut posisi *hawser* terhadap panama *chock*.
- b. Dengan memperhatikan posisi relatif *hawser* atau *shuttle tanker* terhadap FSO.



(a)



(b)



(c)

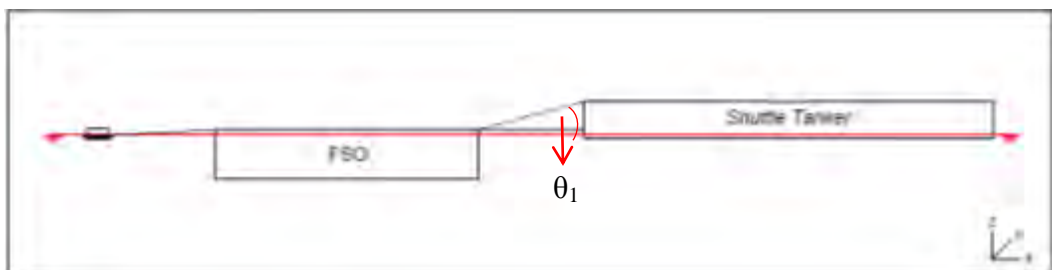
Gambar 4.134 Konfigurasi Sudut yang Terjadi akibat Perbedaan *Displacement* pada FSO Arco Ardjuna dan *Shuttle Tanker* 85000 DWT; (a) Sistem *Tandem Offloading* saat FSO *Full Load* dan *Shuttle Tanker Light Load* Tampak Samping; (b) Sistem *Tandem Offloading* saat FSO *Light Load* dan *Shuttle Tanker Full Load* Tampak Samping; (c) Sistem *Tandem Offloading* Tampang Atas

#### 4.11.1 Variasi Sudut

FSO dan *Shuttle Tanker* mengalami enam macam gerakan baik dalam kondisi sistem *tandem offloading* SPM – FSO *Full Load* – *Shuttle Tanker Light Load* maupun kondisi sistem *tandem offloading* SPM – FSO *Light Load* – *Shuttle Tanker Full Load* yang setiap periodik akan berubah-ubah untuk posisi *shuttle tanker* terhadap FSO. Perubahan posisi tersebut menyebabkan terbentuknya sudut akibat dari posisi *hawser* terhadap panama *chock*.

Dengan dasar pemikiran tersebut, untuk mendapatkan tegangan maksimum yang terjadi pada konstruksi panama *chock* dibuatlah variasi sudut posisi *hawser* terhadap panama *chock* yaitu sebesar  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  dan  $60^\circ$  dimana beban yang digunakan adalah nilai *tension* maksimum yang terjadi pada *hawser* 3 dalam dua kondisi sistem *tandem offloading* yaitu SPM – FSO *full load* – *Shuttle tanker light load* dan SPM – FSO *light load* – *Shuttle tanker full load*. Nilai *tension* ini didapatkan dari simulasi yang merupakan gaya dengan sudut tertentu, sehingga perlu diperhitungkan sudut yang dibentuk untuk melakukan pembebanan pada konstruksi panama *chock*. Konfigurasi beban tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.135 – Gambar 4.137.

Beban yang mengenai panama *chock* ada pada bagian yang dianggap paling kritis yaitu bagian atas, samping kanan dan samping kiri baik secara vertikal maupun horizontal. Pembebanan tidak dilakukan pada bagian bawah panama *chock*, hal ini dikarenakan panama *chock* pada bagian bawah ditumpu oleh *seat / skit* dan *deck* sehingga tegangan yang terjadi pada bagian bawah relatif kecil dan tidak terlalu berpengaruh terhadap analisis ini. Pembebanan dengan kondisi ini menggambarkan kondisi ekstrem.



Gambar 4.135 Konfigurasi Sudut *Hawser* dimana Pembebanan Mengenai Bagian Atas Panama *Chock*

Berdasarkan konfigurasi di atas, untuk nilai  $\theta_1$  adalah variasi sudut yang telah ditentukan sebelumnya, yaitu  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  dan  $60^\circ$ . Setelah nilai sudut ditentukan, nilai sudut tersebut digunakan untuk menghitung gaya yang akan dimasukkan dalam analisis. Hasil perhitungan gaya pada konstruksi panama *chock* adalah sebagai berikut:

Diketahui: *Tension* maksimum (F) = 2156,817 kN

Maka:

a. Untuk sudut  $15^\circ$

$$F_x = F \cos 15^\circ = 2083,325 \text{ kN}$$

$$F_y = 0$$

$$F_z = F \sin 15^\circ = 558,225 \text{ kN}$$

b. Untuk sudut  $30^\circ$

$$F_x = F \cos 30^\circ = 1867,858 \text{ kN}$$

$$F_y = 0$$

$$F_z = F \sin 30^\circ = 1078,4085 \text{ kN}$$

c. Untuk sudut  $45^\circ$

$$F_x = F \cos 45^\circ = 1525,01 \text{ kN}$$

$$F_y = 0$$

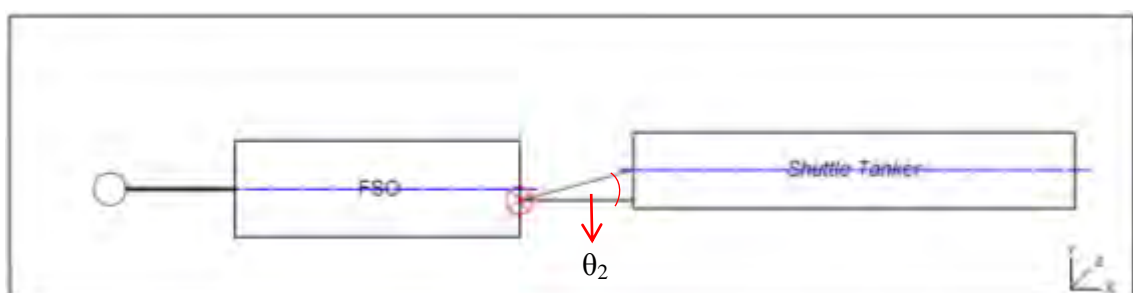
$$F_z = F \sin 45^\circ = 1525,01 \text{ kN}$$

d. Untuk sudut  $60^\circ$

$$F_x = F \cos 60^\circ = 1078,41 \text{ kN}$$

$$F_y = 0$$

$$F_z = F \sin 60^\circ = 1867,86 \text{ kN}$$



Gambar 4.136 Konfigurasi Sudut *Hawser* dimana Pembebanan Mengenai Bagian Samping Kanan Panama *Chock*

Berdasarkan konfigurasi di atas, untuk nilai  $\theta_2$  adalah variasi sudut yang telah ditentukan sebelumnya, yaitu  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  dan  $60^\circ$ . Nilai sudut tersebut digunakan untuk menghitung gaya yang akan dimasukkan dalam analisis. Hasil perhitungan gaya pada konstruksi panama *chock* adalah sebagai berikut:  
Diketahui: *Tension* maksimum (F) = 2156,817 kN

Maka:

a. Untuk sudut  $15^\circ$

$$F_x = F \cos 15^\circ = 2083,325 \text{ kN}$$

$$F_y = F \sin 15^\circ = 558,225 \text{ kN}$$

$$F_z = 0$$

b. Untuk sudut  $30^\circ$

$$F_x = F \cos 30^\circ = 1867,858 \text{ kN}$$

$$F_y = F \sin 30^\circ = 1078,4085 \text{ kN}$$

$$F_z = 0$$

c. Untuk sudut  $45^\circ$

$$F_x = F \cos 45^\circ = 1525,01 \text{ kN}$$

$$F_y = F \sin 45^\circ = 1525,01 \text{ kN}$$

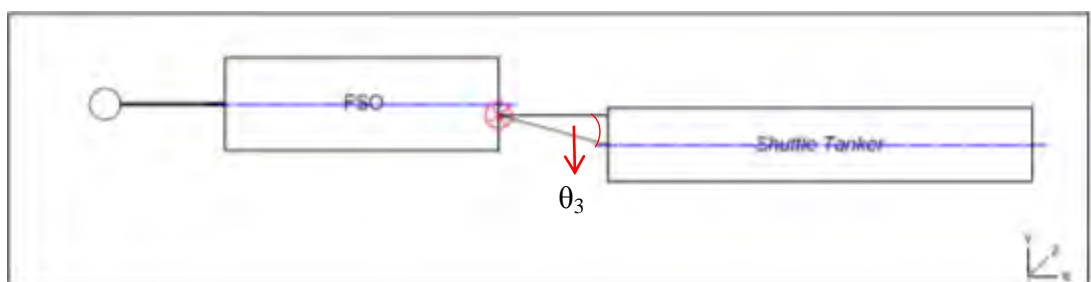
$$F_z = 0$$

d. Untuk sudut  $60^\circ$

$$F_x = F \cos 60^\circ = 1078,41 \text{ kN}$$

$$F_y = F \sin 60^\circ = 1867,86 \text{ kN}$$

$$F_z = 0$$



Gambar 4.137 Konfigurasi Sudut *Hawser* dimana Pembebanan Mengenai Bagian Samping Kiri Panama *Chock*

Sama halnya dengan analisis sebelumnya, untuk nilai  $\theta_3$  adalah variasi sudut yang telah ditentukan sebelumnya, yaitu  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  dan  $60^\circ$ . Untuk hasil perhitungan gaya pada konstruksi panama *chock* adalah sebagai berikut:

Diketahui: *Tension* maksimum ( $F$ ) = 2156,817 kN

Maka:

a. Untuk sudut  $15^\circ$

$$F_x = F \cos 15^\circ = 2083,325 \text{ kN}$$

$$F_y = F \sin 15^\circ = 558,225 \text{ kN}$$

$$F_z = 0$$

b. Untuk sudut  $30^\circ$

$$F_x = F \cos 30^\circ = 1867,858 \text{ kN}$$

$$F_y = F \sin 30^\circ = 1078,4085 \text{ kN}$$

$$F_z = 0$$

c. Untuk sudut  $45^\circ$

$$F_x = F \cos 45^\circ = 1525,01 \text{ kN}$$

$$F_y = F \sin 45^\circ = 1525,01 \text{ kN}$$

$$F_z = 0$$

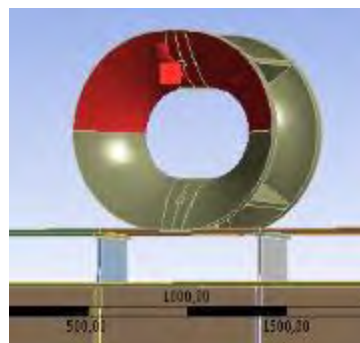
d. Untuk sudut  $60^\circ$

$$F_x = F \cos 60^\circ = 1078,41 \text{ kN}$$

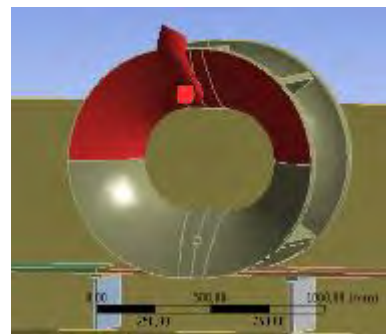
$$F_y = F \sin 60^\circ = 1867,86 \text{ kN}$$

$$F_z = 0$$

Gaya-gaya hasil perhitungan di atas digunakan sebagai *input* pembebanan pada Ansys Mechanical. Gambar 4.138 – 4.140 adalah hasil *input* gaya-gaya untuk pembebanan pada konstruksi panama *chock*.

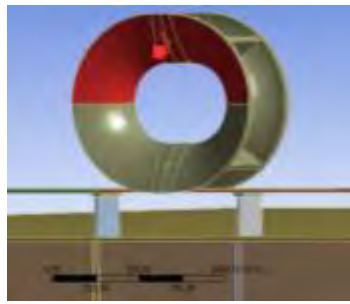


(a)

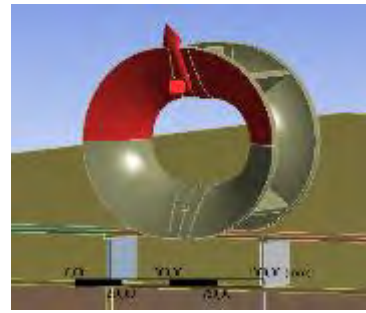


(b)



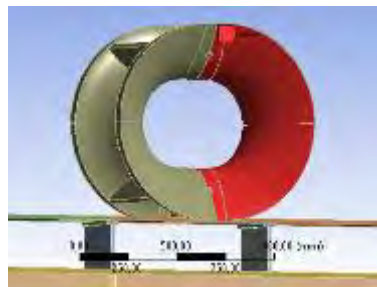


(c)

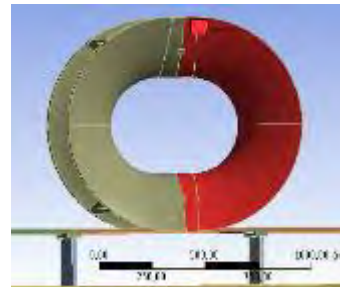


(d)

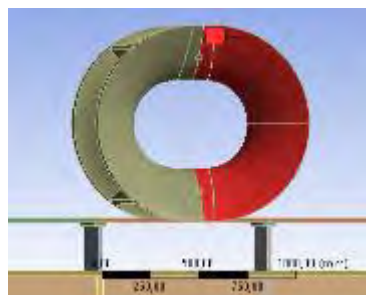
Gambar 4.138 Pembebanan terhadap Panama *Chock* yang Mengenai Bagian Atas Struktur; (a) Sudut 15°; (b) Sudut 30°; (c) Sudut 45°; (d) Sudut 60°



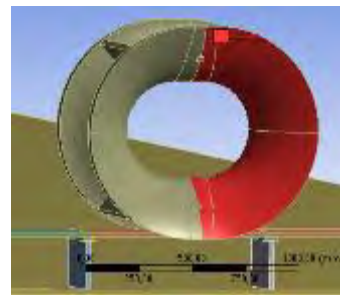
(a)



(b)

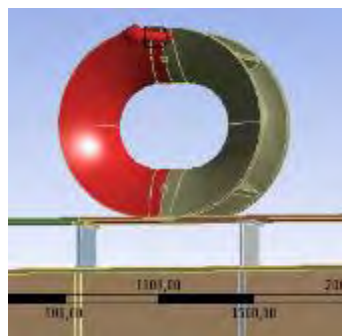


(c)

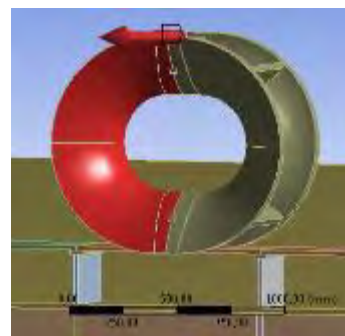


(d)

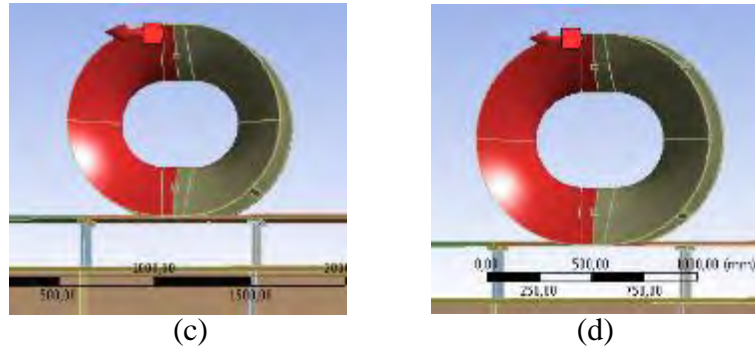
Gambar 4.139 Pembebanan terhadap Panama *Chock* yang Mengenai Bagian Samping Kanan Struktur; (a) Sudut 15°; (b) Sudut 30°; (c) Sudut 45°; (d) Sudut 60°



(a)



(b)



Gambar 4.140 Pembebanan terhadap Panama *Chock* yang Mengenai Bagian Samping Kiri Struktur; (a) Sudut 15°; (b) Sudut 30°; (c) Sudut 45°; (d) Sudut 60°

#### 4.11.2 Posisi Relatif *Hawser* atau *Shuttle Tanker* terhadap FSO

Pembebanan dengan memperhatikan posisi relatif *hawser* atau *shuttle tanker* terhadap FSO menggambarkan kondisi *real* untuk perubahan posisi *shuttle tanker* terhadap FSO. Pembebanan pada analisis ini menggunakan nilai *tension hawser* 3 pada fungsi waktu yang sama dengan waktu ketika selisih terbesar perubahan posisi *shuttle tanker* dan FSO terjadi baik pada gerakan *sway* maupun *heave*. Dengan memperhitungkan selisih terbesar perubahan posisi *shuttle tanker* dan FSO pada gerakan *sway* dan *heave* serta panjang *hawser* 3, didapatkan sudut untuk posisi *hawser* terhadap panama *chock*.

Sama halnya dengan analisis variasi sudut yang telah dibahas sebelumnya, sudut untuk posisi *hawser* terhadap panama *chock* pada analisis ini digunakan untuk menghitung *input* gaya-gaya pada Ansys Mechanical. Berikut rangkuman perhitungan untuk pembebanan dengan memperhatikan posisi relatif *hawser* atau *shuttle tanker* terhadap FSO.

a. Kondisi saat Sistem *Tandem Offloading SPM* – FSO *Full Load* – *Shuttle Tanker Light Load*

1. *Heading* 0°

$$T = 685,5 \text{ s} \longrightarrow Z_{\text{FSO}} - Z_{\text{Tanker}} = 1,16957 \text{ m}, F_H = 0,51184 \text{ kN}$$

$$Y_{\text{FSO}} - Y_{\text{Tanker}} = -0,0191 \text{ m}, F_H = 0,51184 \text{ kN}$$

$$\theta_z = 87,05^\circ$$

$$\theta_y = 0,02^\circ$$

Dimana  $F = 0,51184 \text{ kN}$

Sehingga,  $F_x = 0,511 \text{ kN}$

$F_y = 0,000178 \text{ kN}$

$F_z = 0,511 \text{ kN}$

$T = 5900 \text{ s} \rightarrow Z_{\text{FSO}} - Z_{\text{Tanker}} = 0,31117 \text{ m}, F_H = 17,082 \text{ kN}$

$Y_{\text{FSO}} - Y_{\text{Tanker}} = 0,20543 \text{ m}, F_H = 17,082 \text{ kN}$

$\theta_z = 89,67^\circ$

$\theta_y = 0,218^\circ$

Dimana  $F = 17,0824 \text{ kN}$

Sehingga,  $F_x = 17,08 \text{ kN}$

$F_y = 0,065 \text{ kN}$

$F_z = 17,08 \text{ kN}$

## 2. Heading $45^\circ$

$T = 274,25 \text{ s} \rightarrow Z_{\text{FSO}} - Z_{\text{Tanker}} = 1,11418 \text{ m}, F_H = 0,115365 \text{ kN}$

$Y_{\text{FSO}} - Y_{\text{Tanker}} = -0,0891 \text{ m}, F_H = 0,115365 \text{ kN}$

$\theta_z = 88,8^\circ$

$\theta_y = 0,1^\circ$

Dimana  $F = 0,115365 \text{ kN}$

Sehingga,  $F_x = 0,1153 \text{ kN}$

$F_y = 0,000201 \text{ kN}$

$F_z = 0,1153 \text{ kN}$

$T = 499 \text{ s} \rightarrow Z_{\text{FSO}} - Z_{\text{Tanker}} = 0,56385 \text{ m}, F_H = 344,936 \text{ kN}$

$Y_{\text{FSO}} - Y_{\text{Tanker}} = 0,39660 \text{ m}, F_H = 344,936 \text{ kN}$

$\theta_z = 89,4^\circ$

$\theta_y = 0,42^\circ$

Dimana  $F = 344,936 \text{ kN}$

Sehingga,  $F_x = 344,92 \text{ kN}$

$F_y = 2,528 \text{ kN}$

$F_z = 344,92 \text{ kN}$

3. *Heading 90°*

$$T = 94 \text{ s} \longrightarrow Z_{\text{FSO}} - Z_{\text{Tanker}} = 1,22037 \text{ m}, F_H = 0,0305 \text{ kN}$$
$$Y_{\text{FSO}} - Y_{\text{Tanker}} = 0,19895 \text{ m}, F_H = 0,0305 \text{ kN}$$

$$\theta_z = 88,71^\circ$$

$$\theta_y = 0,211^\circ$$

Dimana  $F = 0,0305 \text{ kN}$

Sehingga,  $F_x = 0,03049 \text{ kN}$

$$F_y = 0,000112 \text{ kN}$$

$$F_z = 0,03049 \text{ kN}$$

$$T = 95,75 \text{ s} \longrightarrow Z_{\text{FSO}} - Z_{\text{Tanker}} = 0,21555 \text{ m}, F_H = 17,73 \text{ kN}$$
$$Y_{\text{FSO}} - Y_{\text{Tanker}} = 0,63602 \text{ m}, F_H = 17,73 \text{ kN}$$

$$\theta_z = 89,77^\circ$$

$$\theta_y = 0,674^\circ$$

Dimana  $F = 17,0824 \text{ kN}$

Sehingga,  $F_x = 17,73 \text{ kN}$

$$F_y = 0,21 \text{ kN}$$

$$F_z = 17,73 \text{ kN}$$

4. *Heading 180°*

$$T = 5085 \text{ s} \longrightarrow Z_{\text{FSO}} - Z_{\text{Tanker}} = 0,54416 \text{ m}, F_H = -0,2362 \text{ kN}$$
$$Y_{\text{FSO}} - Y_{\text{Tanker}} = 0,03420 \text{ m}, F_H = -0,2362 \text{ kN}$$

$$\theta_z = 89,43^\circ$$

$$\theta_y = 0,036^\circ$$

Dimana  $F = -0,23625 \text{ kN}$

Sehingga,  $F_x = 0,236 \text{ kN}$

$$F_y = 0,00015 \text{ kN}$$

$$F_z = 0,236 \text{ kN}$$

$$T = 10268,75 \text{ s} \longrightarrow Z_{\text{FSO}} - Z_{\text{Tanker}} = 0,32896 \text{ m}, F_H = 2,4685 \text{ kN}$$
$$Y_{\text{FSO}} - Y_{\text{Tanker}} = 0,10529 \text{ m}, F_H = 2,4685 \text{ kN}$$

$$\theta_z = 89,65^\circ$$

$$\theta_y = 0,112^\circ$$

Dimana  $F = 2,4685 \text{ kN}$

Sehingga,  $F_x = 2,4685 \text{ kN}$

$F_y = 0,00483 \text{ kN}$

$F_z = 2,4685 \text{ kN}$

b. Kondisi saat Sistem *Tandem Offloading SPM – FSO Light Load – Shuttle Tanker Full Load*

1. *Heading 0°*

$T = 881,75 \text{ s} \rightarrow Z_{\text{FSO}} - Z_{\text{Tanker}} = 2,64977 \text{ m}, F_H = 0,10345 \text{ kN}$

$Y_{\text{FSO}} - Y_{\text{Tanker}} = 0,18879 \text{ m}, F_H = 0,10345 \text{ kN}$

$\theta_z = 87,2^\circ$

$\theta_y = 0,2^\circ$

Dimana  $F = 0,10345 \text{ kN}$

Sehingga,  $F_x = 0,1033 \text{ kN}$

$F_y = 0,000361 \text{ kN}$

$F_z = 0,1033 \text{ kN}$

$T = 991,25 \text{ s} \rightarrow Z_{\text{FSO}} - Z_{\text{Tanker}} = 0,04567 \text{ m}, F_H = 2910,503 \text{ kN}$

$Y_{\text{FSO}} - Y_{\text{Tanker}} = 0,29766 \text{ m}, F_H = 2910,503 \text{ kN}$

$\theta_z = 89,95^\circ$

$\theta_y = 0,316^\circ$

Dimana  $F = 2910,503 \text{ kN}$

Sehingga,  $F_x = 991,25 \text{ kN}$

$F_y = 5,47 \text{ kN}$

$F_z = 991,25 \text{ kN}$

2. *Heading 45°*

$T = 176,75 \text{ s} \rightarrow Z_{\text{FSO}} - Z_{\text{Tanker}} = 1,56055 \text{ m}, F_H = 2,6195 \text{ kN}$

$Y_{\text{FSO}} - Y_{\text{Tanker}} = 0,48639 \text{ m}, F_H = 2,6195 \text{ kN}$

$\theta_z = 88,35^\circ$

$\theta_y = 0,52^\circ$

Dimana  $F = 2,6195 \text{ kN}$

Sehingga,  $F_x = 2,6183 \text{ kN}$

$F_y = 0,0238 \text{ kN}$

$F_z = 2,6184 \text{ kN}$

$$T = 167 \text{ s} \longrightarrow Z_{\text{FSO}} - Z_{\text{Tanker}} = 0,95771 \text{ m}, F_H = 1,938 \text{ kN}$$

$$Y_{\text{FSO}} - Y_{\text{Tanker}} = 0,74959 \text{ m}, F_H = 1,938 \text{ kN}$$

$$\theta_z = 88,99^\circ$$

$$\theta_y = 0,795^\circ$$

Dimana  $F = 1,938 \text{ kN}$

Sehingga,  $F_x = 1,938 \text{ kN}$

$$F_y = 0,0027 \text{ kN}$$

$$F_z = 1,9377 \text{ kN}$$

### 3. Heading $90^\circ$

$$T = 9626,5 \text{ s} \longrightarrow Z_{\text{FSO}} - Z_{\text{Tanker}} = 2,491439 \text{ m}, F_H = 1262,5275 \text{ kN}$$

$$Y_{\text{FSO}} - Y_{\text{Tanker}} = 0,870346 \text{ m}, F_H = 1262,5275 \text{ kN}$$

$$\theta_z = 87,36^\circ$$

$$\theta_y = 0,923^\circ$$

Dimana  $F = 1262,5275 \text{ kN}$

Sehingga,  $F_x = 1261,024 \text{ kN}$

$$F_y = 20,316 \text{ kN}$$

$$F_z = 1261,188 \text{ kN}$$

$$T = 9618,25 \text{ s} \longrightarrow Z_{\text{FSO}} - Z_{\text{Tanker}} = 0,825896 \text{ m}, F_H = 1325,183 \text{ kN}$$

$$Y_{\text{FSO}} - Y_{\text{Tanker}} = 1,521147 \text{ m}, F_H = 1325,183 \text{ kN}$$

$$\theta_z = 89,125^\circ$$

$$\theta_y = 1,613^\circ$$

Dimana  $F = 17,0824 \text{ kN}$

Sehingga,  $F_x = 1324,503 \text{ kN}$

$$F_y = 37,298 \text{ kN}$$

$$F_z = 1325,028 \text{ kN}$$

### 4. Heading $180^\circ$

$$T = 5083,5 \text{ s} \longrightarrow Z_{\text{FSO}} - Z_{\text{Tanker}} = 2,75755 \text{ m}, F_H = 1118,081 \text{ kN}$$

$$Y_{\text{FSO}} - Y_{\text{Tanker}} = 0,00865 \text{ m}, F_H = 118,081 \text{ kN}$$

$$\theta_z = 87,08^\circ$$

$$\theta_y = 0,0092^\circ$$

Dimana  $F = 1118,081 \text{ kN}$

Sehingga,  $F_x = 1116,629 \text{ kN}$

$F_y = 0,1793 \text{ kN}$

$F_z = 1116,629 \text{ kN}$

$T = 4058,25 \text{ s} \rightarrow Z_{\text{FSO}} - Z_{\text{Tanker}} = 1,47658 \text{ m}, F_H = 206,367 \text{ kN}$

$Y_{\text{FSO}} - Y_{\text{Tanker}} = 0,26222 \text{ m}, F_H = 206,367 \text{ kN}$

$\theta_z = 88,4^\circ$

$\theta_y = 0,278^\circ$

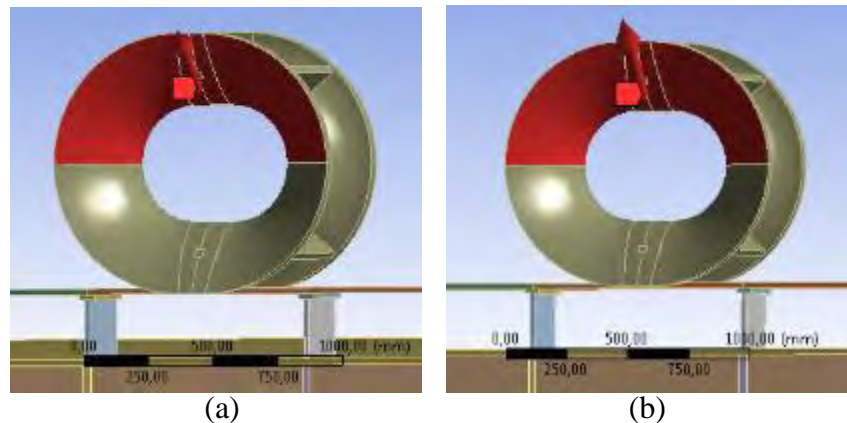
Dimana  $F = 206,367 \text{ kN}$

Sehingga,  $F_x = 206,284 \text{ kN}$

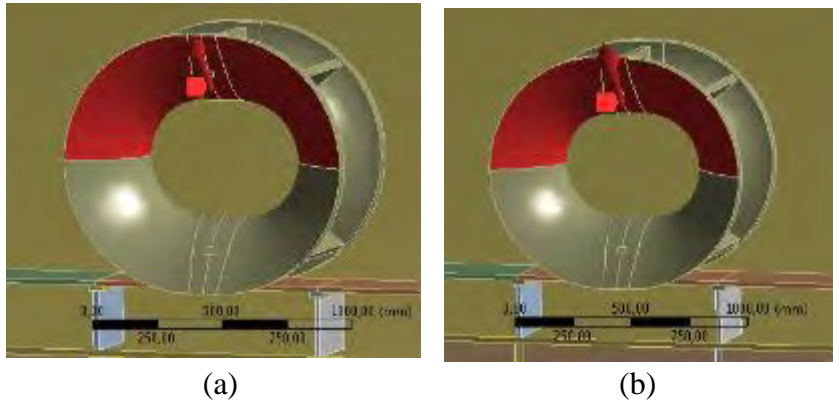
$F_y = 1 \text{ kN}$

$F_z = 206,287 \text{ kN}$

Gambar 4.141 – 4.148 menunjukkan hasil *input* gaya-gaya dari perhitungan di atas untuk pembebanan pada konstruksi panama *chock* dengan menggunakan *software* Ansys Mechanical.

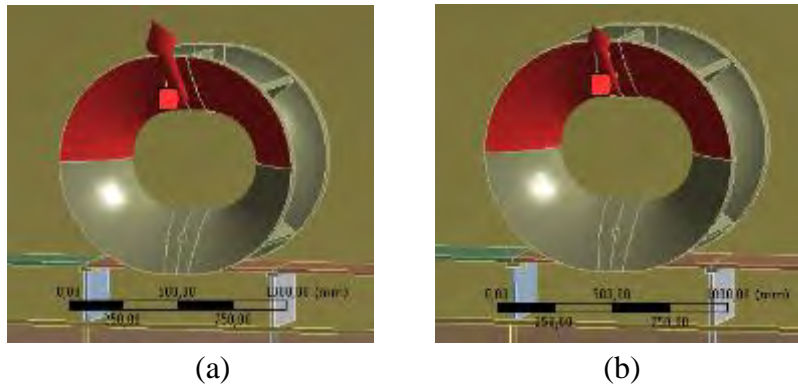


Gambar 4.141 Pembebanan terhadap Panama *Chock* untuk Kondisi Sistem *Tandem Offloading SPM – FSO Full Load – Shuttle Tanker Light Load* pada *Heading*  $0^\circ$ ; (a) Saat  $T = 685,5 \text{ s}$ ; (b) Saat  $T = 5900 \text{ s}$



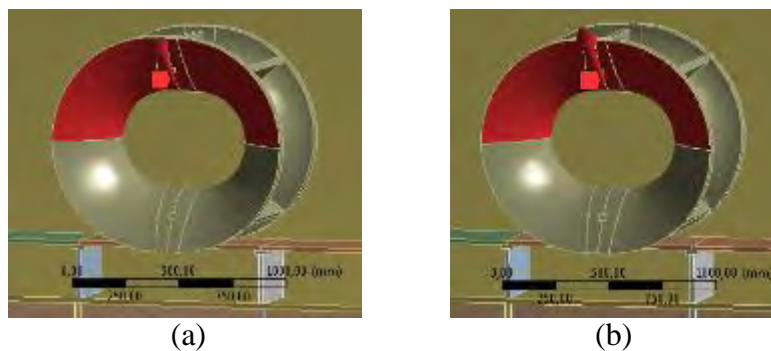
(a) (b)

Gambar 4.142 Pembebanan terhadap Panama *Chock* untuk Kondisi Sistem *Tandem Offloading SPM – FSO Full Load – Shuttle Tanker Light Load* pada *Heading 45°*; (a) Saat  $T = 274,25$  s; (b) Saat  $T = 499$  s



(a) (b)

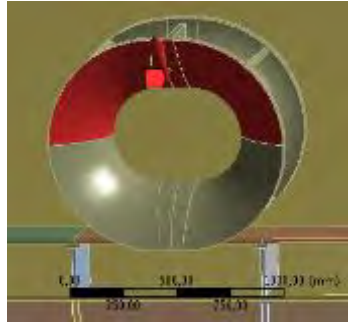
Gambar 4.143 Pembebanan terhadap Panama *Chock* untuk Kondisi Sistem *Tandem Offloading SPM – FSO Full Load – Shuttle Tanker Light Load* pada *Heading 90°*; (a) Saat  $T = 94$  s; (b) Saat  $T = 95,75$  s



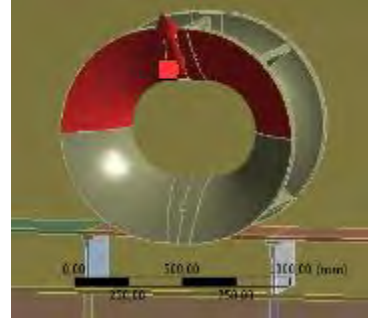
(a) (b)

Gambar 4.144 Pembebanan terhadap Panama *Chock* untuk Kondisi Sistem *Tandem Offloading SPM – FSO Full Load – Shuttle Tanker Light Load* pada *Heading 180°*; (a) Saat  $T = 274,25$  s; (b) Saat  $T = 499$  s



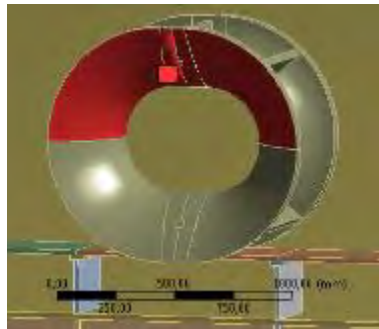


(a)

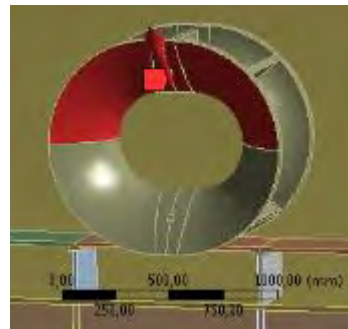


(b)

Gambar 4.145 Pembebanan terhadap Panama *Chock* untuk Kondisi Sistem *Tandem Offloading SPM – FSO Light Load – Shuttle Tanker Full Load* pada *Heading 0°*; (a) Saat  $T = 881,75$  s; (b) Saat  $T = 991,25$  s

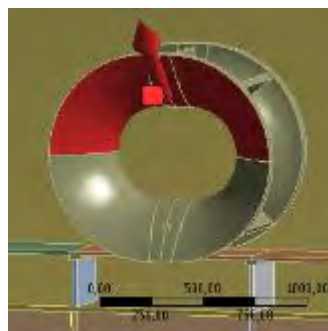


(a)

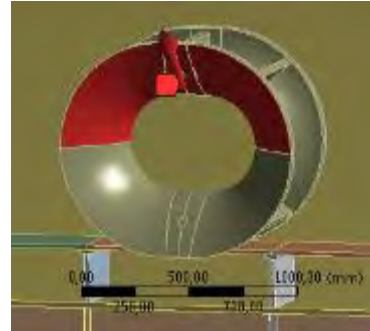


(b)

Gambar 4.146 Pembebanan terhadap Panama *Chock* untuk Kondisi Sistem *Tandem Offloading SPM – FSO Light Load – Shuttle Tanker Full Load* pada *Heading 45°*; (a) Saat  $T = 176,75$  s; (b) Saat  $T = 167$  s

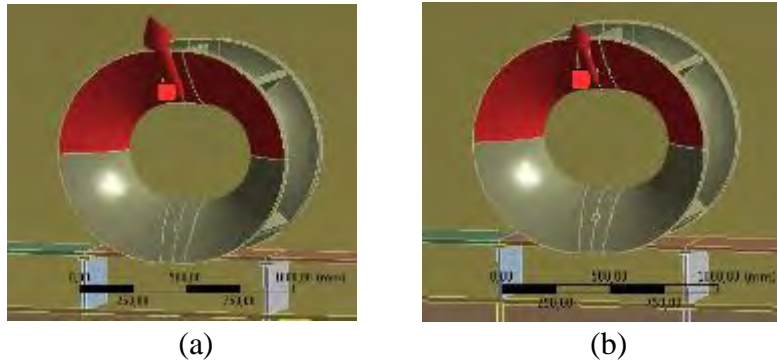


(a)



(b)

Gambar 4.147 Pembebanan terhadap Panama *Chock* untuk Kondisi Sistem *Tandem Offloading SPM – FSO Light Load – Shuttle Tanker Full Load* pada *Heading 90°*; (a) Saat  $T = 9626,5$  s; (b) Saat  $T = 9618,25$  s



Gambar 4.148 Pembebanan terhadap Panama *Chock* untuk Kondisi Sistem *Tandem Offloading* SPM – FSO *Light Load* – *Shuttle Tanker Full Load* pada *Heading* 180°; (a) Saat  $T = 5083,5$  s; (b) Saat  $T = 4058,25$  s

#### 4.12 *Meshing dan Sensitivity Analysis*

Setelah pemodelan konstruksi panama *chock* dilakukan, analisis selanjutnya adalah melakukan *meshing*. *Meshing* merupakan pembagian model struktur menjadi elemen-elemen kecil sesuai dengan ukuran pembagi yang diinginkan. *Meshing* disini berfungsi sebagai tempat distribusi tegangan pada elemen-elemen kecil tersebut. Ukuran *meshing* yang semakin kecil menyebabkan distribusi tegangan akan semakin baik dimana hasil yang didapatkan juga akan lebih *valid*.

Diperlukan analisis sensitivitas *meshing* dalam menentukan ketepatan ukuran *meshing* agar didapatkan hasil yang *valid*. Tingkat akurasi dalam *meshing* dilakukan dengan analisis ini. Analisis sensitivitas *meshing* dilakukan untuk mengecek apakah model dan tegangan yang didapat dari hasil *running* dengan *software* Ansys Mechanical sudah benar atau sudah mendekati nilai kebenaran. Pada Tugas Akhir ini, dilakukan uji *sensitivity* dengan memvariasikan ukuran elemen *meshing* yang selanjutnya akan didapatkan *equivalent stress* atau *Von Mises Stress*. Tegangan yang dihasilkan akan dianalisis hingga didapat perbedaan hasil kurang dari 5% dan dapat dibuktikan dengan perubahan ukuran *meshing* yang tidak berpengaruh terhadap besarnya tegangan.

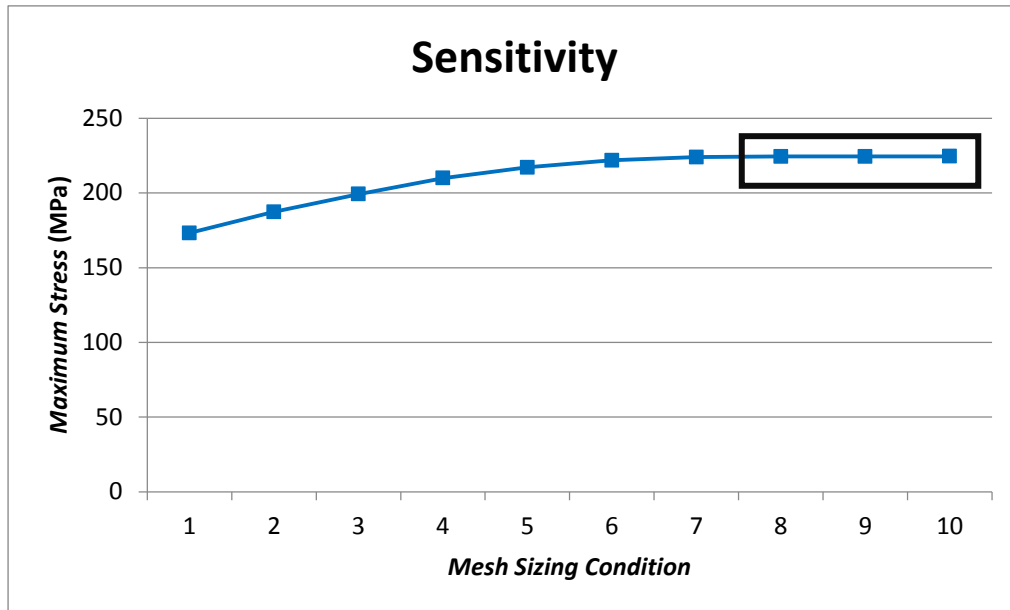
Menurut ABS “*Safehull-Dynamic Loading Approach for FPSO Systems*” tahun 2001 rentang kerapatan ukuran *meshing* yang digunakan untuk *local analysis* adalah 1/5 sampai 1/10 dari ukuran lebar *longitudinal girder*. Dari sini maka didapatkan rentang ukuran *meshing* untuk konstruksi panama *chock* adalah

108 mm – 54 mm. pada Tugas Akhir ini dilakukan *running* uji elemen *meshing* dengan 10 kondisi kerapatan *meshing*.

Analisis sensitivitas *meshing* ini dilakukan pada kondisi pembebanan dengan variasi sudut dan kondisi pembebanan dengan memperhatikan posisi relatif *hawser* atau *shuttle tanker* terhadap FSO. Untuk kondisi pembebanan dengan variasi sudut, dilakukan uji elemen *meshing* pada struktur yang pembebanannya mengenai bagian samping kiri panama *chock* dengan sudut 60°. Sedangkan untuk kondisi pembebanan dengan posisi relatif *hawser* atau *shuttle tanker* terhadap FSO, uji elemen *meshing* dilakukan saat panama *chock* dikenai beban *tension* pada  $T = 9618,25$  s untuk *heading* 90° dengan kondisi sistem *tandem offloading* SPM – FSO *light load* – *shuttle tanker full load*.

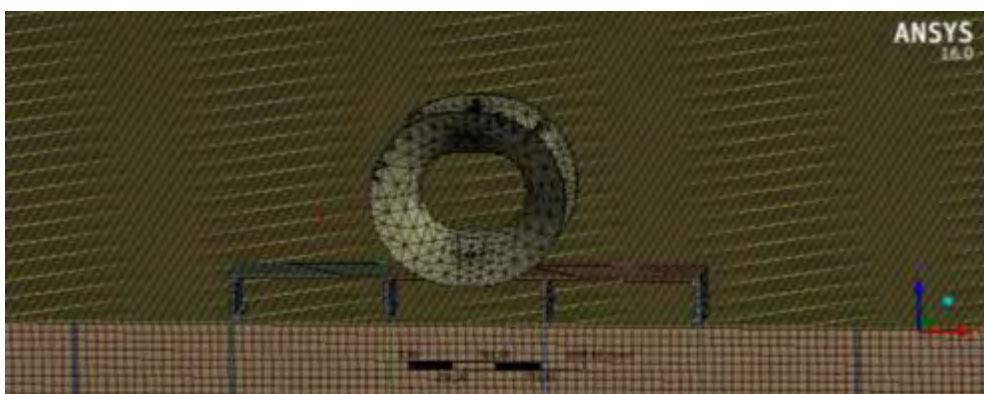
Tabel 4.31 Tabulasi Hasil *Maximum Von Mises* untuk Analisis Sensitifitas *Meshing* pada Konstruksi Panama *Chock* untuk Kondisi Pembebanan dengan Variasi Sudut

| <b>Kondisi</b> | <b>Ukuran (mm)</b> | <b>Nodes</b> | <b>Elemen</b> | <b>Tegangan (MPa)</b> | <b>Koreksi (%)</b> |
|----------------|--------------------|--------------|---------------|-----------------------|--------------------|
| 1              | 108                | 311734       | 46254         | 173,14                | -                  |
| 2              | 98                 | 355912       | 52270         | 187,38                | 8,225              |
| 3              | 88                 | 441400       | 64522         | 199,26                | 6,340              |
| 4              | 78                 | 526300       | 76593         | 209,94                | 5,360              |
| 5              | 68                 | 694145       | 100192        | 217,07                | 3,396              |
| 6              | 58                 | 893451       | 128618        | 221,81                | 2,184              |
| 7              | 57                 | 928021       | 133987        | 223,95                | 0,965              |
| 8              | 56                 | 952433       | 137407        | 224,39                | 0,196              |
| 9              | 55                 | 977912       | 141166        | 224,43                | 0,018              |
| 10             | 54                 | 1017821      | 146812        | 224,46                | 0,013              |



Gambar 4.149 Grafik Sensitivitas Konstruksi Panama *Chock* untuk Kondisi Pembebanan dengan Variasi Sudut

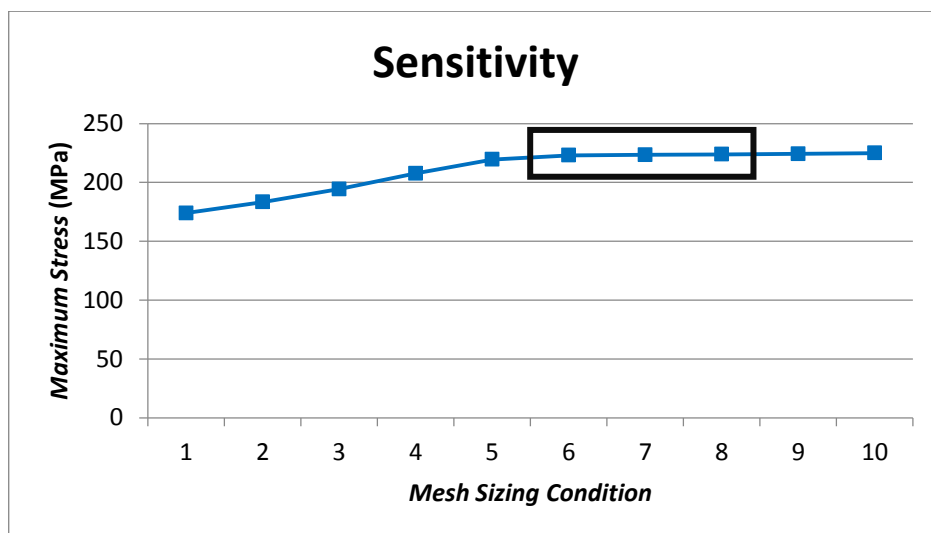
Berdasarkan tabel 4.31 dan grafik pada gambar 4.149 dapat disimpulkan bahwa konstruksi panama *chock* pada FSO Arco Ardjuna untuk kondisi pembebanan dengan variasi sudut efektif dimodelkan pada ukuran *meshing* 55 mm karena hasil perhitungan *error* untuk ukuran *meshing* ini kurang dari 5%. Model elemen *meshing* konstruksi panama *chock* untuk ukuran *meshing* 55 mm dapat dilihat pada Gambar 4.150.



Gambar 4.150 Model Elemen *Meshing* Konstruksi Panama *Chock* pada Kondisi Pembebanan dengan Variasi Sudut untuk Ukuran *Meshing* Sebesar 55 mm

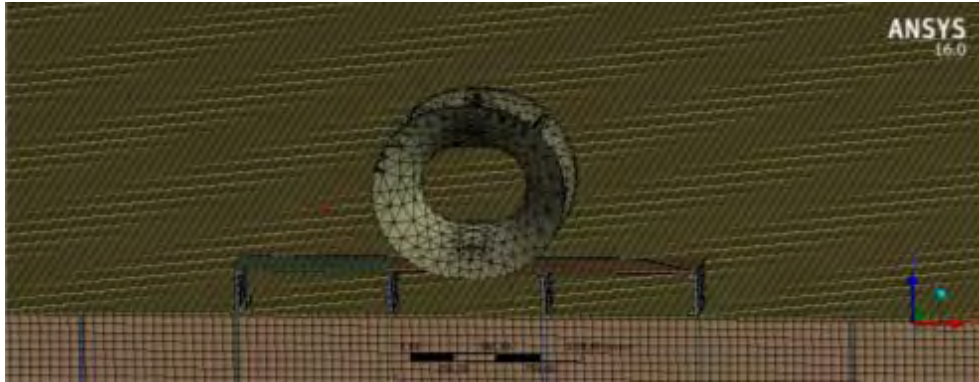
Tabel 4.32 Tabulasi Hasil *Maximum Von Mises* untuk Analisis Sensitifitas *Meshing* pada Konstruksi Panama *Chock* untuk Kondisi Pembebanan dengan Posisi Relatif *Hawser* atau *Shuttle Tanker* terhadap FSO

| Kondisi | Ukuran (mm) | Nodes   | Elemen | Tegangan (MPa) | Koreksi (%) |
|---------|-------------|---------|--------|----------------|-------------|
| 1       | 108         | 311734  | 46254  | 173,88         | -           |
| 2       | 98          | 355912  | 52270  | 183,32         | 5,429       |
| 3       | 88          | 441400  | 64522  | 194,34         | 6,011       |
| 4       | 78          | 526300  | 76593  | 207,66         | 6,854       |
| 5       | 68          | 694145  | 100192 | 219,52         | 5,711       |
| 6       | 58          | 893451  | 128618 | 223            | 1,585       |
| 7       | 57          | 928021  | 133987 | 223,4          | 0,179       |
| 8       | 56          | 952433  | 137407 | 223,85         | 0,201       |
| 9       | 55          | 977912  | 141166 | 224,25         | 0,179       |
| 10      | 54          | 1017821 | 146812 | 224,98         | 0,326       |



Gambar 4.151 Grafik Sensitivitas Konstruksi Panama *Chock* untuk Kondisi Pembebanan dengan Posisi Relatif *Hawser* atau *Shuttle Tanker* terhadap FSO

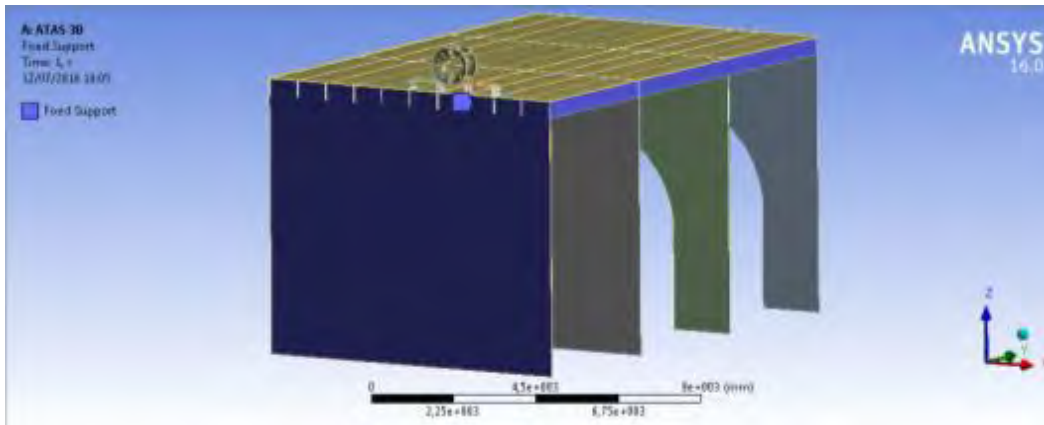
Berdasarkan tabel 4.32 dan grafik pada gambar 4.151 diketahui bahwa konstruksi panama *chock* pada FSO Arco Ardjuna untuk kondisi pembebanan dengan posisi relatif *hawser* atau *shuttle tanker* terhadap FSO efektif dimodelkan pada ukuran *meshing* 57 mm karena hasil perhitungan *error* untuk ukuran *meshing* ini kurang dari 5%. Model elemen *meshing* konstruksi panama *chock* untuk ukuran *meshing* 57 mm dapat dilihat pada Gambar 4.1512.



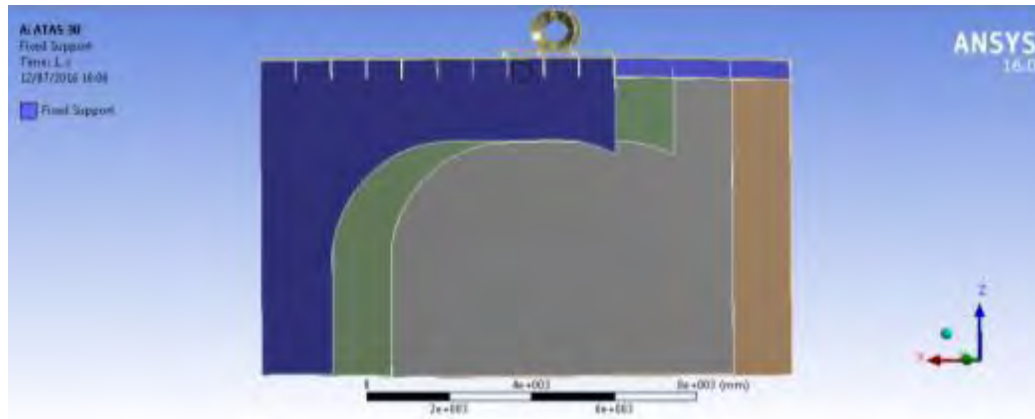
Gambar 4.152 Model Elemen *Meshing* Konstruksi Panama *Chock* pada Kondisi Pembebanan dengan Posisi Relatif *Hawser* atau *Shuttle Tanker* terhadap FSO untuk Ukuran *Meshing* Sebesar 57 mm

#### 4.13 Analisis Tegangan Lokal Konstruksi Panama *Chock*

Sebelum analisis tegangan dan deformasi dilakukan, penentuan letak *constraint* (Gambar 4.153) ditentukan terlebih dahulu. *Constraint* adalah pemilihan bagian struktur yang dianggap *fix* yang bertujuan agar tidak terjadi deformasi. Pada analisis ini, *constraint* terletak pada ujung-ujung atau tepi *deck* sehingga pada bagian struktur tersebut dianggap tetap terhadap gerakan translasi maupun rotasi.



(a)



(b)

Gambar 4.153 Letak *Constraint* atau *Boundary Condition* pada Konstruksi Panama *Chock* yang Ditunjukkan dengan *Deck* Berwarna Biru

Setelah menentukan letak *constraint*, dilakukan analisis tegangan *Von Mises* dan deformasi pada konstruksi panama *chock* dengan mempertimbangkan dua metode pembebanan yaitu dengan variasi sudut dan posisi relatif *hawser* atau *shuttle tanker* terhadap FSO. Analisis tegangan dan deformasi pada konstruksi panama *chock* ini dilakukan sesuai dengan skenario pembebanan yang telah dibahas sebelumnya. Tabel 4.33 dan 4.34 di bawah ini merupakan hasil rangkuman dari analisis tegangan dan deformasi dengan berbagai macam skenario pembebanan.

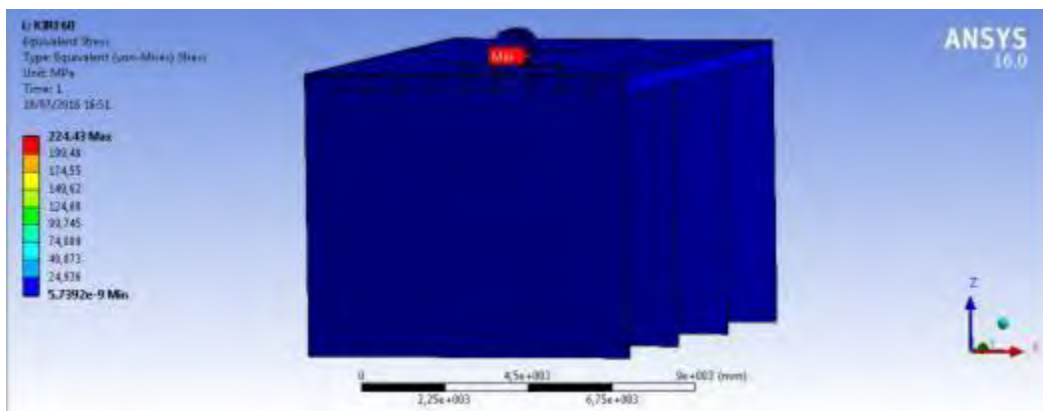
Tabel 4.33 Hasil Analisis Tegangan dan Deformasi Konstruksi Panama *Chock* pada Kondisi Pembebanan dengan Variasi Sudut

| Kondisi Pembebanan | Sudut (°) | <i>Von Mises Stress</i> (Mpa) | Deformasi (mm) |
|--------------------|-----------|-------------------------------|----------------|
| Atas               | 15        | 175,86                        | 2,6016         |
|                    | 30        | 218,78                        | 3,4878         |
|                    | 45        | 222,74                        | 3,3362         |
|                    | 60        | 185,95                        | 2,5164         |
| Samping Kanan      | 15        | 141,57                        | 1,2433         |
|                    | 30        | 196,43                        | 1,2144         |
|                    | 45        | 220,13                        | 1,2239         |
|                    | 60        | 224,22                        | 1,1256         |
| Samping Kiri       | 15        | 141,72                        | 1,0737         |
|                    | 30        | 196,56                        | 0,89046        |
|                    | 45        | 220,62                        | 0,90829        |
|                    | 60        | 224,43                        | 0,76328        |

Tabel 4.34 Hasil Analisis Tegangan dan Deformasi Konstruksi Panama *Chock* pada Kondisi Pembebanan dengan Posisi Relatif *Hawser* atau *Shuttle Tanker* terhadap FSO

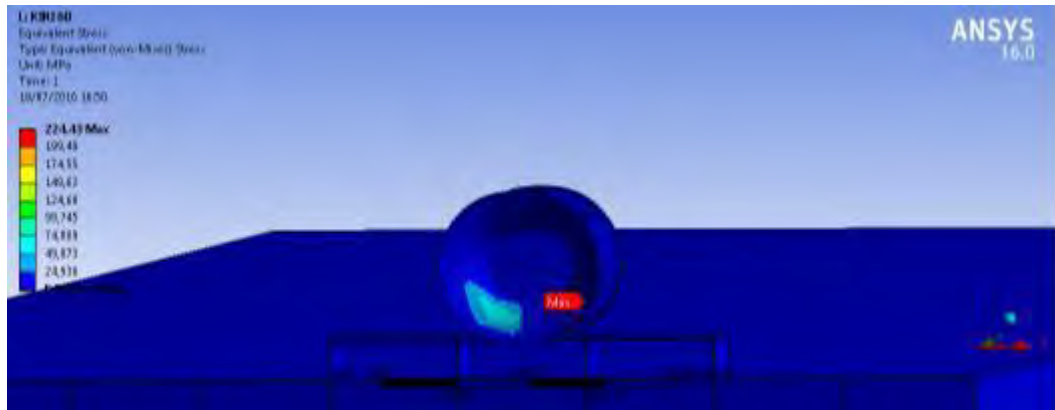
| Kondisi  | Heading (°) | Time (s) | Von Mises Stress (Mpa) | Deformasi (mm) | Time (s) | Von Mises Stress (Mpa) | Deformasi (mm) |
|--|-------------|----------|------------------------|----------------|----------|------------------------|----------------|
| Sistem Tandem Offloading SPM – FSO Full Load – Shuttle Tanker Light Load | 0           | 685,5    | 0,8045                 | 0,01205        | 5900     | 26,923                 | 0,40272        |
|  | 45          | 274,25   | 0,1816                 | 0,00272        | 499      | 170,31                 | 2,4778         |
|  | 90          | 94       | 0,04806                | 0,0000719      | 95,75    | 28,029                 | 0,4181         |
|  | 180         | 5085     | 0,3716                 | 0,00556        | 10268,75 | 3,8884                 | 0,0582         |
| Sistem Tandem Offloading SPM – FSO Light Load – Shuttle Tanker Full Load | 0           | 881,75   | 0,1627                 | 0,00244        | 991,25   | 206,38                 | 3,0465         |
|  | 45          | 176,75   | 4,1351                 | 0,06174        | 167      | 3,0659                 | 0,0457         |
|  | 90          | 9626,5   | 220,13                 | 3,2804         | 9618,25  | 223,4                  | 3,3129         |
|  | 180         | 5083,5   | 213,65                 | 3,1986         | 4058,25  | 152,13                 | 2,2705         |

Dari tabel di atas dapat dilihat bahwa untuk kondisi pembebanan dengan variasi sudut, tegangan tertinggi dan deformasi yang terjadi pada konstruksi panama *chock* berada ketika pembebanan mengenai struktur panama *chock* bagian samping kiri dengan sudut posisi *hawser* terhadap panama *chock* sebesar 60°. Sedangkan tegangan tertinggi dan deformasi yang terjadi ketika pembebanan dengan posisi relatif *hawser* atau *shuttle tanker* terhadap FSO adalah pada heading 90° dengan T = 9618,25 s saat kondisi sistem *tandem offloading* SPM – FSO *light load* – *shuttle tanker full load*. Untuk penjabaran hasil tegangan tertinggi dan deformasi yang terjadi dikedua kondisi tersebut diuraikan pada Gambar 4.154 – 4.161.

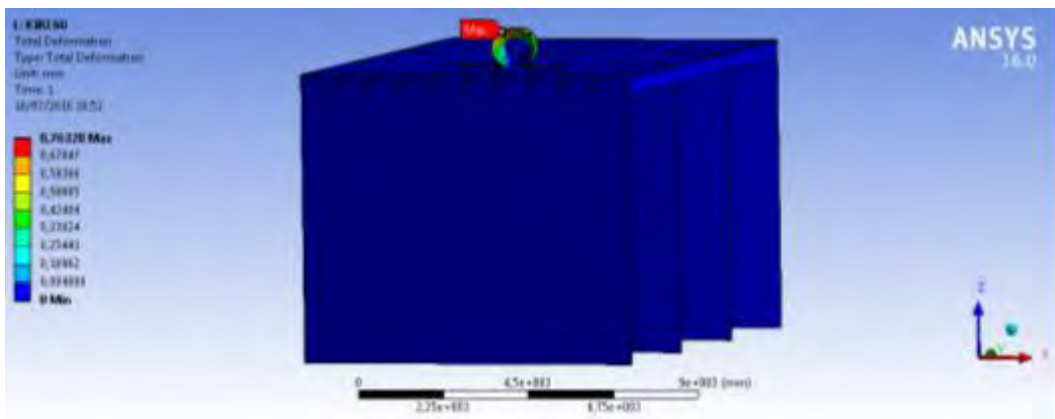


Gambar 4.154 Hasil *Stress* Maksimum Konstruksi Panama *Chock* untuk Pembebanan dengan Variasi Sudut Sebesar 224,43 MPa

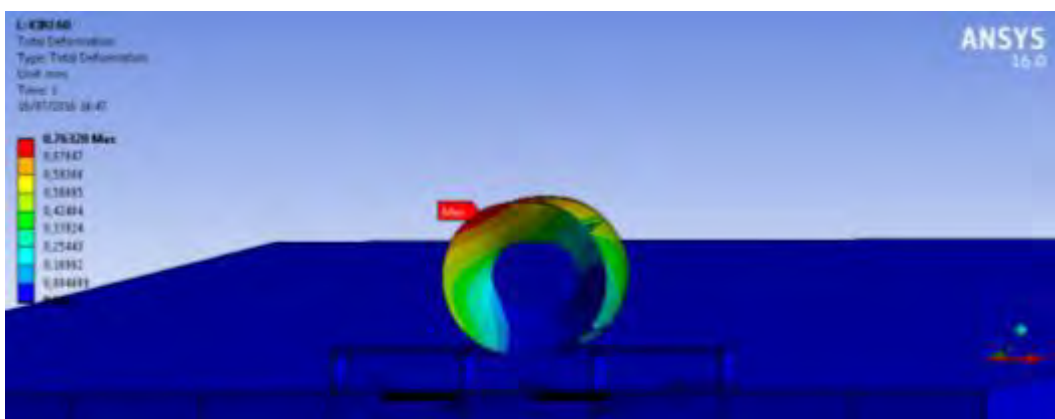




Gambar 4.155 Detail dari Hasil *Stress* Maksimum Konstruksi Panama *Check* untuk Pembebanan dengan Variasi Sudut Sebesar 224,43 MPa



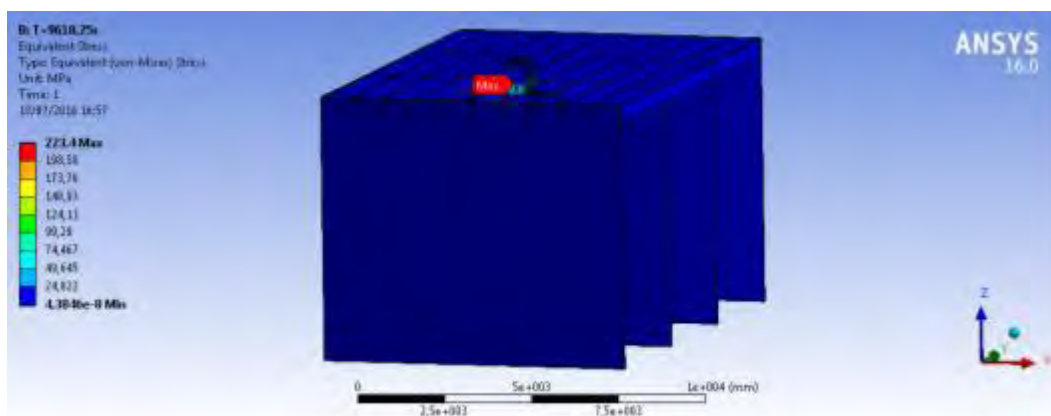
Gambar 4.156 Hasil Deformasi Konstruksi Panama *Check* untuk Pembebanan dengan Variasi Sudut Sebesar 0,76328 mm



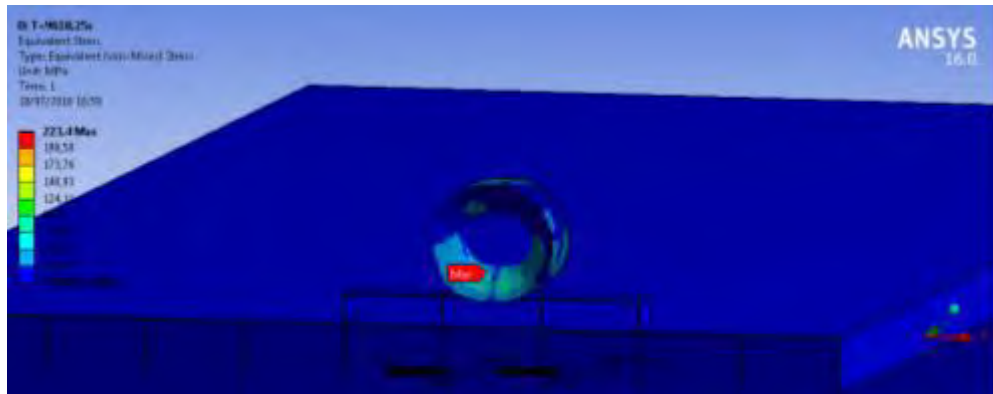
Gambar 4.157 Detail dari Hasil Deformasi Konstruksi Panama *Check* untuk Pembebanan dengan Variasi Sudut Sebesar 0,76328 mm

Hasil *running* konstruksi panama *chock* dengan pembebanan variasi sudut pada Ansys Mechanical menunjukkan tegangan maksimum terjadi pada bagian bawah struktur panama *chock*. Berdasarkan *meshing* dan pembebanan yang dilakukan diperoleh hasil dari tegangan maksimum sebesar 224,43 MPa. Selain itu, beban yang mengenai konstruksi panama *chock* juga mengakibatkan terjadinya deformasi pada struktur tersebut. Deformasi merupakan perubahan bentuk pada struktur akibat beban yang mengenainya. Nilai deformasi yang terjadi pada konstruksi panama *chock* adalah 0,7633 mm yang terletak pada bagian atas struktur panama *chock*.

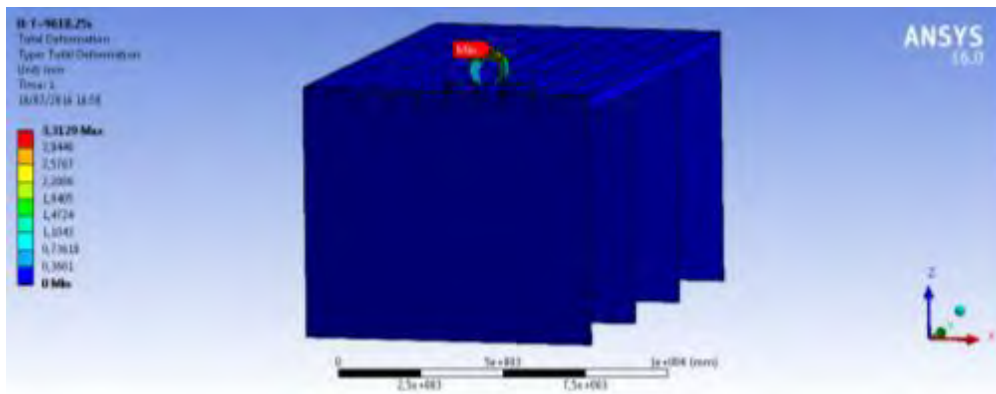
Sedangkan untuk hasil *running* konstruksi panama *chock* dengan pembebanan posisi relatif *hawser* atau *shuttle tanker* terhadap FSO pada Ansys Mechanical, tempat terjadinya tegangan maksimum dan deformasi sama dengan hasil pembebanan variasi sudut yaitu bagian bawah struktur panama *chock* untuk tegangan maksimum dan bagian atas struktur panama *chock* untuk deformasi. Berdasarkan *meshing* dan pembebanan yang dilakukan diperoleh hasil dari tegangan maksimum sebesar 223,4 MPa. Nilai deformasi yang terjadi pada konstruksi panama *chock* adalah 3,3129 mm. Untuk hasil *running* tegangan maksimum dan deformasi pada Ansys Mechanical dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



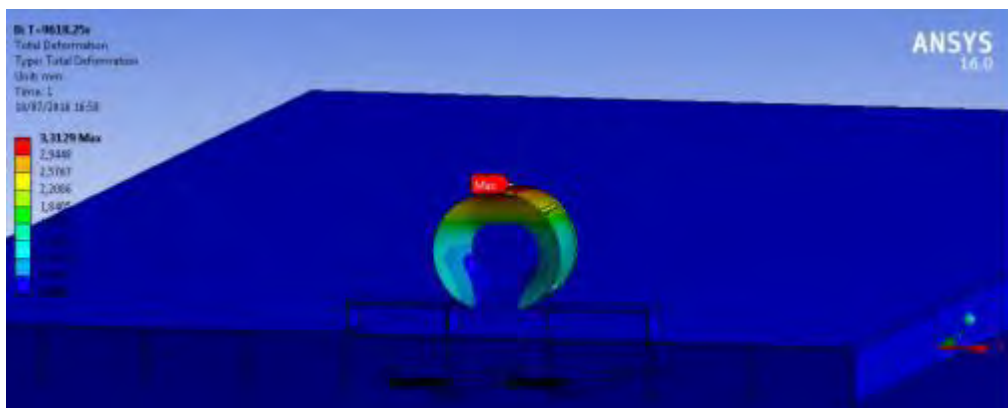
Gambar 4.158 Hasil *Stress* Maksimum Konstruksi Panama *Chock* untuk Pembebanan dengan Posisi Relatif *Hawser* atau *Shuttle Tanker* terhadap FSO Sebesar 223,4 MPa



Gambar 4.159 Detail dari Hasil *Stress* Maksimum Konstruksi Panama *Chock* untuk Pembebanan dengan Posisi Relatif *Hawser* atau *Shuttle Tanker* terhadap FSO Sebesar 223,4 MPa



Gambar 4.160 Hasil Deformasi Konstruksi Panama *Chock* untuk Pembebanan dengan Posisi Relatif *Hawser* atau *Shuttle Tanker* terhadap FSO Sebesar 3,3129 mm



Gambar 4.161 Detail dari Hasil Deformasi Konstruksi Panama *Chock* untuk Pembebanan dengan Posisi Relatif *Hawser* atau *Shuttle Tanker* terhadap FSO Sebesar 3,3129 mm

Menurut ABS “*Safehull-Dynamic Loading Approach for Floating Production, Storage and Offloading (FPSO) Systems*” (2001) struktur dikatakan aman jika tegangan yang terjadi tidak melebihi 90% *yield strength* material yang digunakan. Pada analisis ini material yang digunakan adalah Baja ASTM A36 dengan *yield strength* sebesar 250 MPa, sehingga 90% dari *yield strength* Baja ASTM A36 adalah 225 Mpa. Dapat dilihat dari hasil analisis di atas, tegangan maksimum pada konstruksi panama *chock* tidak melebihi 225 MPa. Sehingga dapat disimpulkan bahwa konstruksi panama *chock* aman beroperasi.

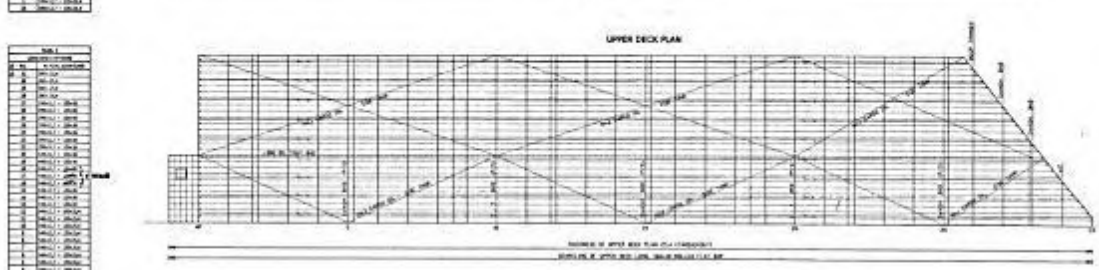
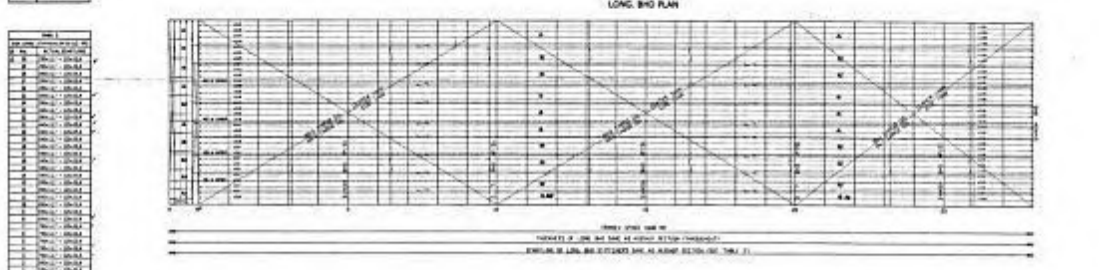
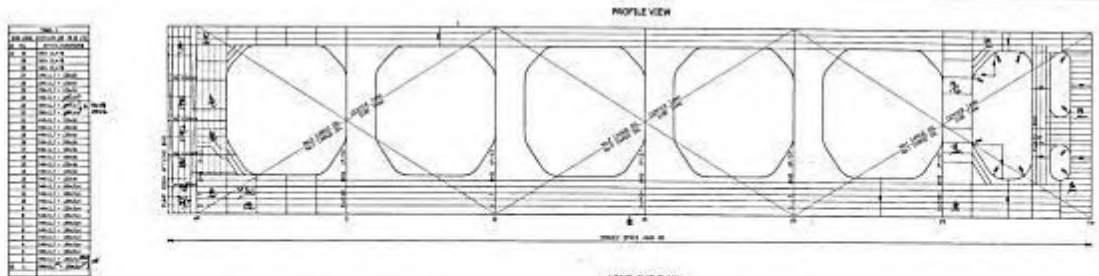
Sedangkan untuk deformasi, batas yang diijinkan menurut ABS “*Shipbuilding and Repair Quality Standard for Hull Structures during Construction*” (2001) yaitu sebesar 6 mm. Hasil deformasi yang didapat dari analisis di atas memiliki nilai yang lebih kecil dibandingkan dengan batas yang diijinkan oleh *codes*, sehingga konstruksi panama *chock* aman untuk beroperasi.

Setelah meninjau hasil dari tegangan dan deformasi yang terjadi pada konstruksi panama *chock* dengan dua kondisi pembebanan yaitu variasi sudut dan posisi relatif *hawser* atau *shuttle tanker* terhadap FSO, dapat diketahui bahwa tegangan pada kondisi pembebanan dengan variasi sudut memiliki nilai yang lebih besar dibanding dengan kondisi posisi relatif *hawser* atau *shuttle tanker* terhadap FSO, akan tetapi masih aman untuk dioperasikan karena masih memenuhi syarat yang ditentukan. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi pembebanan dengan variasi sudut yang menggambarkan kondisi ekstrem saja memenuhi standar yang berlaku apalagi jika dibandingkan dengan kondisi pembebanan posisi relatif *hawser* atau *shuttle tanker* terhadap FSO yang menggambarkan kondisi *real*.

**LAMPIRAN A**  
**Data dan Model Struktur FSO Arco Ardjuna,**  
**SPM 3, Konstruksi Panama *Chock***

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*





| NO. | DESCRIPTION | QTY | UNIT | REMARKS |
|-----|-------------|-----|------|---------|
| 1   | PLATE       | ... | ...  | ...     |
| 2   | ...         | ... | ...  | ...     |
| 3   | ...         | ... | ...  | ...     |
| 4   | ...         | ... | ...  | ...     |
| 5   | ...         | ... | ...  | ...     |
| 6   | ...         | ... | ...  | ...     |
| 7   | ...         | ... | ...  | ...     |
| 8   | ...         | ... | ...  | ...     |
| 9   | ...         | ... | ...  | ...     |
| 10  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 11  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 12  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 13  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 14  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 15  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 16  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 17  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 18  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 19  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 20  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 21  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 22  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 23  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 24  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 25  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 26  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 27  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 28  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 29  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 30  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 31  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 32  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 33  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 34  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 35  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 36  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 37  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 38  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 39  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 40  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 41  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 42  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 43  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 44  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 45  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 46  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 47  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 48  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 49  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 50  | ...         | ... | ...  | ...     |

| NO. | DESCRIPTION | QTY | UNIT | REMARKS |
|-----|-------------|-----|------|---------|
| 1   | ...         | ... | ...  | ...     |
| 2   | ...         | ... | ...  | ...     |
| 3   | ...         | ... | ...  | ...     |
| 4   | ...         | ... | ...  | ...     |
| 5   | ...         | ... | ...  | ...     |
| 6   | ...         | ... | ...  | ...     |
| 7   | ...         | ... | ...  | ...     |
| 8   | ...         | ... | ...  | ...     |
| 9   | ...         | ... | ...  | ...     |
| 10  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 11  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 12  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 13  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 14  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 15  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 16  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 17  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 18  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 19  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 20  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 21  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 22  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 23  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 24  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 25  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 26  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 27  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 28  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 29  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 30  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 31  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 32  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 33  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 34  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 35  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 36  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 37  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 38  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 39  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 40  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 41  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 42  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 43  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 44  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 45  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 46  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 47  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 48  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 49  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 50  | ...         | ... | ...  | ...     |

| NO. | DESCRIPTION | QTY | UNIT | REMARKS |
|-----|-------------|-----|------|---------|
| 1   | ...         | ... | ...  | ...     |
| 2   | ...         | ... | ...  | ...     |
| 3   | ...         | ... | ...  | ...     |
| 4   | ...         | ... | ...  | ...     |
| 5   | ...         | ... | ...  | ...     |
| 6   | ...         | ... | ...  | ...     |
| 7   | ...         | ... | ...  | ...     |
| 8   | ...         | ... | ...  | ...     |
| 9   | ...         | ... | ...  | ...     |
| 10  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 11  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 12  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 13  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 14  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 15  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 16  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 17  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 18  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 19  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 20  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 21  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 22  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 23  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 24  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 25  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 26  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 27  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 28  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 29  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 30  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 31  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 32  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 33  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 34  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 35  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 36  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 37  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 38  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 39  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 40  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 41  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 42  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 43  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 44  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 45  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 46  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 47  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 48  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 49  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 50  | ...         | ... | ...  | ...     |

| NO. | DESCRIPTION | QTY | UNIT | REMARKS |
|-----|-------------|-----|------|---------|
| 1   | ...         | ... | ...  | ...     |
| 2   | ...         | ... | ...  | ...     |
| 3   | ...         | ... | ...  | ...     |
| 4   | ...         | ... | ...  | ...     |
| 5   | ...         | ... | ...  | ...     |
| 6   | ...         | ... | ...  | ...     |
| 7   | ...         | ... | ...  | ...     |
| 8   | ...         | ... | ...  | ...     |
| 9   | ...         | ... | ...  | ...     |
| 10  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 11  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 12  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 13  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 14  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 15  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 16  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 17  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 18  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 19  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 20  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 21  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 22  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 23  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 24  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 25  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 26  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 27  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 28  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 29  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 30  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 31  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 32  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 33  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 34  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 35  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 36  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 37  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 38  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 39  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 40  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 41  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 42  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 43  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 44  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 45  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 46  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 47  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 48  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 49  | ...         | ... | ...  | ...     |
| 50  | ...         | ... | ...  | ...     |

**PRINCIPAL DIMENTION**

|                |          |
|----------------|----------|
| LENGHT (P.P)   | 142,60 M |
| LENGHT (L.W.L) | 142,60 M |
| BREADHT (MLD)  | 48,20 M  |
| DEPHT (MLD)    | 26,50 M  |
| DRAFT (MLD)    | 24,00 M  |

APPROVED  
SUSUTUN  
11/11/2014

| NO. | REVISION | DATE | BY  | REMARKS |
|-----|----------|------|-----|---------|
| 1   | ...      | ...  | ... | ...     |
| 2   | ...      | ...  | ... | ...     |

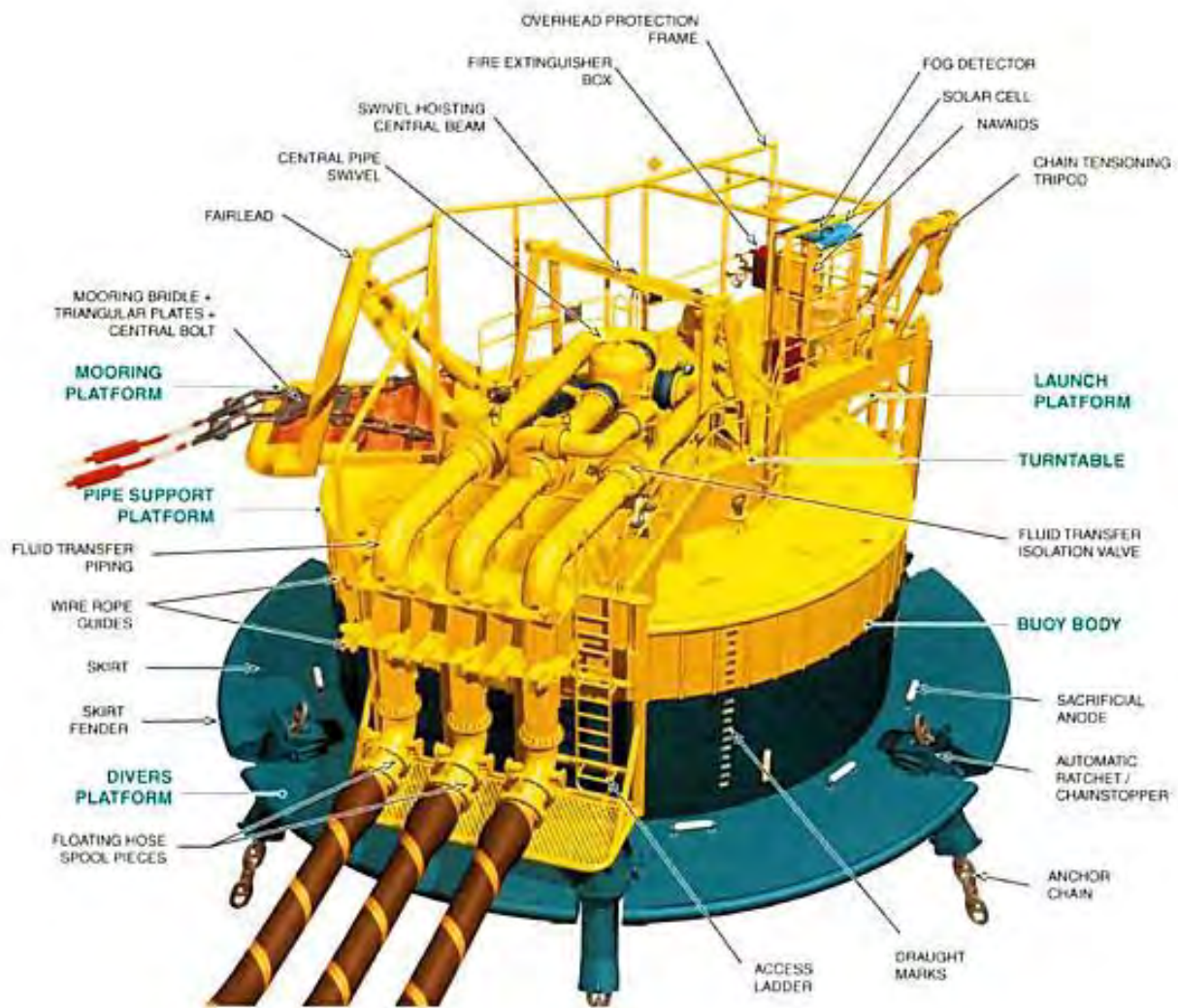
PT. PERTAMINA HULL ENERGY - ONWU  
JAWAH - INDONESIA

PROJECT: "OIL STORAGE BARGE" SECURING

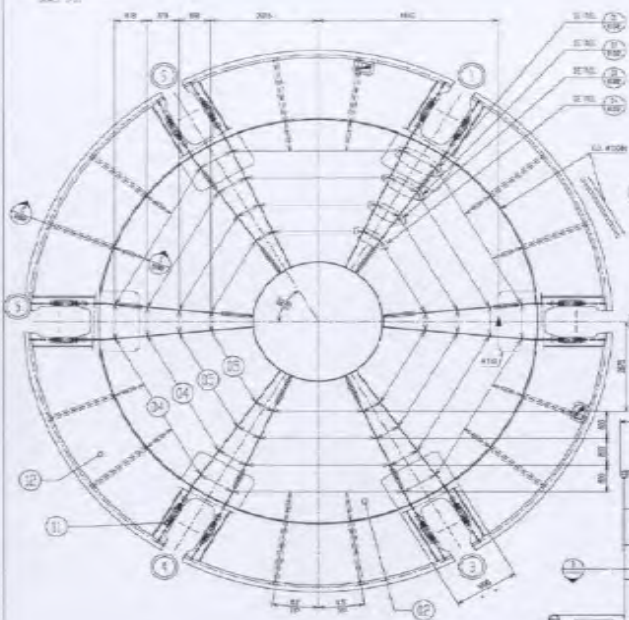
DATE: 11/11/2014

CLASS APPROVAL

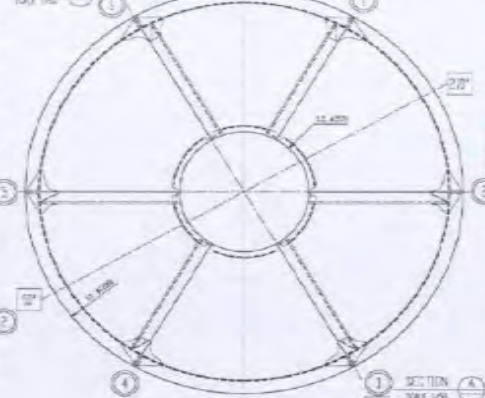




**BOTTOM DECK VIEW**  
SCALE 1/8" = 1'-0"



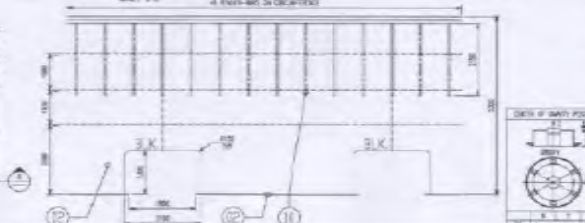
**SECTION A-A**  
SCALE 1/8" = 1'-0"



**TOP DECK VIEW**  
SCALE 1/8" = 1'-0"



**PARTIAL DEVELOPED VIEW OF EXTERNAL RIB**  
SCALE 1/8" = 1'-0"



| Item No. | Description        | Qty   | Unit  | Weight (Lbs) | Cost (\$) |
|----------|--------------------|-------|-------|--------------|-----------|
| 1        | STEEL SHEET PILING | 48.00 | sq ft | 1.5          | 72.00     |
| 2        | STEEL RIBS         | 12.00 | lb    | 1.5          | 18.00     |
| 3        | STEEL STIFFENERS   | 12.00 | lb    | 1.5          | 18.00     |
| 4        | STEEL BRACES       | 12.00 | lb    | 1.5          | 18.00     |
| 5        | STEEL BOLTS        | 12.00 | lb    | 1.5          | 18.00     |

**NOTES:**  
1. ALL DIMENSIONS ARE IN FEET AND INCHES.  
2. ALL DIMENSIONS ARE TO CENTER UNLESS OTHERWISE SPECIFIED.  
3. ALL DIMENSIONS ARE TO BE MAINTAINED THROUGHOUT THE LIFE OF THE STRUCTURE.  
4. ALL DIMENSIONS ARE TO BE MAINTAINED THROUGHOUT THE LIFE OF THE STRUCTURE.  
5. ALL DIMENSIONS ARE TO BE MAINTAINED THROUGHOUT THE LIFE OF THE STRUCTURE.

| Item No. | Description        | Qty   | Unit  | Weight (Lbs) | Cost (\$) |
|----------|--------------------|-------|-------|--------------|-----------|
| 1        | STEEL SHEET PILING | 48.00 | sq ft | 1.5          | 72.00     |
| 2        | STEEL RIBS         | 12.00 | lb    | 1.5          | 18.00     |
| 3        | STEEL STIFFENERS   | 12.00 | lb    | 1.5          | 18.00     |
| 4        | STEEL BRACES       | 12.00 | lb    | 1.5          | 18.00     |
| 5        | STEEL BOLTS        | 12.00 | lb    | 1.5          | 18.00     |

| Item No. | Description        | Qty   | Unit  | Weight (Lbs) | Cost (\$) |
|----------|--------------------|-------|-------|--------------|-----------|
| 1        | STEEL SHEET PILING | 48.00 | sq ft | 1.5          | 72.00     |
| 2        | STEEL RIBS         | 12.00 | lb    | 1.5          | 18.00     |
| 3        | STEEL STIFFENERS   | 12.00 | lb    | 1.5          | 18.00     |
| 4        | STEEL BRACES       | 12.00 | lb    | 1.5          | 18.00     |
| 5        | STEEL BOLTS        | 12.00 | lb    | 1.5          | 18.00     |

| Item No. | Description        | Qty   | Unit  | Weight (Lbs) | Cost (\$) |
|----------|--------------------|-------|-------|--------------|-----------|
| 1        | STEEL SHEET PILING | 48.00 | sq ft | 1.5          | 72.00     |
| 2        | STEEL RIBS         | 12.00 | lb    | 1.5          | 18.00     |
| 3        | STEEL STIFFENERS   | 12.00 | lb    | 1.5          | 18.00     |
| 4        | STEEL BRACES       | 12.00 | lb    | 1.5          | 18.00     |
| 5        | STEEL BOLTS        | 12.00 | lb    | 1.5          | 18.00     |

| Item No. | Description        | Qty   | Unit  | Weight (Lbs) | Cost (\$) |
|----------|--------------------|-------|-------|--------------|-----------|
| 1        | STEEL SHEET PILING | 48.00 | sq ft | 1.5          | 72.00     |
| 2        | STEEL RIBS         | 12.00 | lb    | 1.5          | 18.00     |
| 3        | STEEL STIFFENERS   | 12.00 | lb    | 1.5          | 18.00     |
| 4        | STEEL BRACES       | 12.00 | lb    | 1.5          | 18.00     |
| 5        | STEEL BOLTS        | 12.00 | lb    | 1.5          | 18.00     |

| Item No. | Description        | Qty   | Unit  | Weight (Lbs) | Cost (\$) |
|----------|--------------------|-------|-------|--------------|-----------|
| 1        | STEEL SHEET PILING | 48.00 | sq ft | 1.5          | 72.00     |
| 2        | STEEL RIBS         | 12.00 | lb    | 1.5          | 18.00     |
| 3        | STEEL STIFFENERS   | 12.00 | lb    | 1.5          | 18.00     |
| 4        | STEEL BRACES       | 12.00 | lb    | 1.5          | 18.00     |
| 5        | STEEL BOLTS        | 12.00 | lb    | 1.5          | 18.00     |

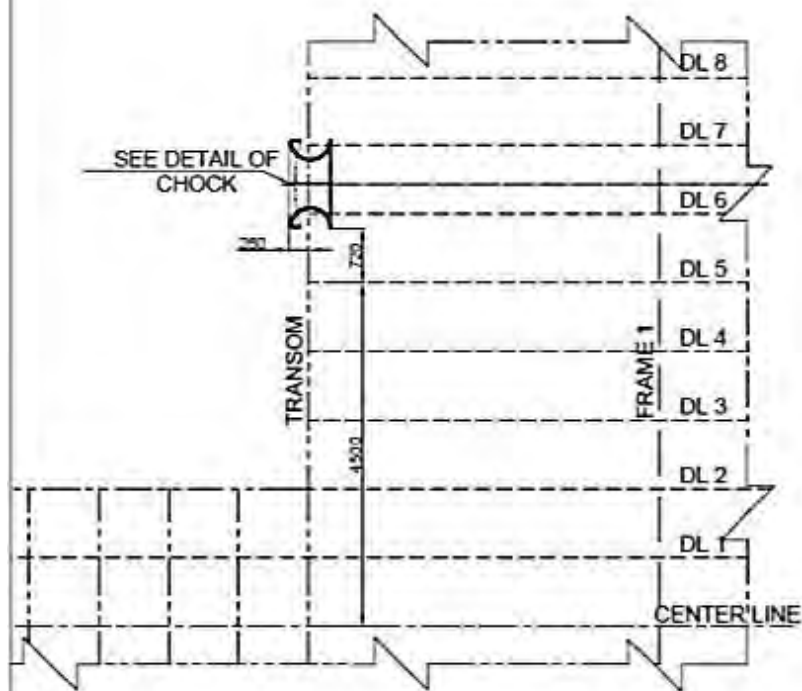
**PERTAMINA**  
P.H.E. G.N.J.

**SINGLE BODY MOORINGS INC.**  
MOORING OFFICE: 1000 WEST 10TH STREET, SUITE 100, NEW YORK, NY 10014  
TELEPHONE: (212) 691-1000  
FAX: (212) 691-1001

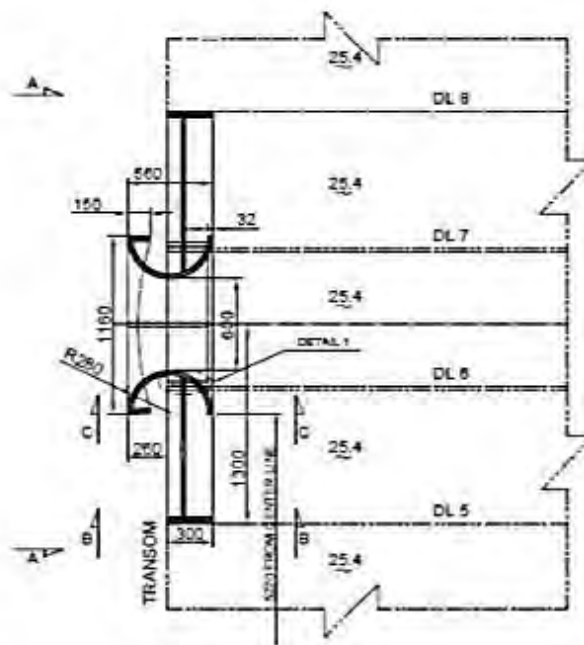
DATE: 07-25-2007  
DRAWN BY: J.S.P.  
CHECKED BY: J.S.P.  
SCALE: AS SHOWN

PROJECT NO.: 07-25-2007  
DRAWING NO.: 07-25-2007  
SCALE: AS SHOWN

### PLAN VIEW



### DETAIL OF CHOCK SCALE 1:25



NOTE  
This drawing and the design it shows are the property of PT CITRA MAS. It is hereby agreed that no part of this drawing shall be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording, or by any information storage and retrieval system, without the written consent of the owner.

| NO | REVISION               | DATE | BY           | CHK          |
|----|------------------------|------|--------------|--------------|
| 1  | ISSUE FOR CONSTRUCTION | 2019 | PT CITRA MAS | PT CITRA MAS |

| CONTRACT NO. | ST/LOT | MC NO. | SC/04B-F1-L210 | MCC NO. |
|--------------|--------|--------|----------------|---------|
| A            | 01-01  | 01     | 01             | 01      |
| A            | 01-02  | 02     | 02             | 02      |
| A            | 01-03  | 03     | 03             | 03      |
| A            | 01-04  | 04     | 04             | 04      |
| A            | 01-05  | 05     | 05             | 05      |

PROJECT TITLE: ENGINEERING MODIFICATION DESIGN FOR AA FSI/CHY DOCK

CONSULTANT: **PT CITRA MAS**

TITLE: **MOORING CHOCK DESIGN OF AFT. TANDEM MOORING ARCO ARDJUNA**

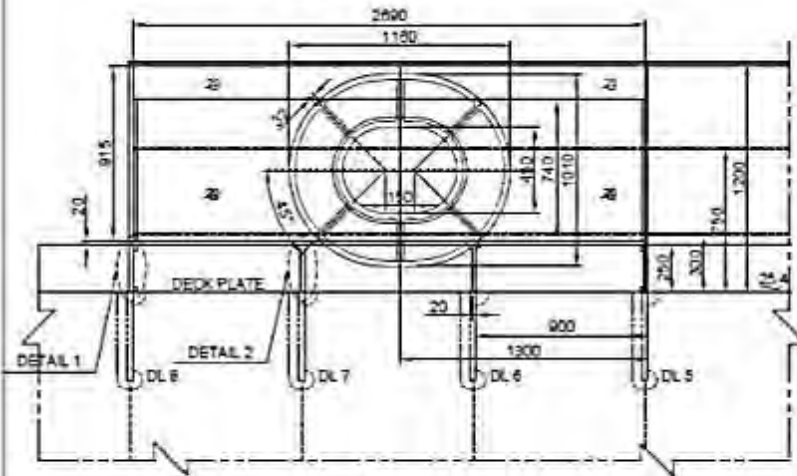
SCALE: 1:25

DESIGNED BY: PT-CITRA-MAS

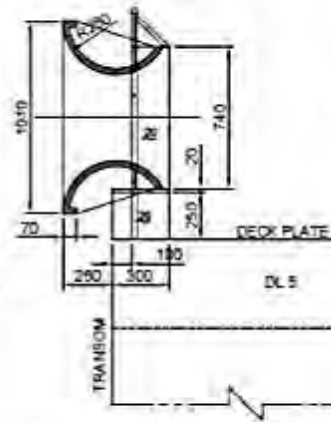




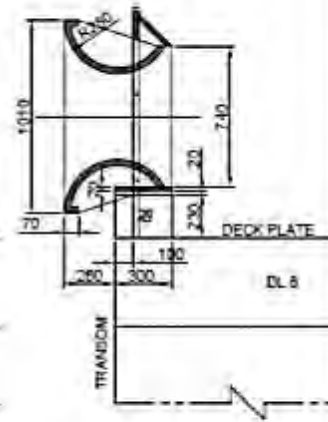
SECTION "A-A"



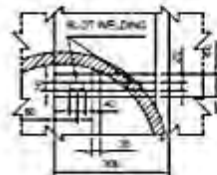
SECTION "B-B"



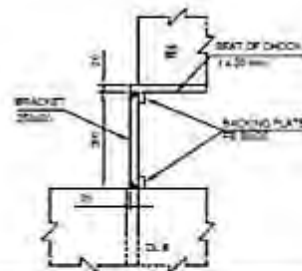
SECTION "C-C"



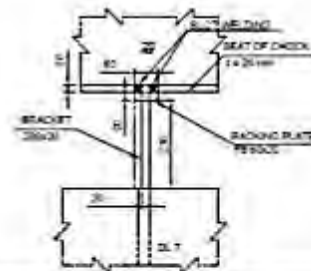
DETAIL 1  
SCALE 1:10



DETAIL 2  
SCALE 1:10



DETAIL 3  
SCALE 1:10



The drawing and the design of mooring chock are the property of PT Citra Max. It is not to be used for any other purpose without the written consent of PT Citra Max. All dimensions are in millimeters unless otherwise specified. All dimensions are to be maintained unless otherwise specified. All dimensions are to be maintained unless otherwise specified. All dimensions are to be maintained unless otherwise specified.

NOTES:

| CONTRACT NO. ETC-078 |                        | WO NO. 80-06-11-215 |    | WOC NO. |          |
|----------------------|------------------------|---------------------|----|---------|----------|
| NO.                  | REVISION               | DATE                | BY | CHKD.   | APPROVED |
| 1                    | Issue for construction |                     |    |         |          |
| 2                    |                        |                     |    |         |          |
| 3                    |                        |                     |    |         |          |
| 4                    |                        |                     |    |         |          |
| 5                    |                        |                     |    |         |          |
| 6                    |                        |                     |    |         |          |
| 7                    |                        |                     |    |         |          |
| 8                    |                        |                     |    |         |          |
| 9                    |                        |                     |    |         |          |
| 10                   |                        |                     |    |         |          |

PROJECT TITLE: ENGINEERING MODIFICATION DESIGN FOR AFT TANDER DOCK SHEET 1 OF 2

**PERTAMINA**  
PHE O&H

CONSULTANT:  
**PT CITRA MAX**

TITLE: MOORING CHOCK DESIGN OF AFT TANDER MOORING ARCO ARDJUNA

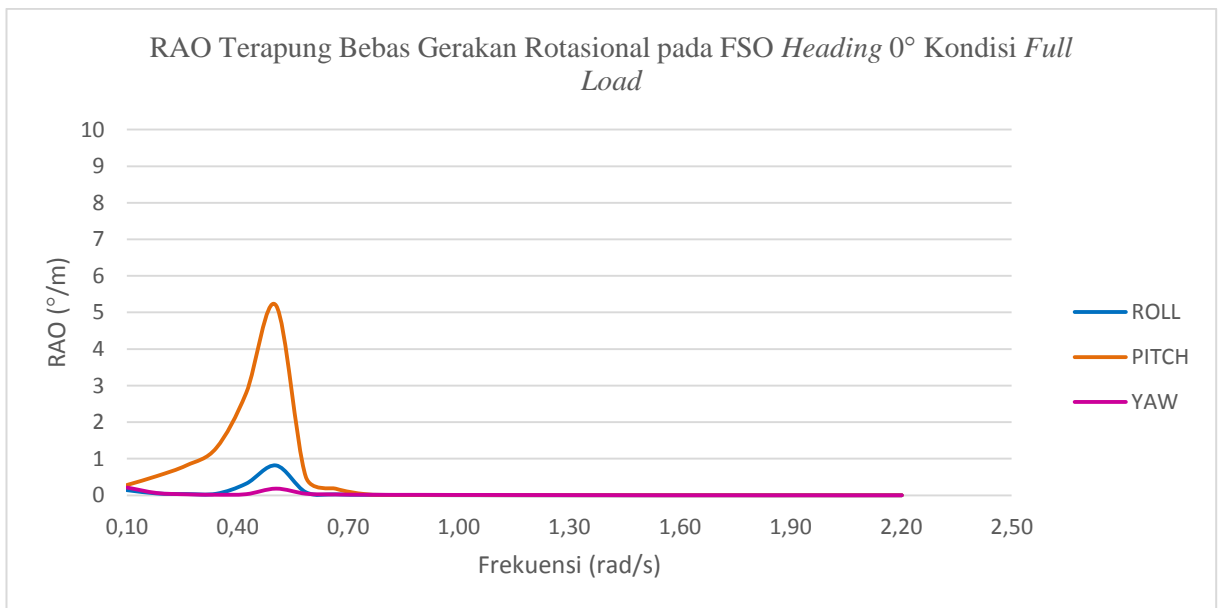
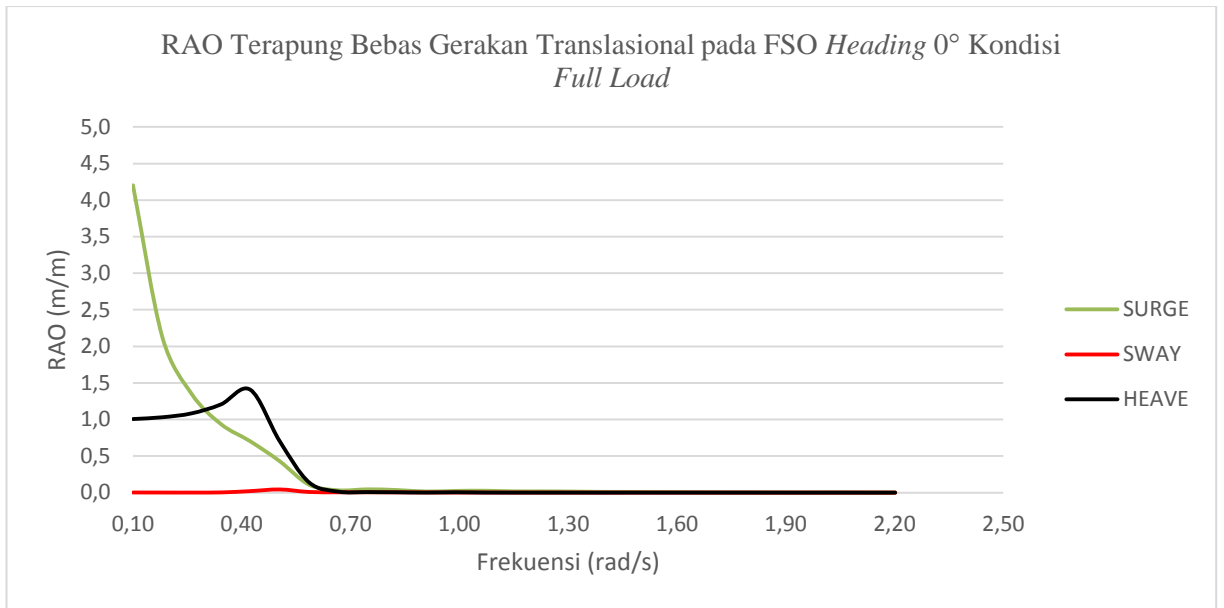
SCALE: 1:10  
DRAWING NO: CT-MAC-CKK-208

## **LAMPIRAN B**

***Response Amplitude Operator (RAO) pada  
FSO Arco Ardjuna, SPM 3 dan Shuttle  
Tanker 85000 DWT saat Kondisi Terapung  
Bebas (Free Floating)***

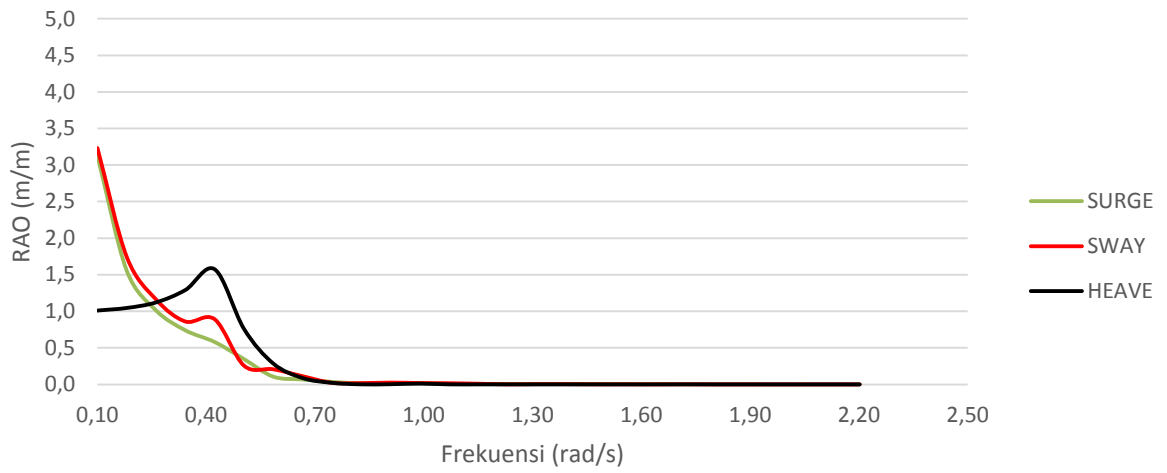
*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

**a. Response Amplitude Operator (RAO) Terapung Bebas (*Free Floating*) pada FSO Arco Ardjuna saat Kondisi *Full Load***

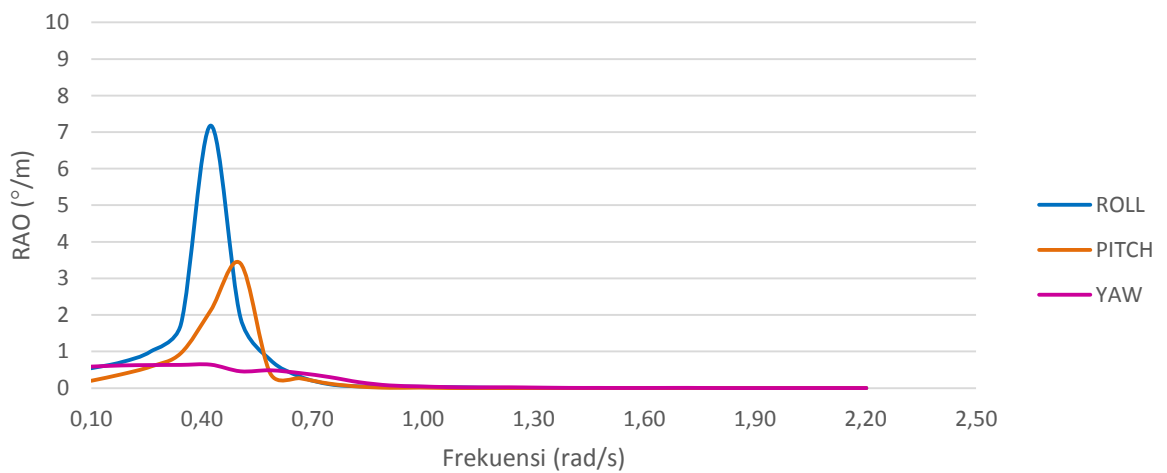




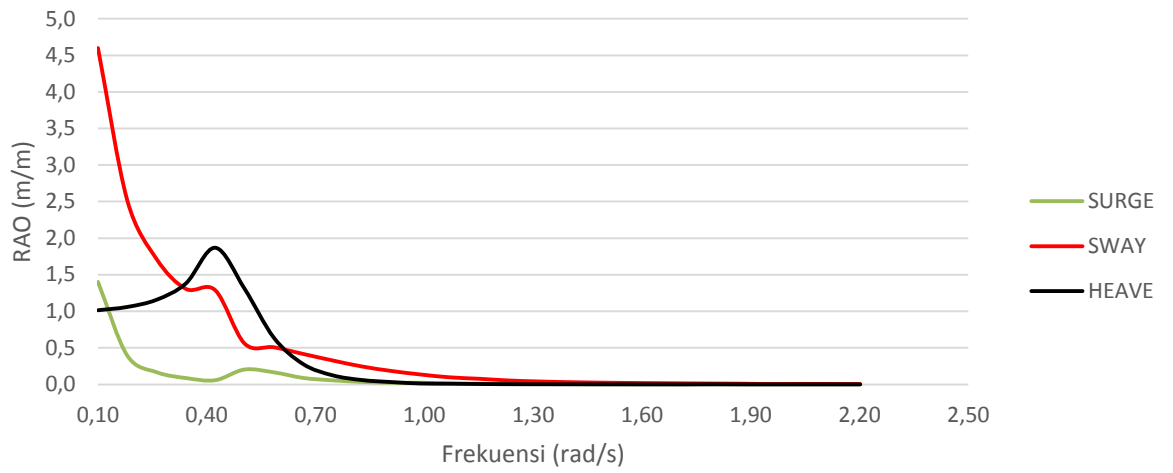
RAO Terapung Bebas Gerakan Translasional pada FSO *Heading 45°* Kondisi *Full Load*



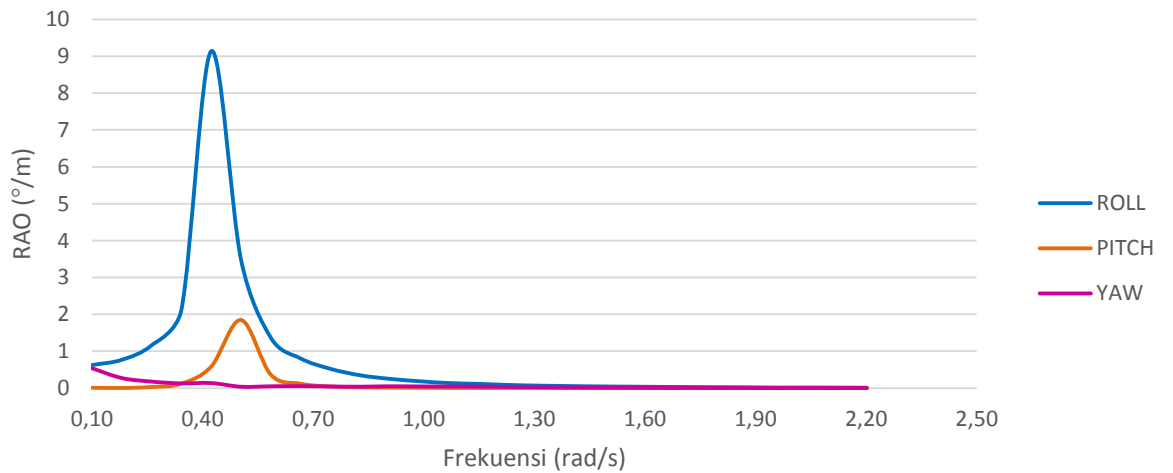
RAO Terapung Bebas Gerakan Rotasional pada FSO *Heading 45°* Kondisi *Full Load*



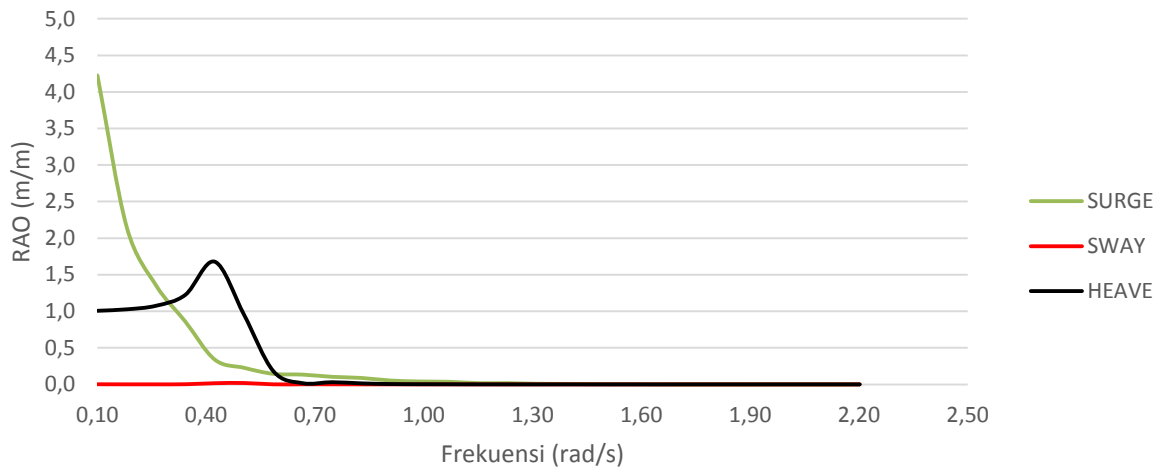
RAO Terapung Bebas Gerakan Translasional pada FSO *Heading 90°* Kondisi *Full Load*



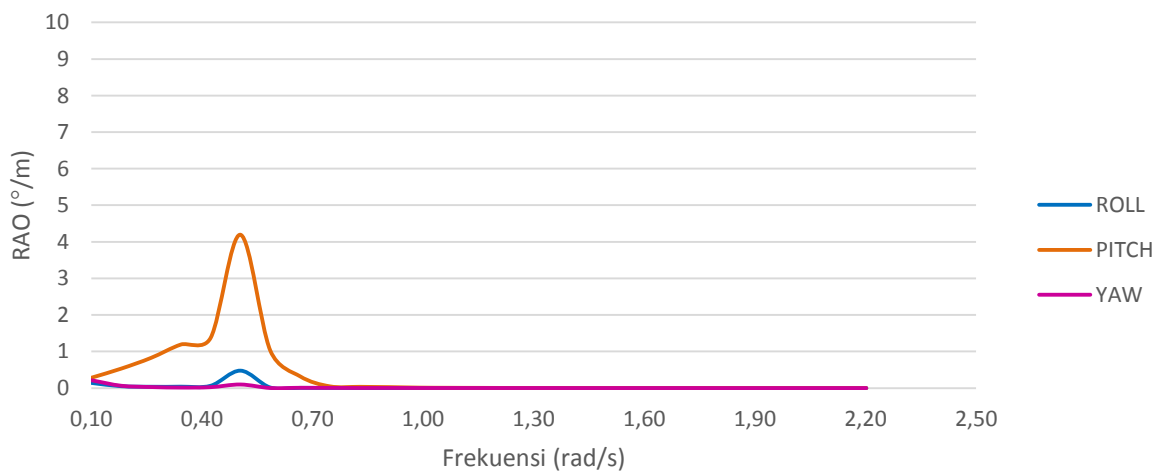
RAO Terapung Bebas Gerakan Rotasional pada FSO *Heading 90°* Kondisi *Full Load*



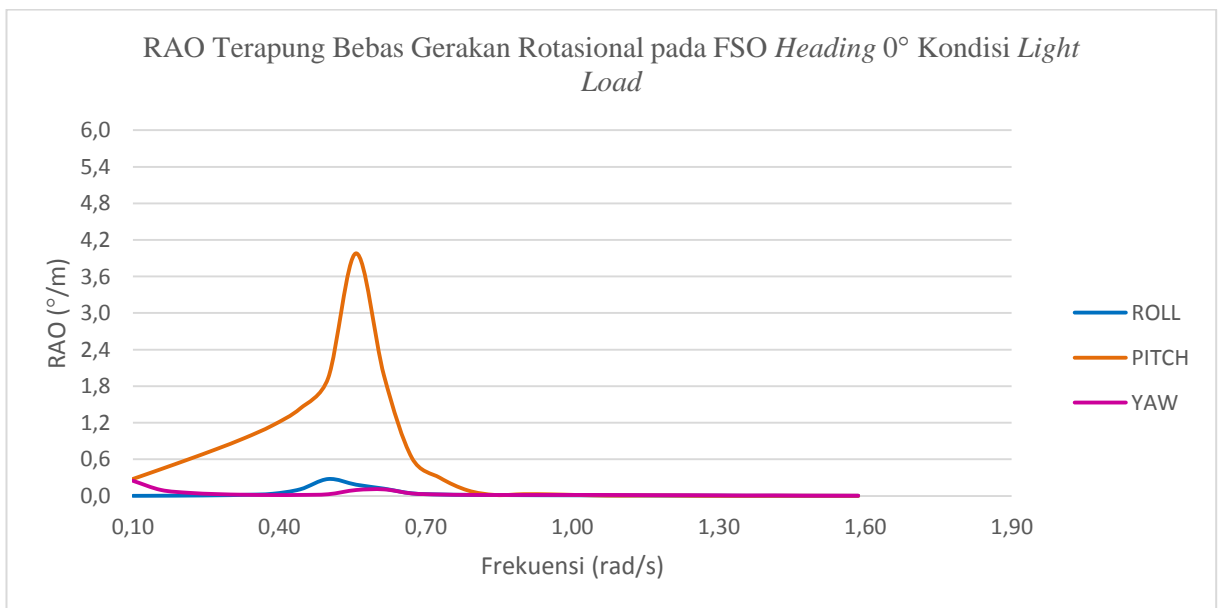
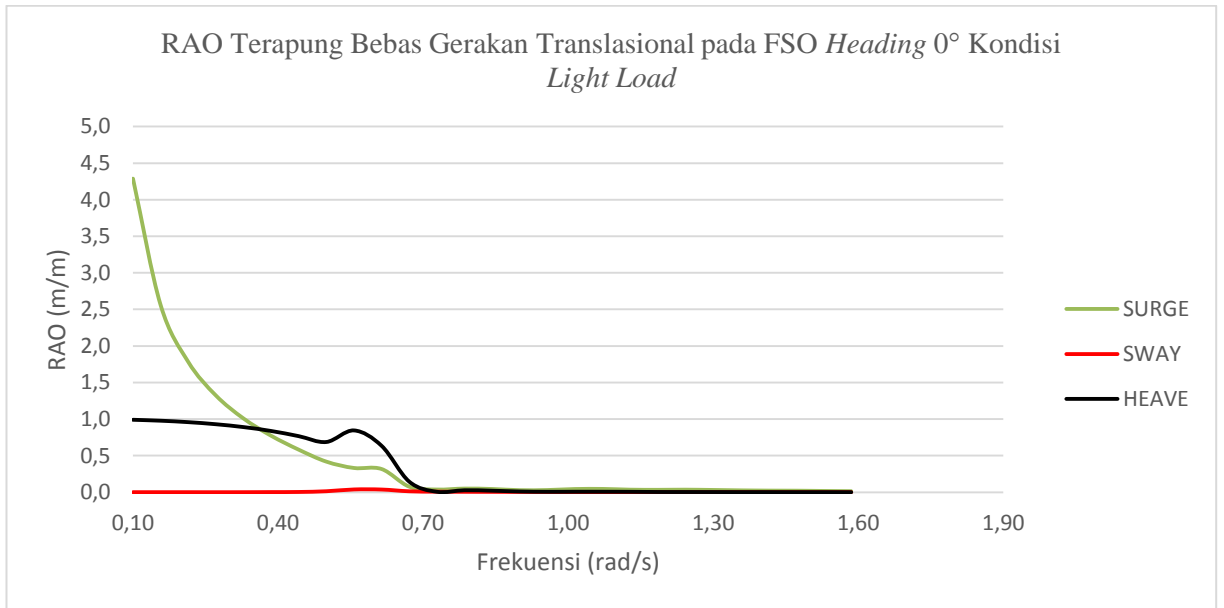
RAO Terapung Bebas Gerakan Translasional pada FSO *Heading* 180° Kondisi *Full Load*



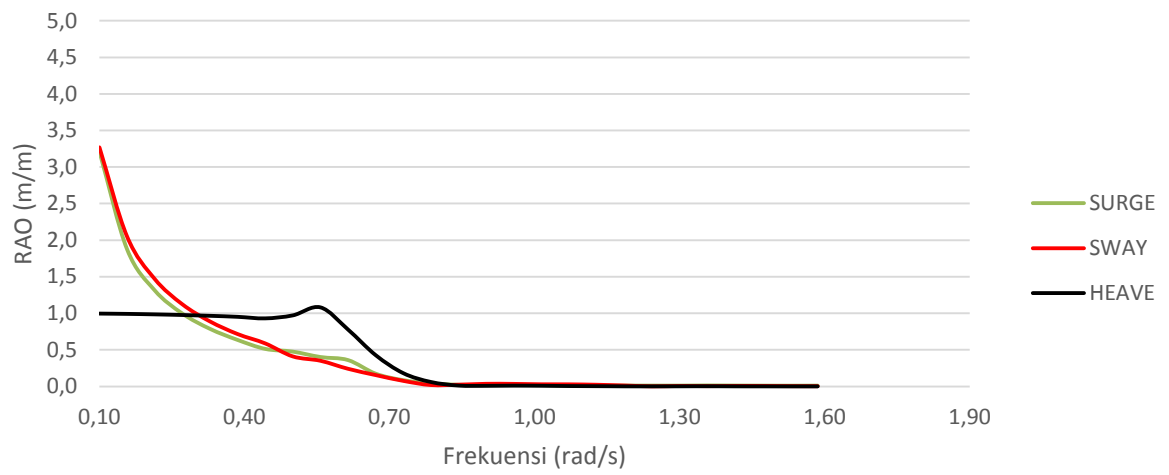
RAO Terapung Bebas Gerakan Rotasional pada FSO *Heading* 180° Kondisi *Full Load*



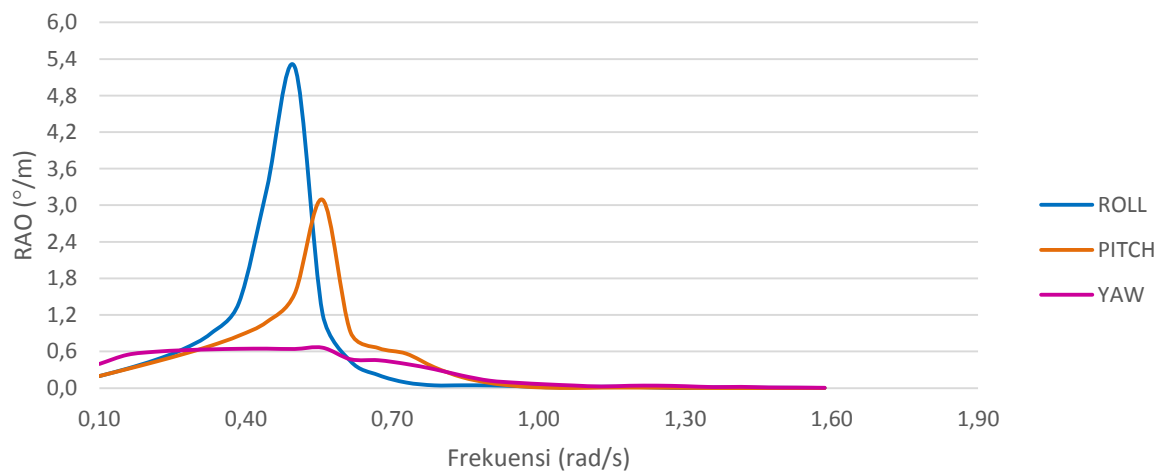
**b. Response Amplitude Operator (RAO) Terapung Bebas (*Free Floating*) pada FSO Arco Ardjuna saat Kondisi *Light Load***



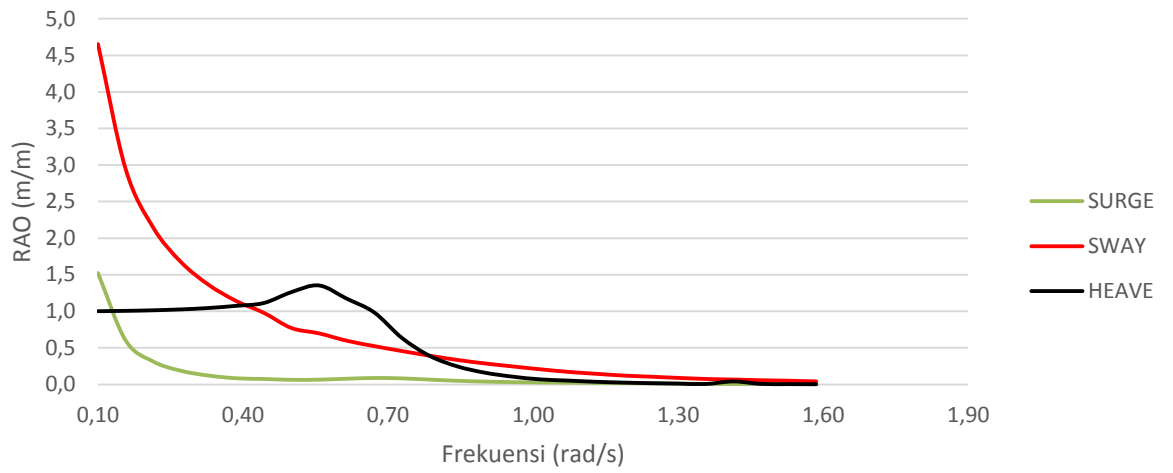
RAO Terapung Bebas Gerakan Translasional pada FSO *Heading 45°* Kondisi *Light Load*



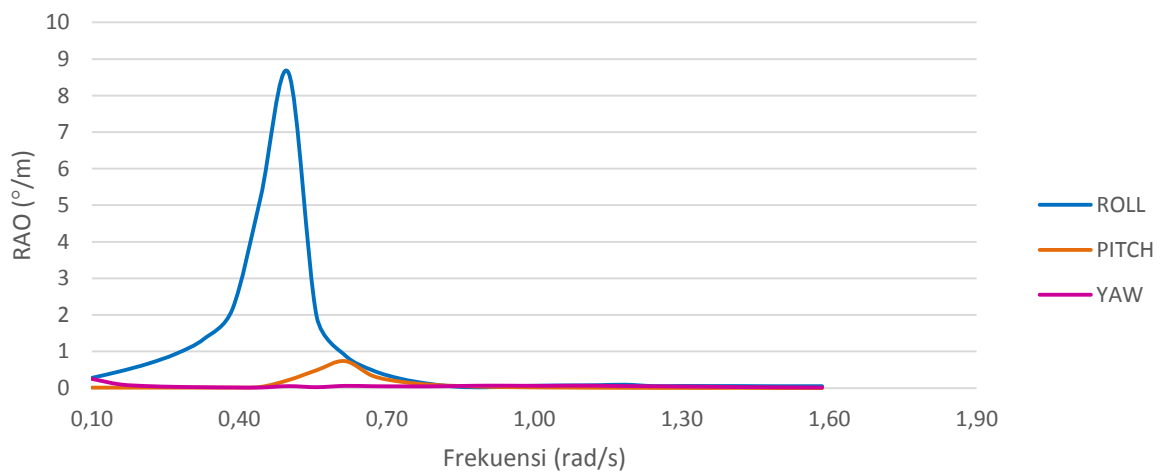
RAO Terapung Bebas Gerakan Rotasional pada FSO *Heading 45°* Kondisi *Light Load*



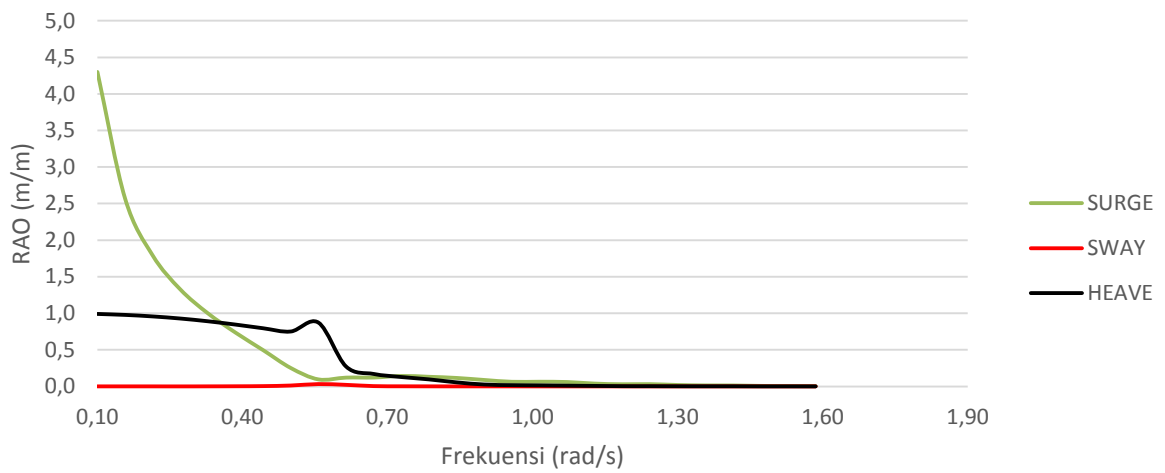
RAO Terapung Bebas Gerakan Translasional pada FSO *Heading 90°* Kondisi *Light Load*



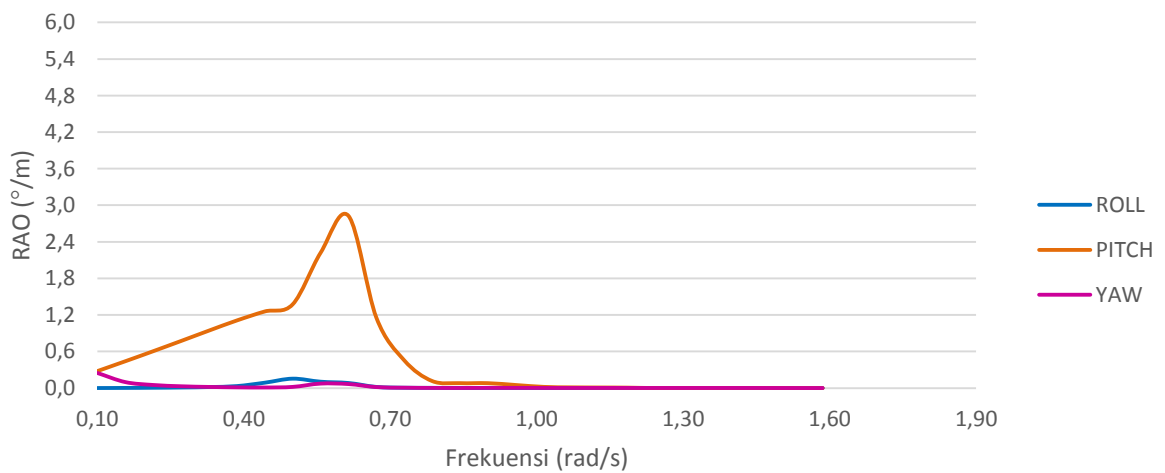
RAO Terapung Bebas Gerakan Rotasional pada FSO *Heading 90°* Kondisi *Light Load*



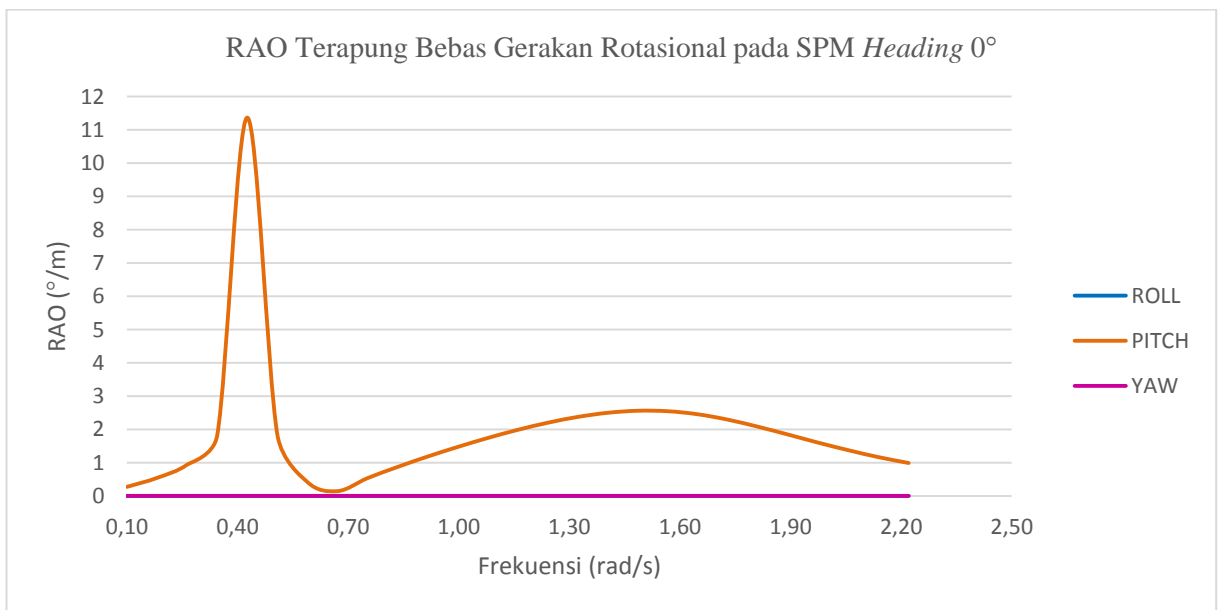
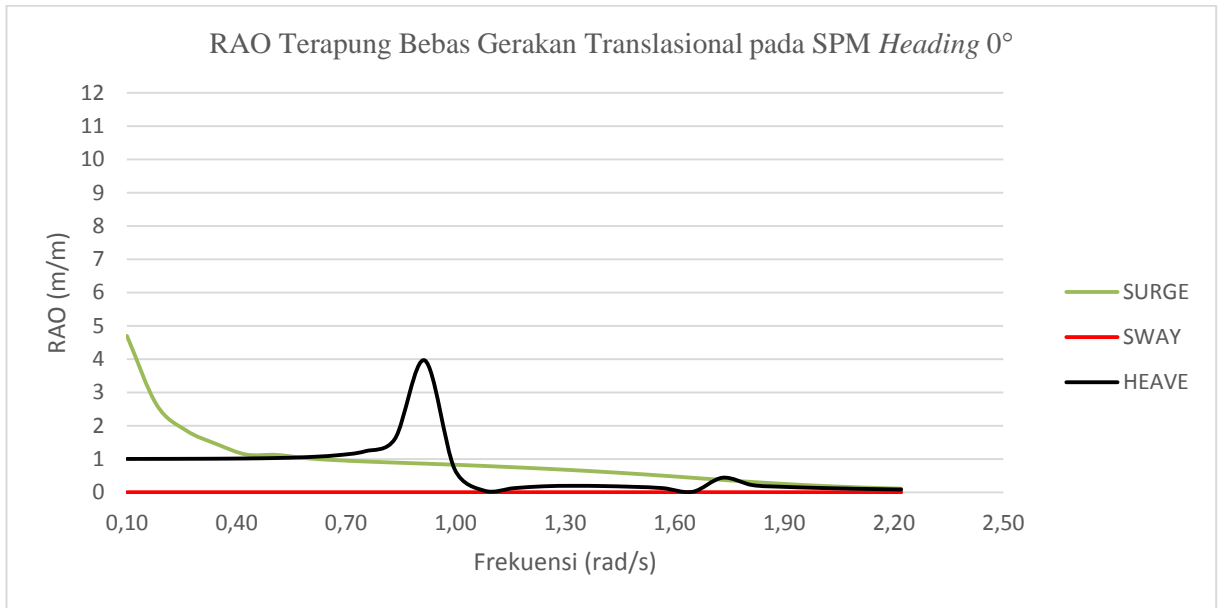
RAO Terapung Bebas Gerakan Translasional pada FSO *Heading* 180° Kondisi *Light Load*



RAO Terapung Bebas Gerakan Rotasional pada FSO *Heading* 180° Kondisi *Light Load*

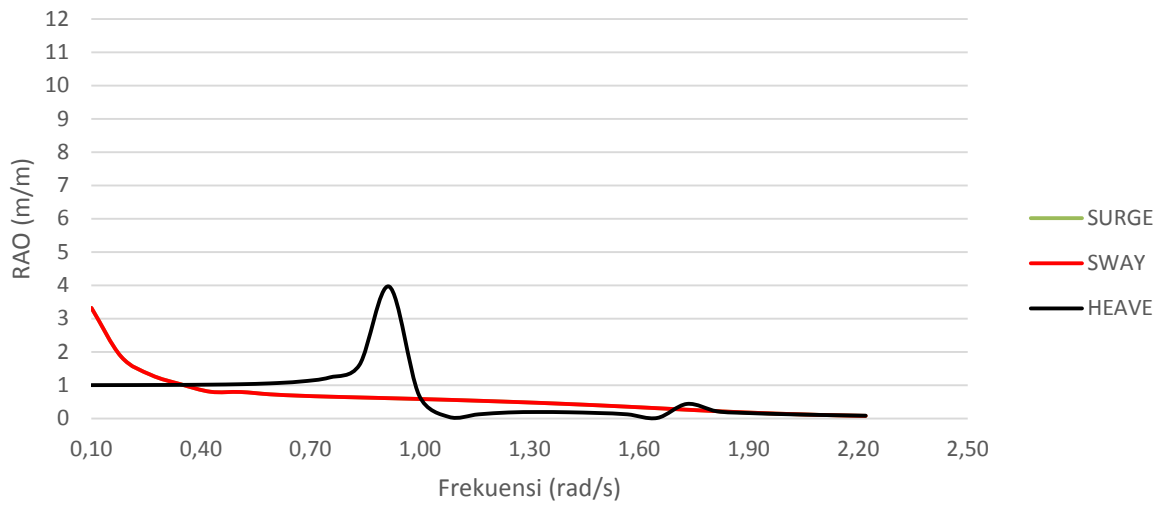


c. **Response Amplitude Operator (RAO) Terapung Bebas (Free Floating) pada SPM 3**

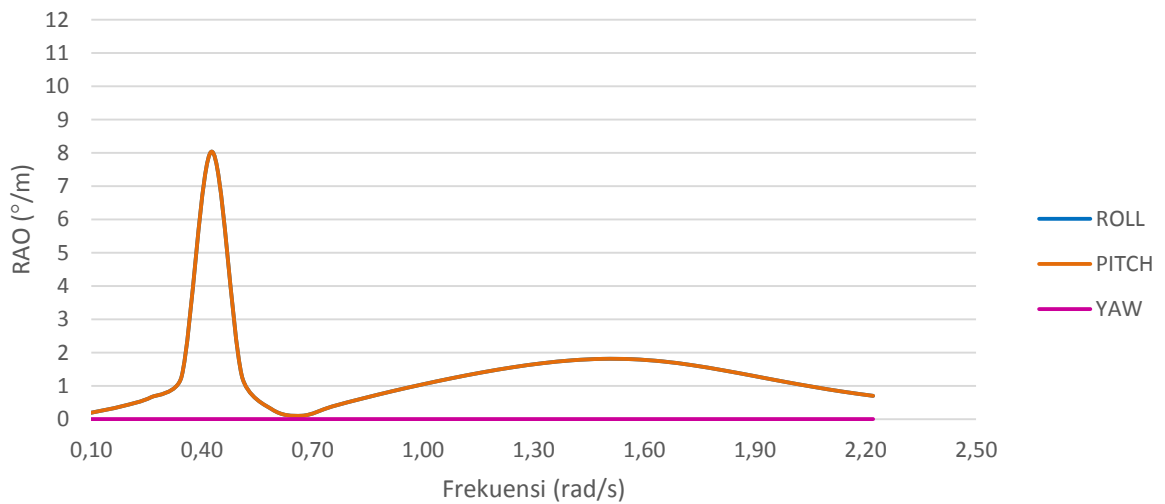




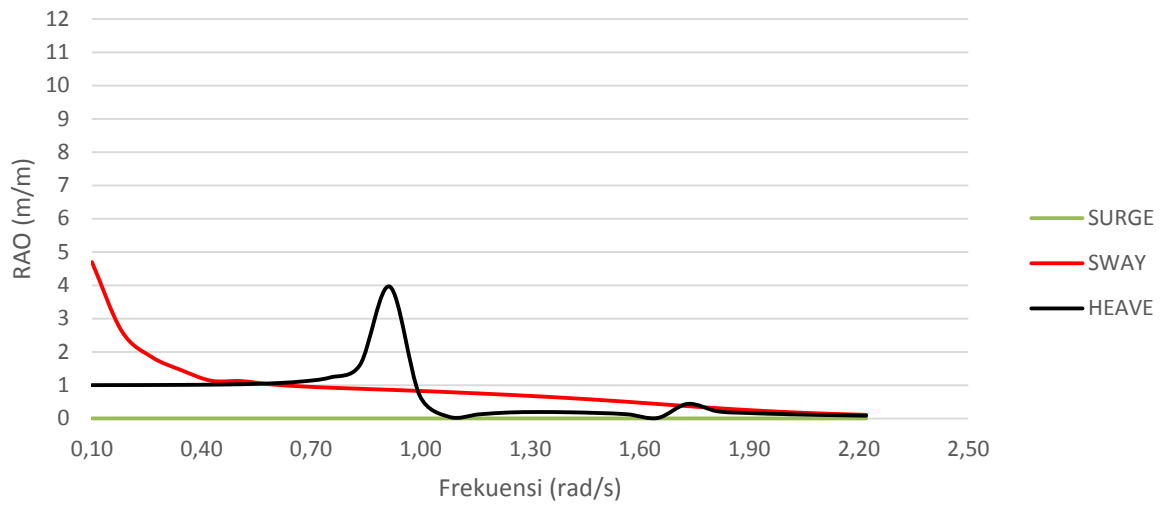
RAO Terapung Bebas Gerakan Translasional pada SPM *Heading* 45°



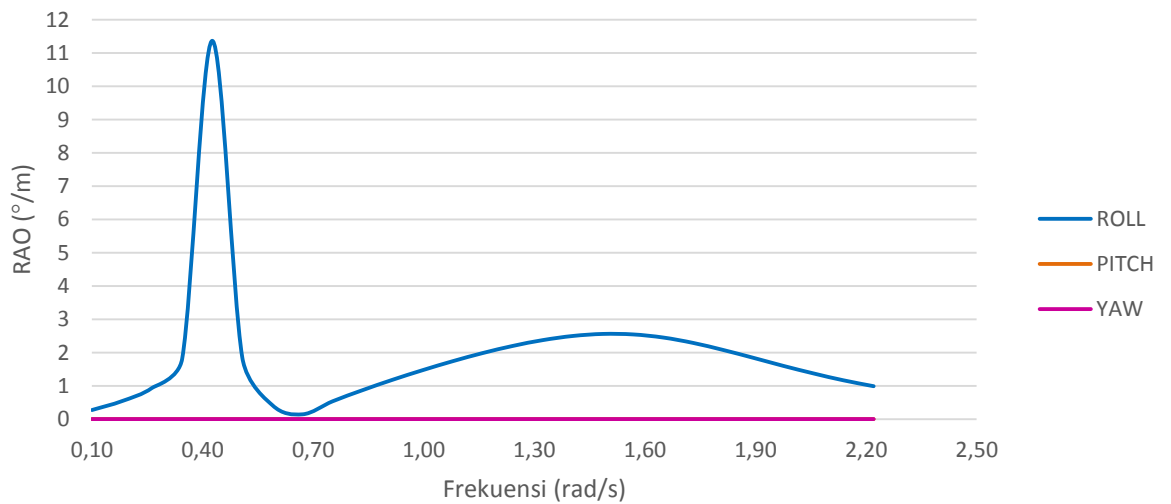
RAO Terapung Bebas Gerakan Rotasional pada SPM *Heading* 45°



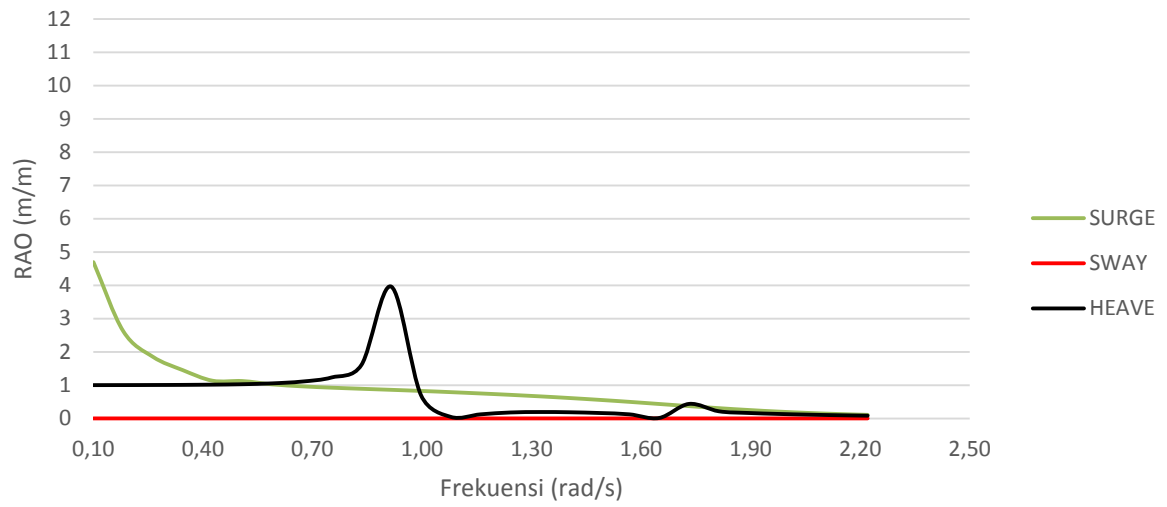
RAO Terapung Bebas Gerakan Translasional pada SPM *Heading* 90°



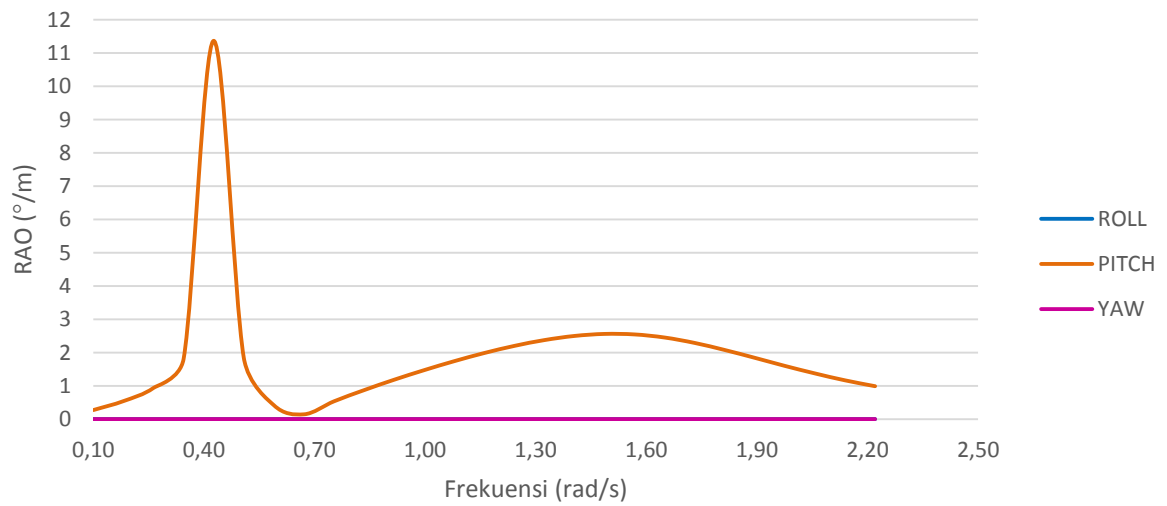
RAO Terapung Bebas Gerakan Rotasional pada SPM *Heading* 90°



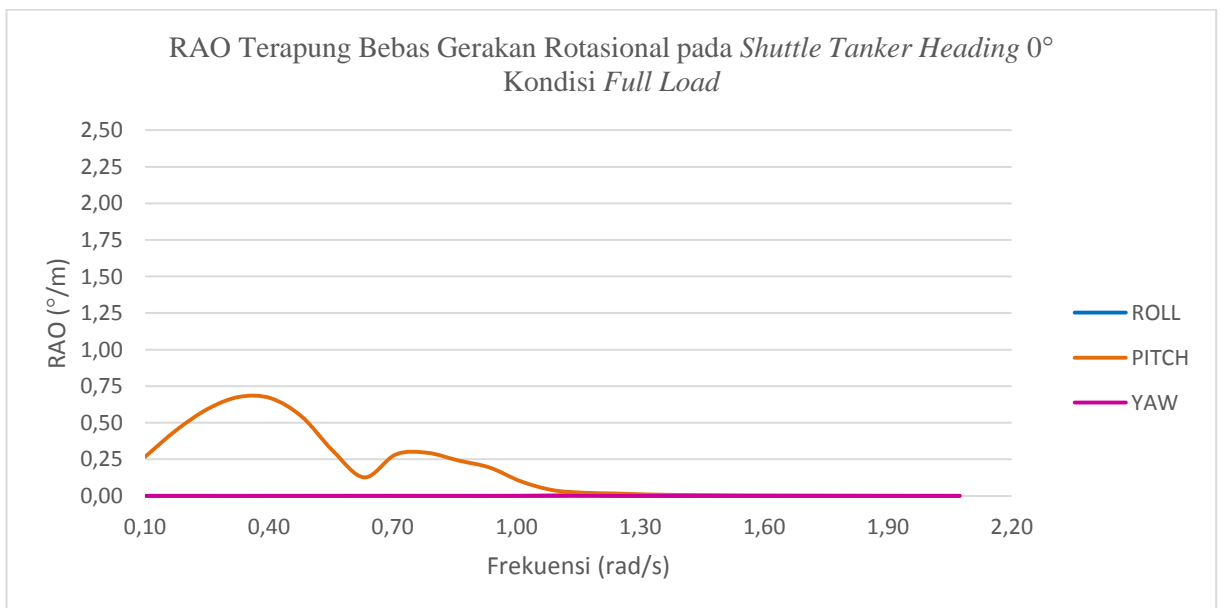
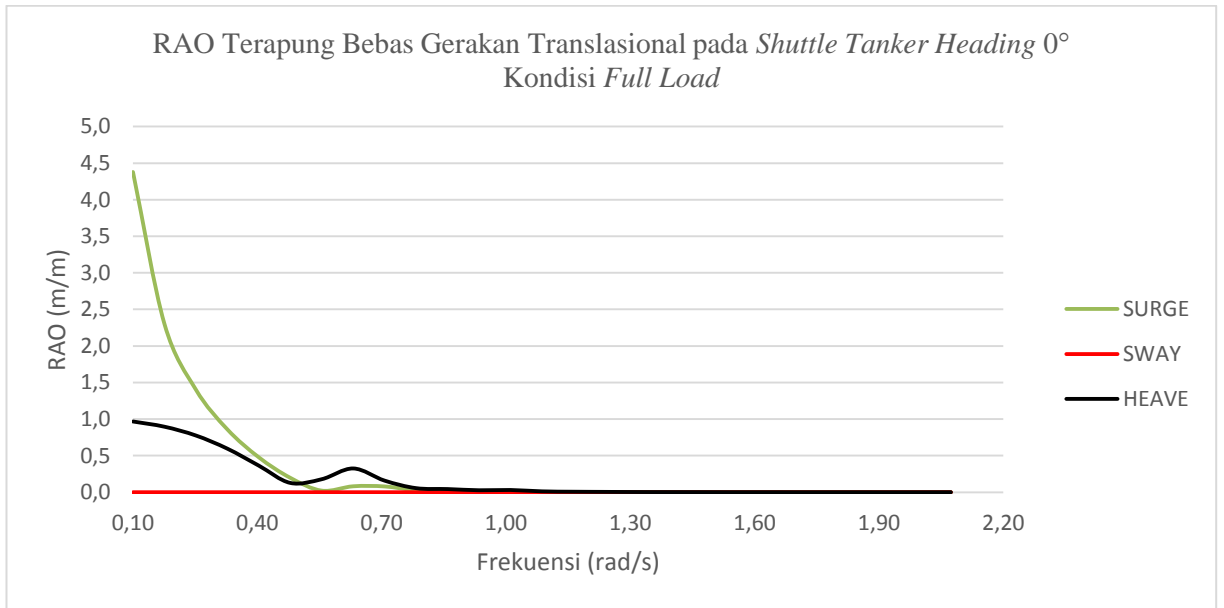
RAO Terapung Bebas Gerakan Translasional pada SPM *Heading* 180°



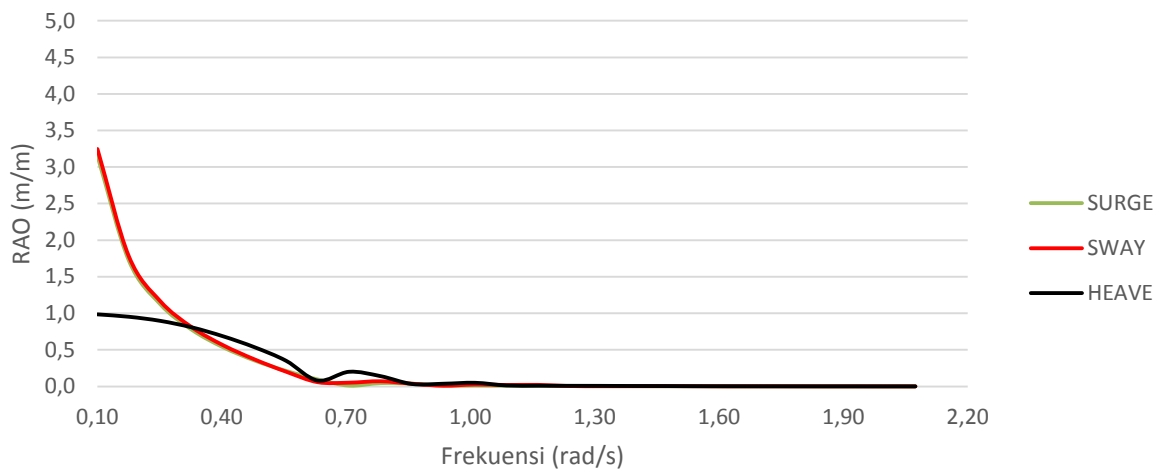
RAO Terapung Bebas Gerakan Rotasional pada SPM *Heading* 180°



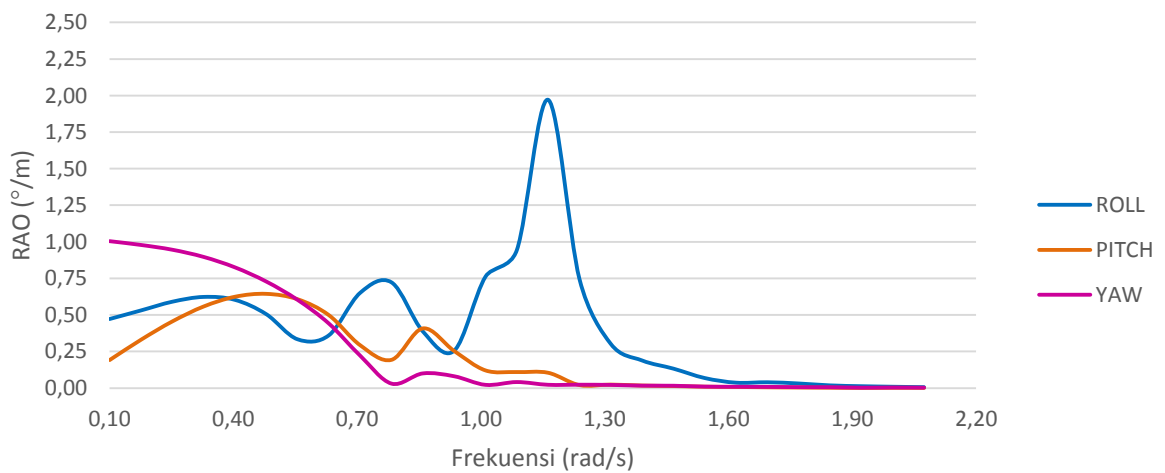
**d. Response Amplitude Operator (RAO) Terapung Bebas (Free Floating) pada Shuttle Tanker 85000 DWT saat Kondisi Full Load**



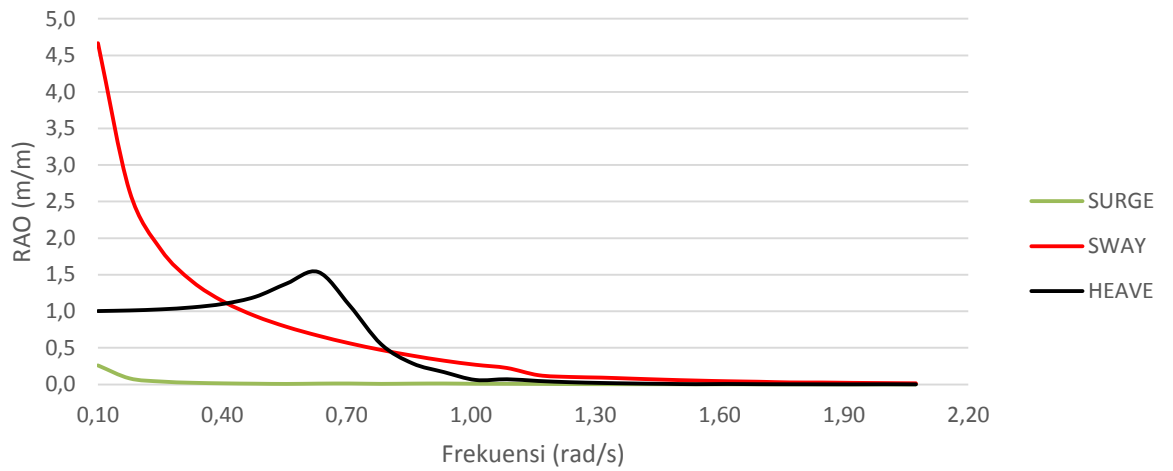
RAO Terapung Bebas Gerakan Translasional pada *Shuttle Tanker Heading 45°*  
Kondisi *Full Load*



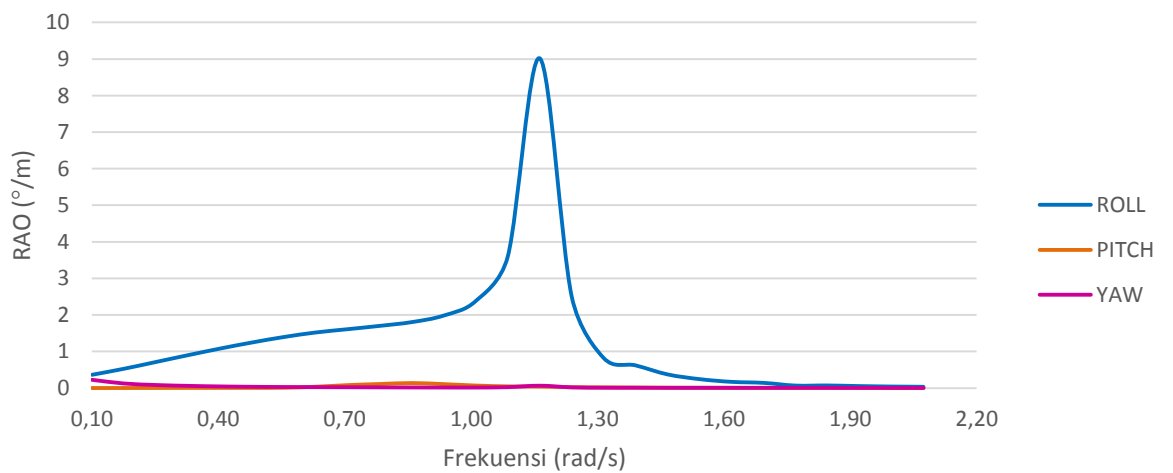
RAO Terapung Bebas Gerakan Rotasional pada *Shuttle Tanker Heading 45°*  
Kondisi *Full Load*



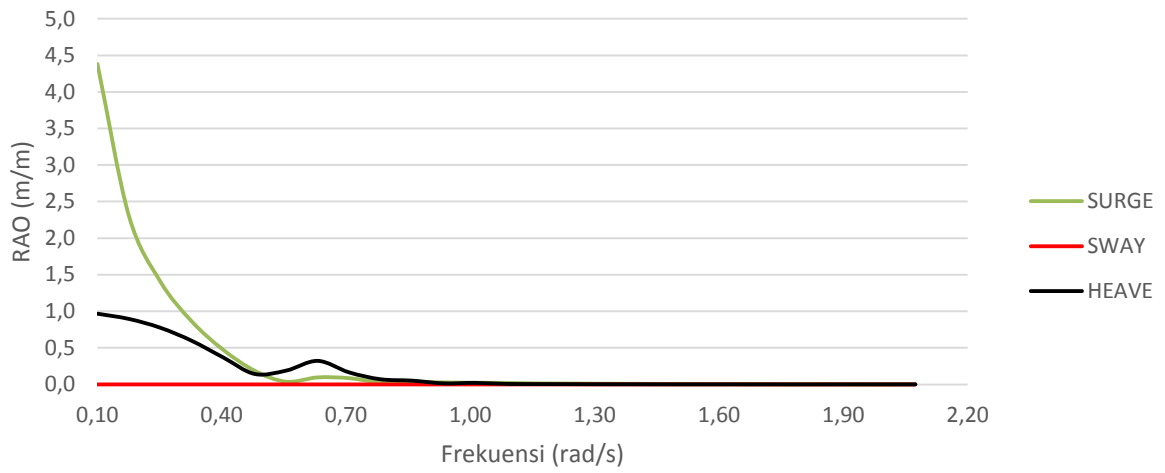
RAO Terapung Bebas Gerakan Translasiional pada *Shuttle Tanker Heading 90°*  
Kondisi *Full Load*



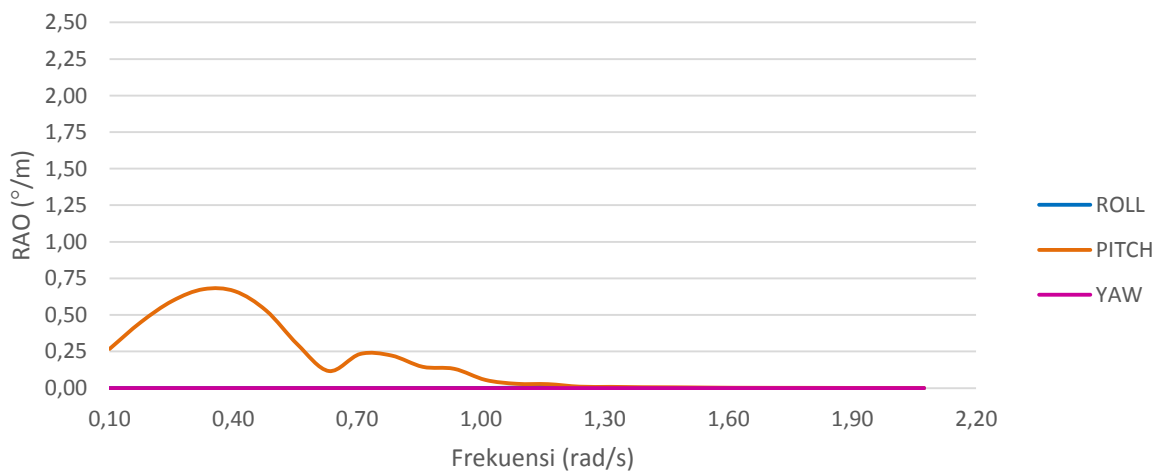
RAO Terapung Bebas Gerakan Rotasional pada *Shuttle Tanker Heading 90°*  
Kondisi *Full Load*



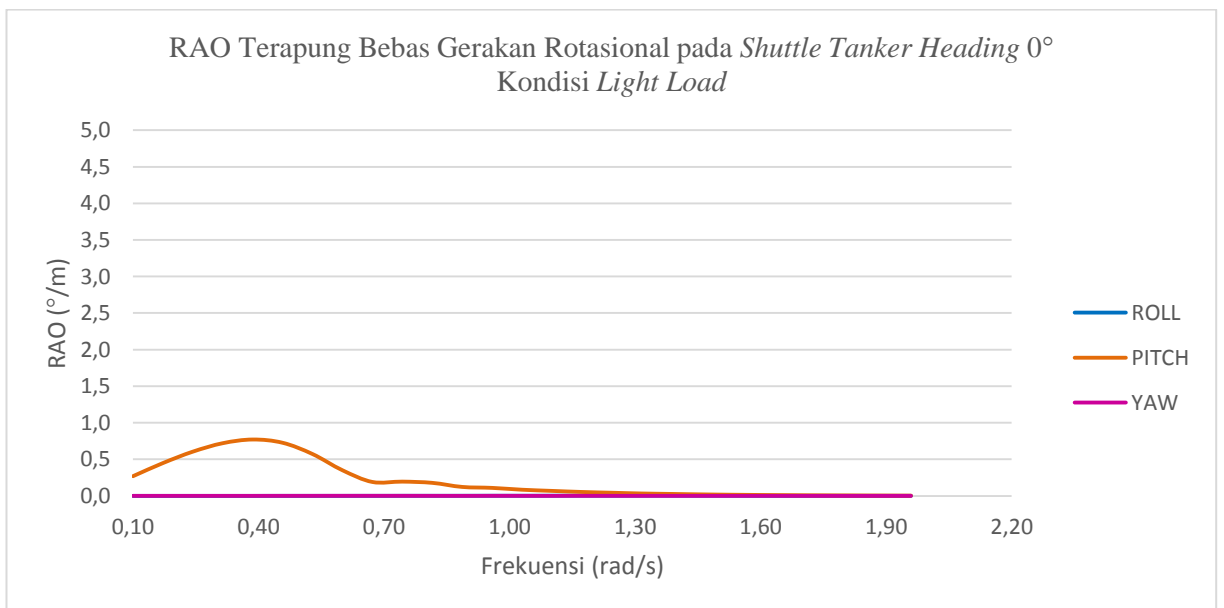
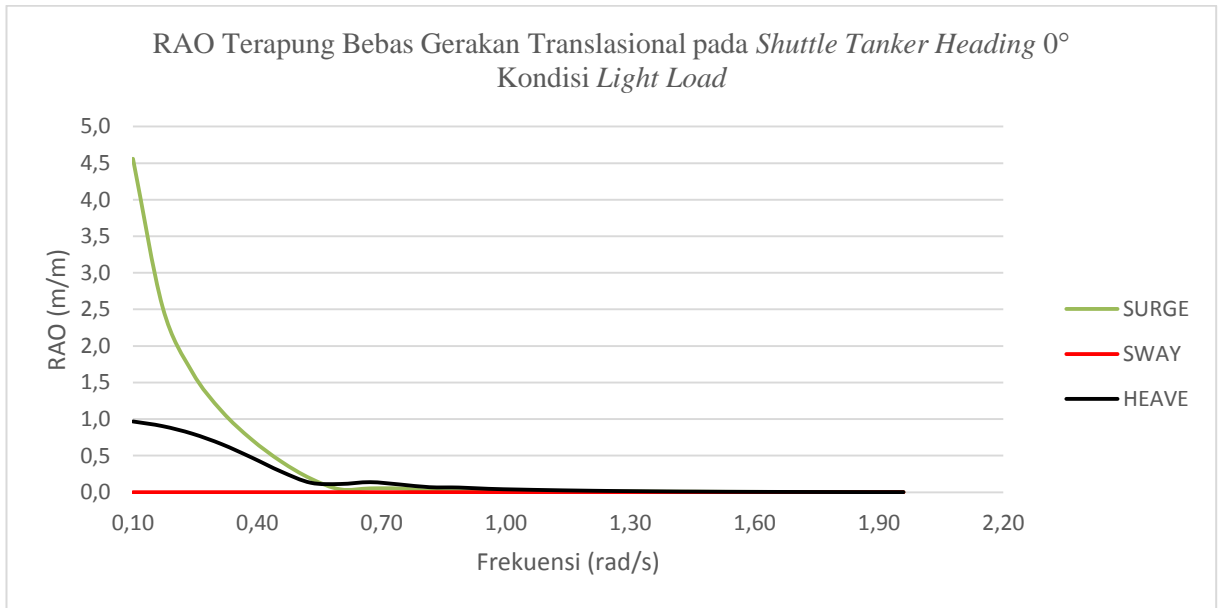
RAO Terapung Bebas Gerakan Translasional pada *Shuttle Tanker Heading 180°*  
Kondisi *Full Load*



RAO Terapung Bebas Gerakan Rotasional pada *Shuttle Tanker Heading 180°*  
Kondisi *Full Load*

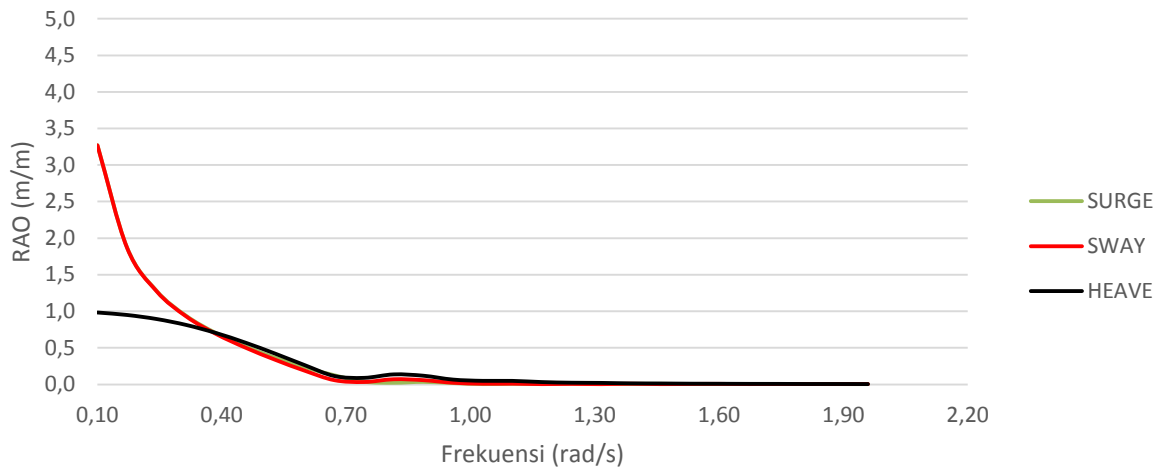


e. **Response Amplitude Operator (RAO) Terapung Bebas (Free Floating) pada Shuttle Tanker 85000 DWT saat Kondisi Light Load**

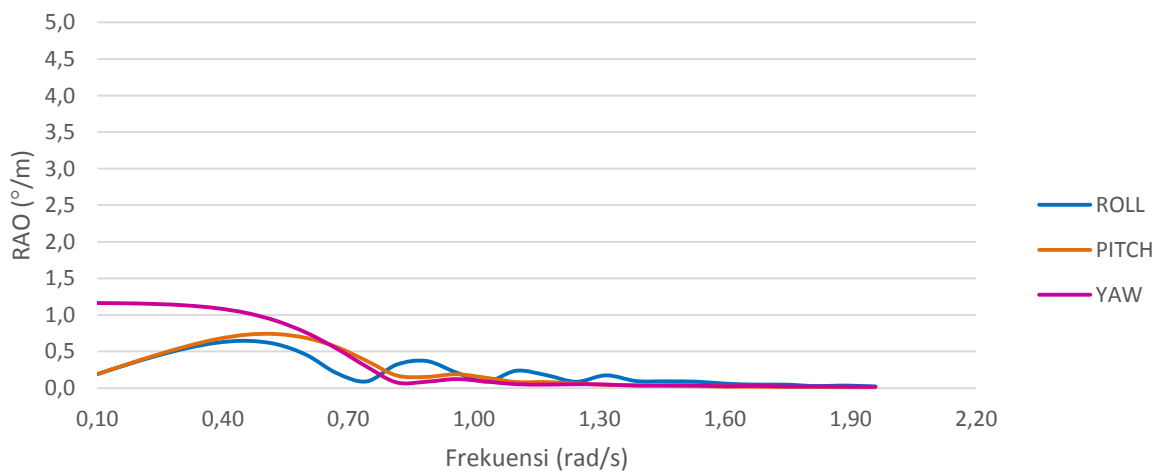




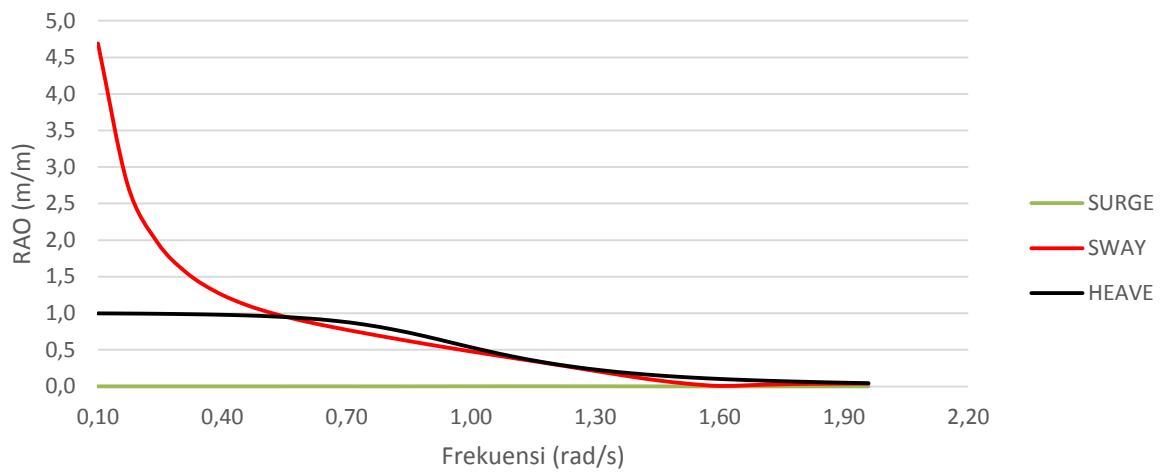
RAO Terapung Bebas Gerakan Translasional pada *Shuttle Tanker Heading 45°*  
Kondisi *Light Load*



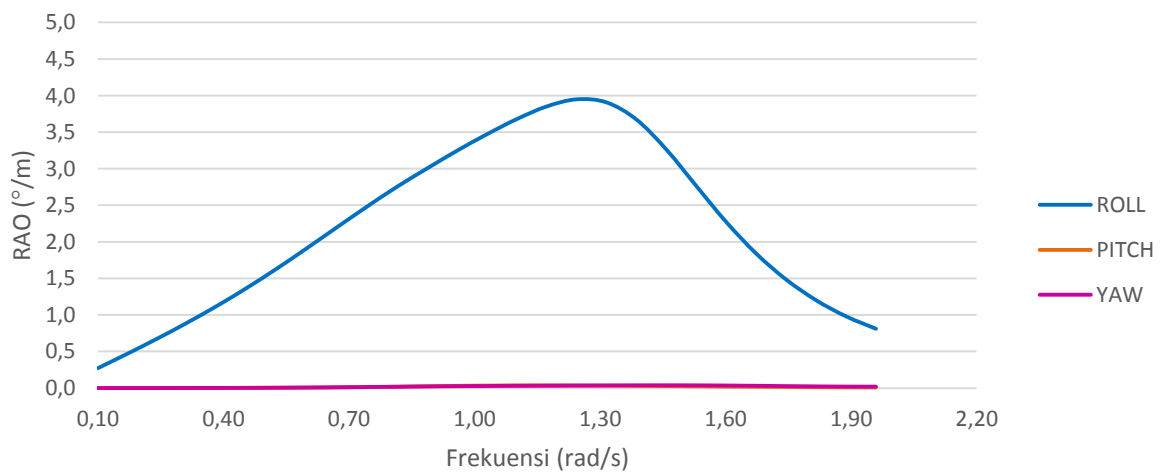
RAO Terapung Bebas Gerakan Rotasional pada *Shuttle Tanker Heading 45°*  
Kondisi *Light Load*



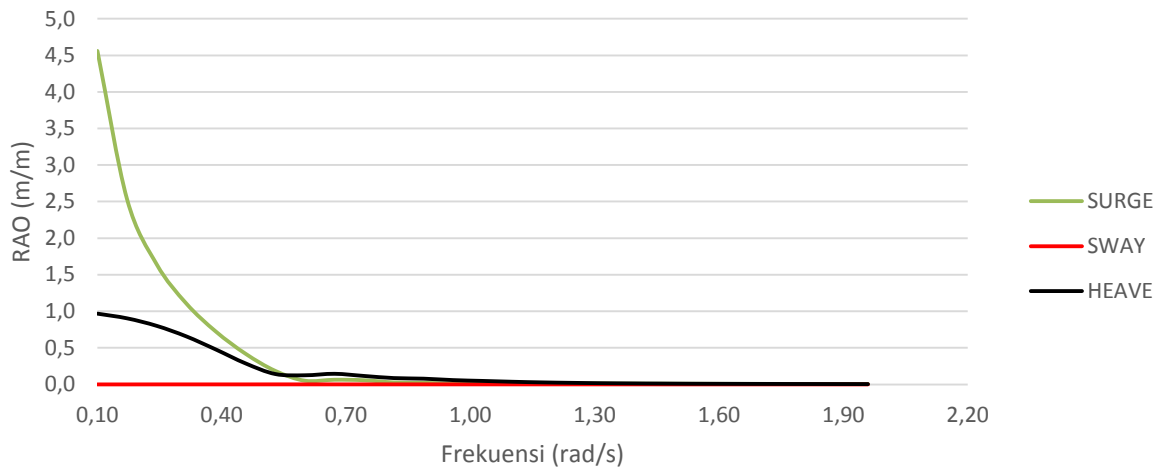
RAO Terapung Bebas Gerakan Translasional pada *Shuttle Tanker Heading 90°*  
Kondisi *Light Load*



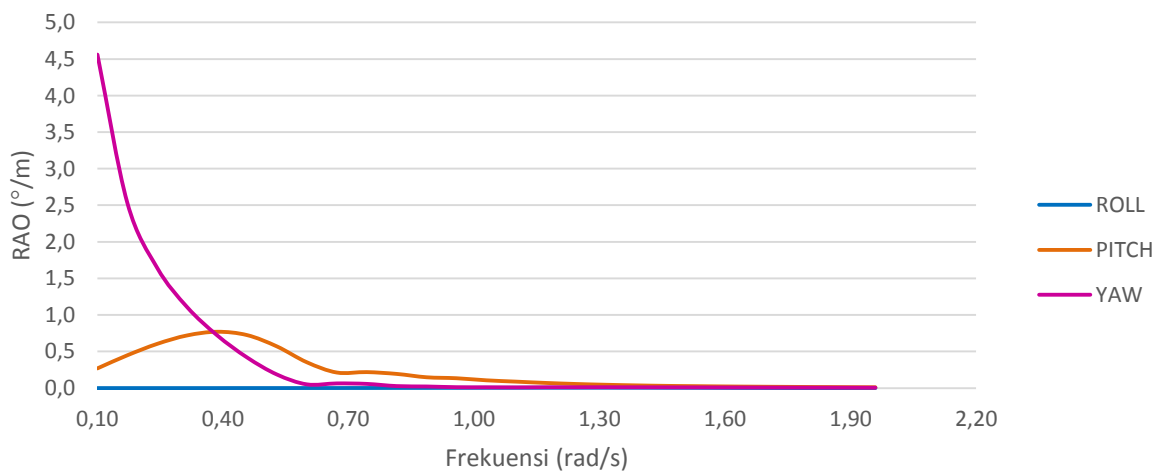
RAO Terapung Bebas Gerakan Rotasional pada *Shuttle Tanker Heading 90°*  
Kondisi *Light Load*



RAO Terapung Bebas Gerakan Translasional pada *Shuttle Tanker Heading 180°* Kondisi *Light Load*



RAO Terapung Bebas Gerakan Rotasional pada *Shuttle Tanker Heading 180°* Kondisi *Light Load*



## **LAMPIRAN C**

### **Perhitungan *Peakedness Parameter***

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

**Diketahui :**

$$\begin{aligned}g &= 9,81 \text{ m/s}^2 \\ \text{Wind speed} &= 25,7 \text{ m/s} \\ \alpha &= 0,0081 \text{ jika } x \text{ tidak diketahui} \\ \tau &= 0,07 \text{ jika } \omega \leq \omega_0 \\ &= 0,09 \text{ jika } \omega > \omega_0 \\ A &= 0,076(X_0)^{-0,22}\end{aligned}$$

Maka,

$$\begin{aligned}X_0 &= (0,0081 : 0,076)^{(1 : -0,22)} \\ &= 26283,02412 \\ \omega_0 &= 2\pi(g/V_w)(X_0)^{-0,33} \\ \omega_0 &= 2 \times 3,14 \times (9,81/25,7) \times (26283,02)^{-0,33} \\ &= 0,08 \text{ rad/s}\end{aligned}$$

#### **Perhitungan Nilai $\gamma$ Menurut Chakrabarti Vol 1 Hal.106**

While the JONSWAP spectrum has five parameters, only two are generally varied in its application –  $\omega_0$  and  $H_s$ . The suitable values of  $\gamma$  to use at various offshore locations will be described later. A suitable parameter for  $\gamma$  is in the range of 2–3 for the North Sea application.

If the peakedness parameter is not defined, the following can be applied:

$$\begin{aligned}\gamma &= 5 \quad \text{for } T_p/\sqrt{H_s} \leq 3.6; \quad \text{and} \\ \gamma &= \exp\left(5.75 - 1.15 \frac{T_p}{\sqrt{H_s}}\right) \quad \text{for } T_p/\sqrt{H_s} > 3.6\end{aligned} \quad (3.22)$$

Dimana,

$$\begin{aligned}T_p &= 9 \text{ s} \\ H_s &= 3,6 \text{ m} \\ T_p/\sqrt{H_s} &= 4,74341649\end{aligned}$$

Sehingga nilai  $\gamma$  adalah

$$\begin{aligned}\gamma &= \exp(5,75-1,15(T_p/\sqrt{H_s})) \\ &= 1,343221773\end{aligned}$$

*(Halaman ini sengaja dikosongkan*

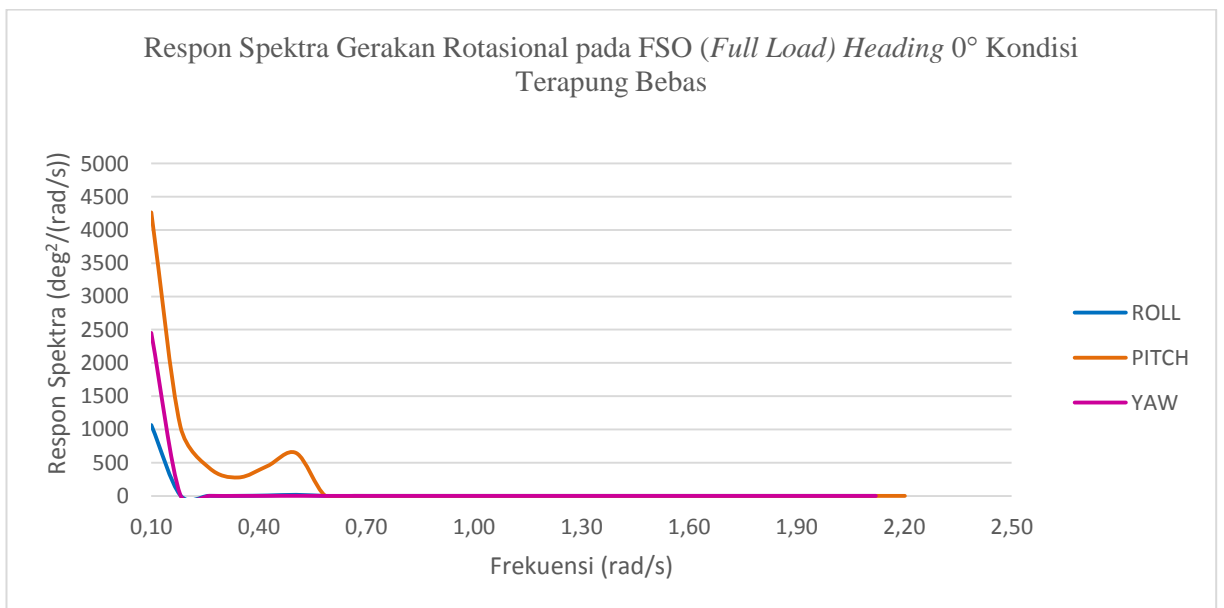
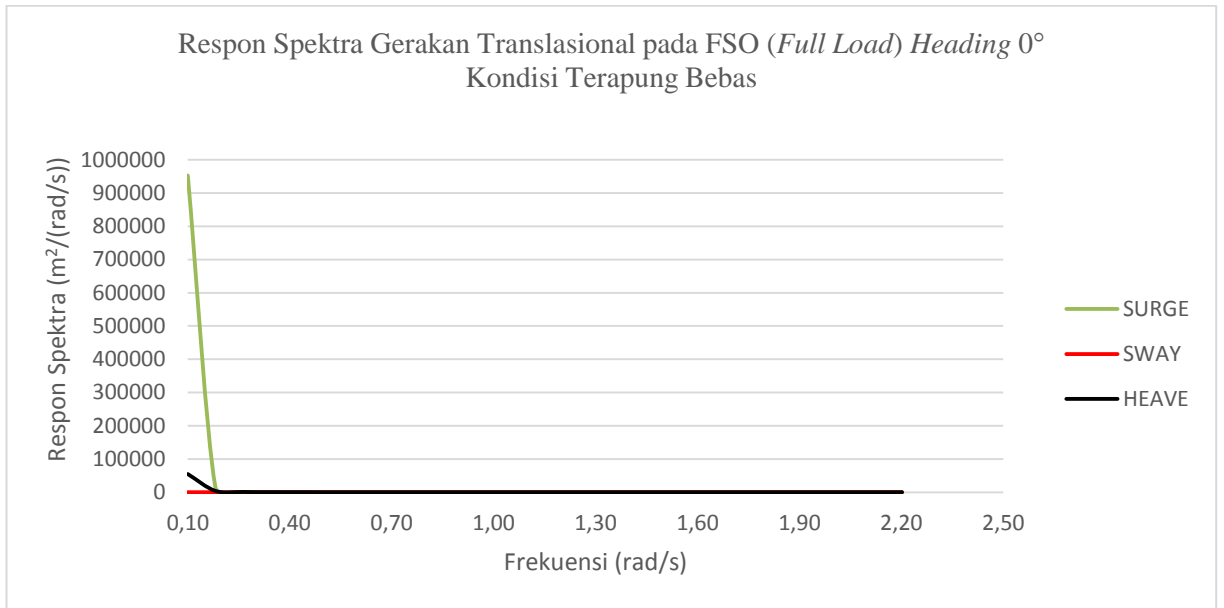
## **LAMPIRAN D**

**Respon Spektra pada FSO Arco Ardjuna,  
SPM 3 dan *Shuttle Tanker* 85000 DWT saat  
Kondisi Terapung Bebas (*Free Floating*)**

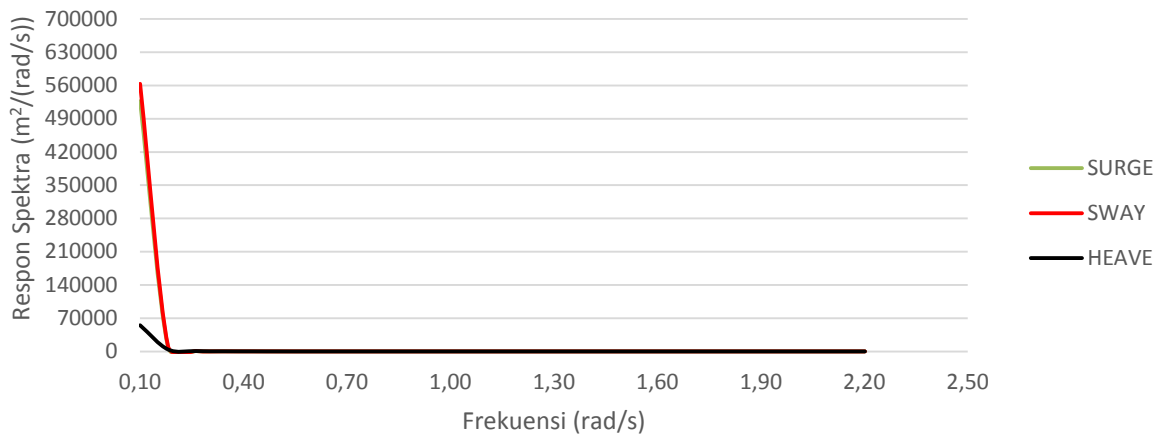


*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

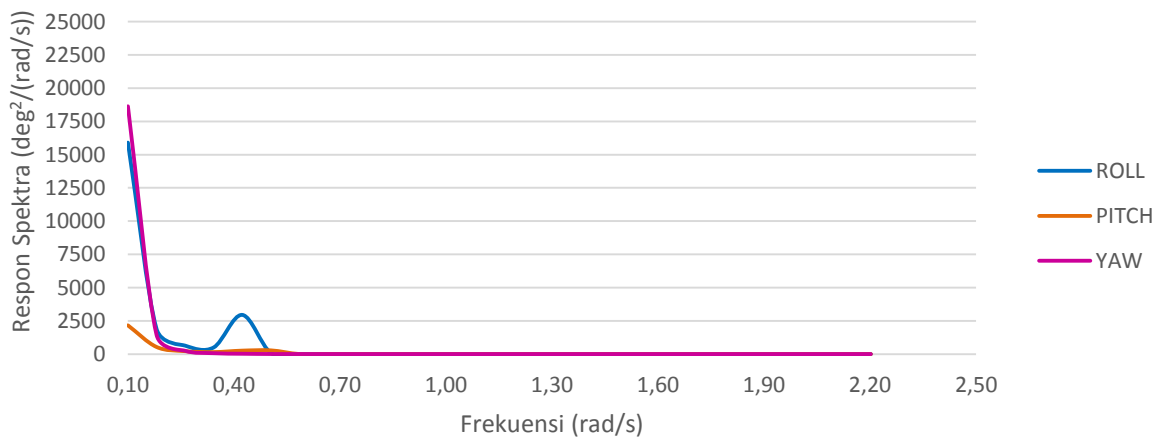
**a. Respon Spektra pada FSO Arco Ardjuna (*Full Load*) saat Kondisi Terapung Bebas (*Free Floating*)**



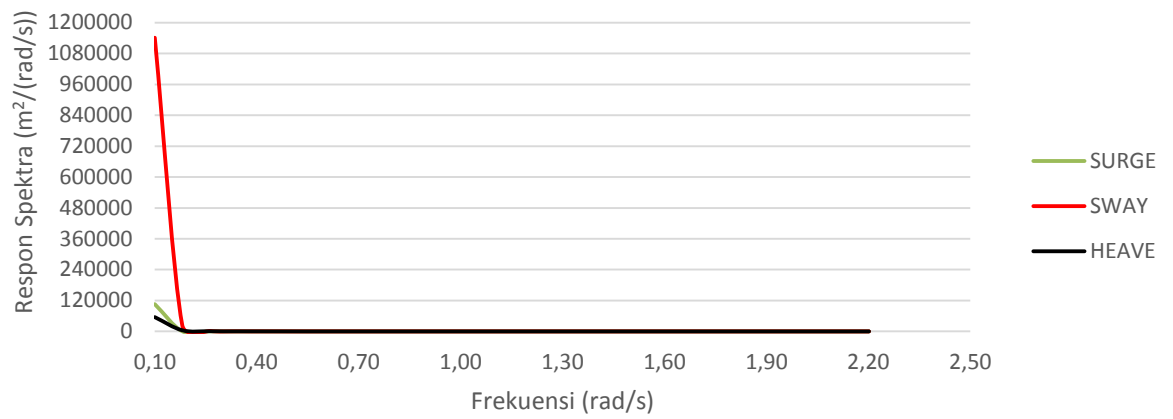
Respon Spektra Gerakan Translasional pada FSO (*Full Load*) *Heading* 45°  
Kondisi Terapung Bebas



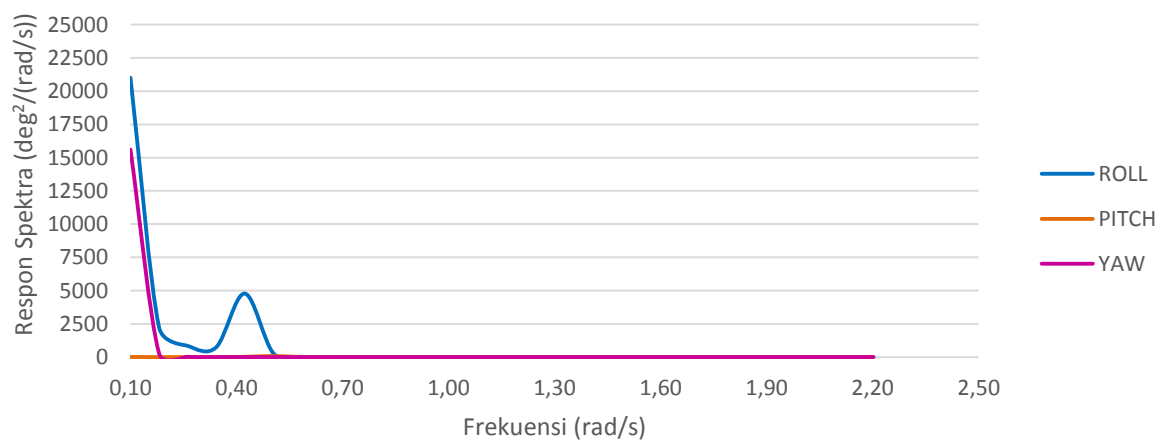
Respon Spektra Gerakan Rotasional pada FSO (*Full Load*) *Heading* 45° Kondisi  
Terapung Bebas



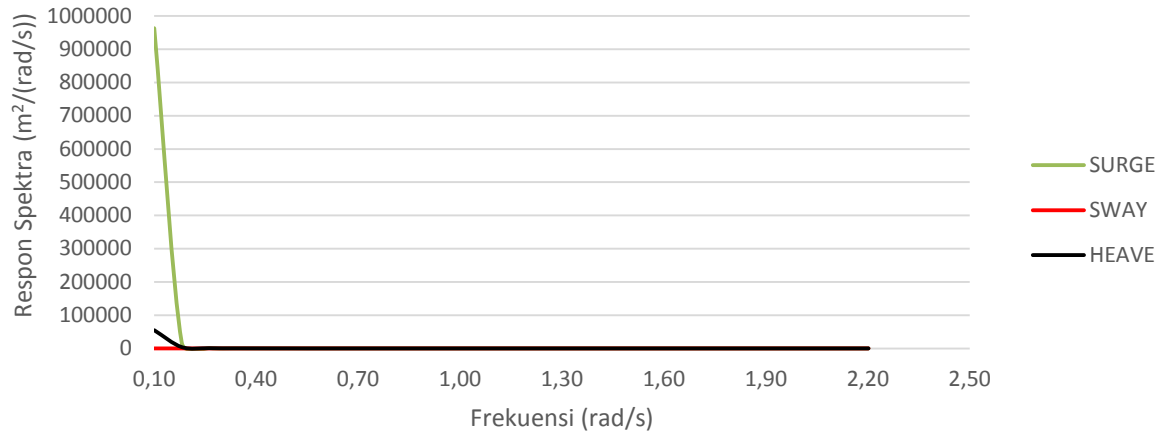
Respon Spektra Gerakan Translasional pada FSO (*Full Load*) Heading 90°  
Kondisi Terapung Bebas



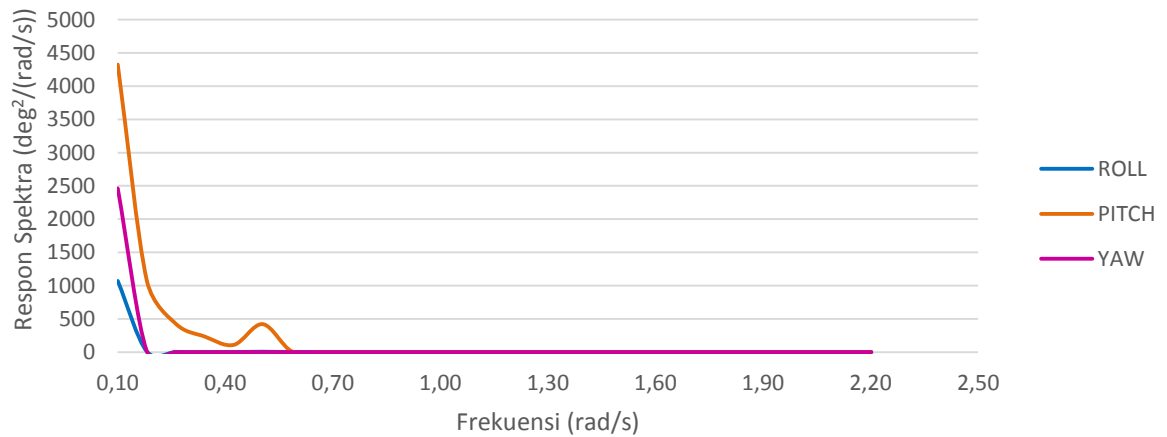
Respon Spektra Gerakan Rotasional pada FSO (*Full Load*) Heading 90° Kondisi  
Terapung Bebas



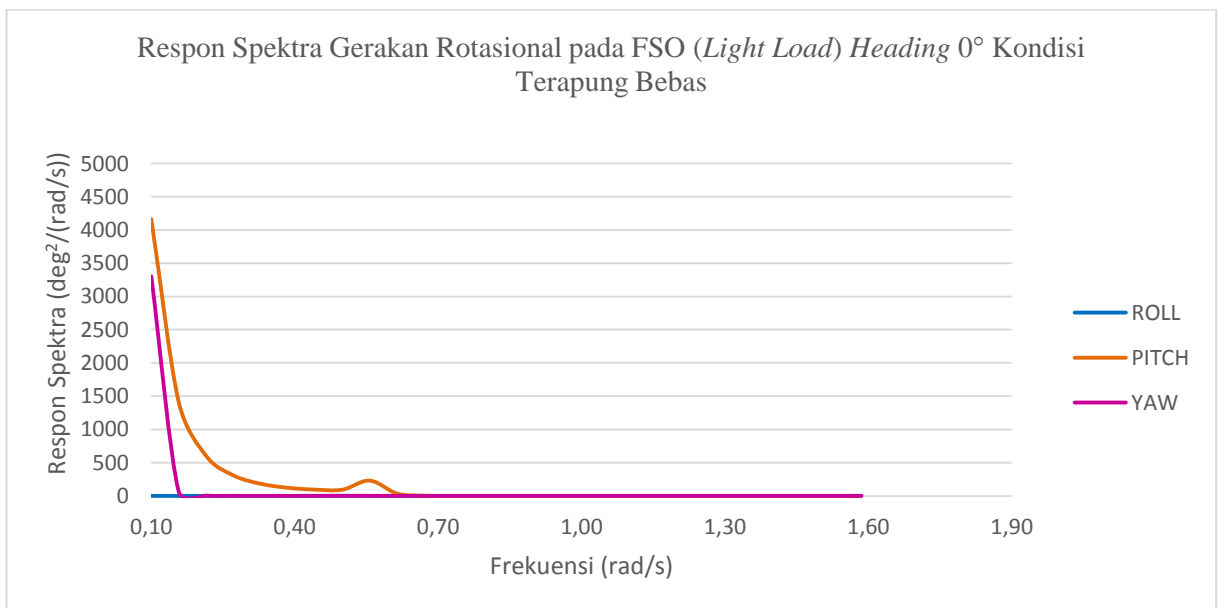
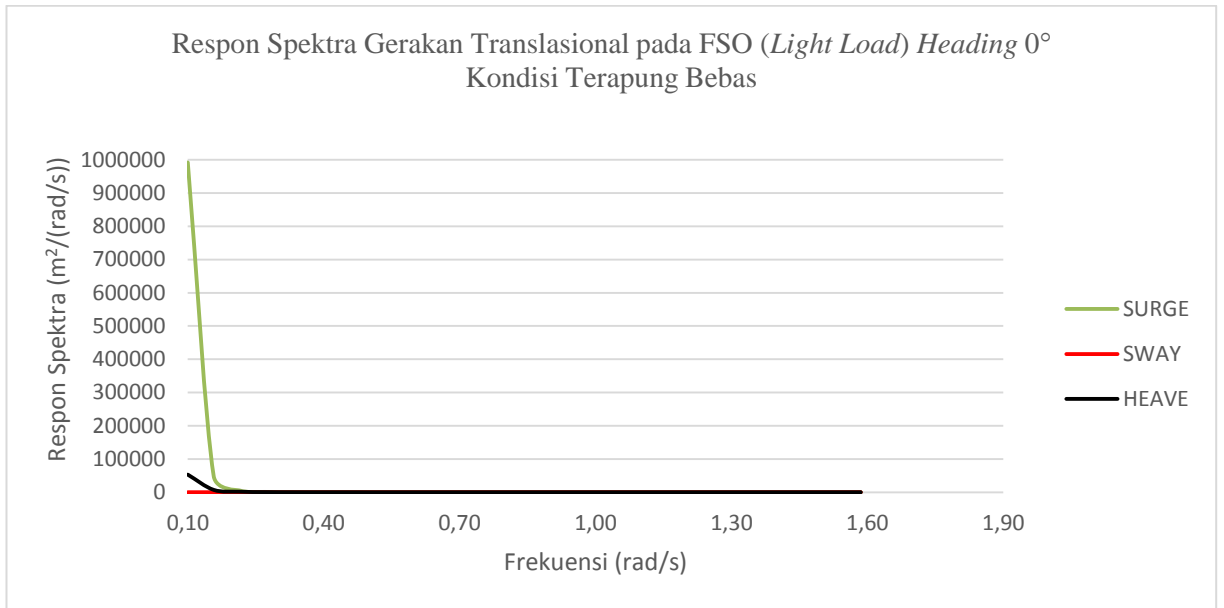
Respon Spektra Gerakan Translasional pada FSO (*Full Load*) Heading 180°  
Kondisi Terapung Bebas



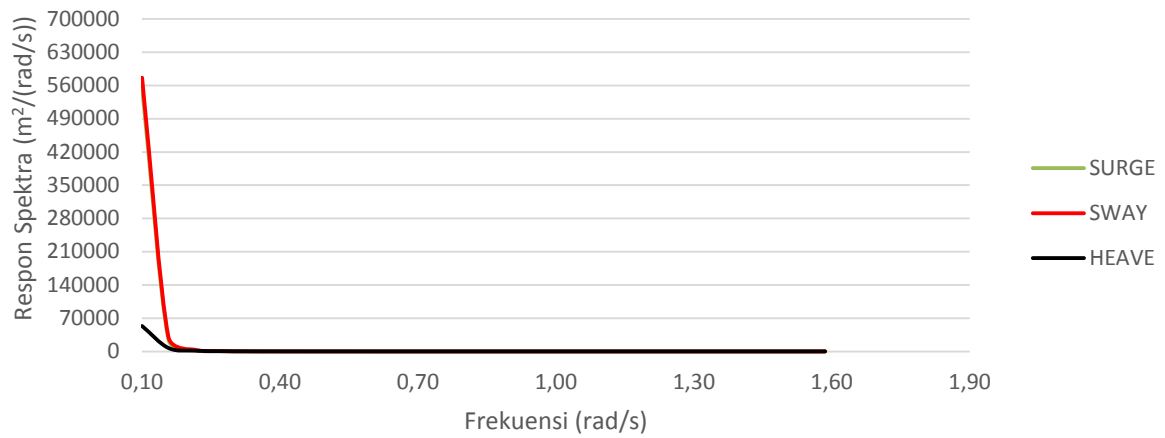
Respon Spektra Gerakan Rotasional pada FSO (*Full Load*) Heading 180°  
Kondisi Terapung Bebas



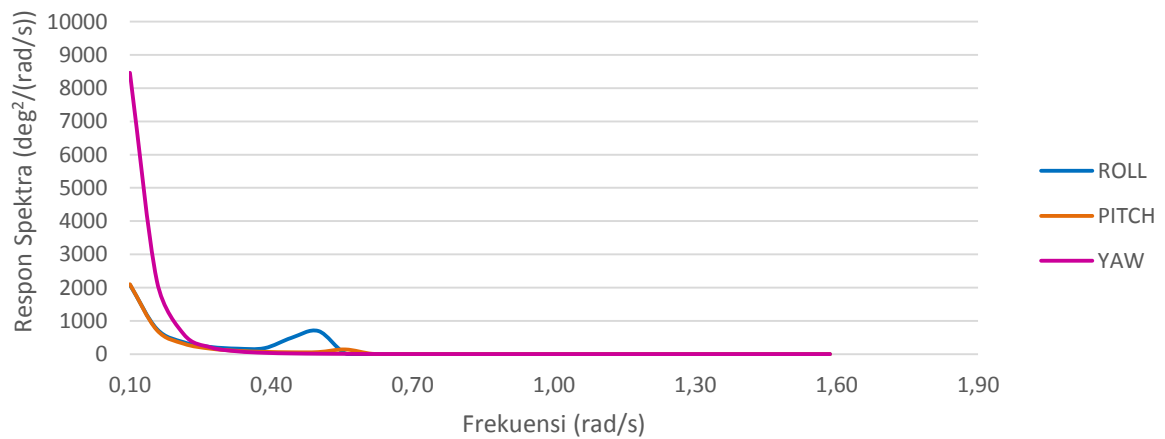
**b. Respon Spektra pada FSO Arco Ardjuna (*Light Load*) saat Kondisi Terapung Bebas (*Free Floating*)**



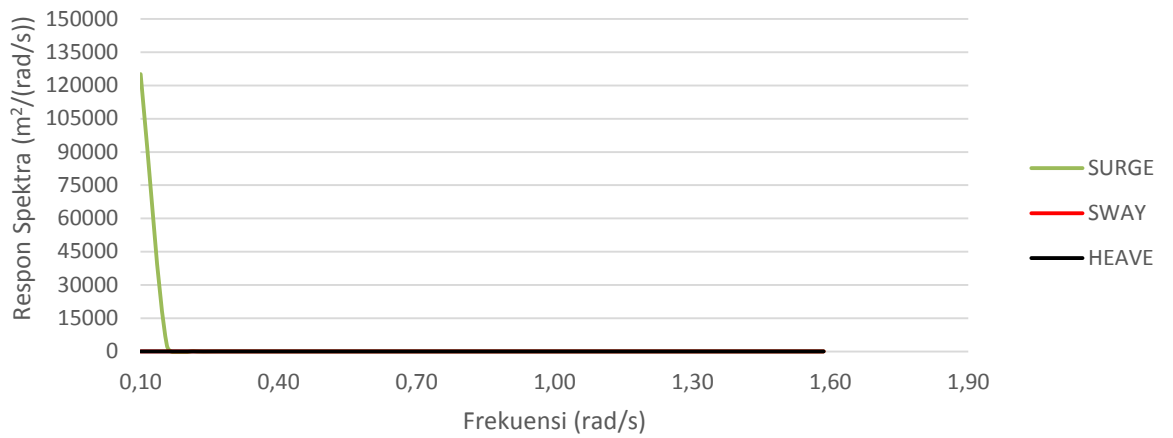
Respon Spektra Gerakan Translasional pada FSO (*Light Load*) Heading 45°  
Kondisi Terapung Bebas



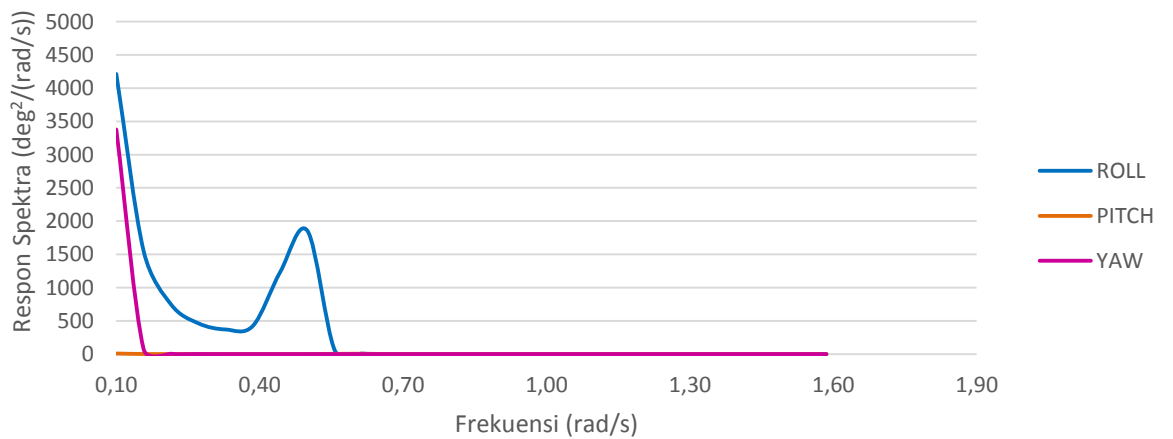
Respon Spektra Gerakan Rotasional pada FSO (*Light Load*) Heading 45°  
Kondisi Terapung Bebas



Respon Spektra Gerakan Translasiional pada FSO (*Light Load*) Heading 90°  
Kondisi Terapung Bebas

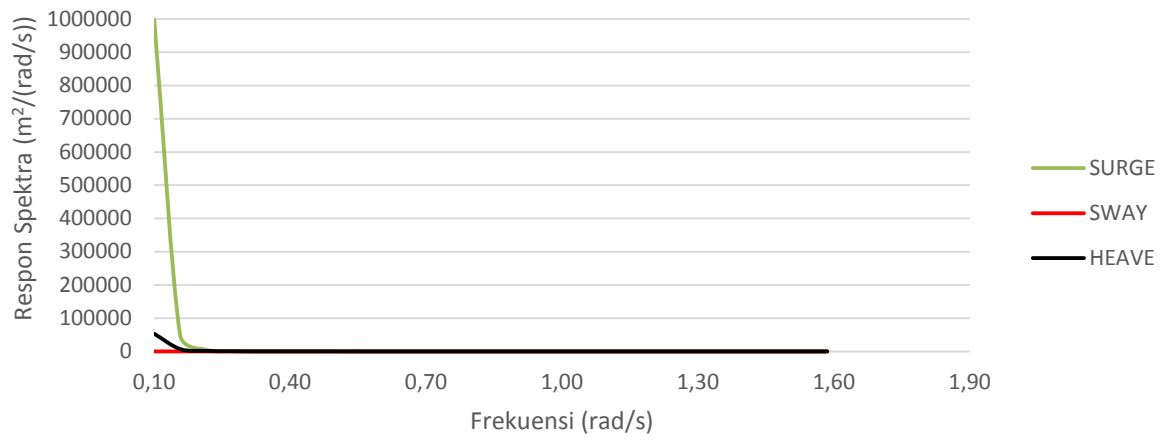


Respon Spektra Gerakan Rotasiional pada FSO (*Light Load*) Heading 90°  
Kondisi Terapung Bebas

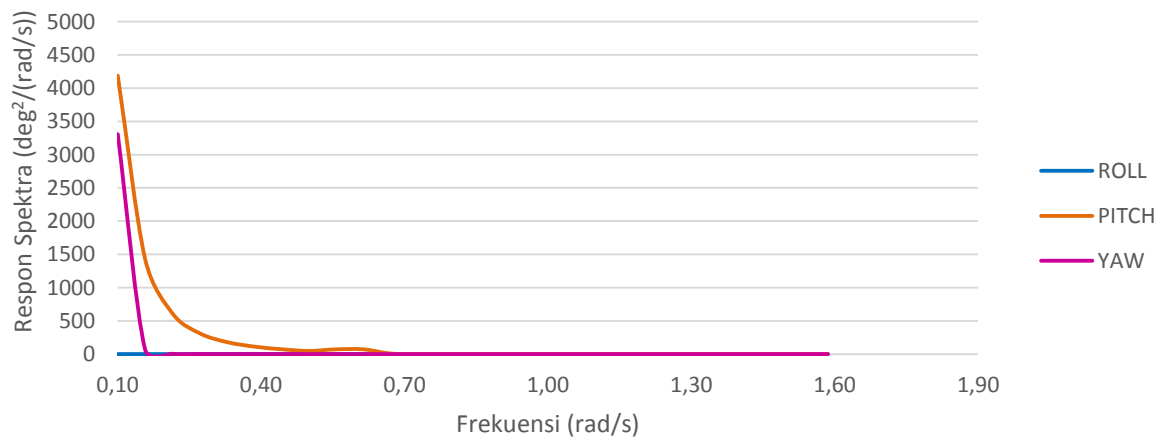




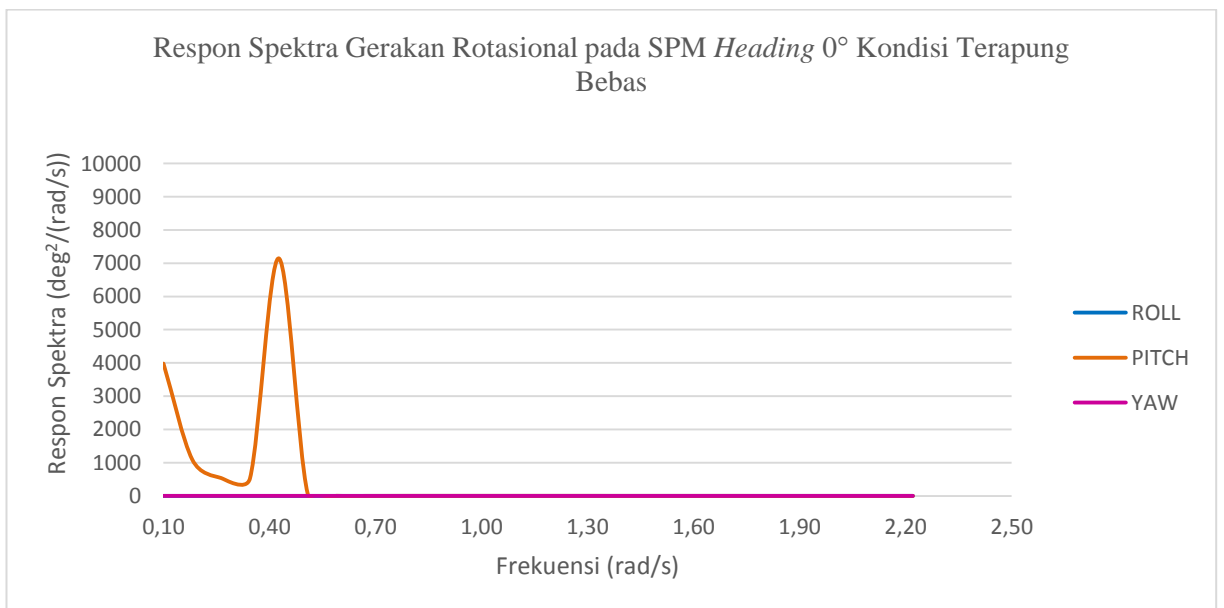
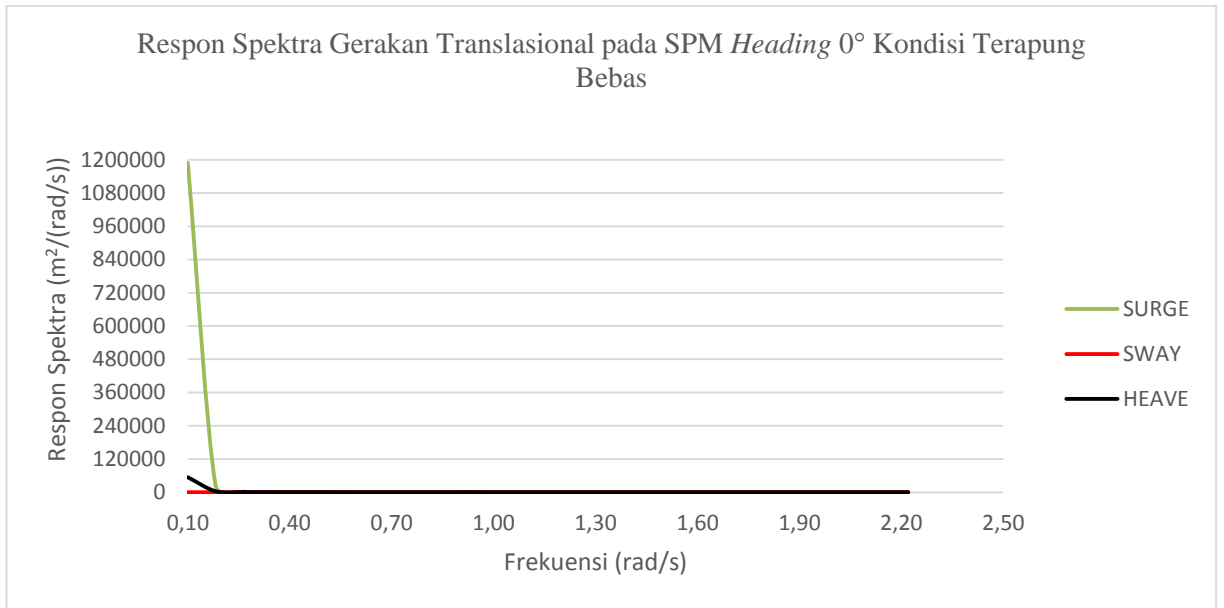
Respon Spektra Gerakan Translasiional pada FSO (*Light Load*) Heading 180°  
Kondisi Terapung Bebas



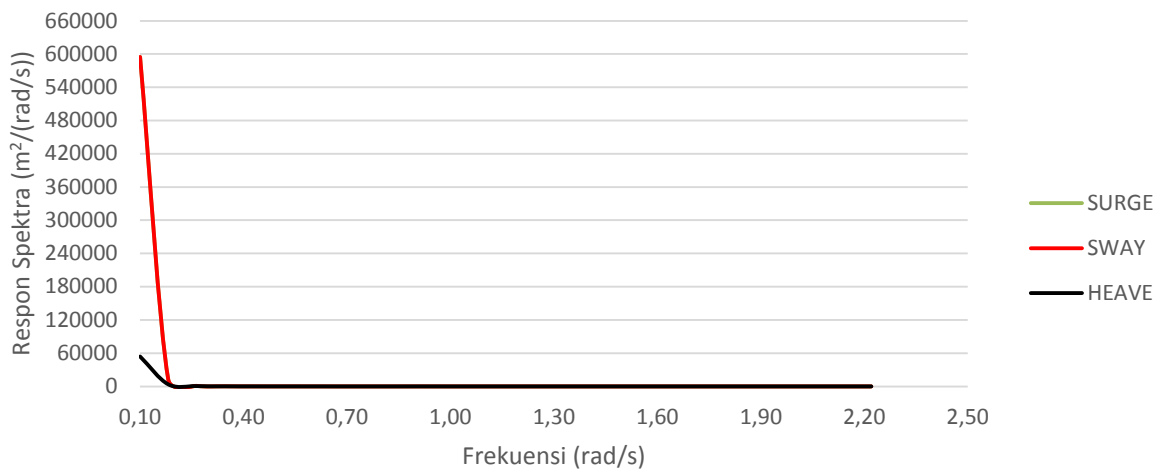
Respon Spektra Gerakan Rotasiional pada FSO (*Light Load*) Heading 180°  
Kondisi Terapung Bebas



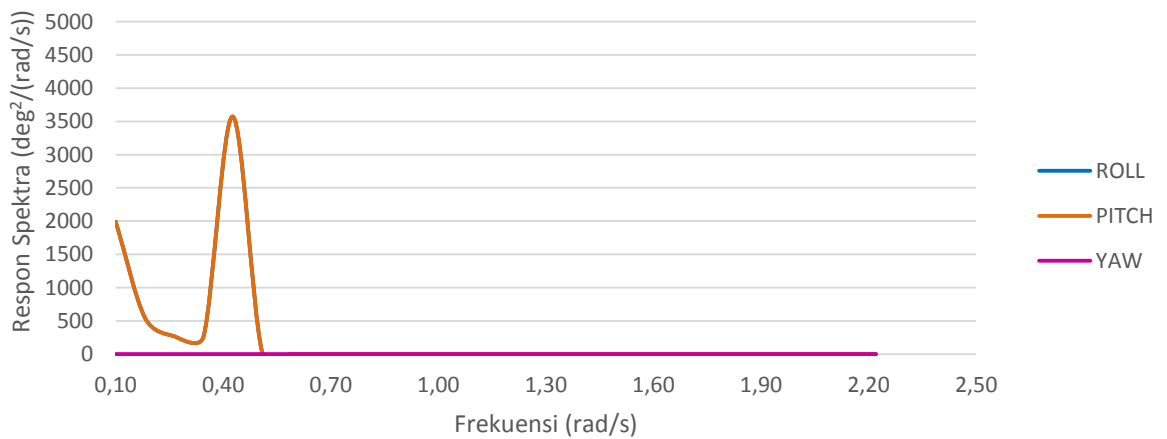
**c. Respon Spektra pada SPM 3 saat Kondisi Terapung Bebas (*Free Floating*)**

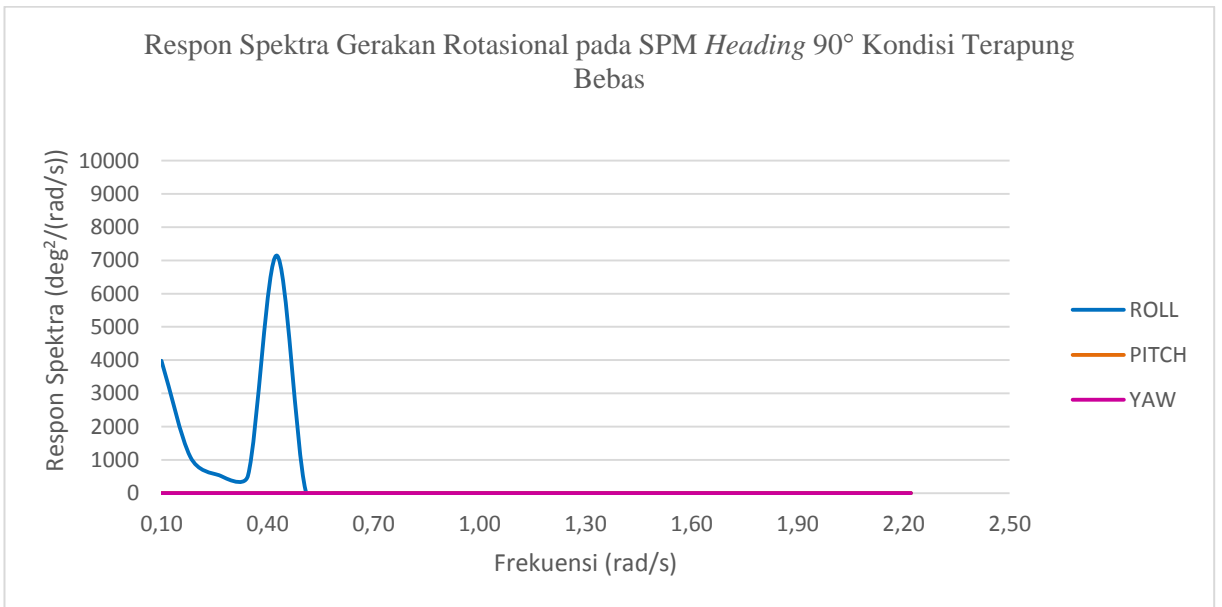
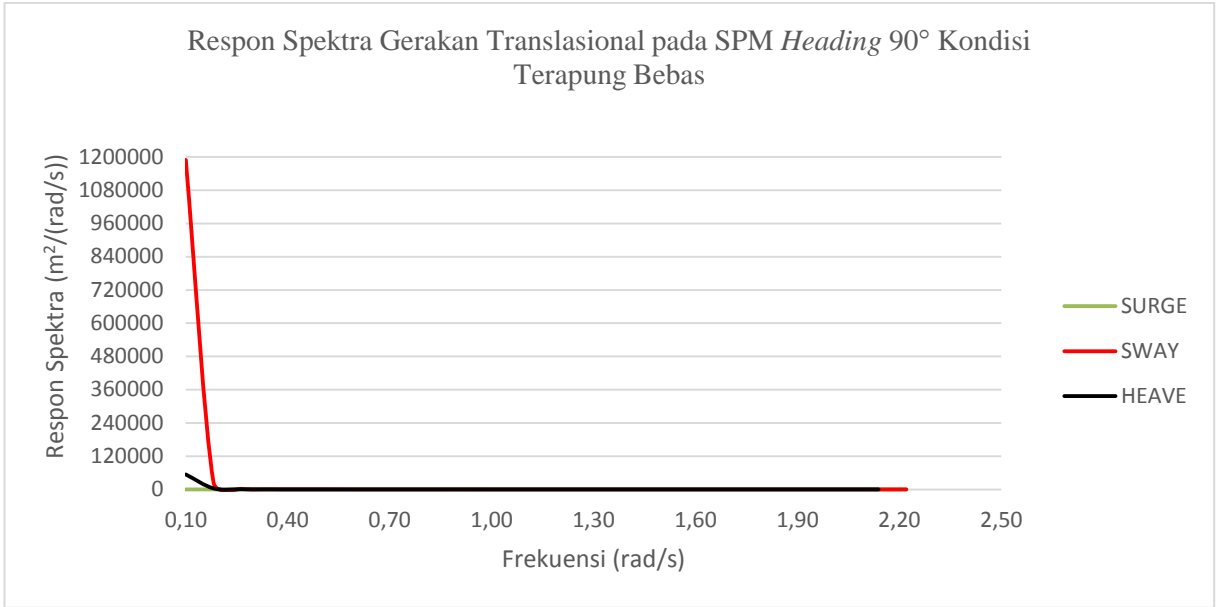


Respon Spektra Gerakan Translasional pada SPM *Heading* 45° Kondisi Terapung Bebas

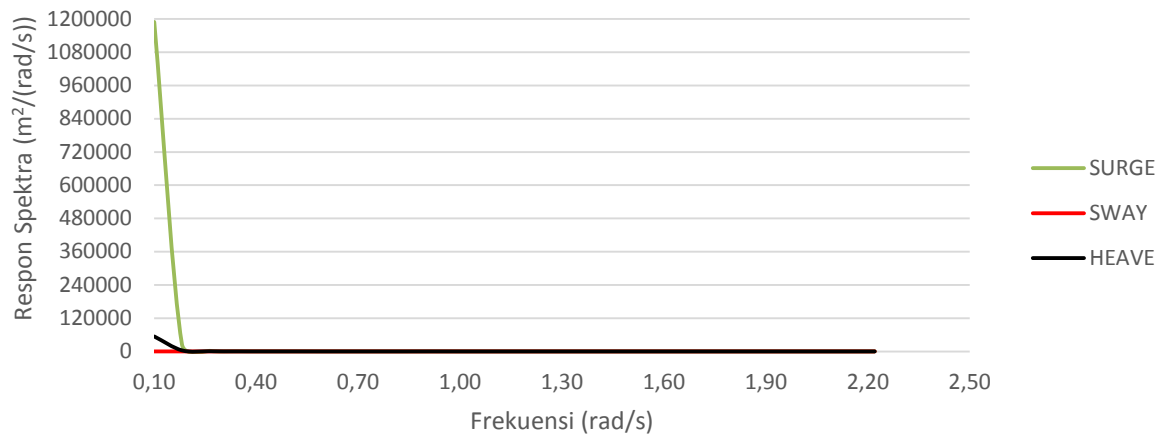


Respon Spektra Gerakan Rotasional pada SPM *Heading* 45° Kondisi Terapung Bebas

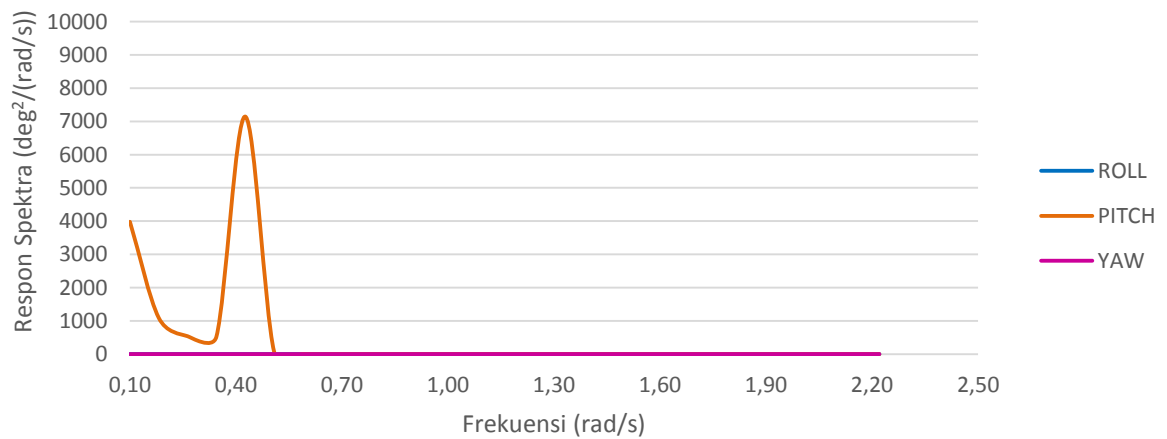




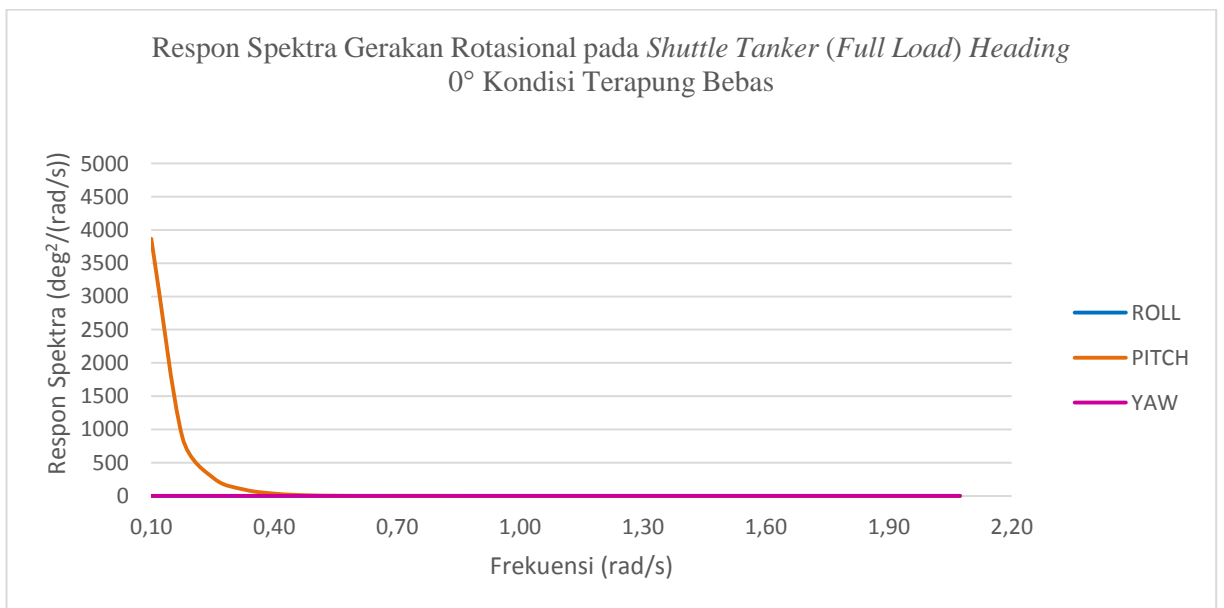
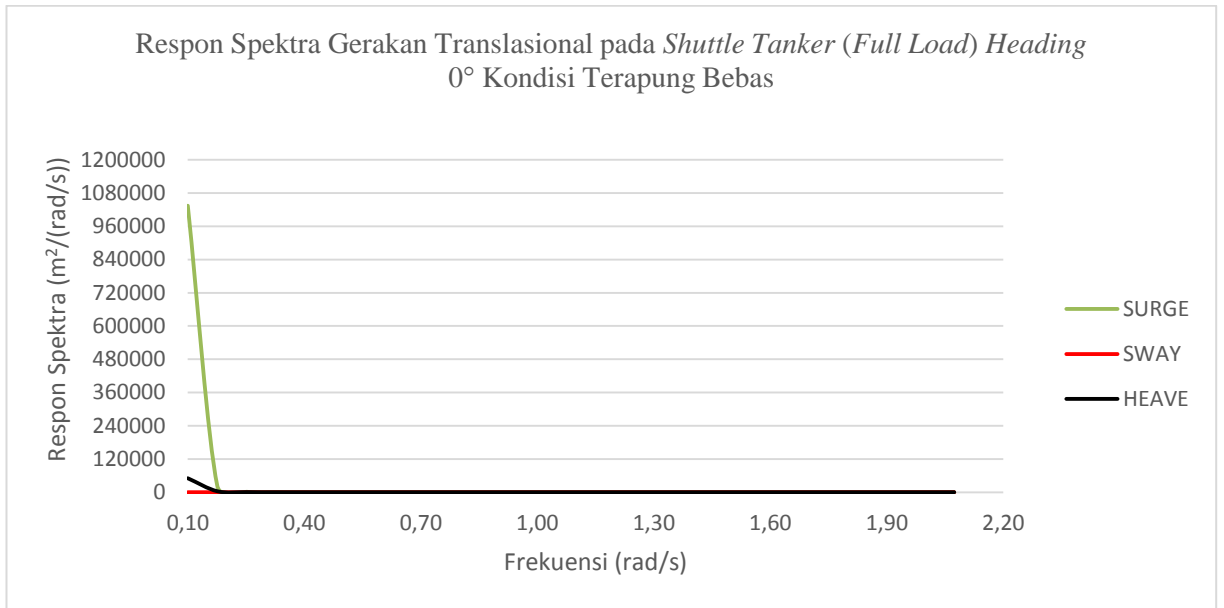
Respon Spektra Gerakan Translasional pada SPM *Heading* 180° Kondisi Terapung Bebas



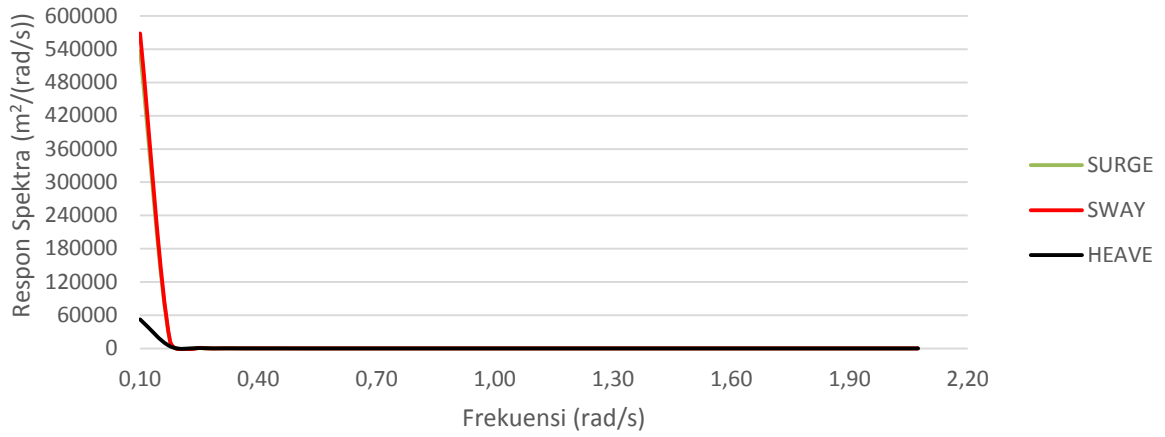
Respon Spektra Gerakan Rotasional pada SPM *Heading* 180° Kondisi Terapung Bebas



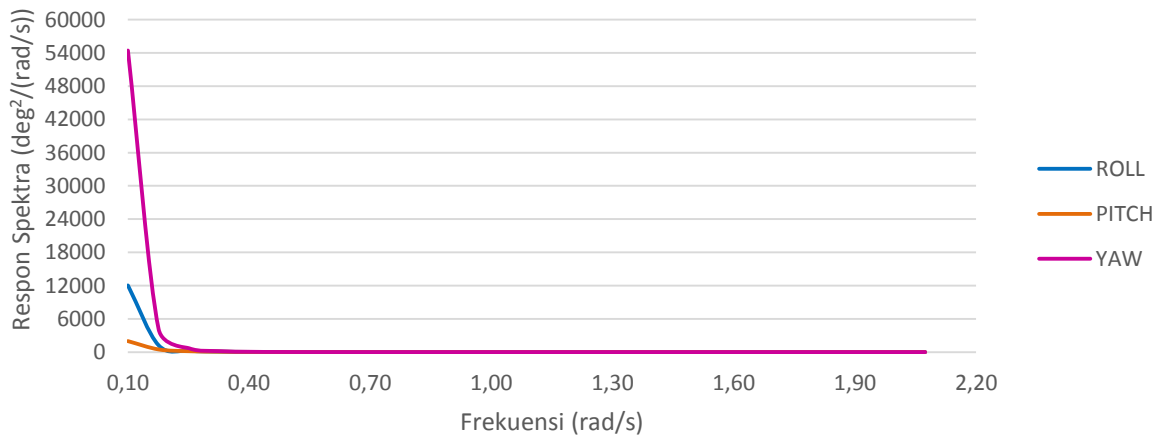
**d. Respon Spektra pada *Shuttle Tanker* 85000 DWT (*Full Load*) saat Kondisi Terapung Bebas (*Free Floating*)**



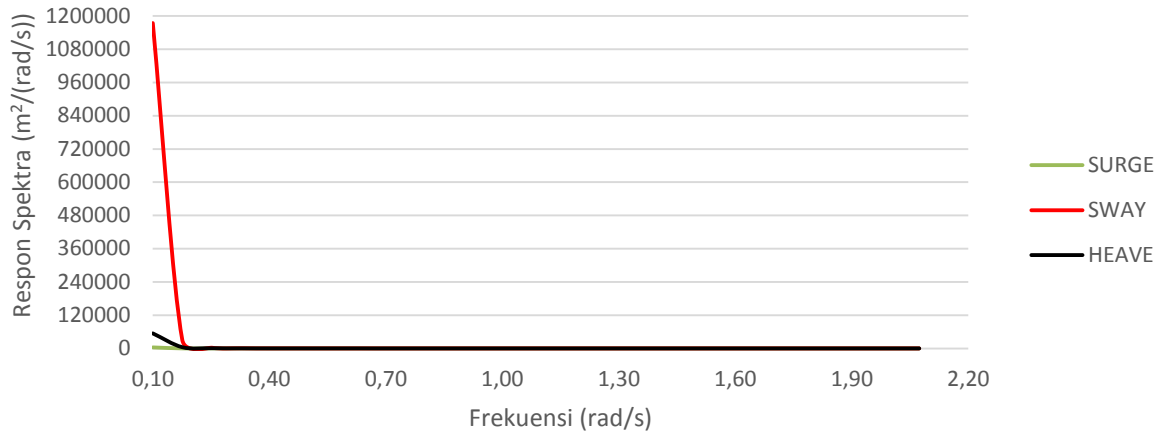
Respon Spektra Gerakan Translasional pada *Shuttle Tanker (Full Load) Heading 45°* Kondisi Terapung Bebas



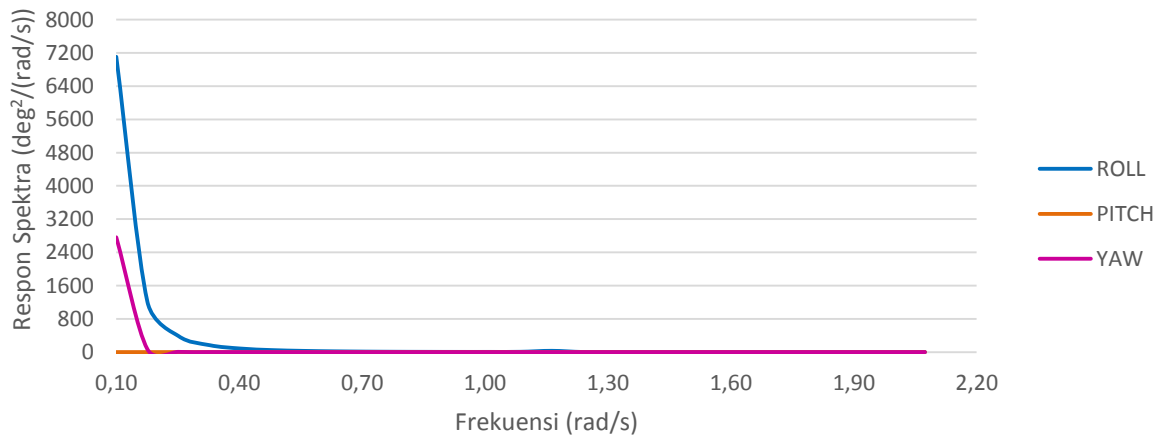
Respon Spektra Gerakan Rotasional pada *Shuttle Tanker (Full Load) Heading 45°* Kondisi Terapung Bebas



Respon Spektra Gerakan Translasional pada *Shuttle Tanker (Full Load)* Heading 90° Kondisi Terapung Bebas

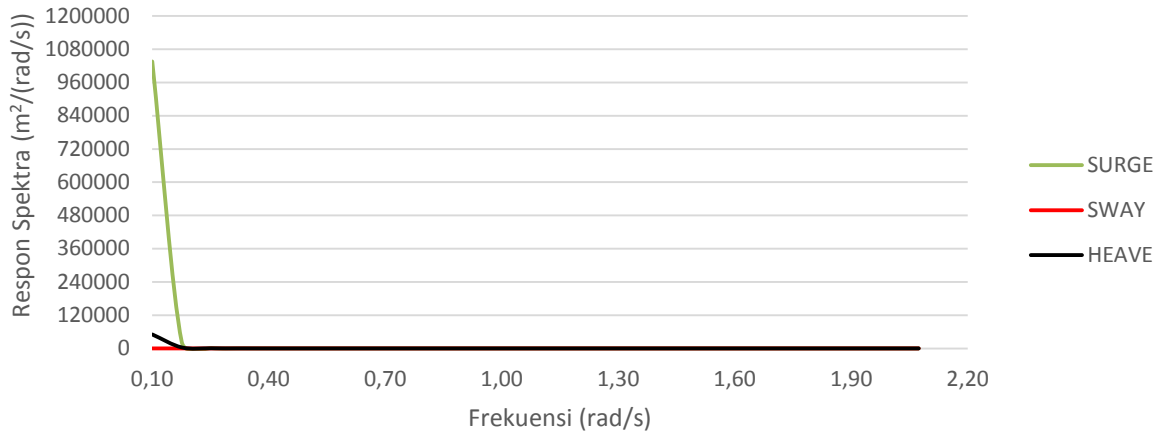


Respon Spektra Gerakan Rotasional pada *Shuttle Tanker (Full Load)* Heading 90° Kondisi Terapung Bebas

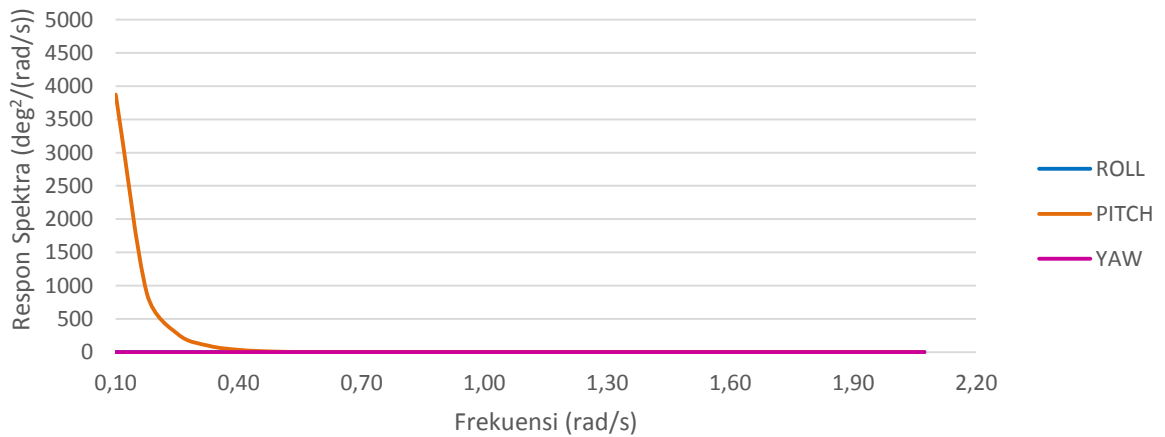




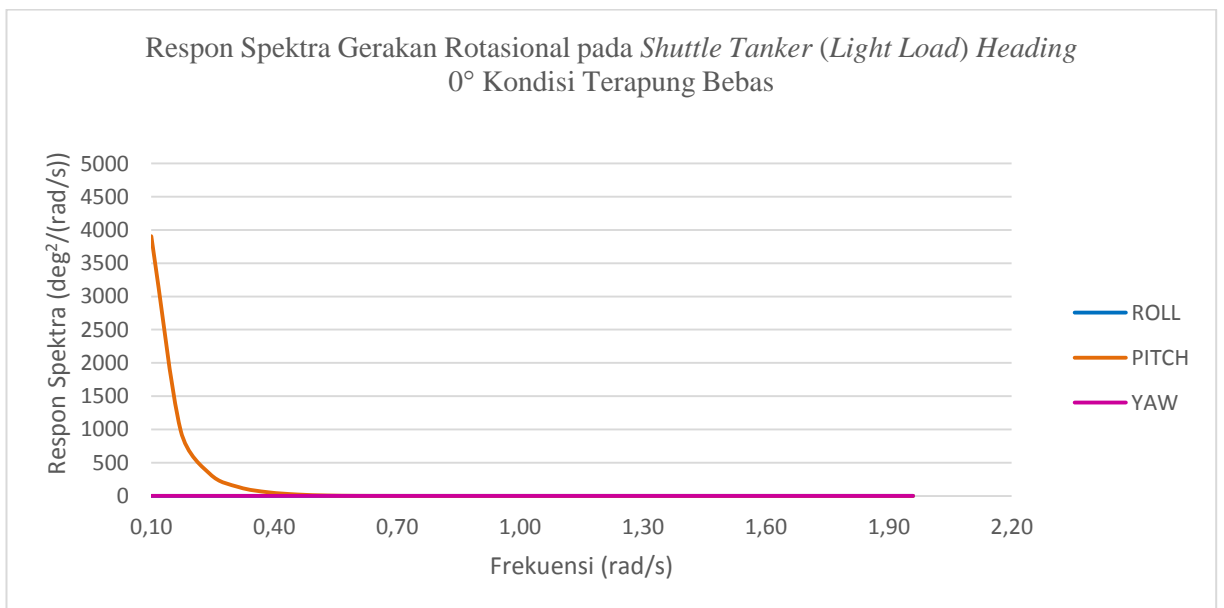
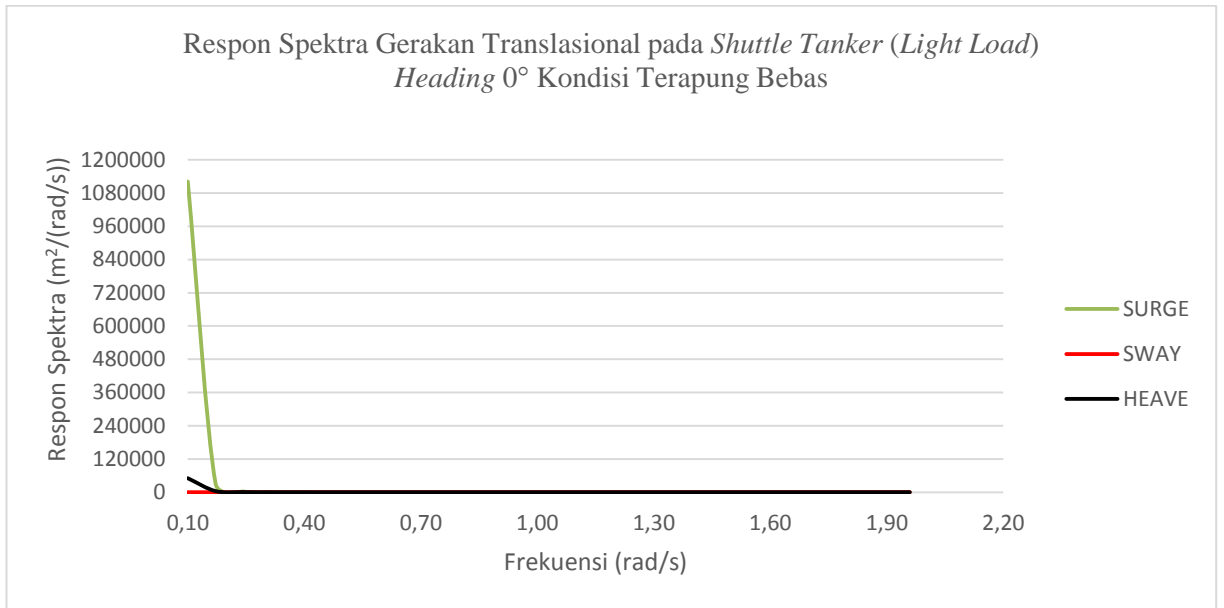
Respon Spektra Gerakan Translasional pada *Shuttle Tanker (Full Load) Heading 180°* Kondisi Terapung Bebas



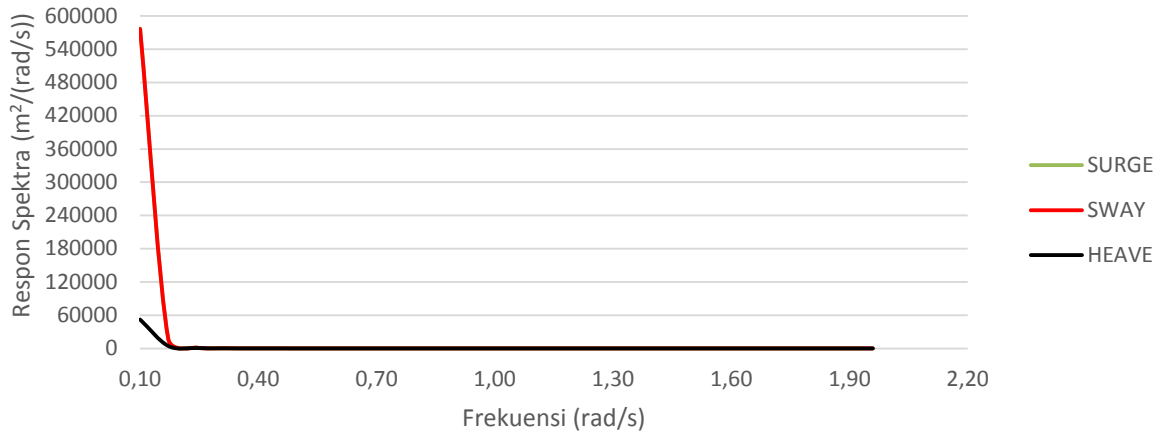
Respon Spektra Gerakan Rotasional pada *Shuttle Tanker (Full Load) Heading 180°* Kondisi Terapung Bebas



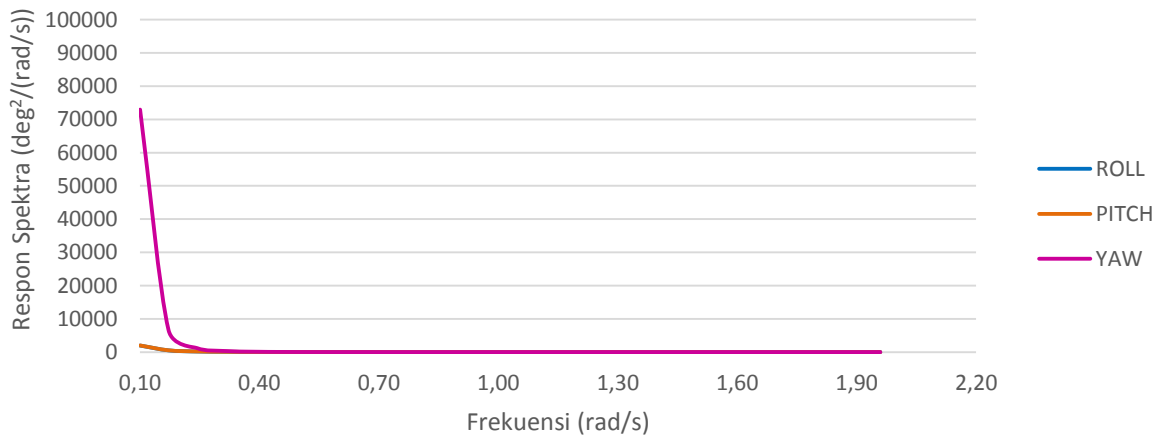
**e. Respon Spektra pada Shuttle Tanker 85000 DWT (Light Load) saat Kondisi Terapung Bebas (Free Floating)**



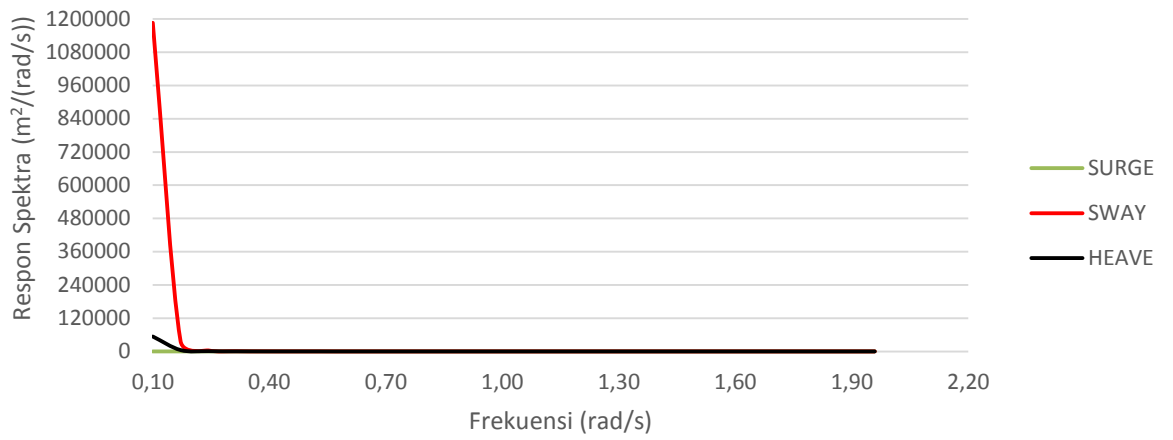
Respon Spektra Gerakan Translasional pada *Shuttle Tanker (Light Load)*  
Heading 45° Kondisi Terapung Bebas



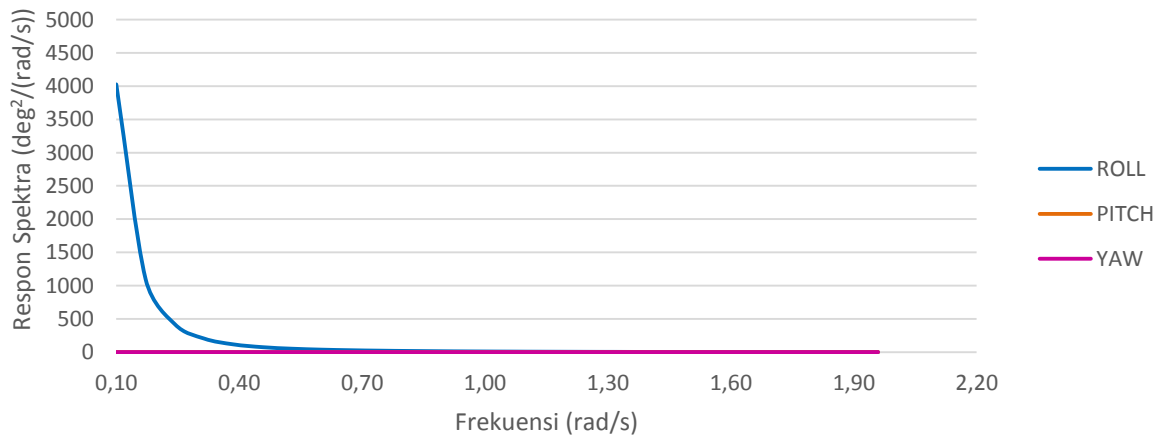
Respon Spektra Gerakan Rotasional pada *Shuttle Tanker (Light Load)* Heading  
45° Kondisi Terapung Bebas



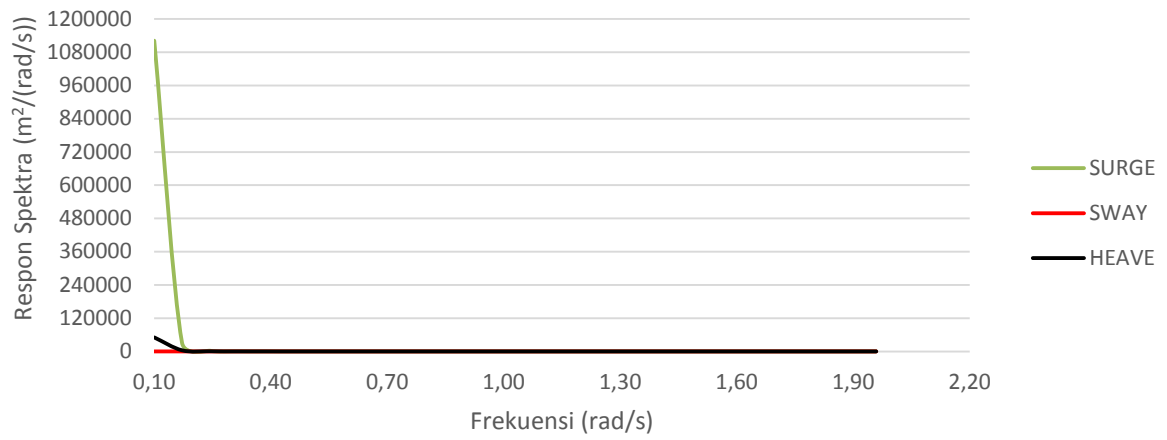
Respon Spektra Gerakan Translasional pada *Shuttle Tanker (Light Load)*  
Heading 90° Kondisi Terapung Bebas



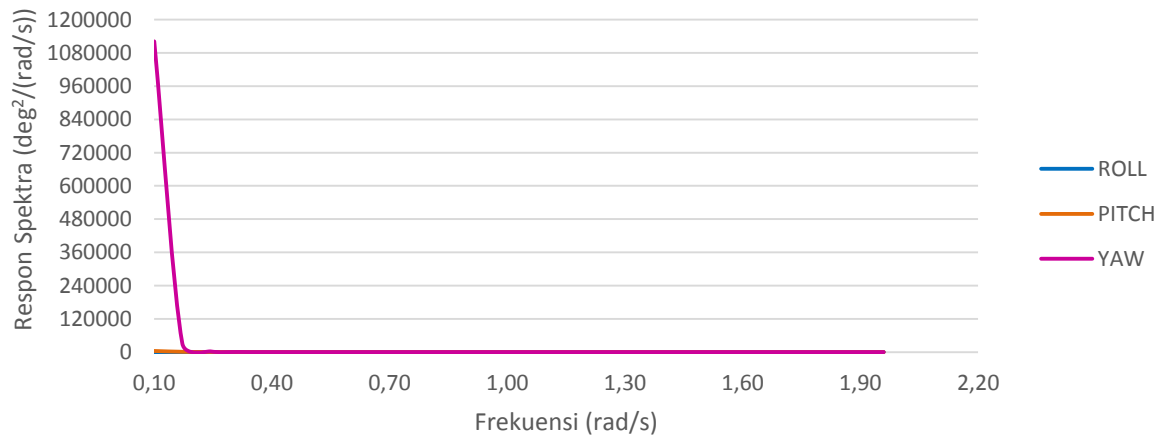
Respon Spektra Gerakan Rotasional pada *Shuttle Tanker (Light Load)* Heading  
90° Kondisi Terapung Bebas



Respon Spektra Gerakan Translasional pada *Shuttle Tanker (Light Load)*  
Heading 180° Kondisi Terapung Bebas



Respon Spektra Gerakan Rotasional pada *Shuttle Tanker (Light Load)* Heading  
180° Kondisi Terapung Bebas



## **LAMPIRAN E**

### **Hasil Analisis *Tension* pada *Anchor Legs* dan *Hawser***

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

Keterangan:

*Cable 1 : Hawser 1*

*Cable 2 : Hawser 2*

*Cable 3 : Anchor Leg 1*

*Cable 4 : Anchor Leg 2*

*Cable 5 : Anchor Leg 3*

*Cable 6 : Anchor Leg 4*

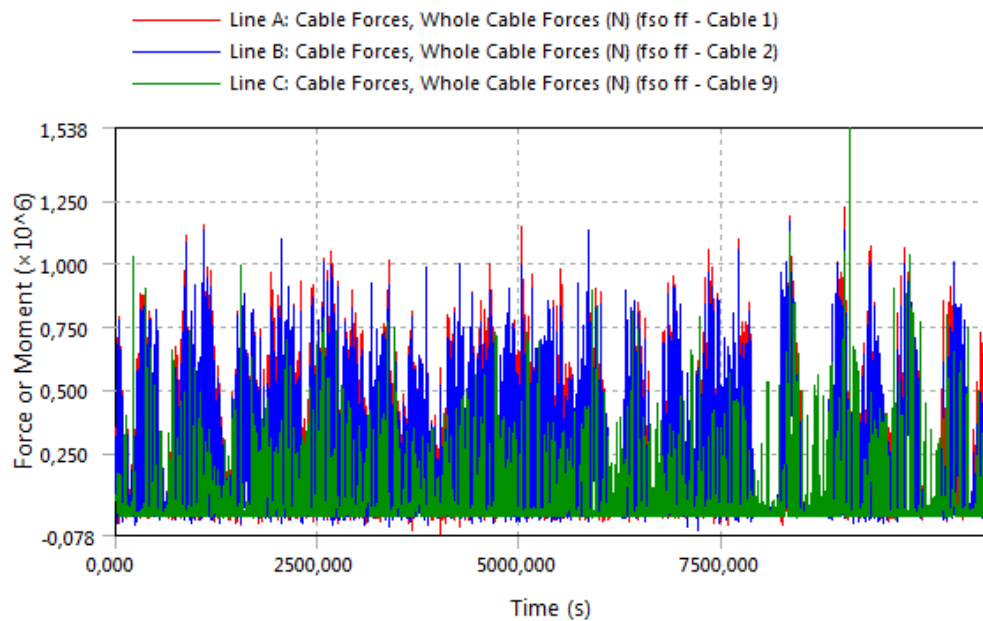
*Cable 7 : Anchor Leg 5*

*Cable 8 : Anchor Leg 6*

*Cable 9: Hawser 3*

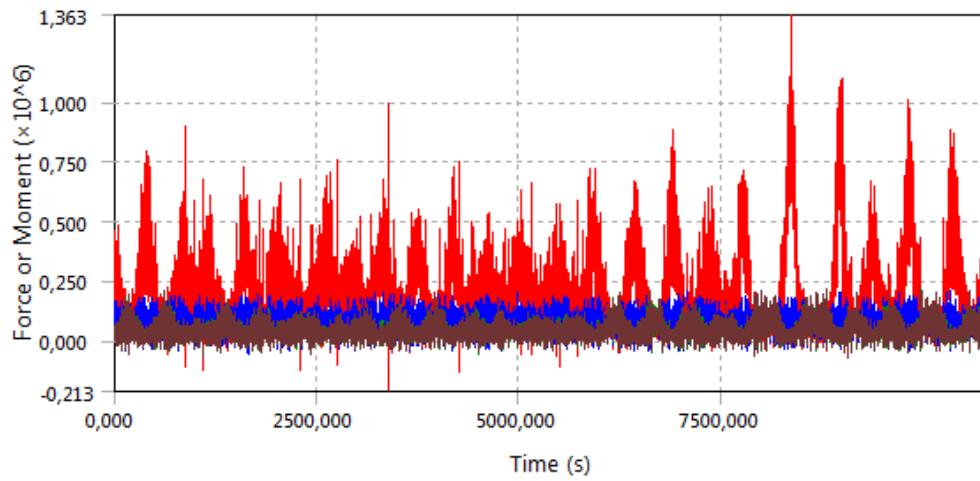
- a. Hasil dari *Software Ansys AQWA* untuk Nilai *Tension* pada *Anchor Legs* dan *Hawser* saat Sistem *Tandem Offloading SPM – FSO Full Load – Shuttle Tanker Light Load*

1. *Heading 0°*

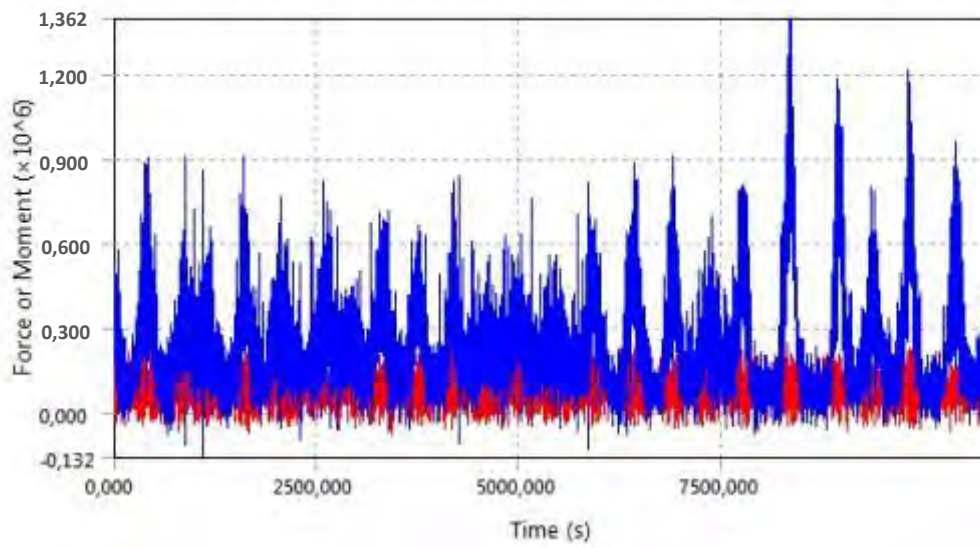




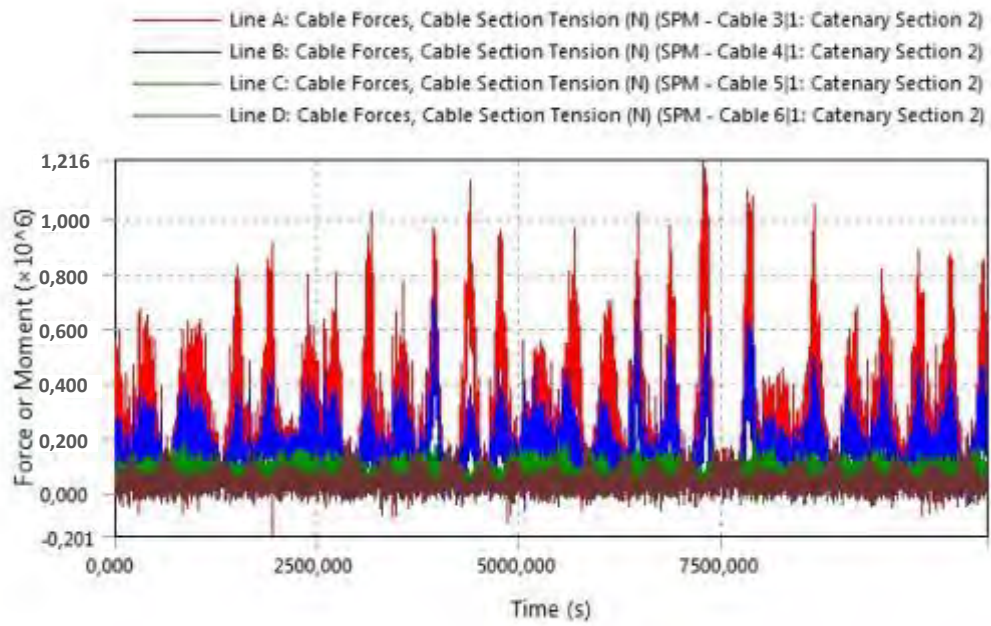
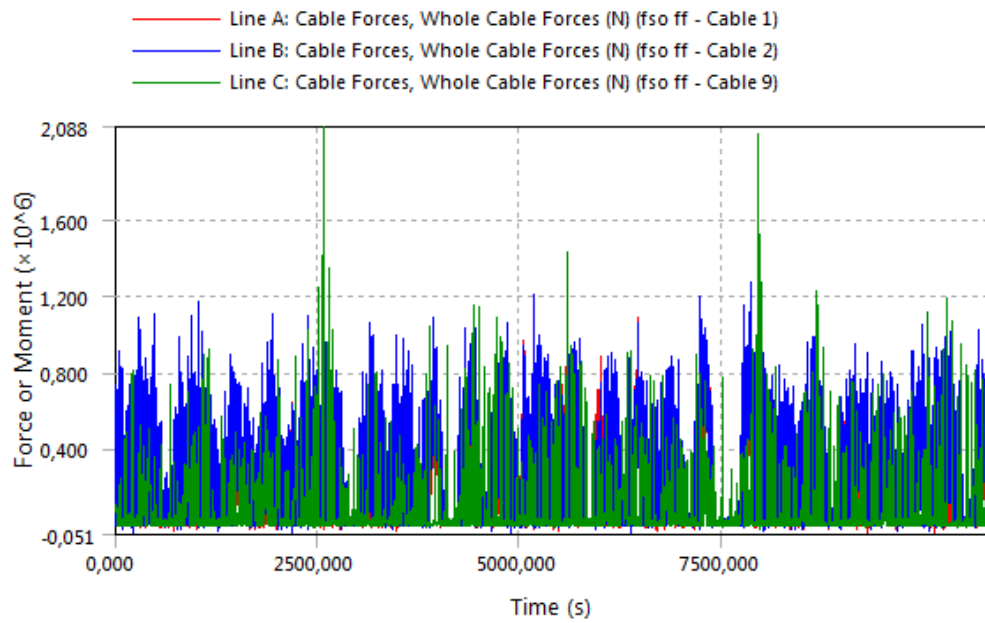
- Line A: Cable Forces, Cable Section Tension (N) (SPM - Cable 3|1: Catenary Section 2)
- Line B: Cable Forces, Cable Section Tension (N) (SPM - Cable 4|1: Catenary Section 2)
- Line C: Cable Forces, Cable Section Tension (N) (SPM - Cable 5|1: Catenary Section 2)
- Line D: Cable Forces, Cable Section Tension (N) (SPM - Cable 6|1: Catenary Section 2)

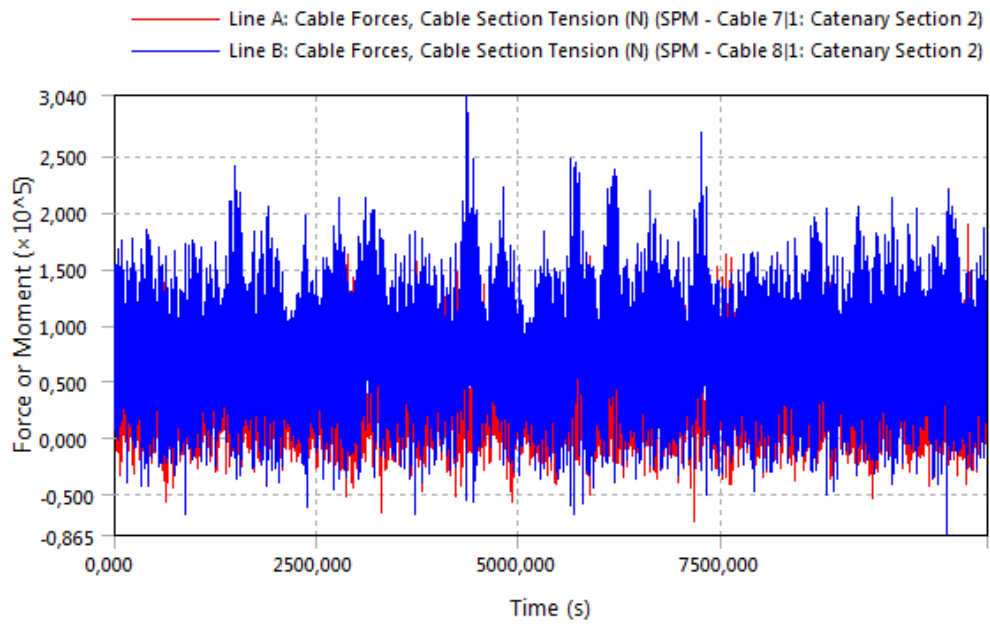


- Line A: Cable Forces, Cable Section Tension (N) (SPM - Cable 7|1: Catenary Section 2)
- Line B: Cable Forces, Cable Section Tension (N) (SPM - Cable 8|1: Catenary Section 2)

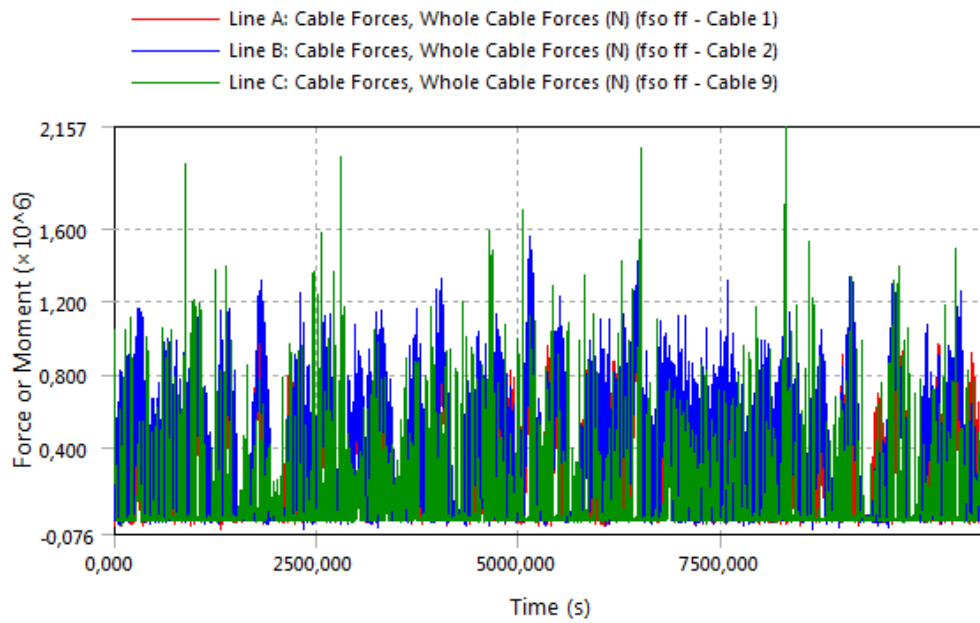


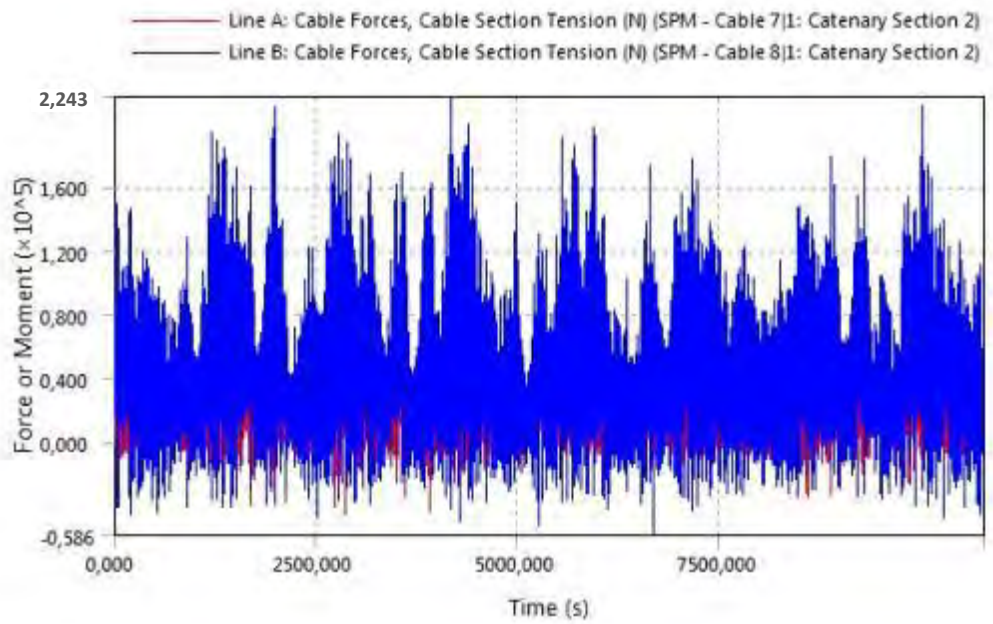
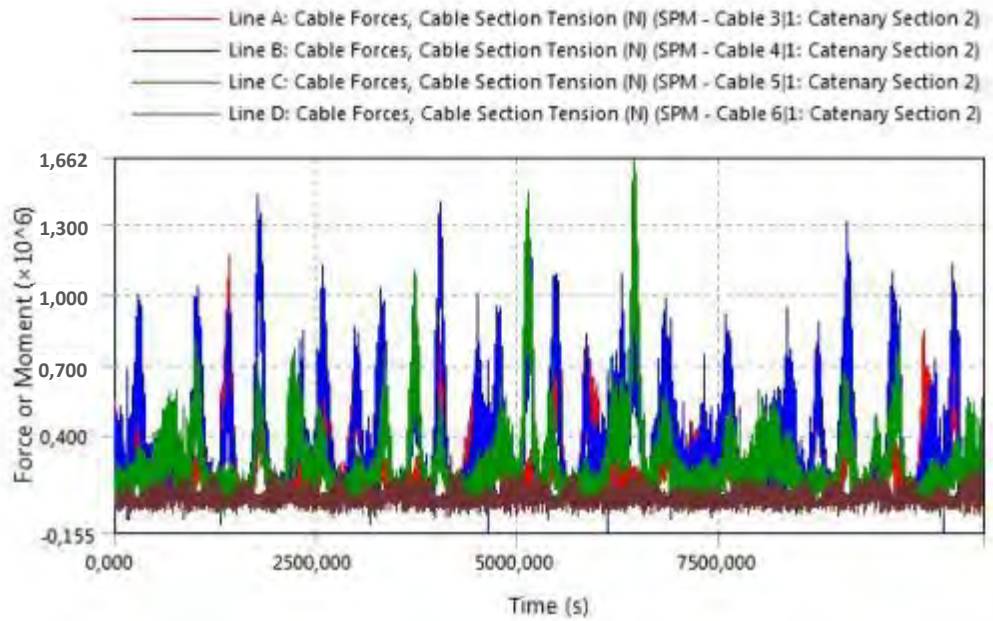
## 2. Heading 45°



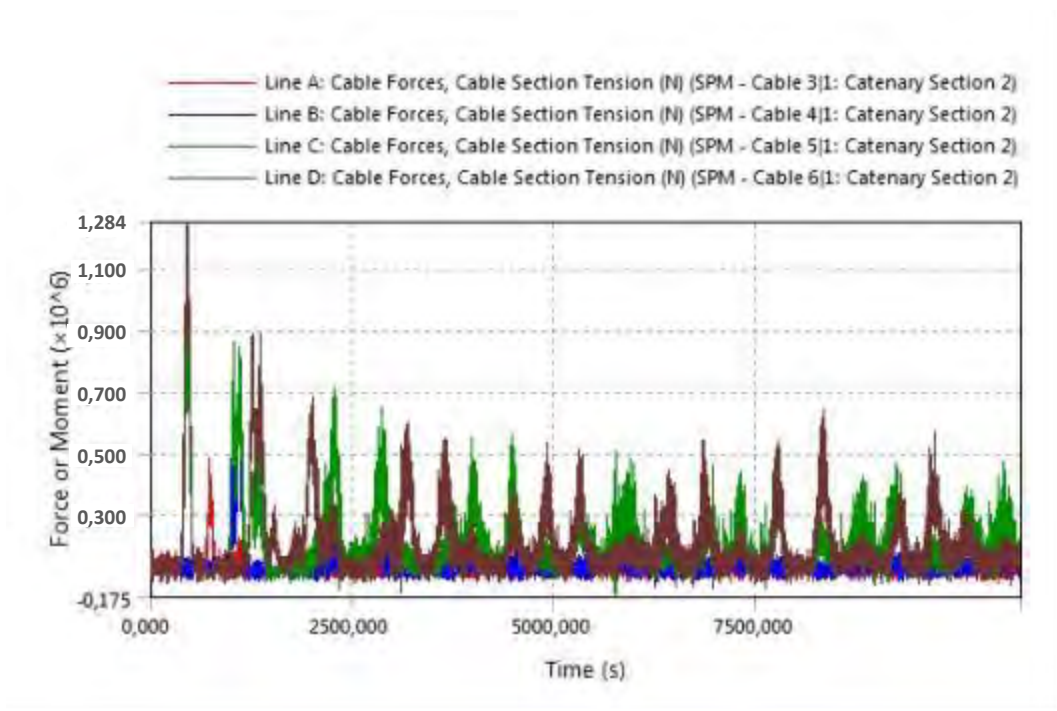
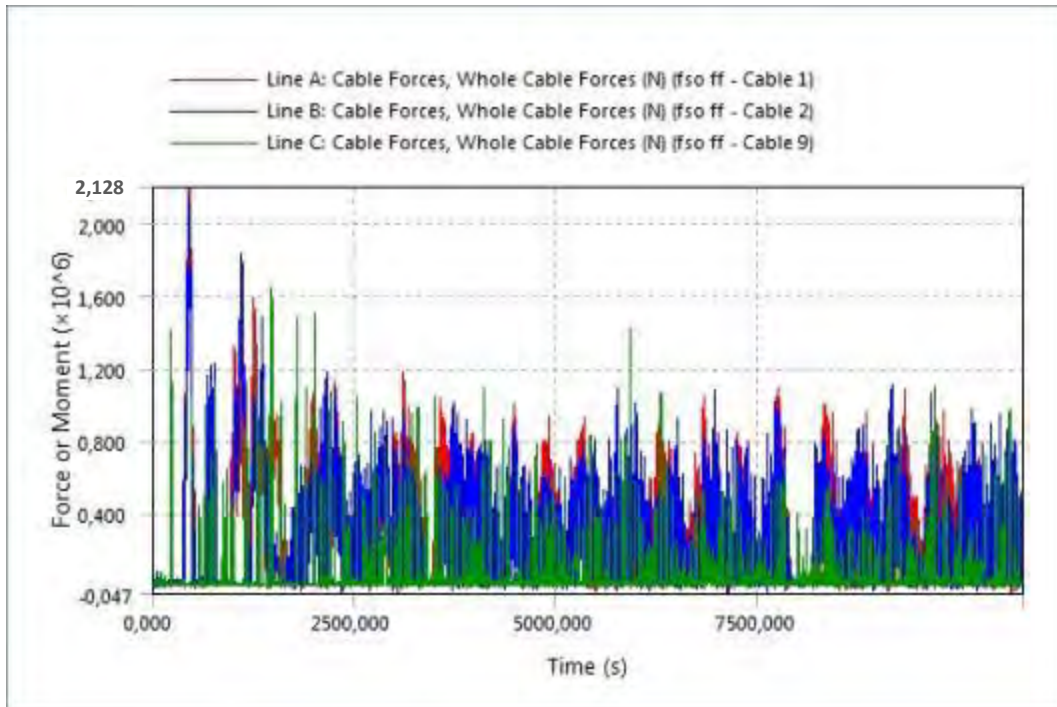


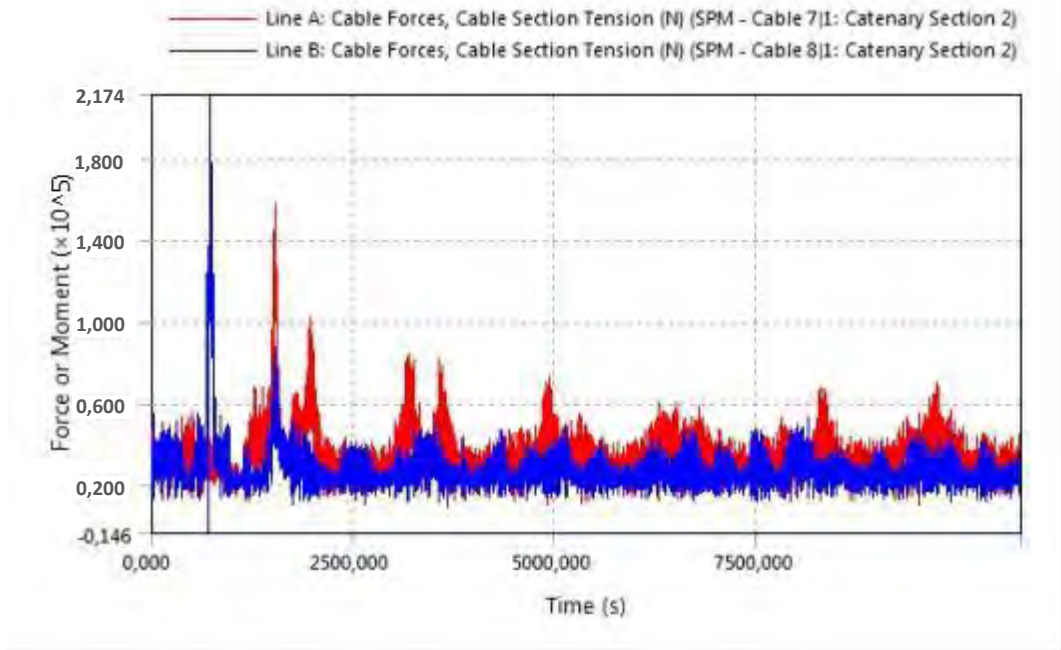
### 3. Heading 90°





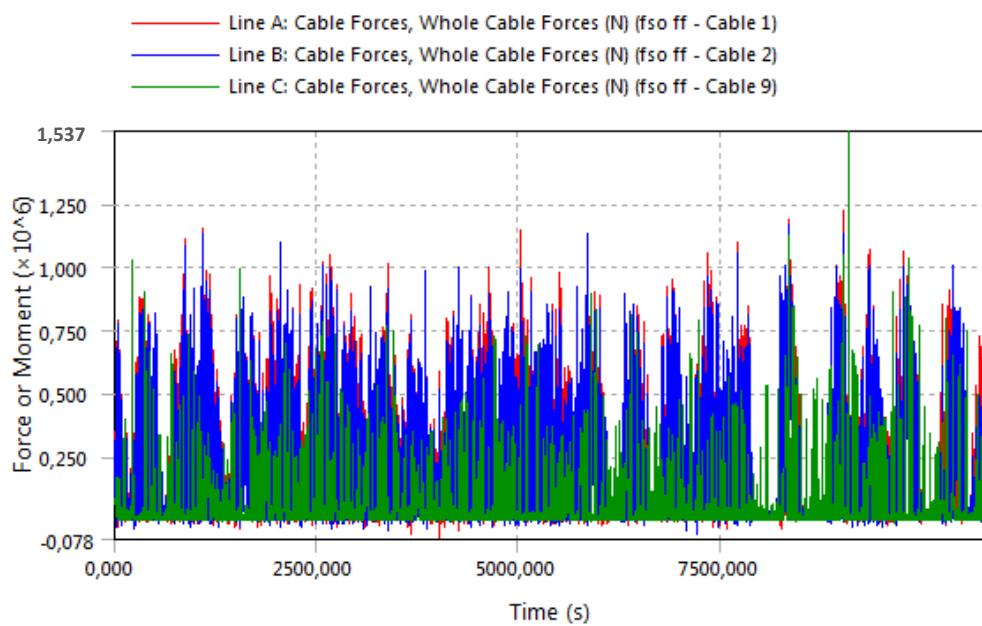
#### 4. Heading 180°



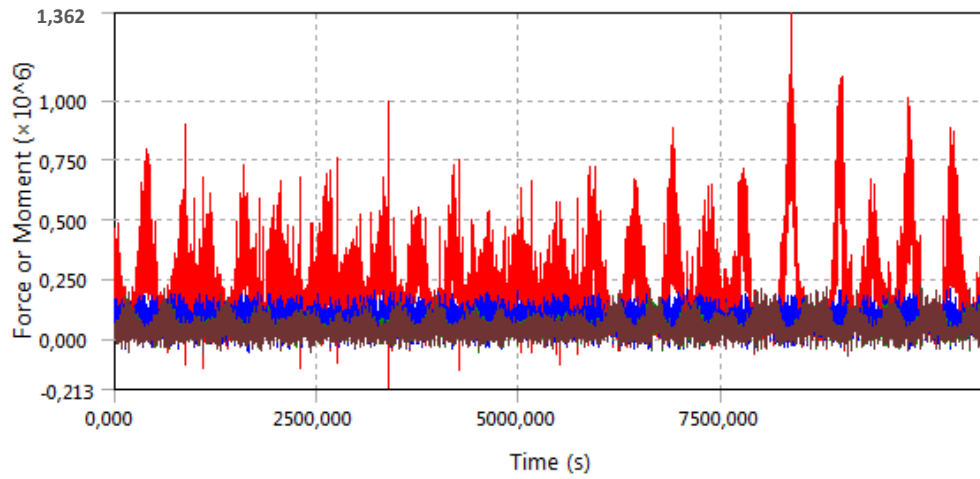


b. Hasil dari *Software Ansys AQWA* untuk Nilai *Tension* pada *Anchor Legs* dan *Hawser* saat Sistem *Tandem Offloading SPM – FSO Light Load – Shuttle Tanker Full Load*

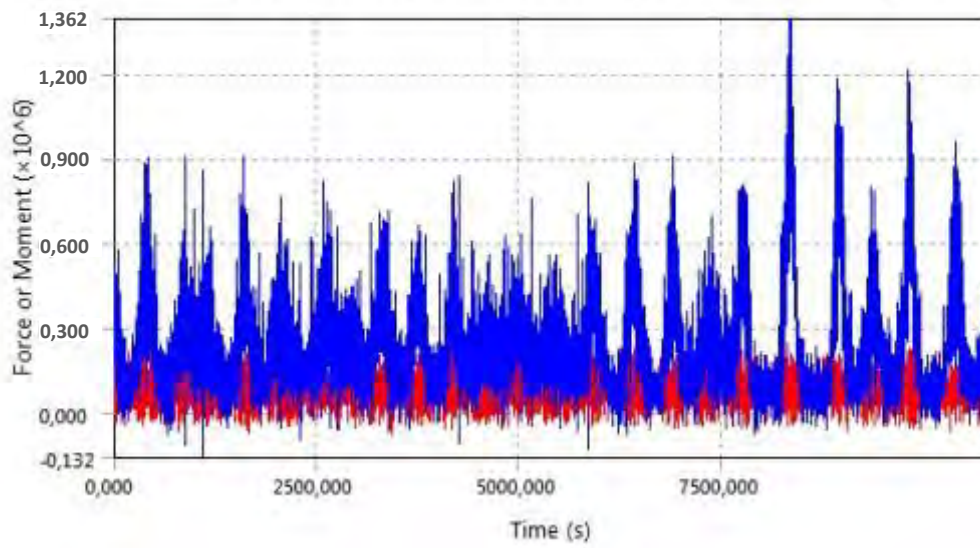
1. *Heading 0°*



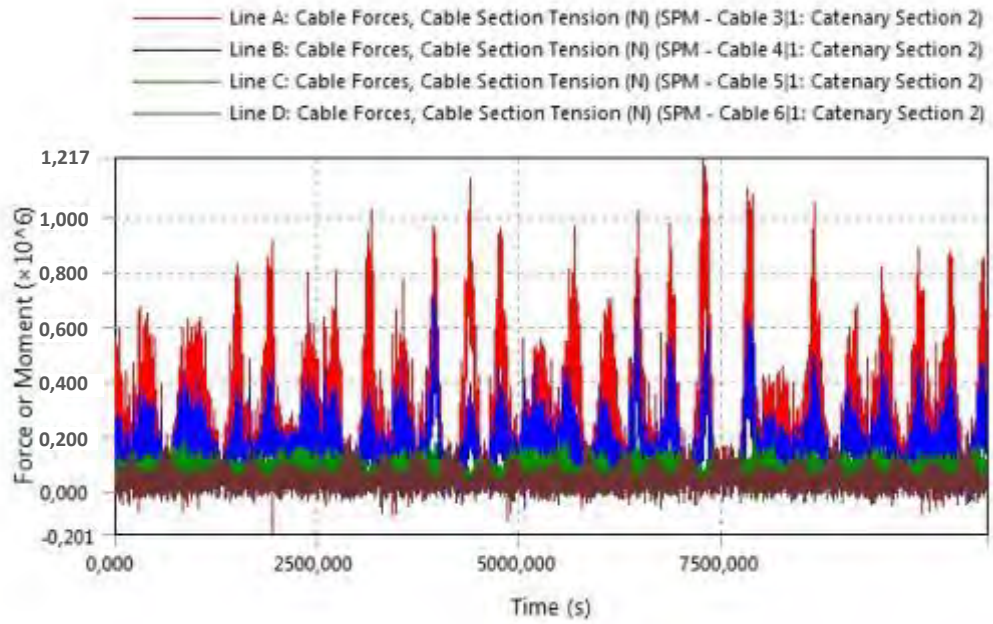
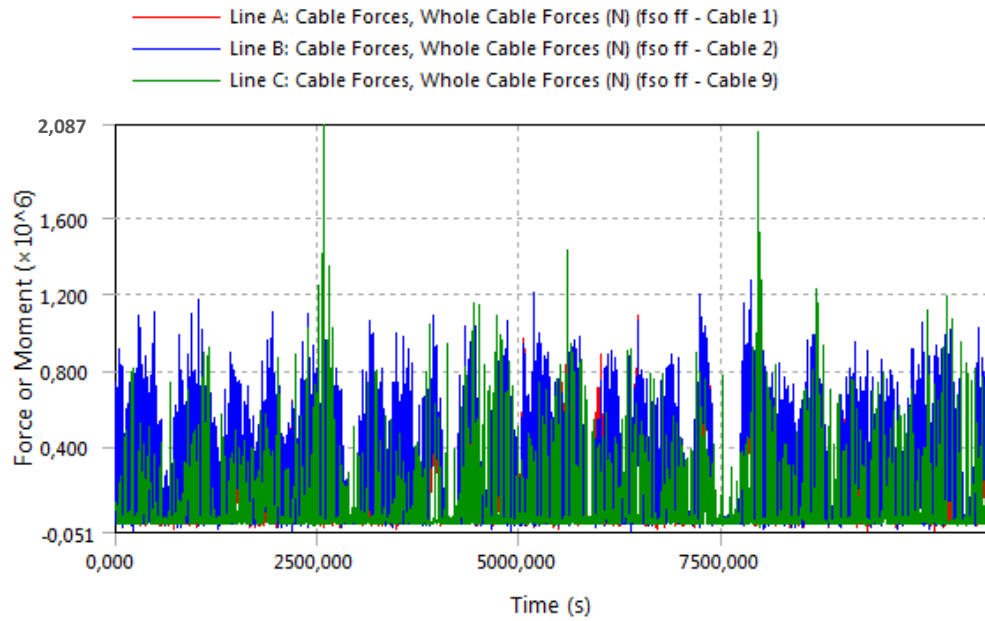
- Line A: Cable Forces, Cable Section Tension (N) (SPM - Cable 3|1: Catenary Section 2)
- Line B: Cable Forces, Cable Section Tension (N) (SPM - Cable 4|1: Catenary Section 2)
- Line C: Cable Forces, Cable Section Tension (N) (SPM - Cable 5|1: Catenary Section 2)
- Line D: Cable Forces, Cable Section Tension (N) (SPM - Cable 6|1: Catenary Section 2)



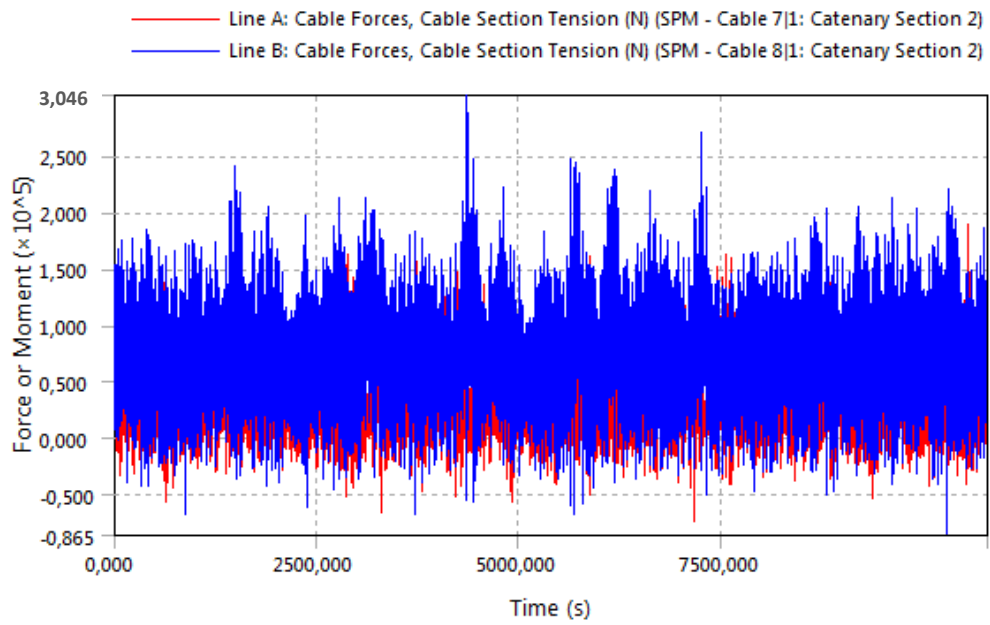
- Line A: Cable Forces, Cable Section Tension (N) (SPM - Cable 7|1: Catenary Section 2)
- Line B: Cable Forces, Cable Section Tension (N) (SPM - Cable 8|1: Catenary Section 2)



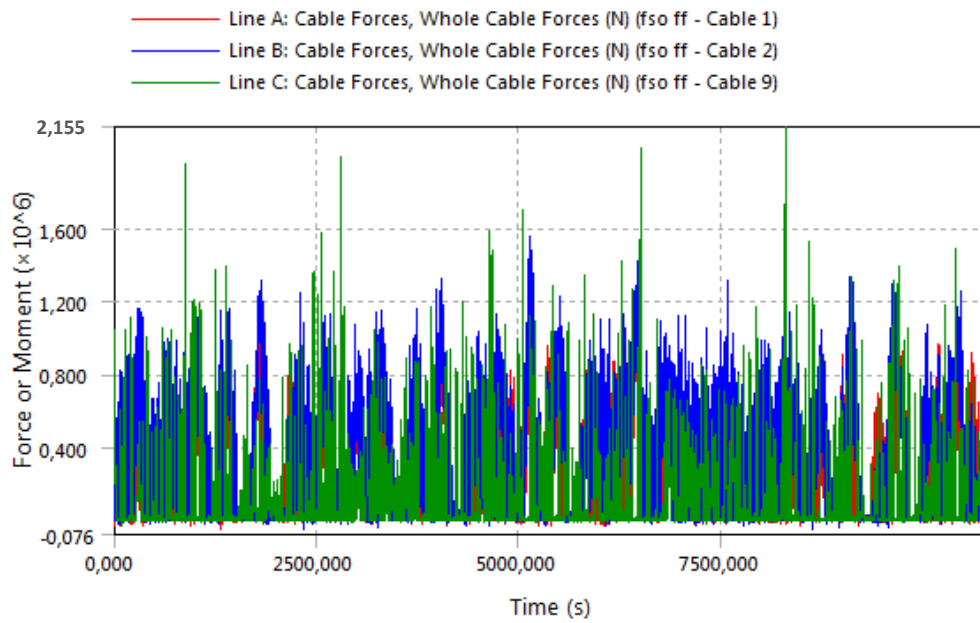
## 2. Heading 45°

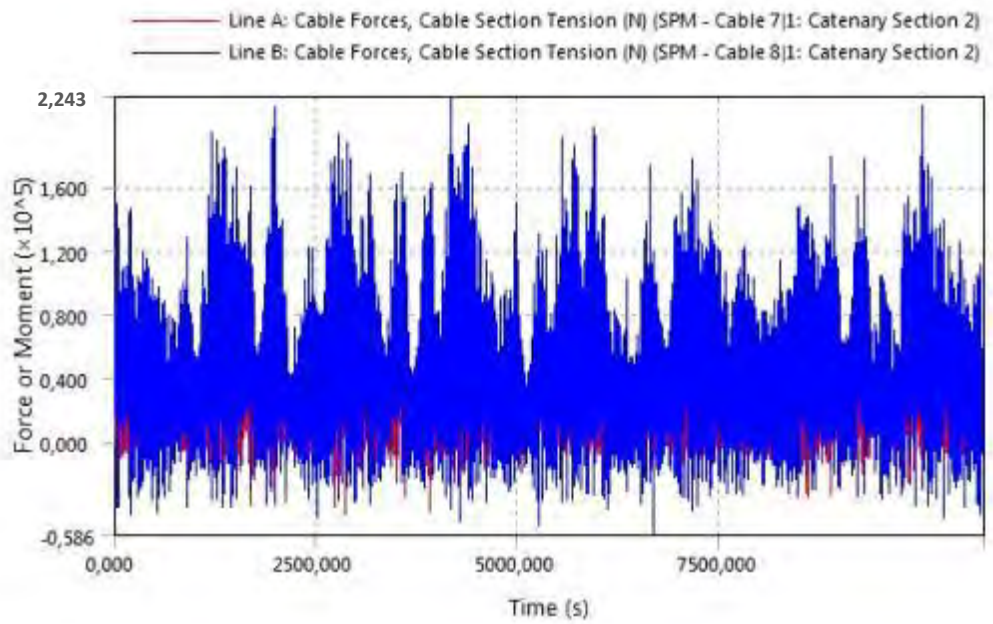
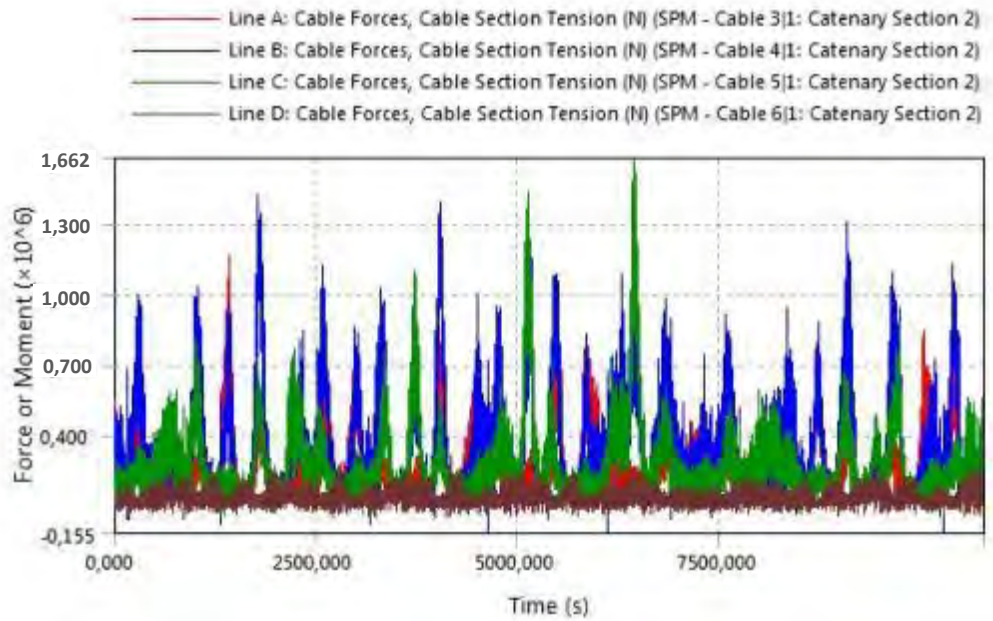




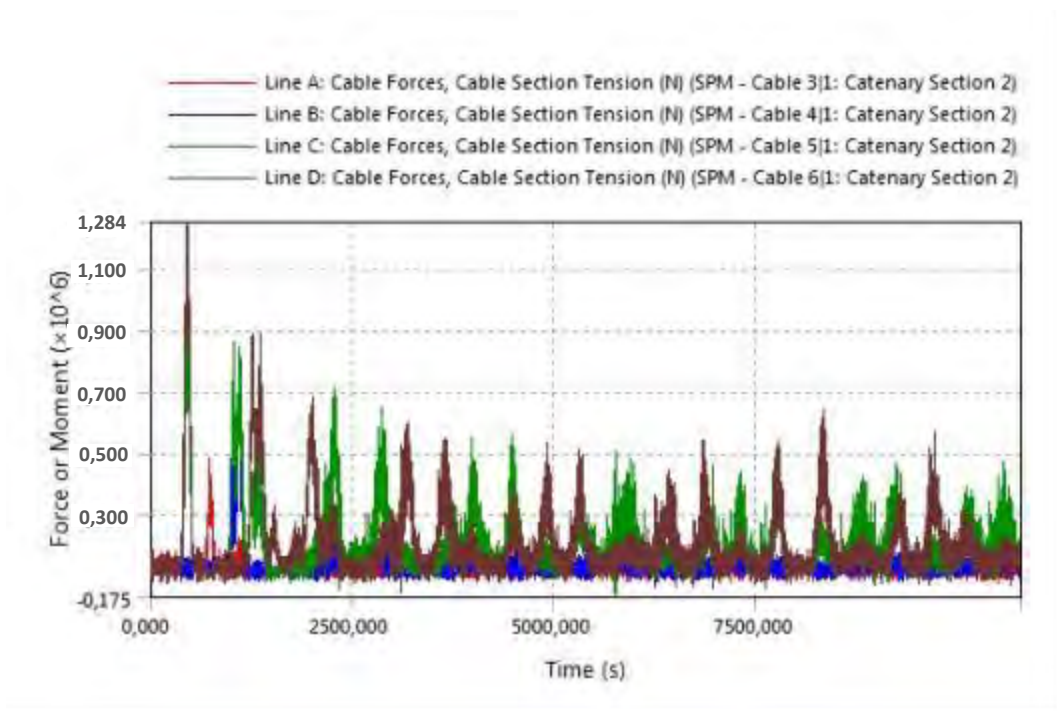
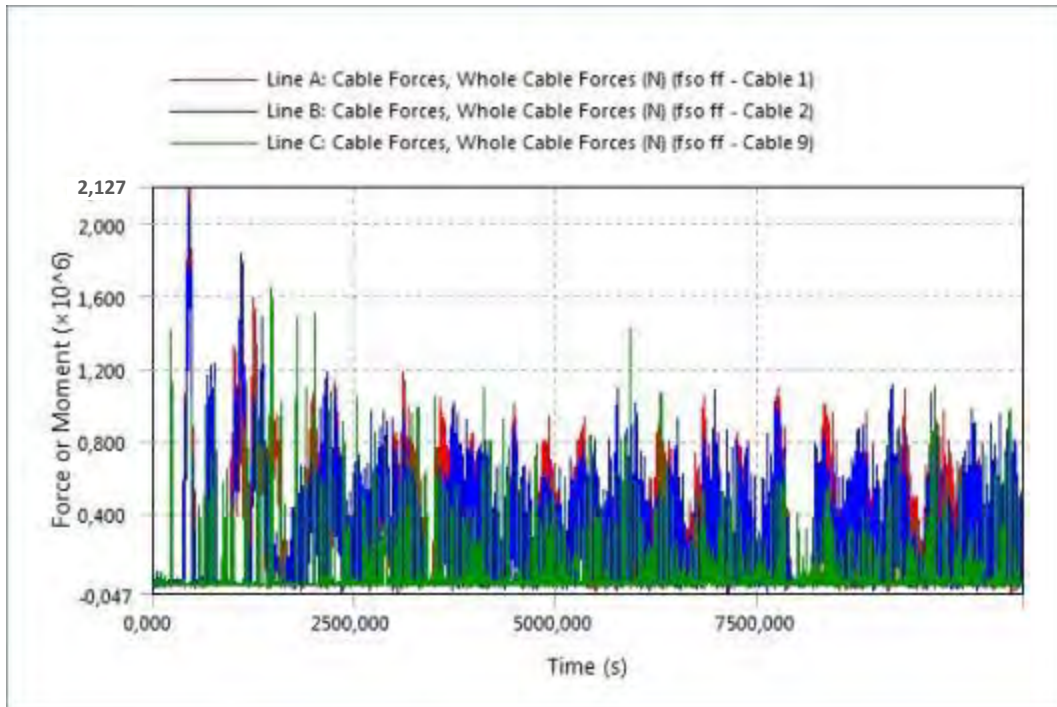


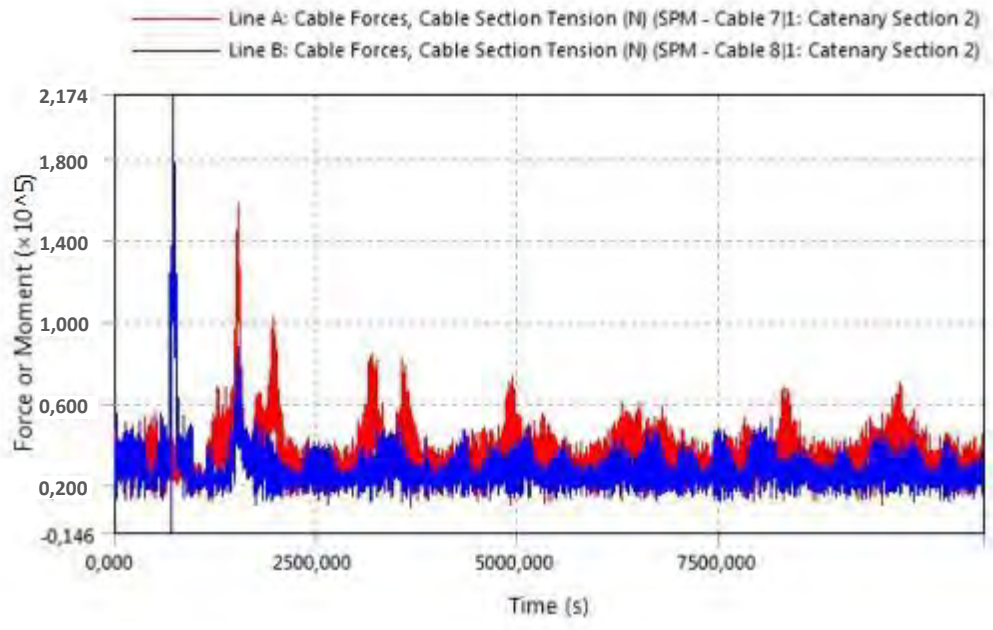
### 3. Heading 90°





#### 4. Heading 180°





*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## **LAMPIRAN F**

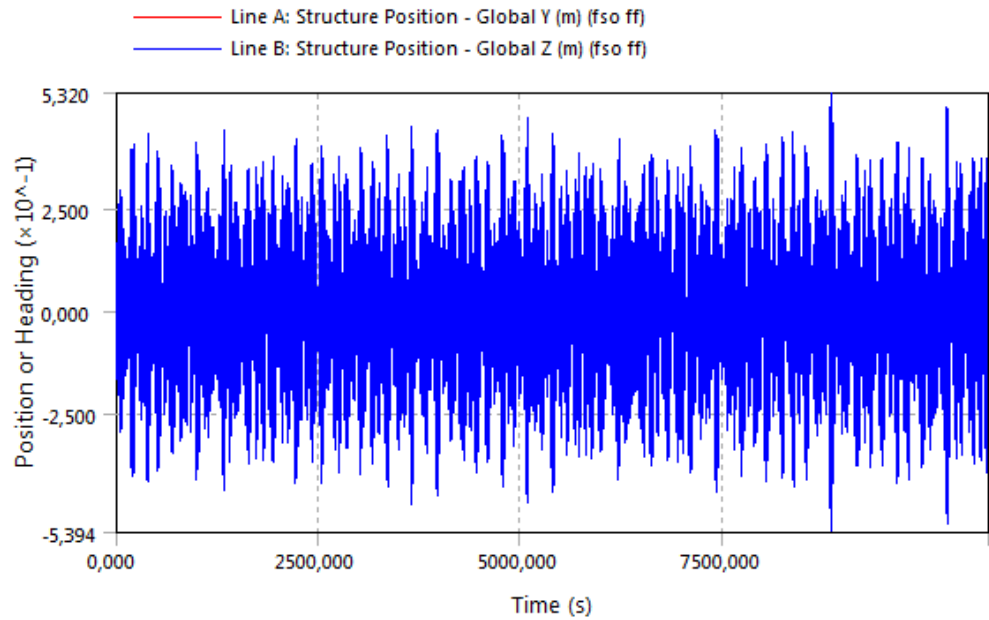
**Hasil dari *Software* Ansys AQWA untuk  
*Structure Position* pada FSO Arco Ardjuna  
dan *Shuttle Tanker* 85000 DWT**

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

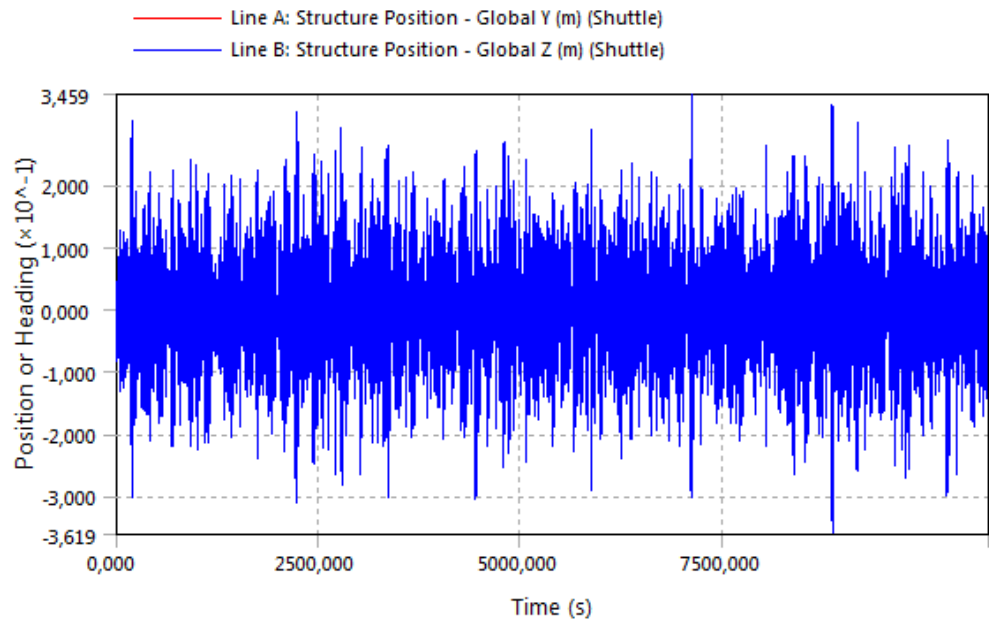
a. Kondisi saat Sistem *Tandem Offloading SPM – FSO Full Load – Shuttle Tanker Light Load*

1. *Heading 0°*

- *Structure Position* pada FSO Arco Ardjuna



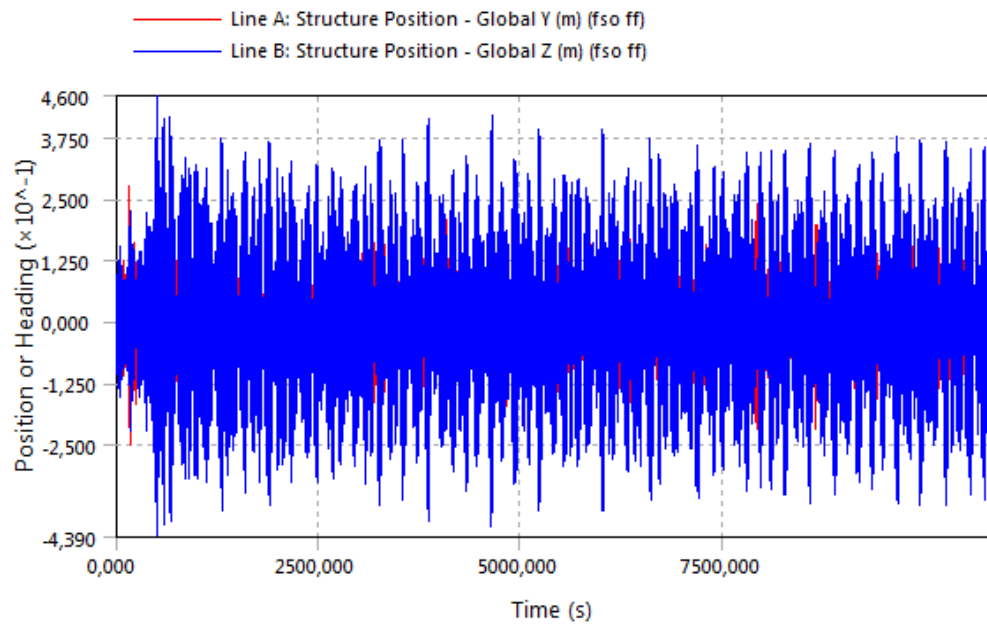
- *Structure Position* pada Shuttle Tanker 85000 DWT



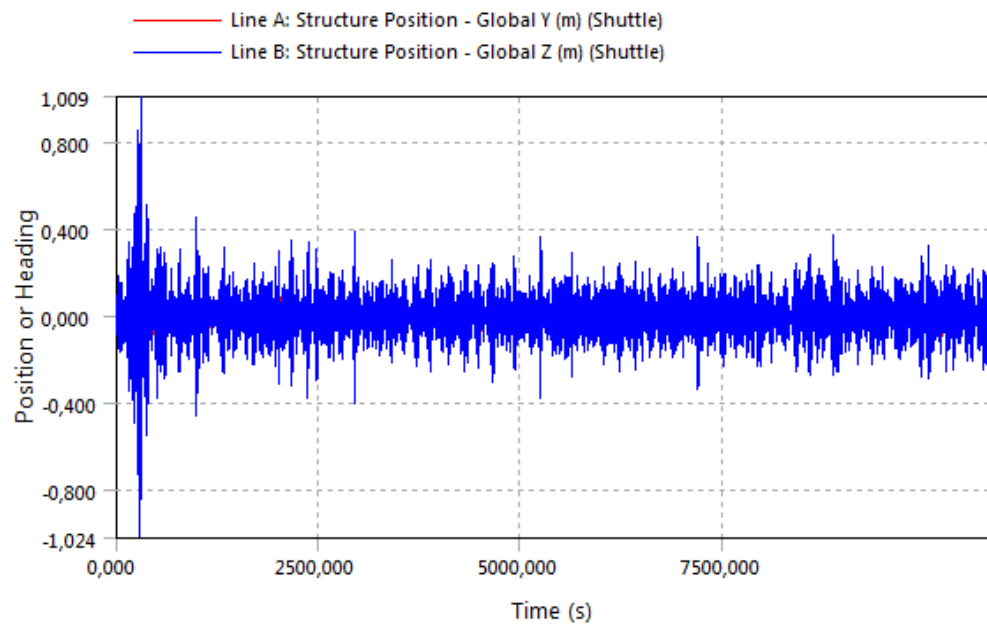


## 2. Heading 45°

- *Structure Position* pada FSO Arco Ardjuna

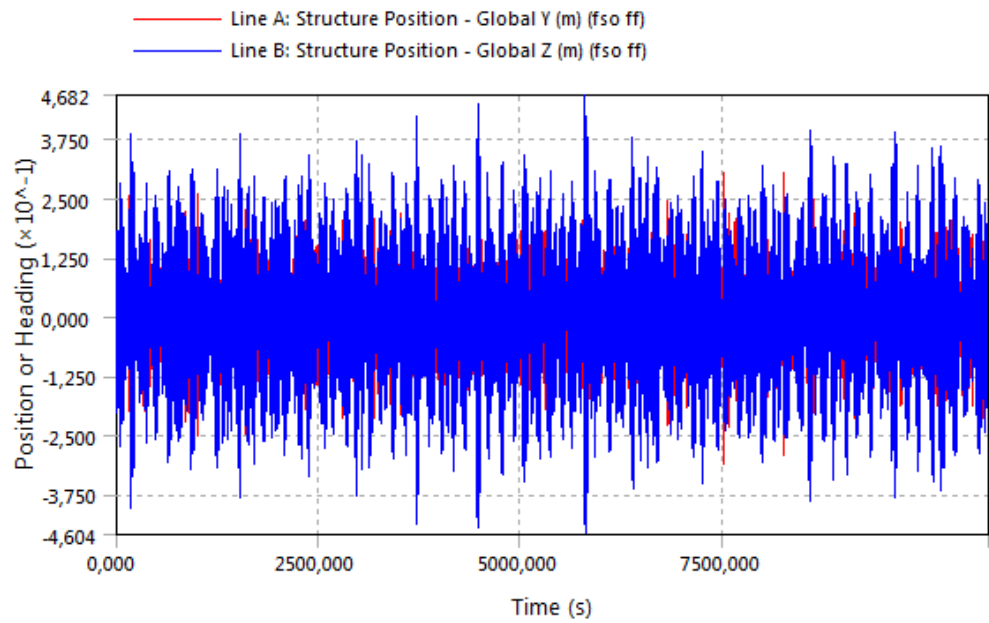


- *Structure Position* pada Shuttle Tanker 85000 DWT

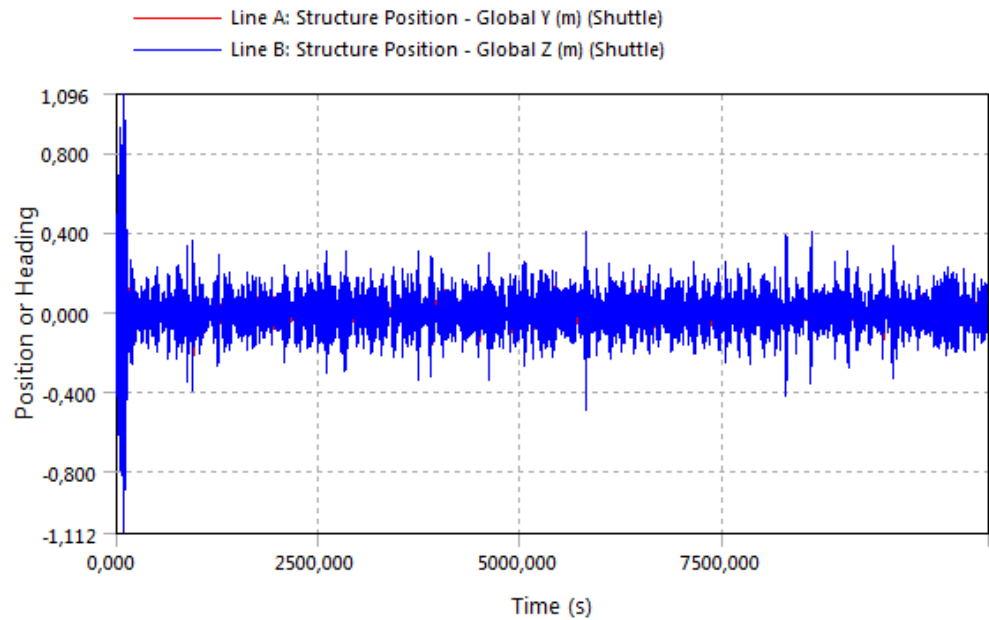


### 3. Heading 90°

- *Structure Position* pada FSO Arco Ardjuna

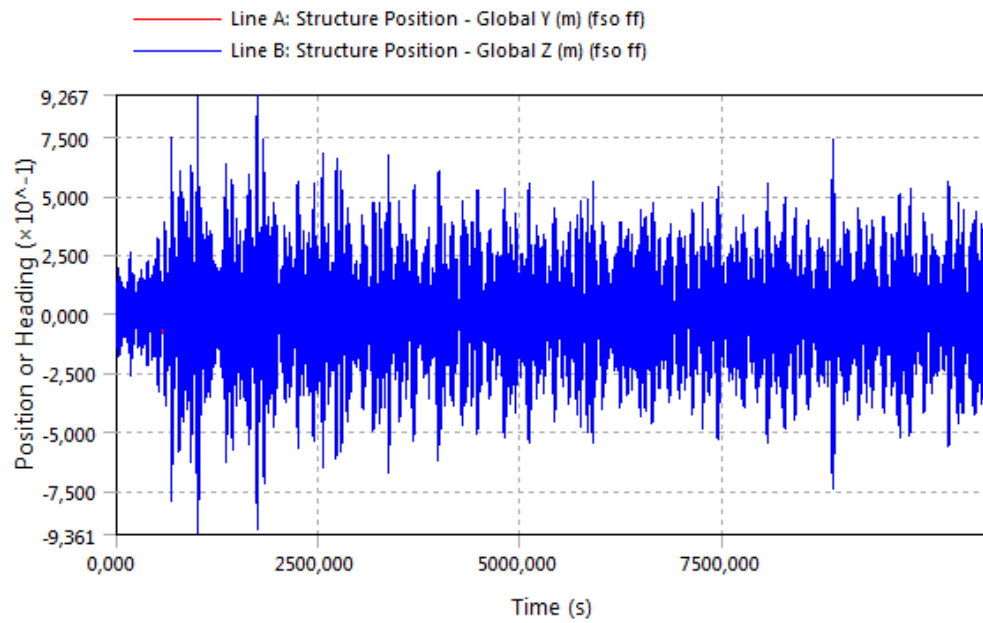


- *Structure Position* pada Shuttle Tanker 85000 DWT

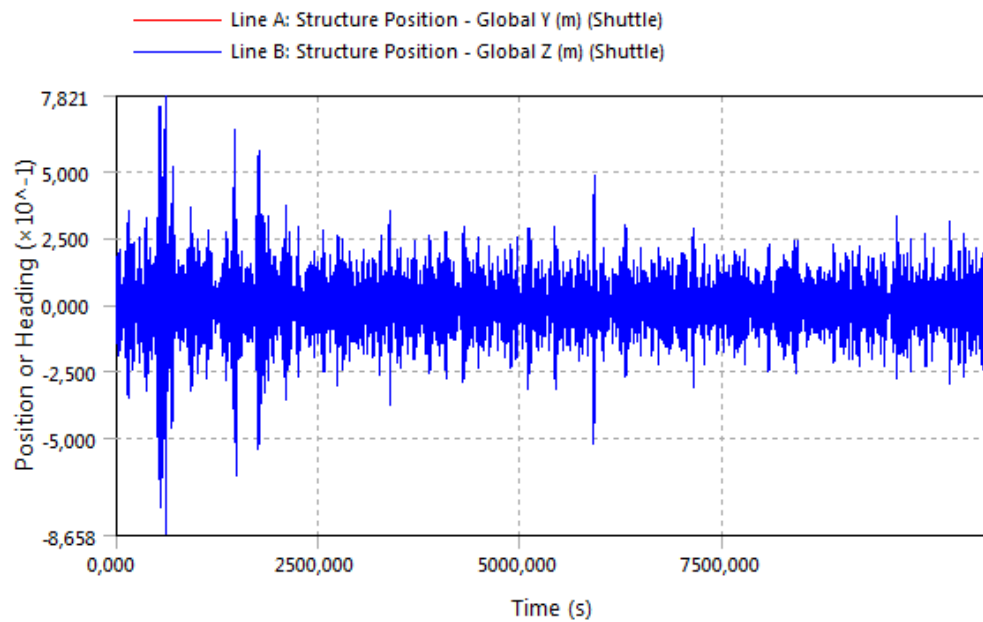


#### 4. Heading 180°

- *Structure Position* pada FSO Arco Ardjuna



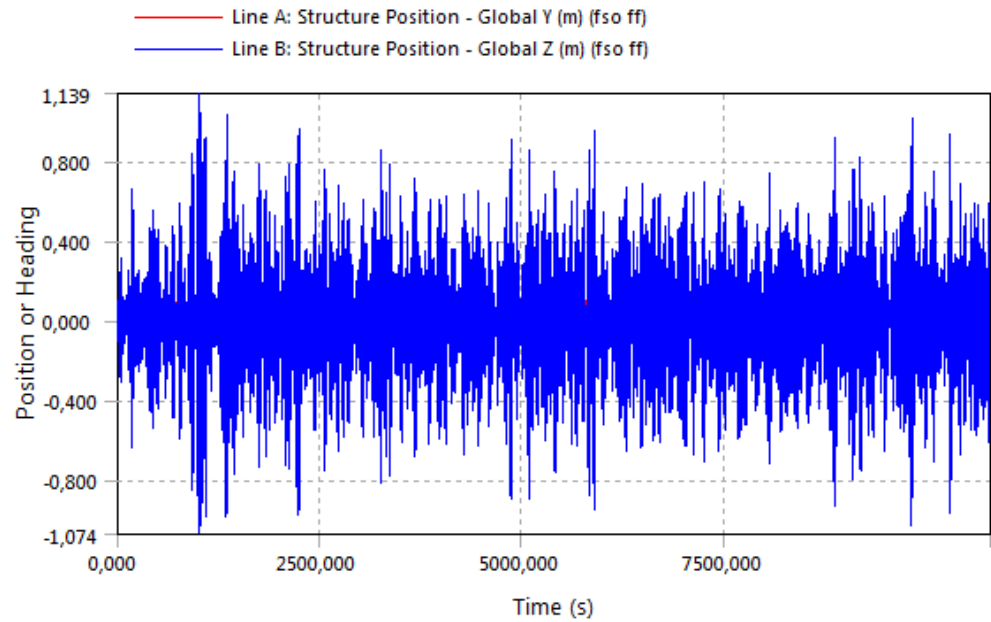
- *Structure Position* pada Shuttle Tanker 85000 DWT



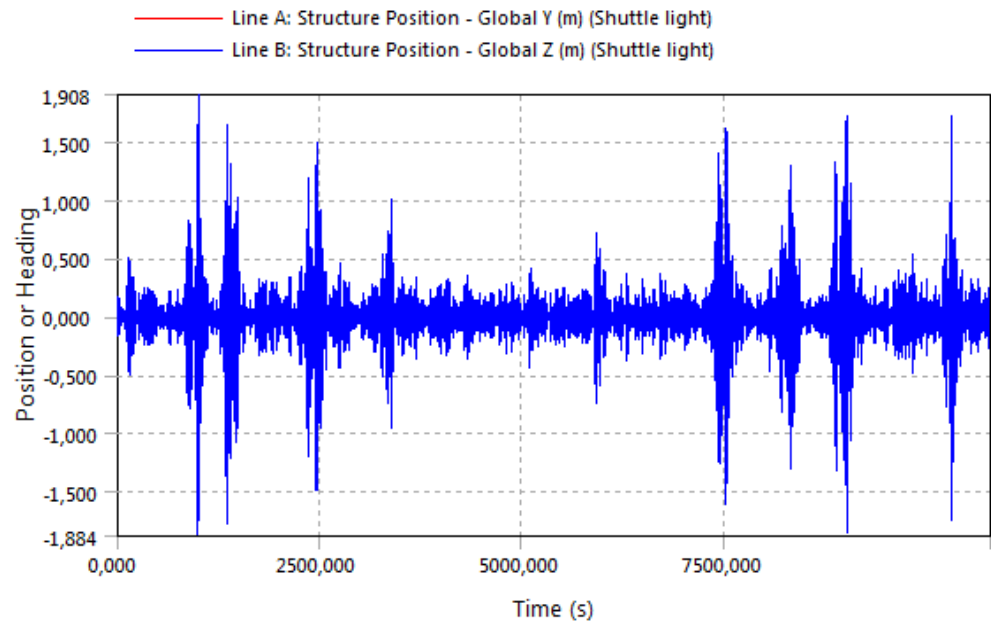
b. Kondisi saat Sistem *Tandem Offloading SPM – FSO Light Load – Shuttle Tanker Full Load*

1. *Heading 0°*

- *Structure Position pada FSO Arco Ardjuna*

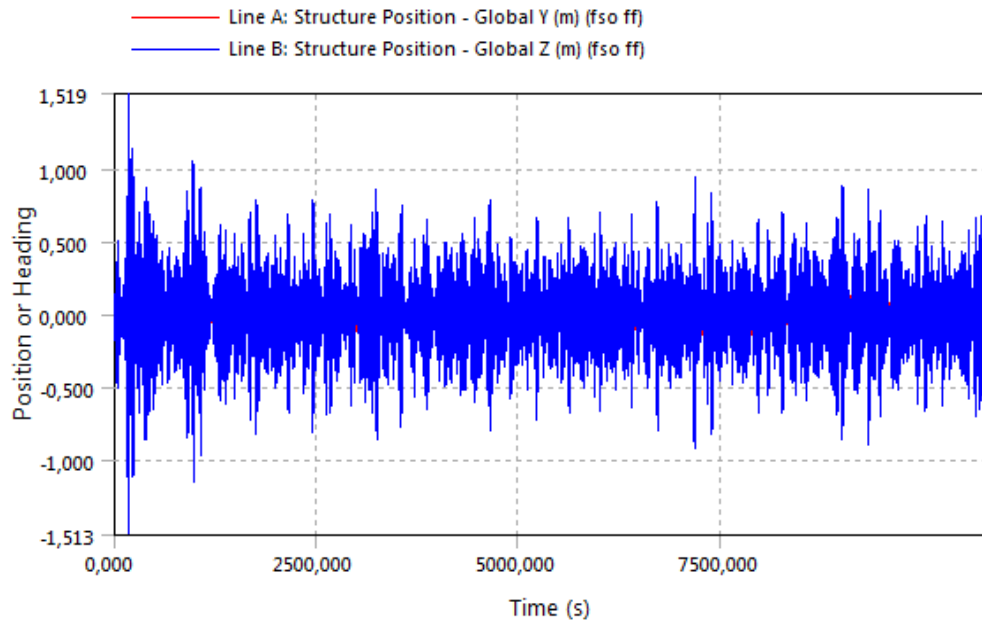


- *Structure Position pada Shuttle Tanker 85000 DWT*

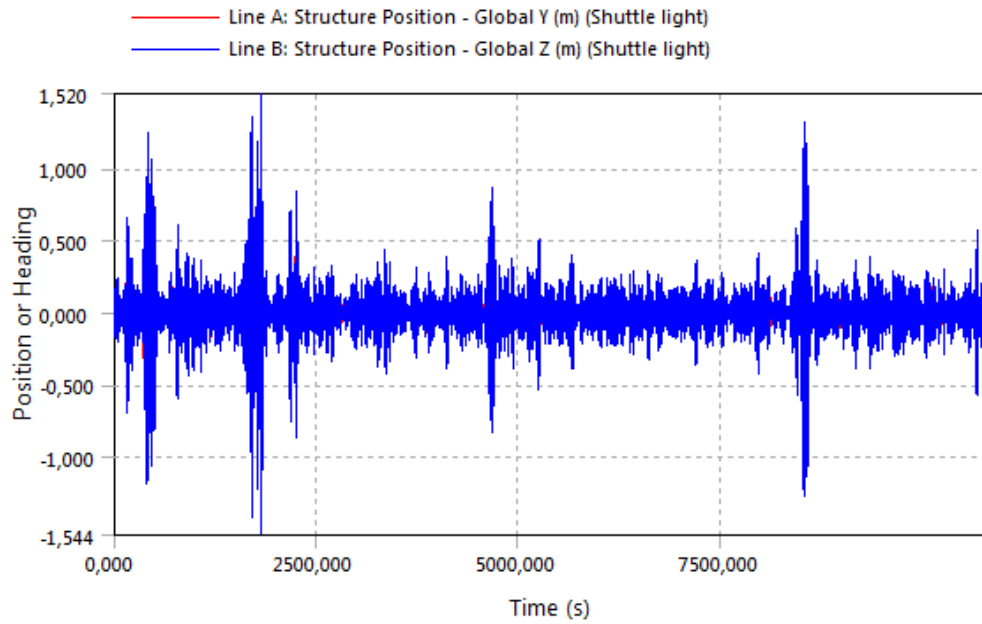


2. *Heading 45°*

- *Structure Position* pada FSO Arco Ardjuna

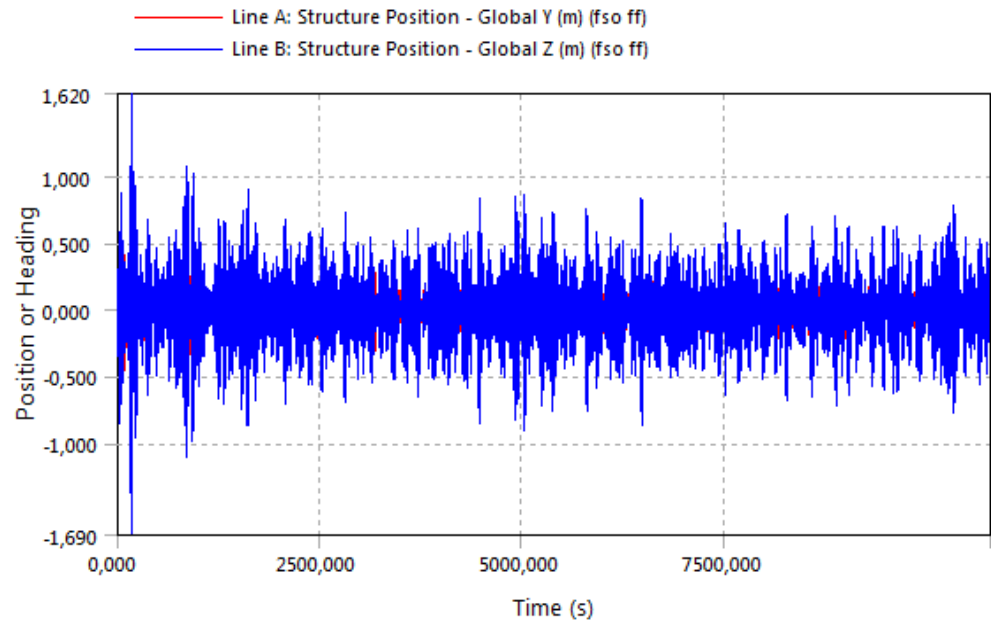


- *Structure Position* pada Shuttle Tanker 85000 DWT

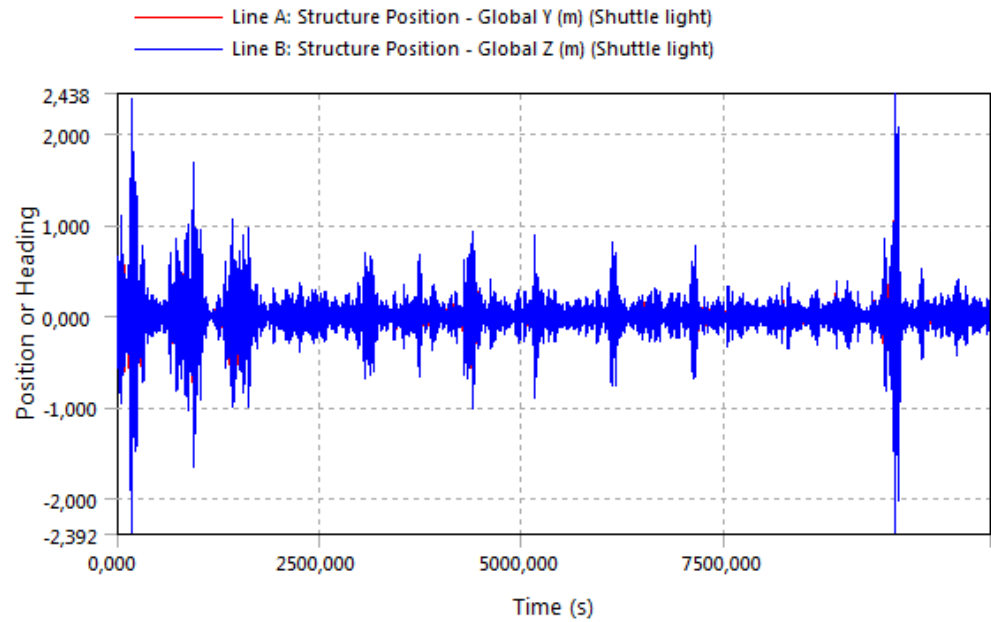


### 3. Heading 90°

- *Structure Position* pada FSO Arco Ardjuna

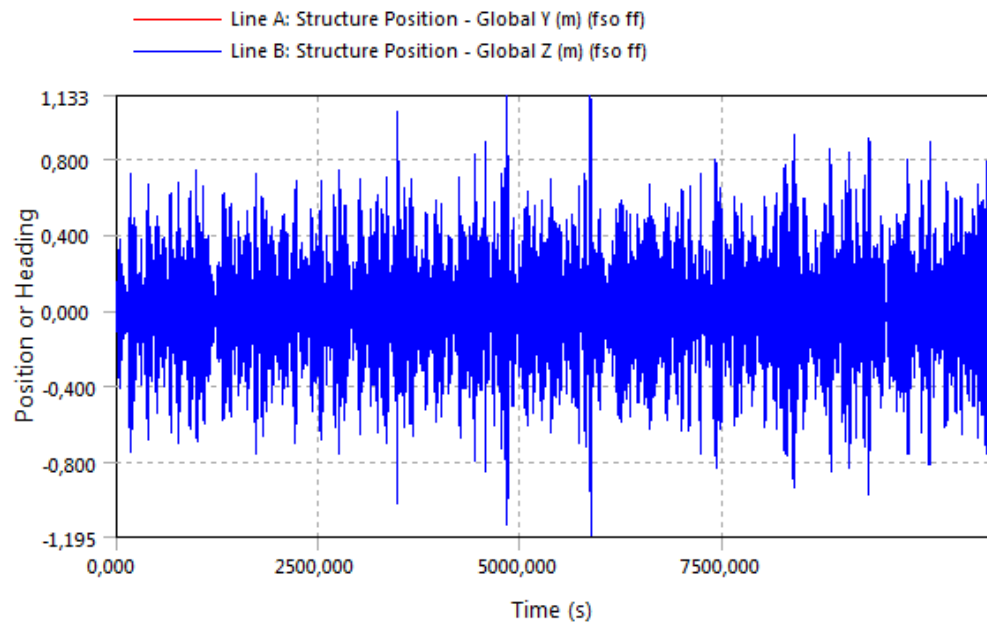


- *Structure Position* pada Shuttle Tanker 85000 DWT

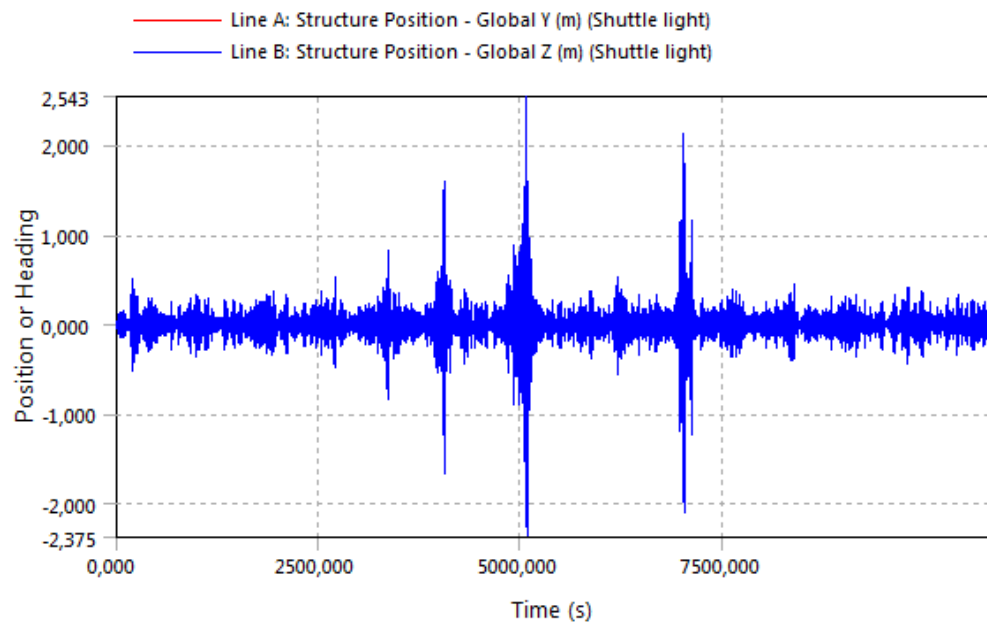


#### 4. Heading 180°

- *Structure Position* pada FSO Arco Ardjuna



- *Structure Position* pada Shuttle Tanker 85000 DWT



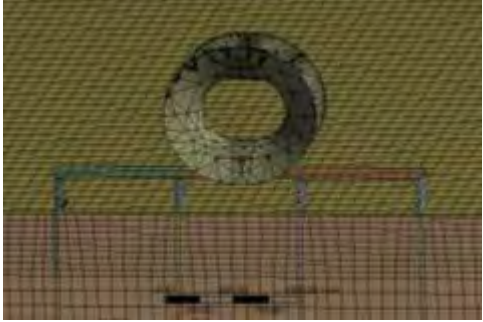
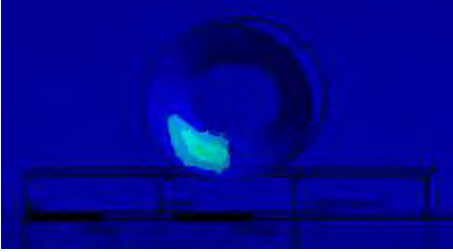
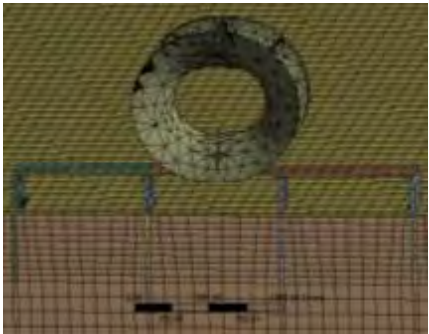
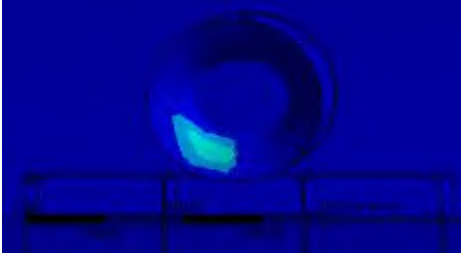
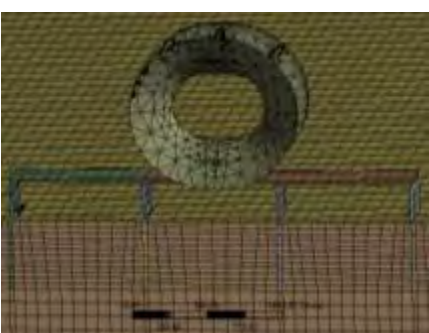
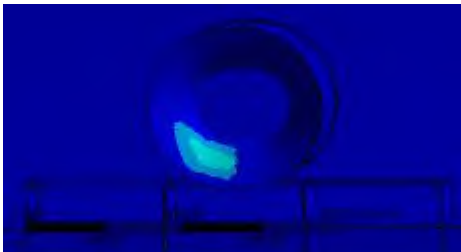
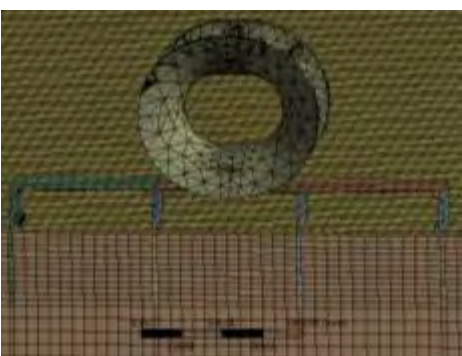
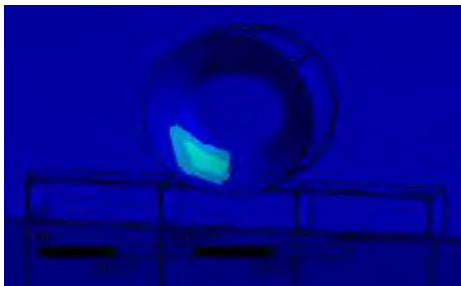
## **LAMPIRAN G**


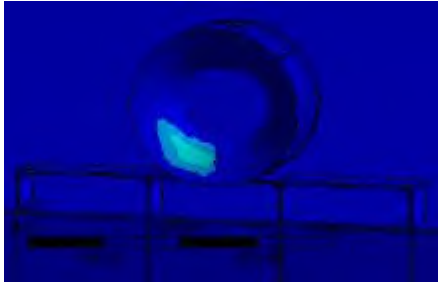
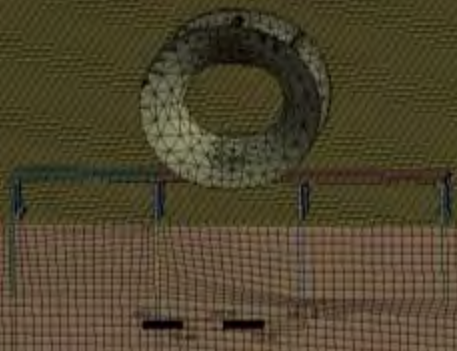
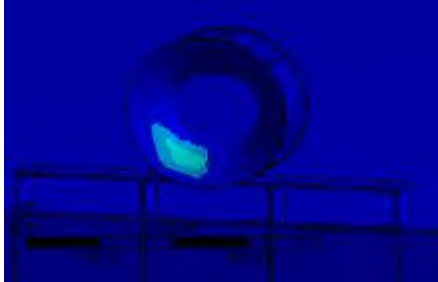

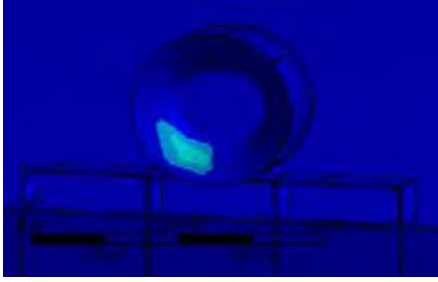

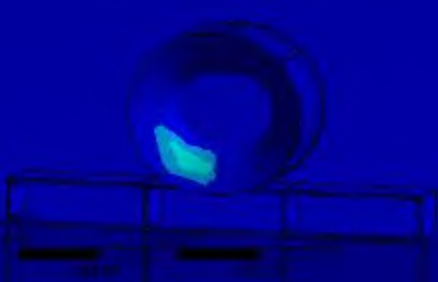
### ***Meshing dan Sensitivity Analysis***

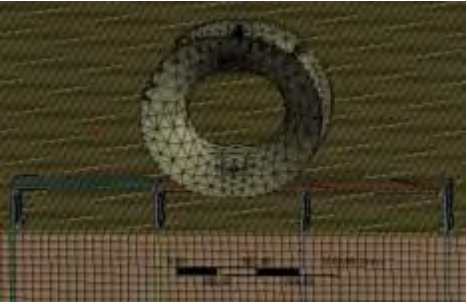
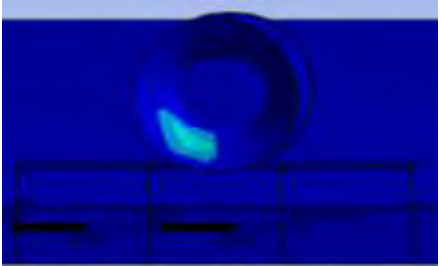
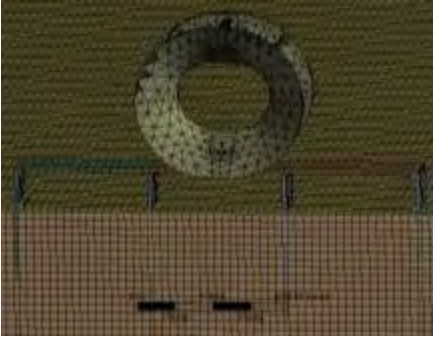
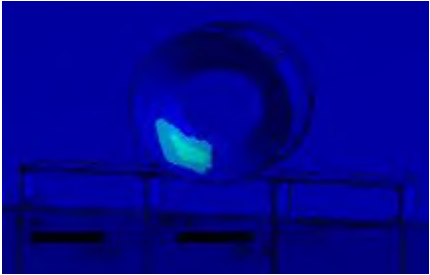


*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

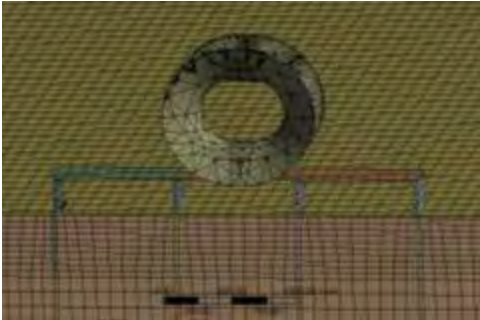
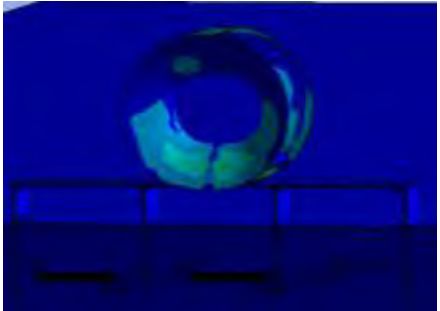
a. Variasi Sudut pada Bagian Samping Kiri Panama *Chock* dengan Sudut 60°

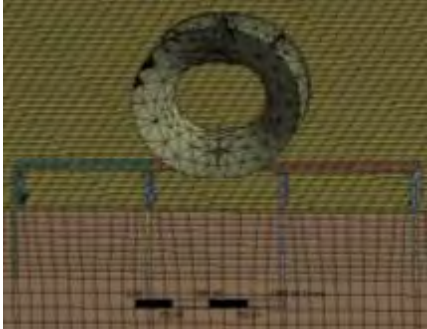
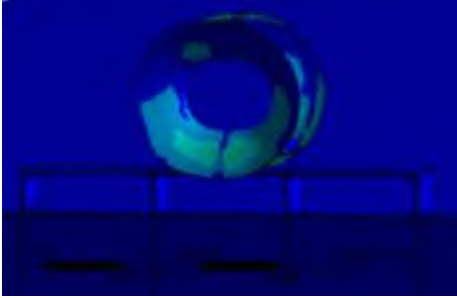
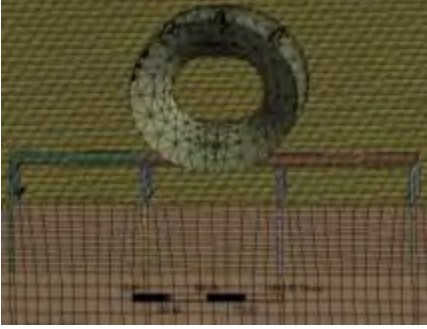
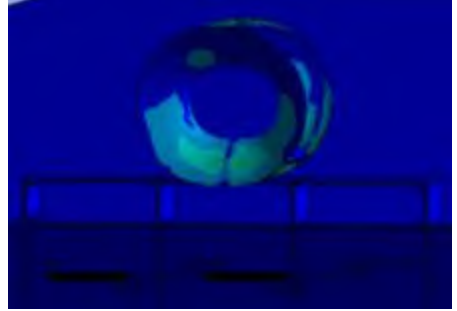
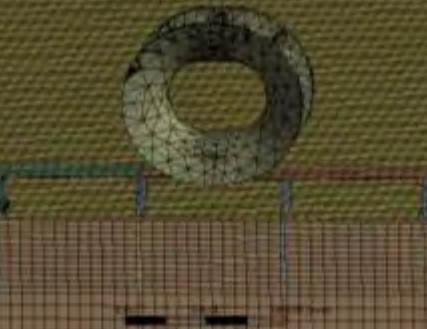
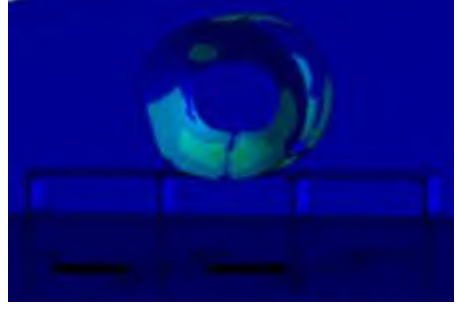

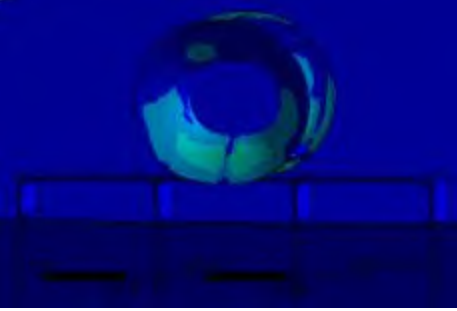
| No. | <i>Meshing</i>   | <i>Stress</i>  |
|-----|--|--|
| 1.  |  <p data-bbox="571 701 683 730">108 mm</p>    |  <p data-bbox="1050 701 1214 734">173,14 MPa</p>     |
| 2.  |  <p data-bbox="579 1108 675 1137">98 mm</p>  |  <p data-bbox="1050 1108 1214 1142">187,38 MPa</p>  |
| 3.  |  <p data-bbox="579 1505 675 1534">88 mm</p> |  <p data-bbox="1050 1505 1214 1538">199,26 MPa</p> |
| 4.  |  <p data-bbox="579 1933 675 1962">78 mm</p> |  <p data-bbox="1050 1933 1214 1966">209,94 MPa</p> |

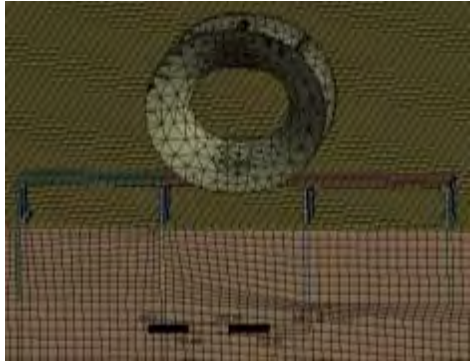
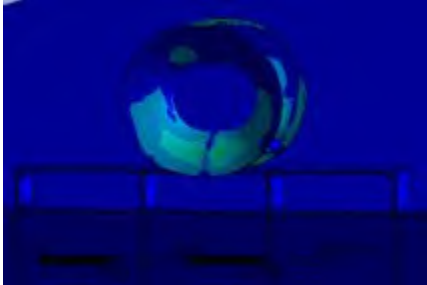
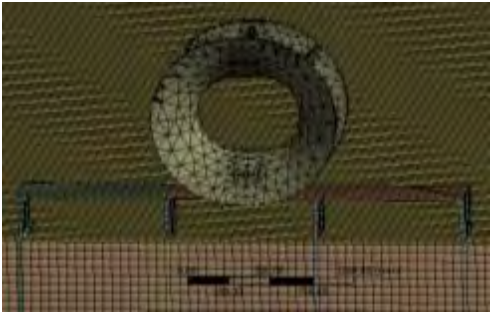
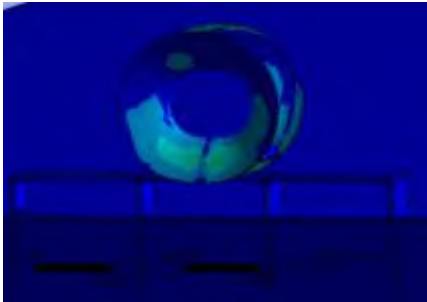

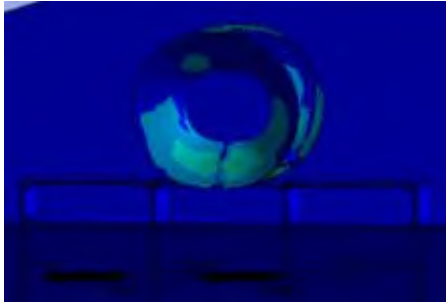

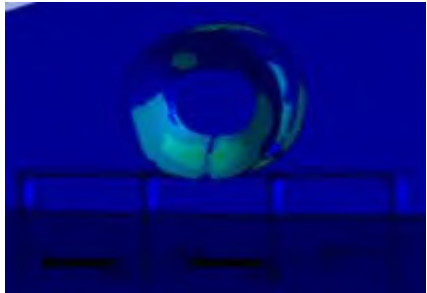
|    |  |   |
|----|--|---|
| 5. |  <p data-bbox="502 616 596 651">68 mm</p>     |  <p data-bbox="975 616 1139 651">217,07 MPa</p>     |
| 6. |  <p data-bbox="502 1046 596 1081">58 mm</p>  |  <p data-bbox="975 1046 1139 1081">221,81 MPa</p>  |
| 7. |  <p data-bbox="502 1433 596 1469">57 mm</p> |  <p data-bbox="975 1433 1139 1469">223,95 MPa</p> |
| 8. |  <p data-bbox="502 1854 596 1890">56 mm</p> |  <p data-bbox="975 1854 1139 1890">224,39 MPa</p> |

|     |   |  |
|-----|---|--|
| 9.  |  <p>55 mm</p>  |  <p>224,43 MPa</p> |
| 10. |  <p>54 mm</p> |  <p>224,46 MPa</p> |

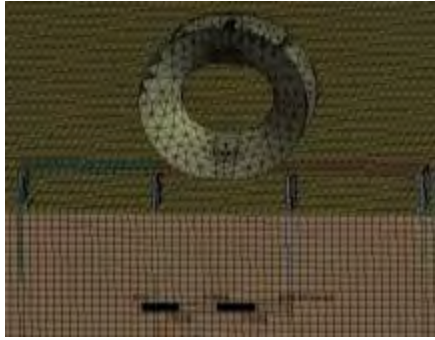
b. Posisi Relatif *Hawser* atau *Shuttle Tanker* terhadap FSO saat Panama *Chock* Dikenai Beban *Tension* pada  $T = 9618,25$  untuk *Heading*  $90^\circ$  dengan Kondisi Sistem *Tandem Offloading* SPM – FSO *Light Load* – *Shuttle Tanker Full Load*

| No. | <i>Meshing</i>  | <i>Stress</i>  |
|-----|---|--|
| 1.  |  <p>108 mm</p> |  <p>173,88 MPa</p> |

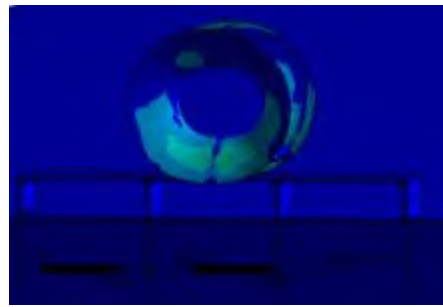
|    |  |  |
|----|--|--|
| 2. |  <p>98 mm</p>   |  <p>183,32 MPa</p>   |
| 3. |  <p>88 mm</p>  |  <p>194,34 MPa</p>  |
| 4. |  <p>78 mm</p> |  <p>207,66 MPa</p> |
| 5. |  <p>68 mm</p> |  <p>219,52 MPa</p> |

|    |  |  |
|----|--|--|
| 6. |  <p>58 mm</p>   |  <p>223 MPa</p>      |
| 7. |  <p>57 mm</p>  |  <p>223,4 MPa</p>   |
| 8. |  <p>56 mm</p> |  <p>223,85 MPa</p> |
| 9. |  <p>55 mm</p> |  <p>224,25 MPa</p> |

10.



54 mm



224,98 MPa

**LAMPIRAN H**  
**Hasil Analisis Tegangan Lokal Konstruksi**  
**Panama *Chock***

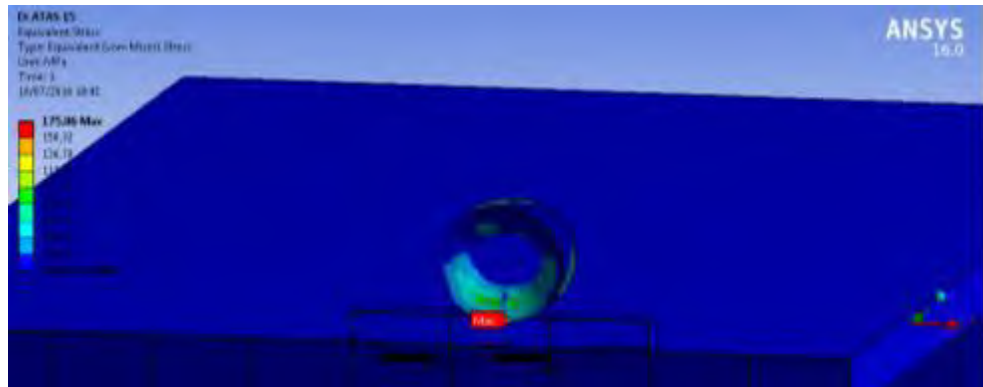


*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

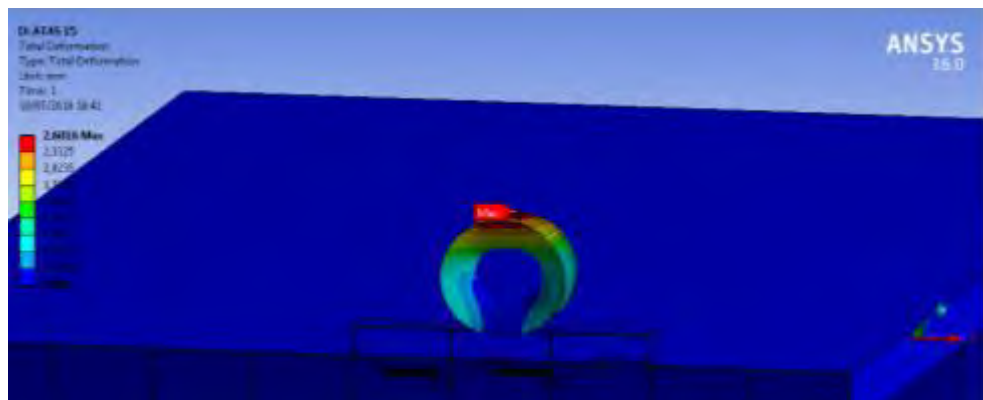
a. Variasi Sudut

1. Bagian Atas

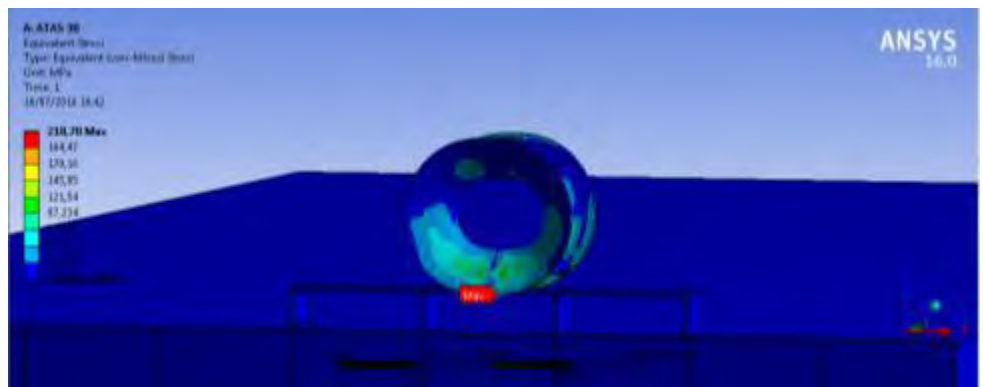
- Sudut 15°  
Tegangan: 175,86 MPa



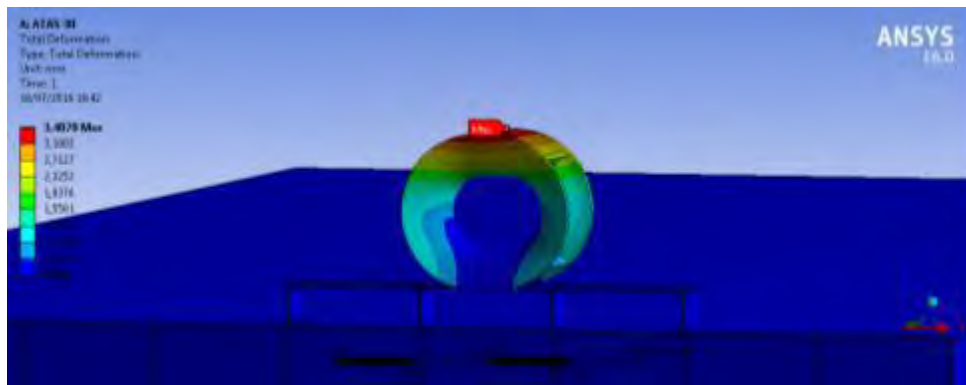
Deformasi: 2,6016 mm



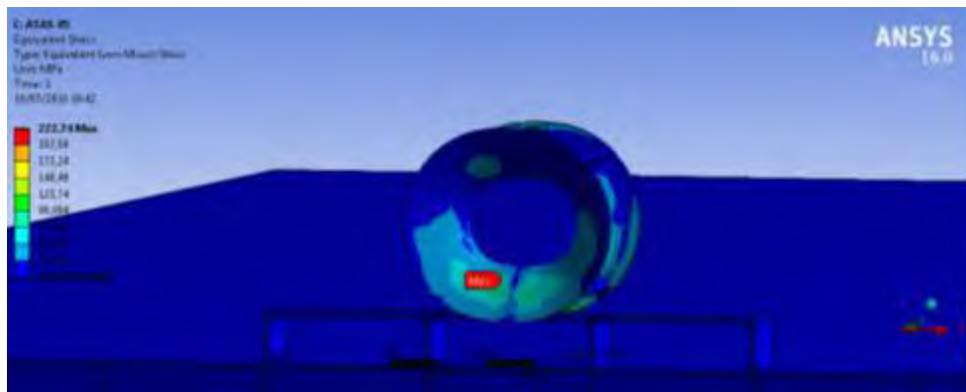
- Sudut 30°  
Tegangan: 218,78 MPa



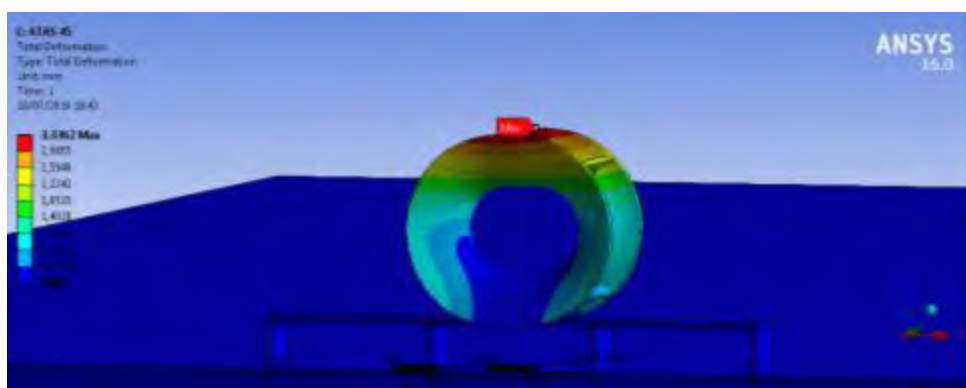
Deformasi: 3,4878 mm



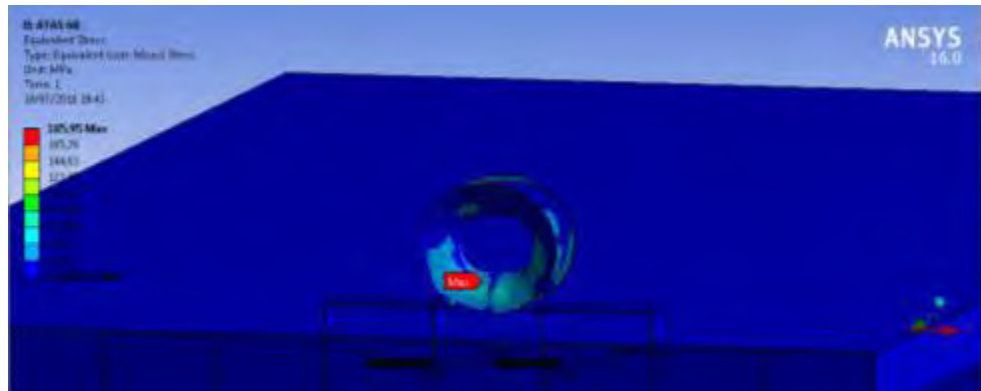
- Sudut 45°  
Tegangan: 222,74 MPa



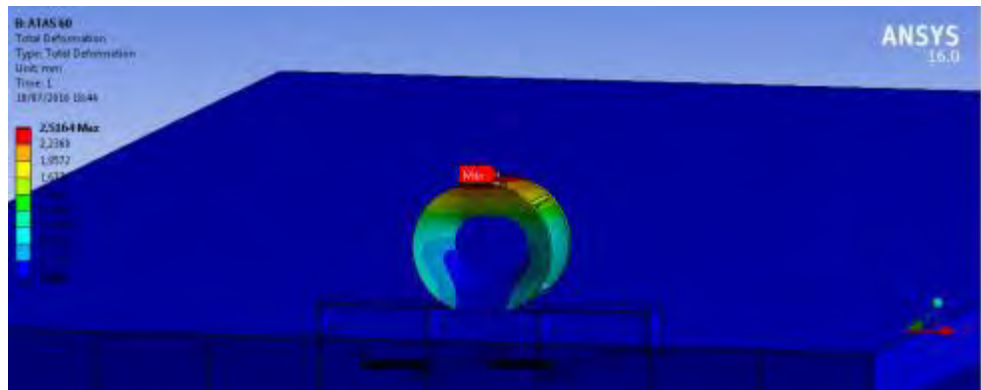
Deformasi: 3,3362 mm



- Sudut 60°  
Tegangan: 185,95 MPa

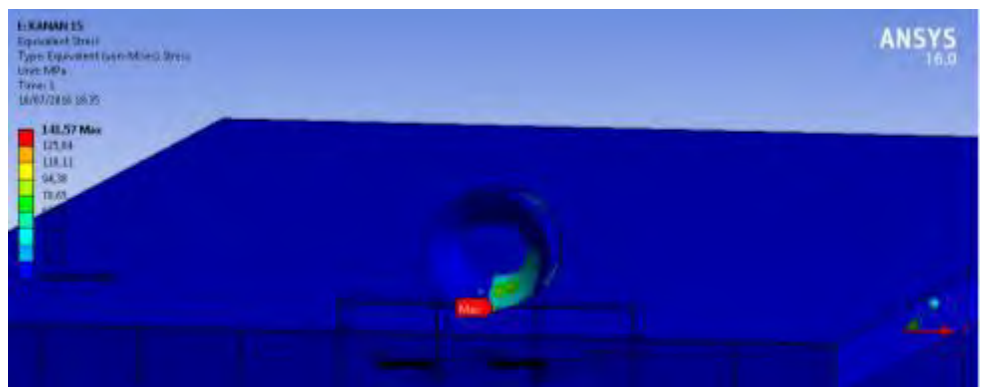


Deformasi: 2,5164 mm

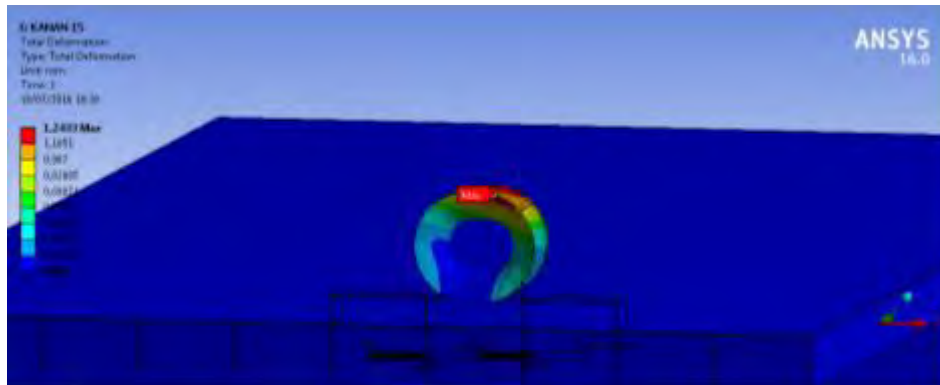


## 2. Bagian Samping Kanan

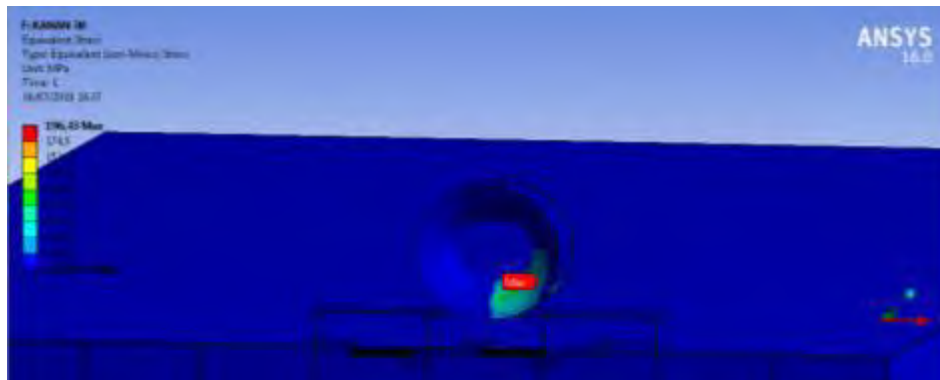
- Sudut 15°  
Tegangan: 141,57 MPa



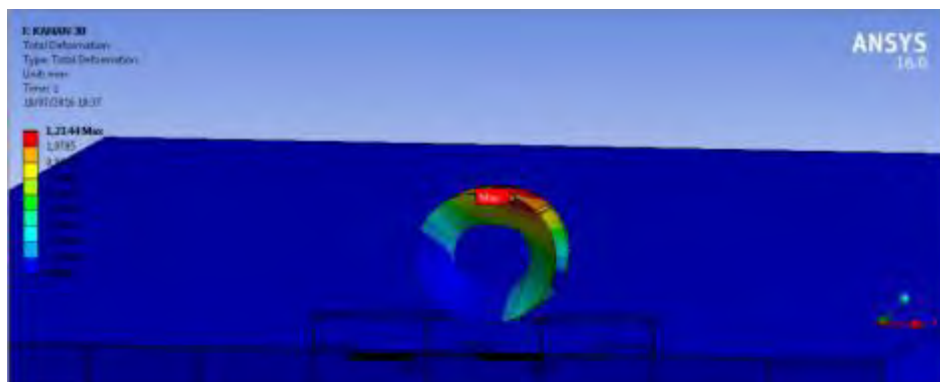
Deformasi: 1,2433 mm



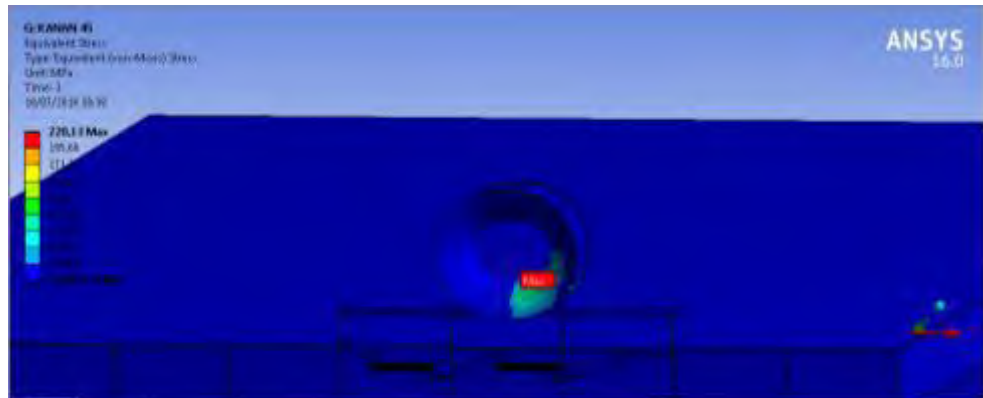
- Sudut 30°  
Tegangan: 196,43 MPa



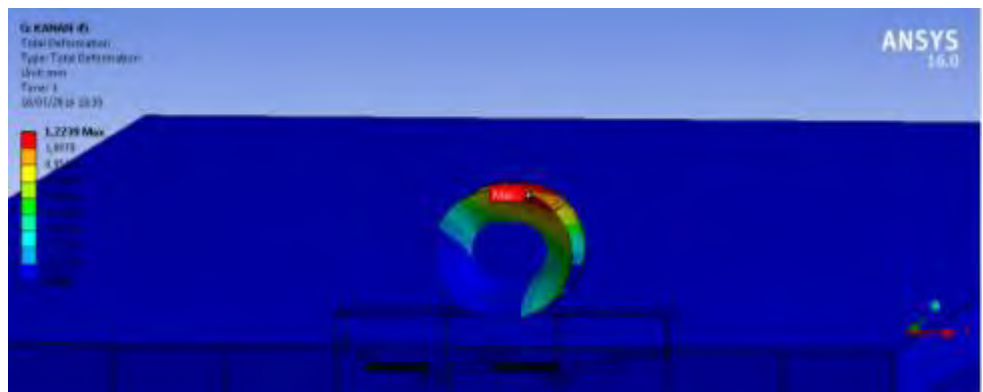
Deformasi: 1,2144 mm



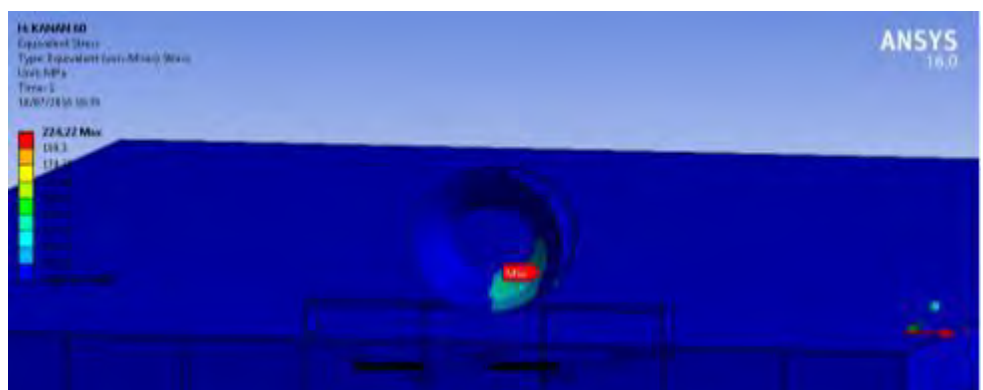
- Sudut 45°  
Tegangan: 220,13 MPa



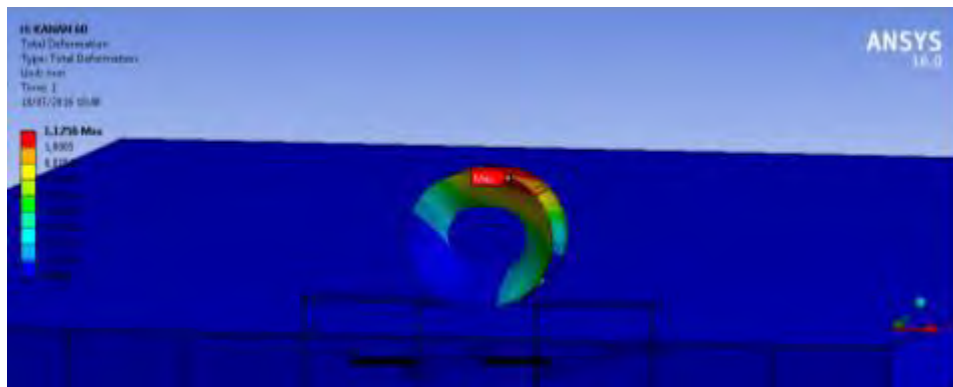
Deformasi: 1,2239 mm



- Sudut 60°  
Tegangan: 224,22 MPa

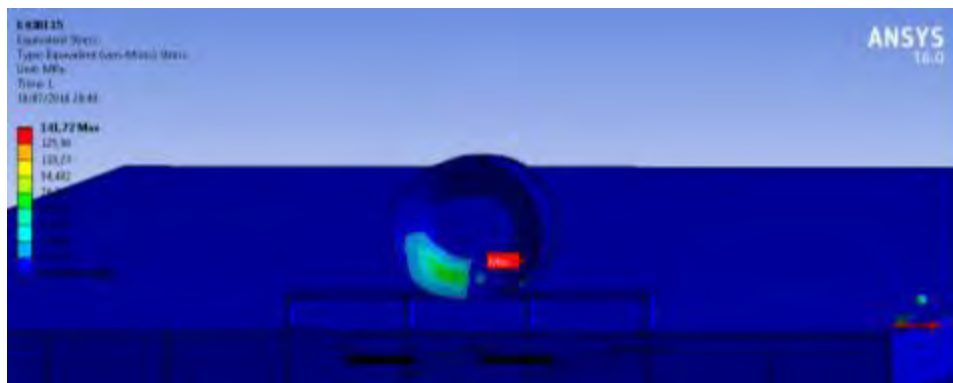


Deformasi: 1,1256 mm

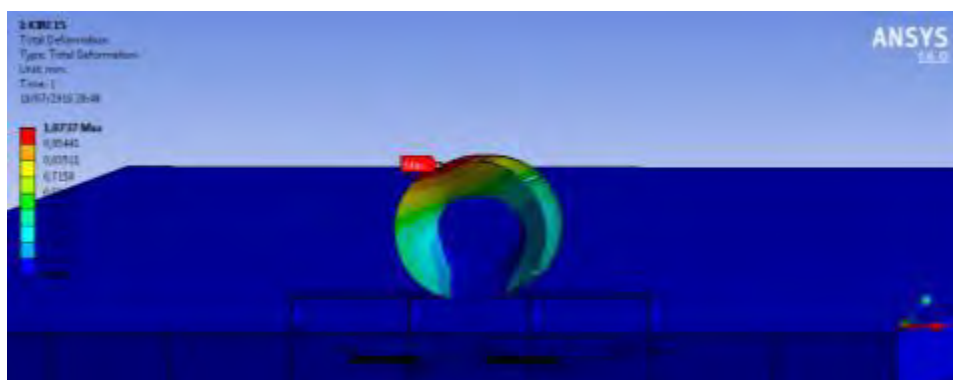


### 3. Bagian Samping Kiri

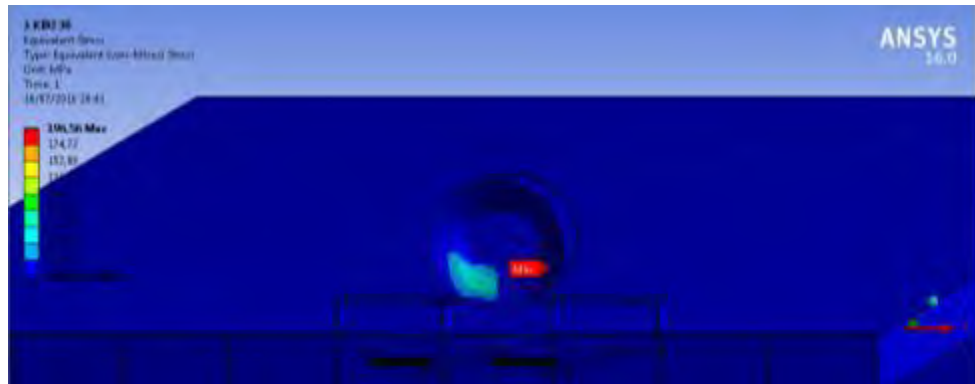
- Sudut  $15^\circ$   
Tegangan: 141,72 MPa



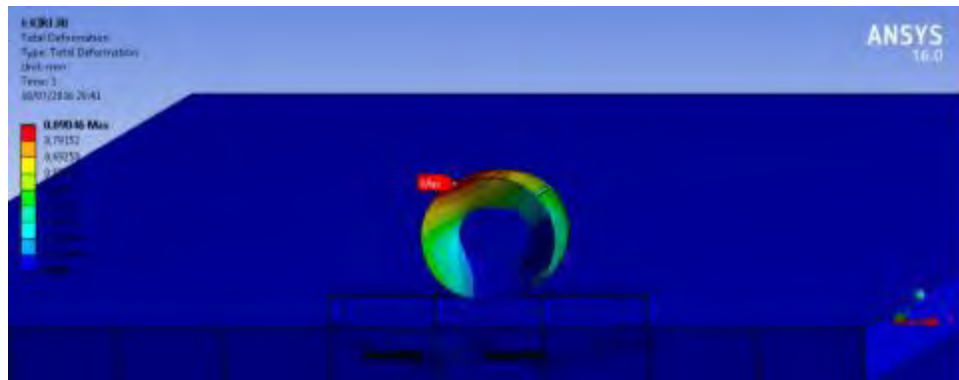
Deformasi: 1,0737 mm



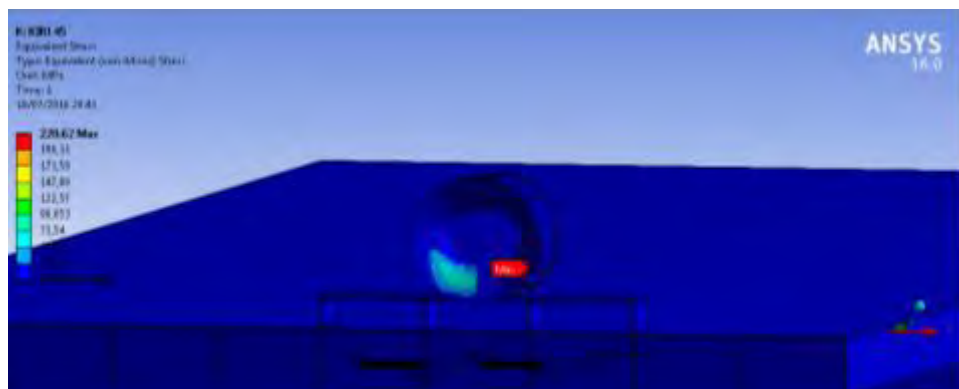
- Sudut 30°  
Tegangan: 196,56 MPa



Deformasi: 0,89046 mm

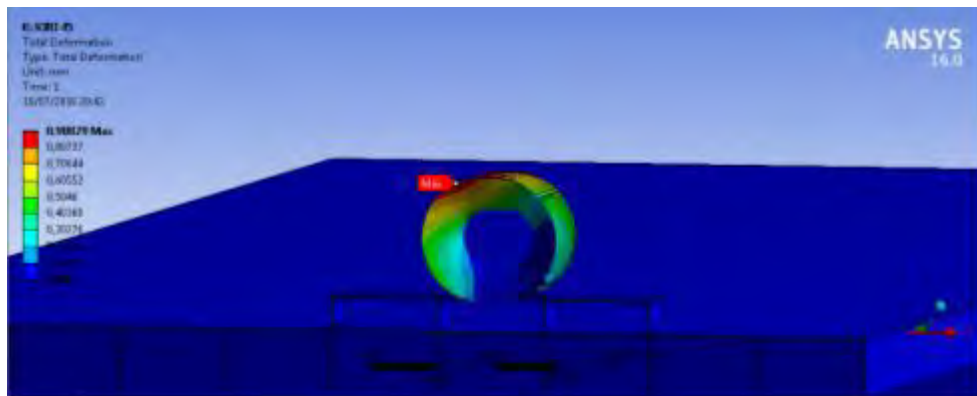


- Sudut 45°  
Tegangan: 220,62 MPa

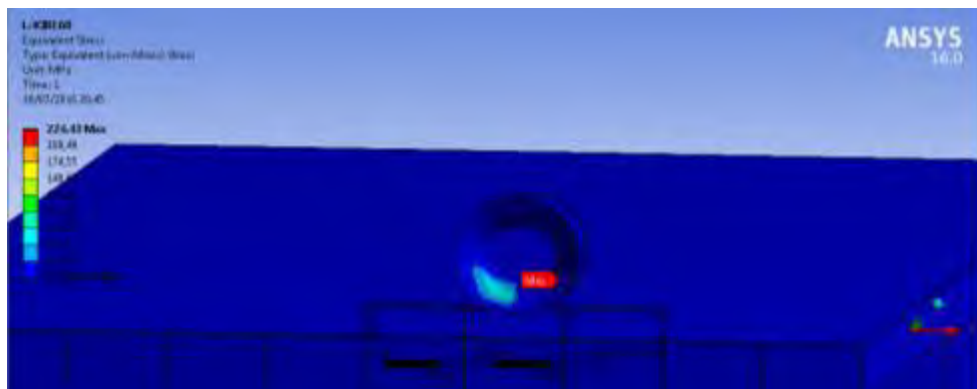




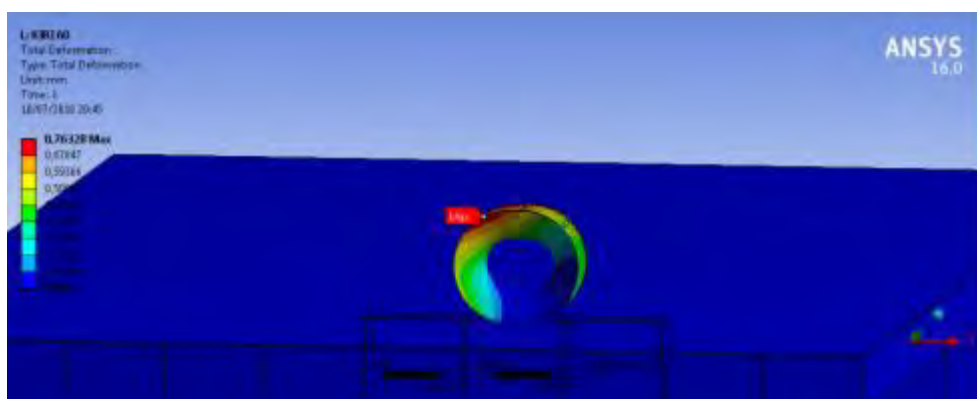
Deformasi: 0,90829 mm



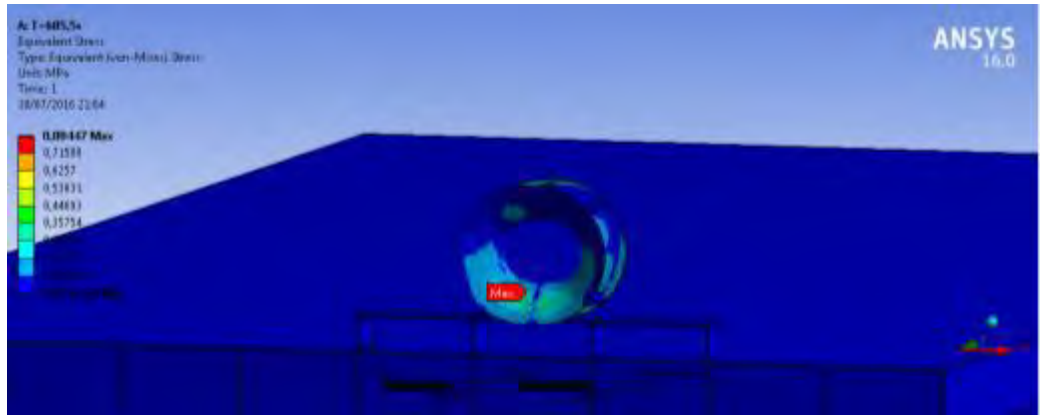
- Sudut 60°  
Tegangan: 224,43 MPa



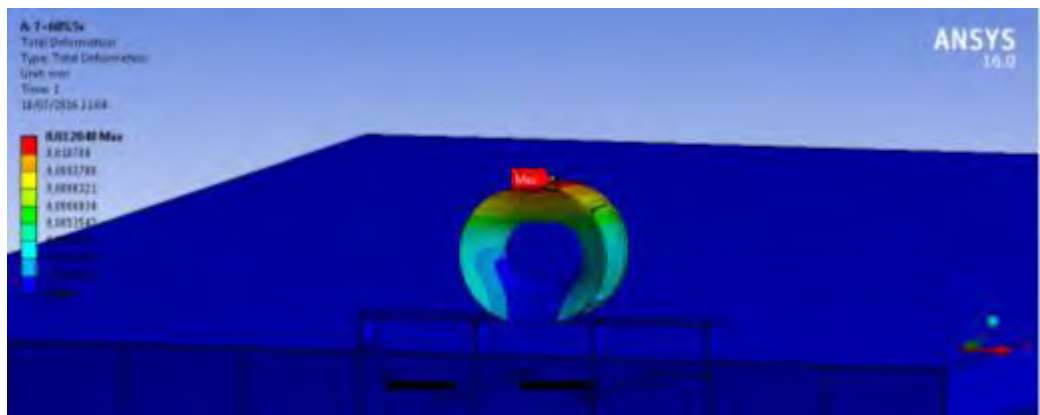
Deformasi: 0,76328 mm



- b. Posisi Relatif *Hawser* atau *Shuttle Tanker* terhadap FSO
1. Saat Kondisi Sistem *Tandem Offloading SPM – FSO Full Load – Shuttle Tanker Light Load*
    - *Heading* 0°  
*Time*: 685,5 s  
*Tegangan*: 0,8045 MPa

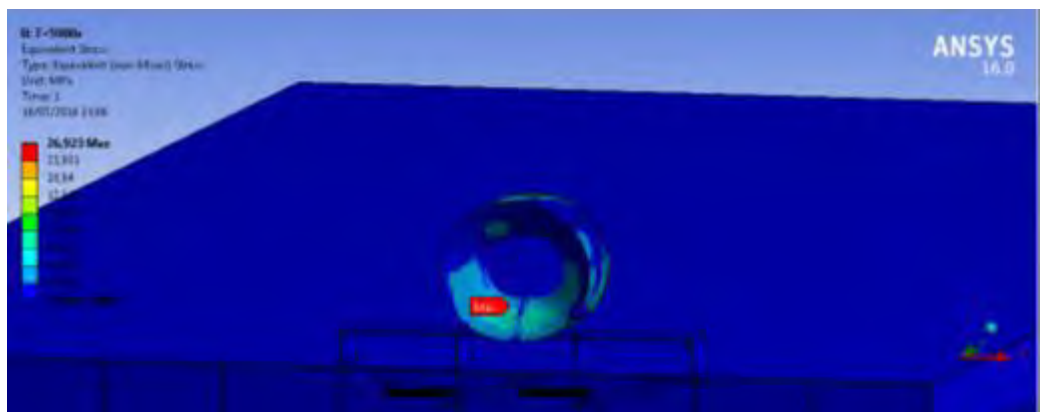


Deformasi: 0,01205 mm

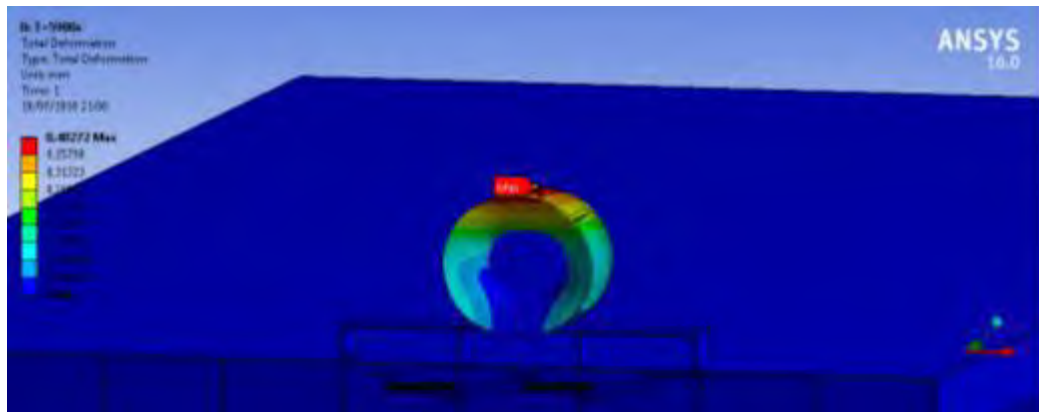


*Time*: 5900 s

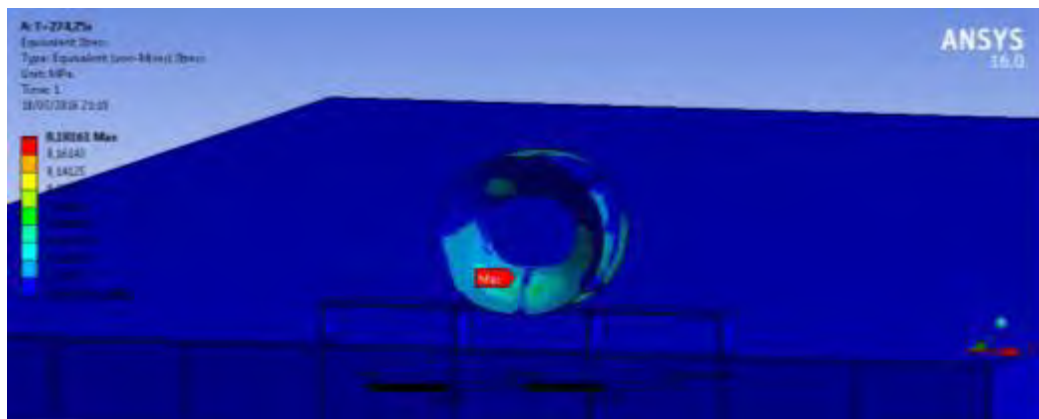
*Tegangan*: 26,923 MPa



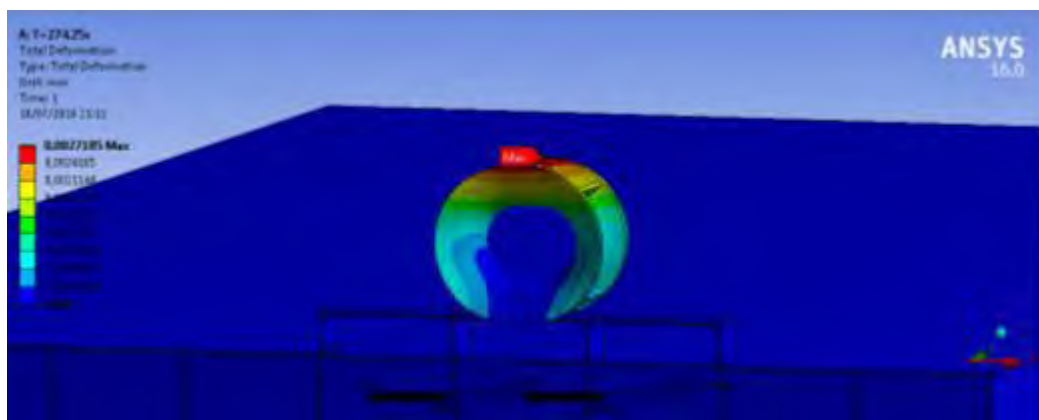
Deformasi: 0,40272 mm



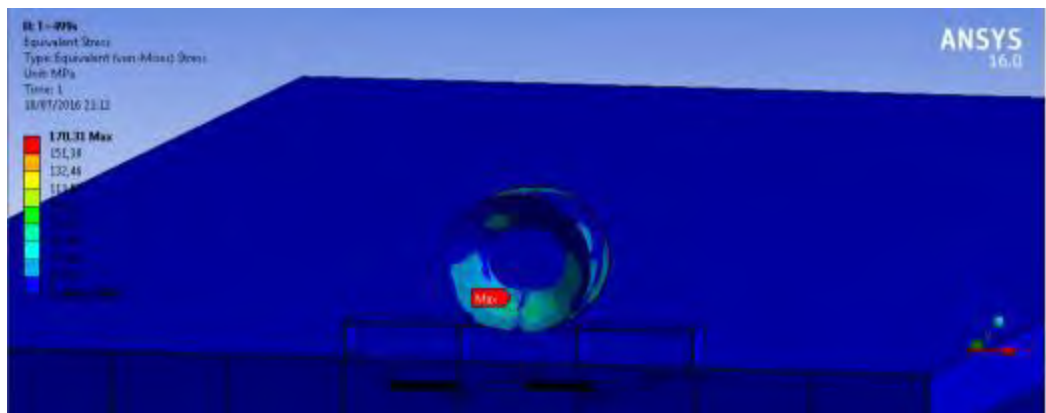
- *Heading 45°*  
Time: 274,25 s  
Tegangan: 0,1816 MPa



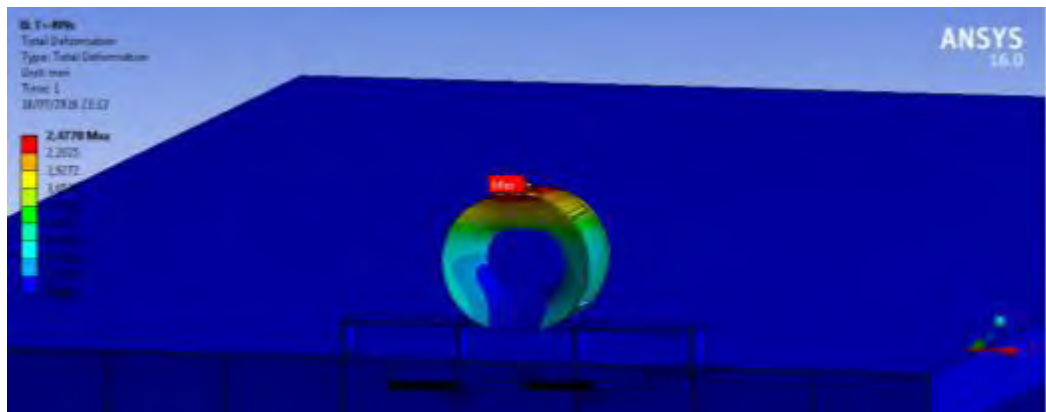
Deformasi: 0,00272 mm



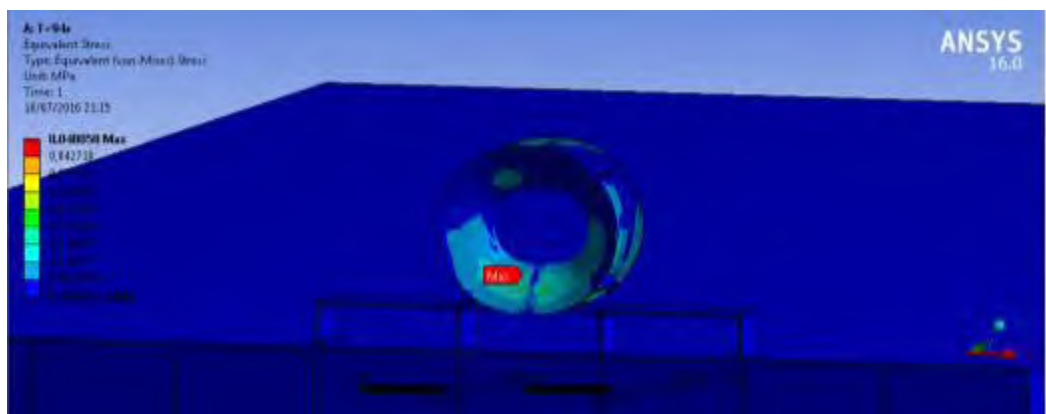
Time: 499 s  
Tegangan: 170,31 MPa



Deformasi: 2,4778 mm

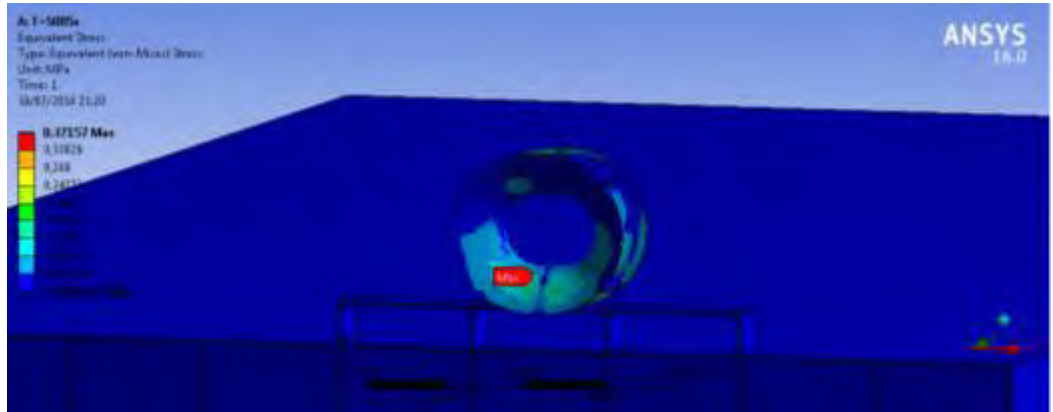


- *Heading 90°*  
Time: 94 s  
Tegangan: 0,04806 MPa

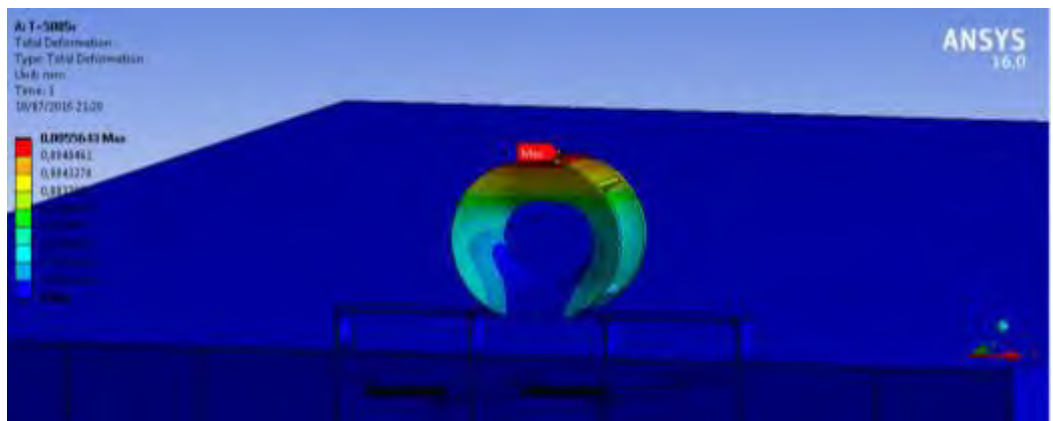




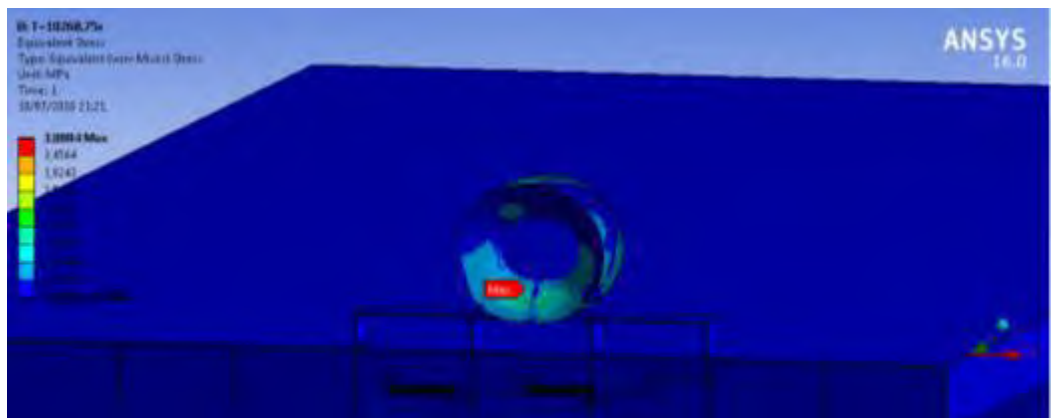
- *Heading 180°*  
*Time: 5085 s*  
*Tegangan: 0,3716 MPa*



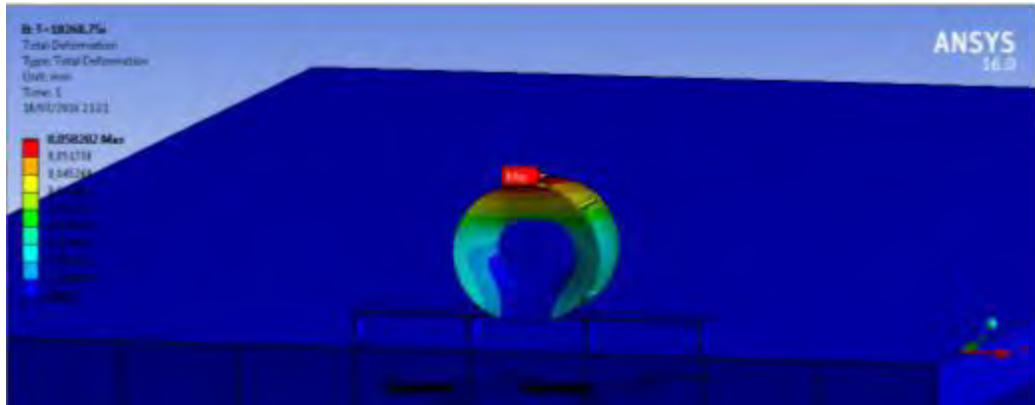
Deformasi: 0,00556 mm



*Time: 10268,75 s*  
*Tegangan: 3,8884 MPa*

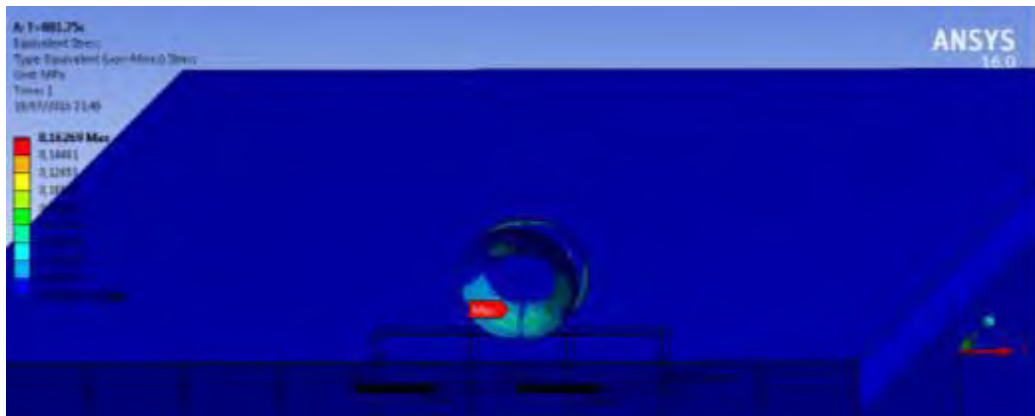


Deformasi: 0,0582 mm

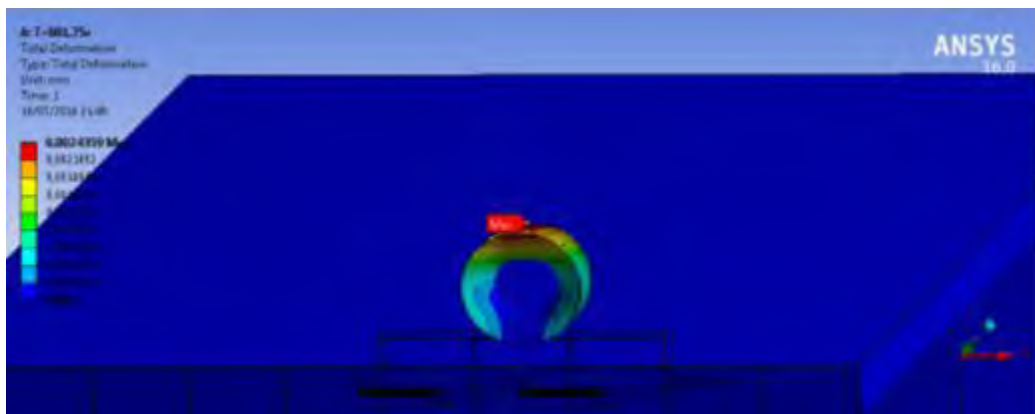


2. Saat Kondisi Sistem *Tandem Offloading SPM – FSO Light Load – Shuttle Tanker Full Load*

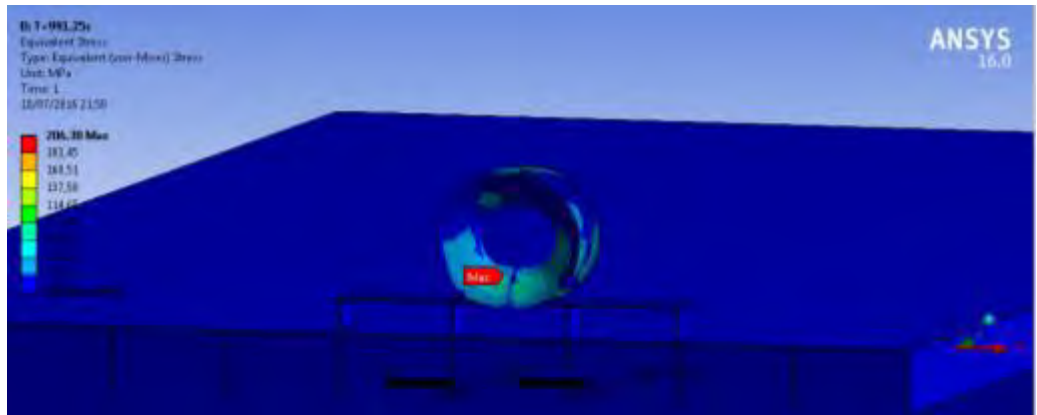
- *Heading 0°*  
*Time: 881,75 s*  
*Tegangan: 0,1627 MPa*



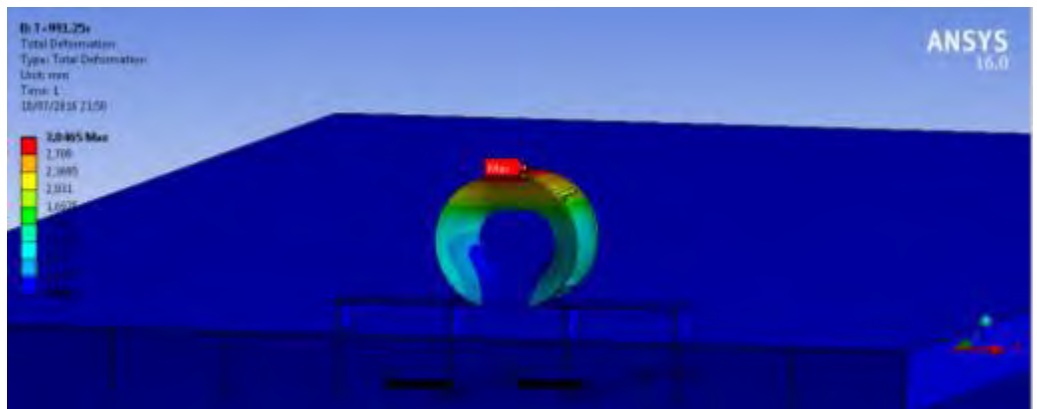
Deformasi: 0,01205 mm



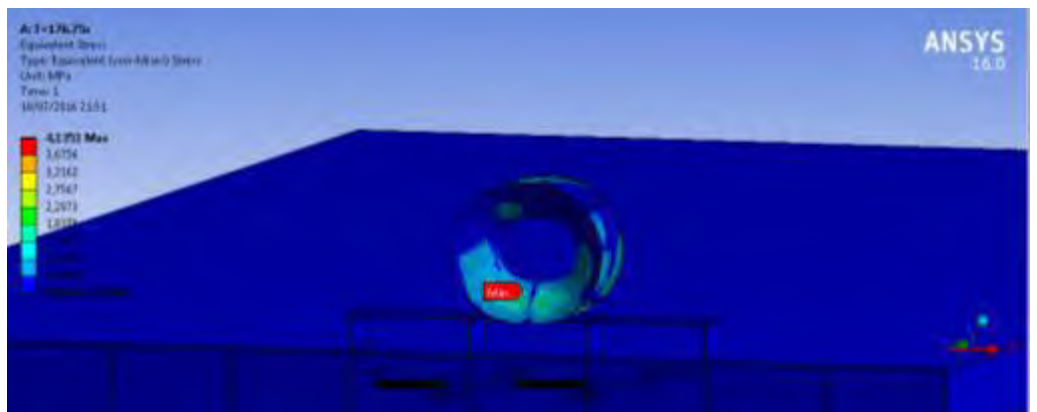
Time: 991,25 s  
Tegangan: 206,38 MPa



Deformasi: 3,0465 mm

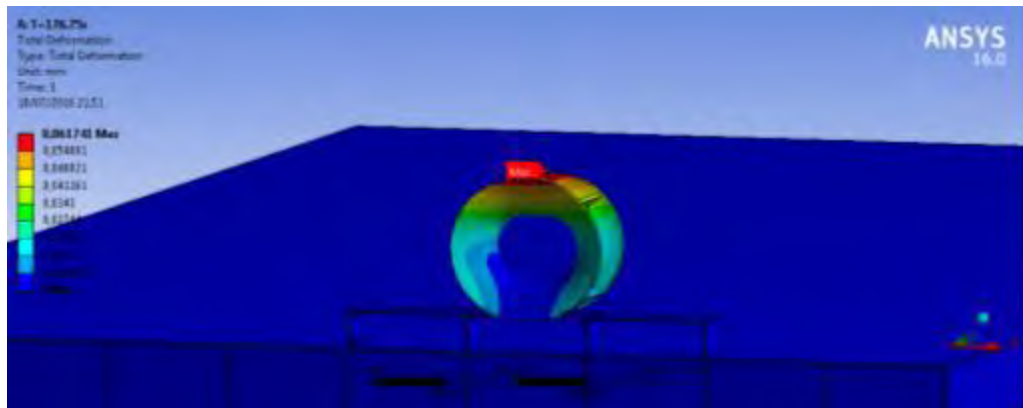


- *Heading 45°*  
Time: 176,75 s  
Tegangan: 4,1351 MPa



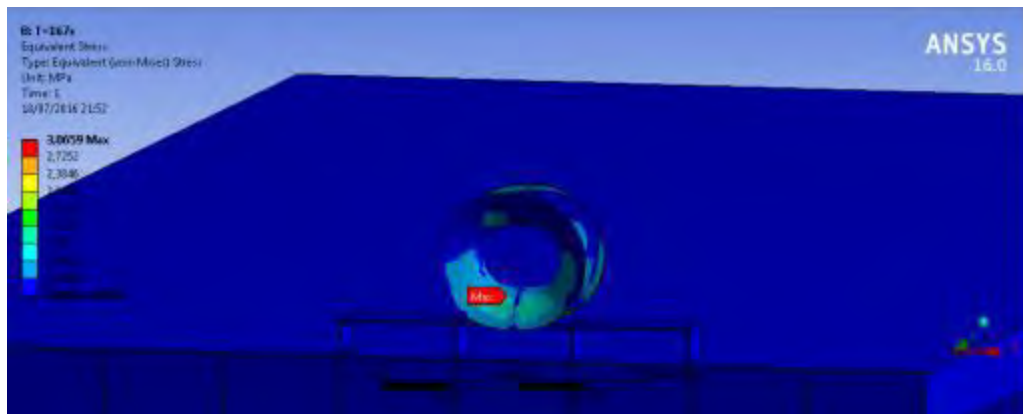


Deformasi: 0,06174 mm

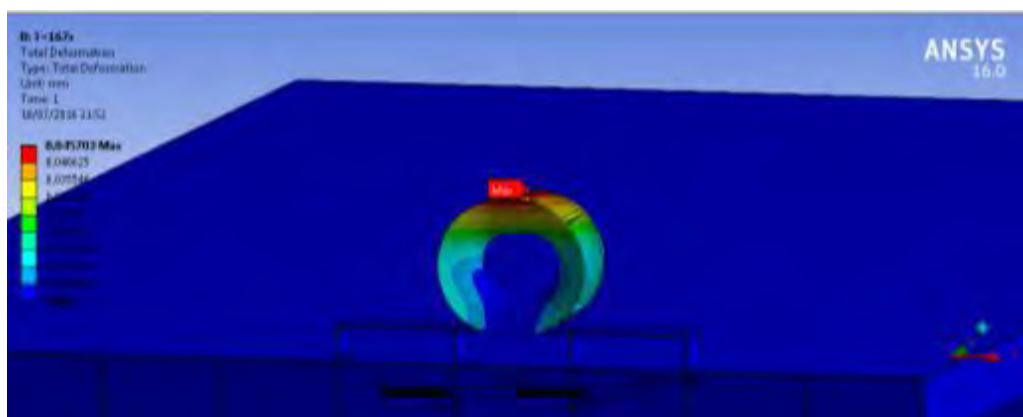


Time: 167 s

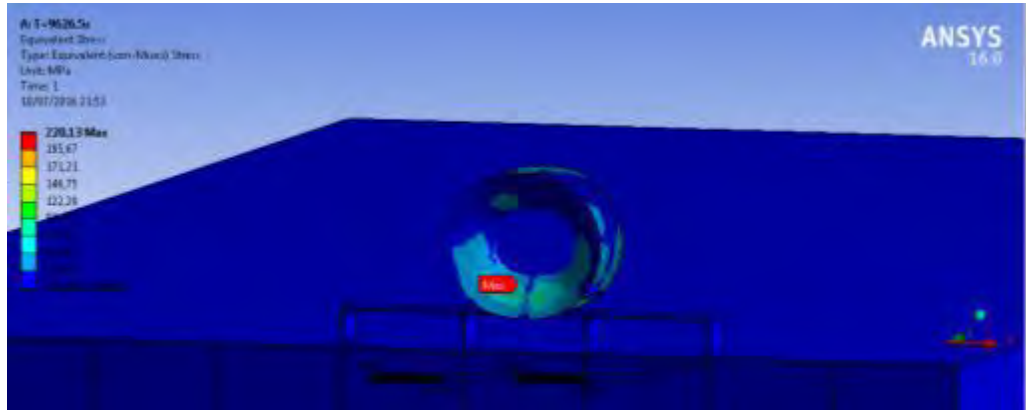
Tegangan: 3,0659 MPa



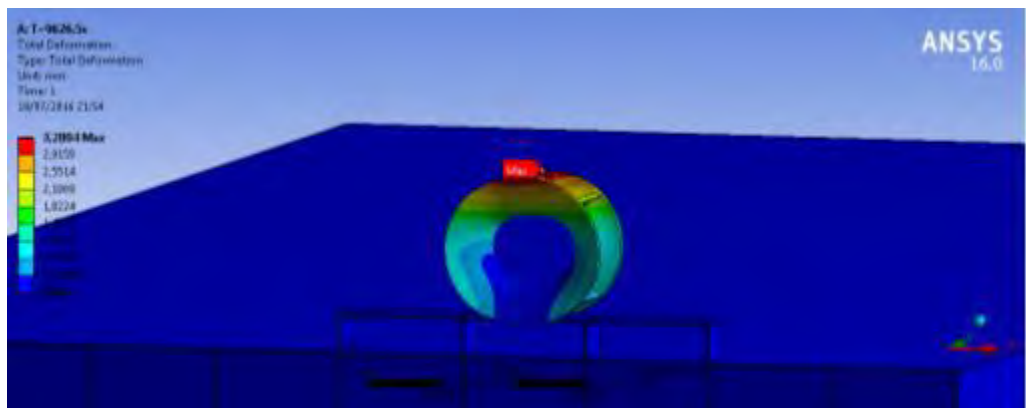
Deformasi: 0,0457 mm



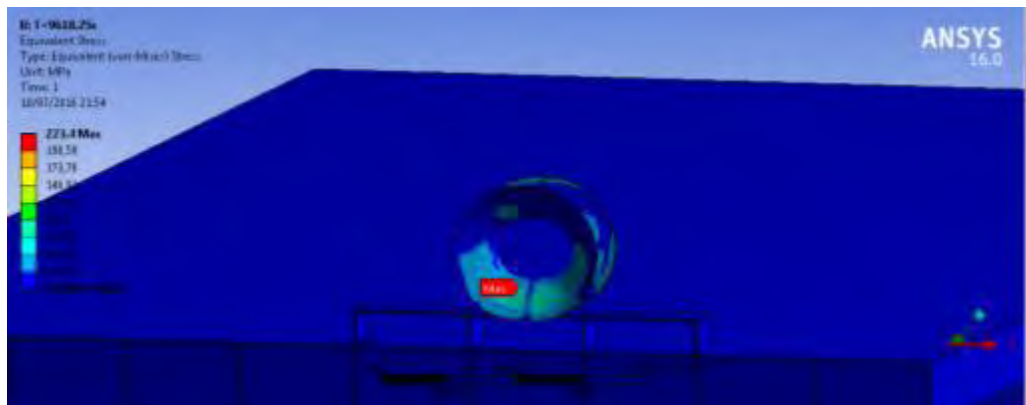
- *Heading 90°*  
Time: 9626,5 s  
Tegangan: 220,13 MPa



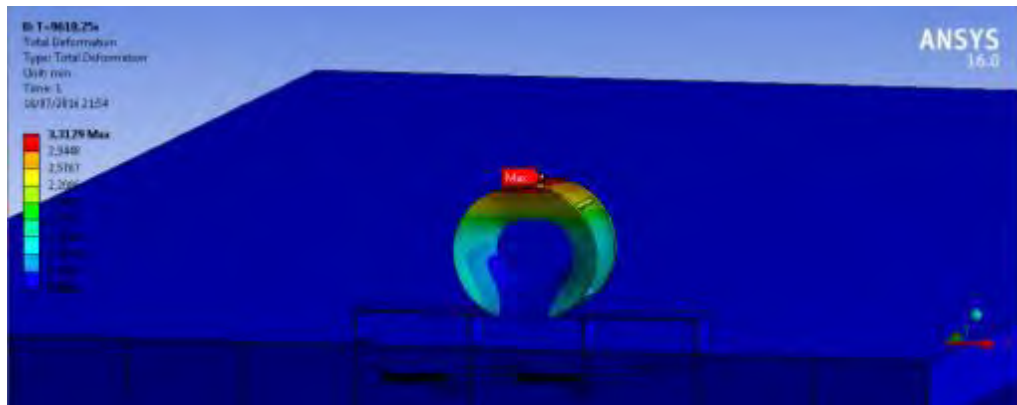
Deformasi: 3,2804 mm



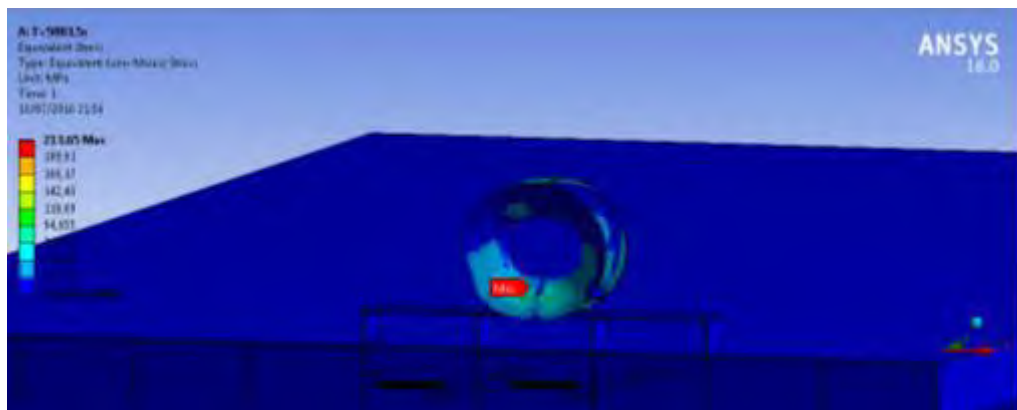
*Time: 9618,25 s*  
Tegangan: 223,4 MPa



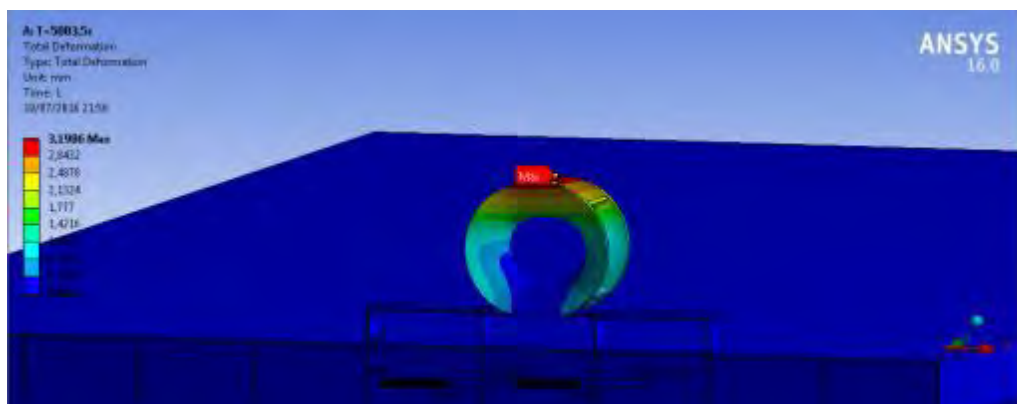
Deformasi: 3,3129 mm



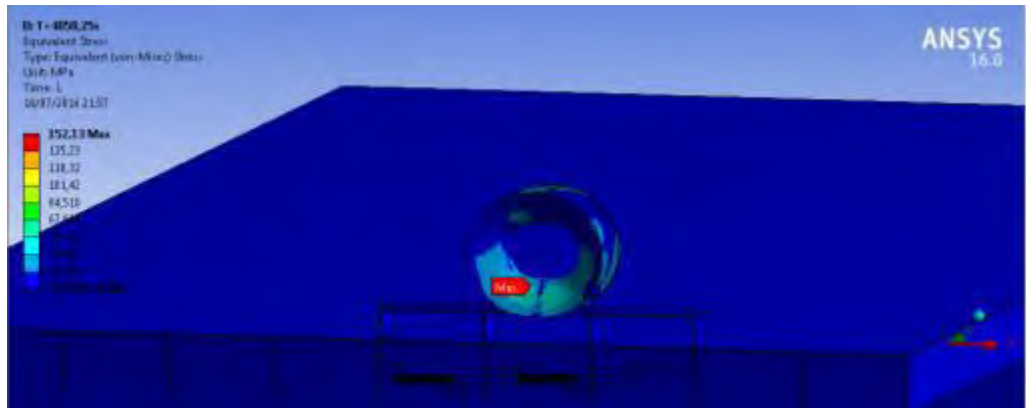
- *Heading 180°*  
*Time: 5083,5 s*  
*Tegangan: 213,65 MPa*



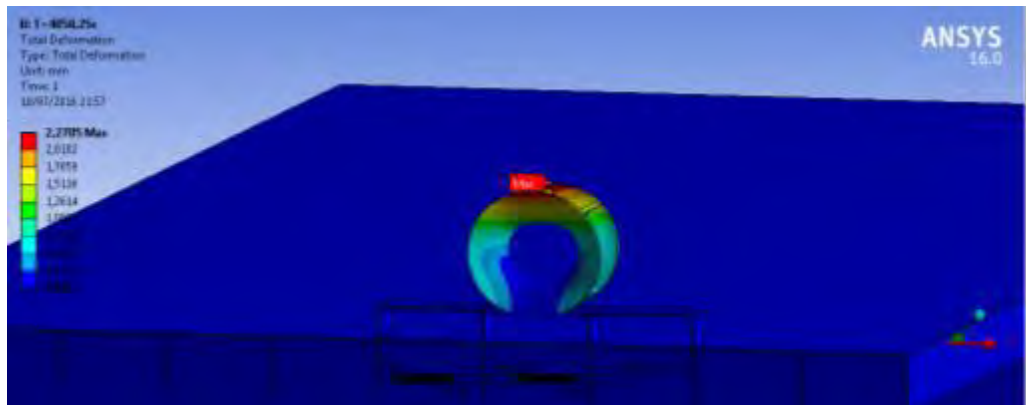
Deformasi: 3,1986 mm



Time: 4058,25 s  
Tegangan: 152,13 MPa



Deformasi: 2,2705 mm



*(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 pada FSO Arco Ardjuna, SPM 3 dan *Shuttle Tanker* 85000 DWT yang diakibatkan oleh beban gelombang pada saat terapung bebas (*free floating*) adalah sebagai berikut:
  - a. RAO FSO Arco Ardjuna saat terapung bebas (*free floating*), nilai terbesar terjadi pada kondisi *light load*. Untuk gerak translasi, yaitu *surge* tertinggi pada *heading* 180° sebesar 4,3 m/m, *sway* tertinggi pada *heading* 90° sebesar 4,653 m/m dan *heave* tertinggi pada *heading* 90° sebesar 1,353 m/m. Untuk gerak rotasi, *roll* terbesar 8,62 deg/m pada *heading* 90°, *pitch* terbesar 3,98 deg/m pada *heading* 0° dan *yaw* terbesar 0,663 deg/m pada *heading* 45°. Hal ini menunjukkan FSO lebih stabil saat kondisi *full load*.
  - b. RAO SPM 3 saat terapung bebas (*free floating*) memiliki nilai terbesar untuk gerak translasi, yaitu *surge* tertinggi pada *heading* 0° sebesar 4,696 m/m, *sway* tertinggi pada *heading* 90° sebesar 4,696 m/m dan *heave* tertinggi pada *heading* 180° sebesar 3,962 m/m. Untuk gerak rotasi, *roll* terbesar 11,367 deg/m pada *heading* 90°, *pitch* terbesar 11,367 deg/m pada *heading* 0° dan *yaw* terbesar 0,00002272 deg/m pada *heading* 180°.
  - c. RAO *Shuttle Tanker* 85000 DWT saat terapung bebas (*free floating*), nilai terbesar terjadi pada kondisi *light load*. Untuk gerak translasi, yaitu *surge* tertinggi pada *heading* 0° sebesar 4,56 m/m, *sway* tertinggi pada *heading* 90° sebesar 4,690 m/m dan *heave* tertinggi pada *heading* 90° sebesar 0,999 m/m. Untuk gerak rotasi, *roll* terbesar 3,949 deg/m pada *heading* 90°, *pitch* terbesar 0,771 deg/m pada *heading* 0° dan *yaw* terbesar 4,560 deg/m pada *heading* 180°. Hal ini menunjukkan *shuttle tanker* lebih stabil saat kondisi *full load*.
2. Respon struktur pada FSO Arco Ardjuna, SPM 3 dan *Shuttle Tanker* 85000 DWT yang diakibatkan oleh beban gelombang pada saat tertambat adalah sebagai berikut:

- a. RAO FSO Arco Ardjuna saat tertambat, nilai terbesar terjadi pada kondisi *light load*. Untuk gerak translasi, yaitu *surge* tertinggi pada *heading*  $0^\circ$  sebesar 0,804 m/m, *sway* tertinggi pada *heading*  $90^\circ$  sebesar 0,996 m/m dan *heave* tertinggi pada *heading*  $180^\circ$  sebesar 0,594 m/m. Untuk gerak rotasi, *roll* terbesar 1,027 deg/m pada *heading*  $90^\circ$ , *pitch* terbesar 1,703 deg/m pada *heading*  $0^\circ$  dan *yaw* terbesar 0,471 deg/m pada *heading*  $45^\circ$ . Nilai RAO tertambat yang lebih kecil dibandingkan dengan RAO terapung bebas (*free floating*) menunjukkan bahwa sistem tambat mampu menahan gerakan FSO.
  - b. RAO SPM 3 saat tertambat, nilai terbesar terjadi pada saat sistem *tandem offloading* SPM – FSO *Full Load* – *Shuttle Tanker Light Load*. Untuk gerak translasi, yaitu *surge* tertinggi pada *heading*  $0^\circ$  sebesar 2,493 m/m, *sway* tertinggi pada *heading*  $45^\circ$  sebesar 0,657 m/m dan *heave* tertinggi pada *heading*  $0^\circ$  sebesar 2,163 m/m. Untuk gerak rotasi, *roll* terbesar 2,867 deg/m pada *heading*  $90^\circ$ , *pitch* terbesar 2,503 deg/m pada *heading*  $0^\circ$  dan *yaw* terbesar 0,0000168 deg/m pada *heading*  $0^\circ$ . Nilai RAO tertambat yang lebih kecil dibandingkan dengan RAO terapung bebas (*free floating*) menunjukkan bahwa sistem tambat mampu menahan gerakan SPM.
  - c. RAO *Shuttle Tanker* 85000 DWT saat tertambat, nilai terbesar terjadi pada kondisi *light load*. Untuk gerak translasi, yaitu *surge* tertinggi pada *heading*  $180^\circ$  sebesar 0,803 m/m, *sway* tertinggi pada *heading*  $90^\circ$  sebesar 0,717 m/m dan *heave* tertinggi pada *heading*  $90^\circ$  sebesar 0,699 m/m. Untuk gerak rotasi, *roll* terbesar 1,181 deg/m pada *heading*  $90^\circ$ , *pitch* terbesar 0,572 deg/m pada *heading*  $45^\circ$  dan *yaw* terbesar 0,325 deg/m pada *heading*  $180^\circ$ . Nilai RAO tertambat yang lebih kecil dibandingkan dengan RAO terapung bebas (*free floating*) menunjukkan bahwa sistem tambat mampu menahan gerakan *shuttle tanker*.
3. *Tension* maksimum *hawser* 3 terjadi saat kondisi sistem *tandem offloading* SPM – FSO *Full Load* – *Shuttle Tanker Light Load* pada simulasi detik ke-8298,25 s dengan *heading*  $90^\circ$ , yaitu sebesar 2156,817 kN dan *safety factor* sebesar 1,858. *Safety factor* ini lebih besar jika dibandingkan dengan *safety*

*factor* yang diatur oleh *American Bureau of Shipping* (ABS) untuk *hawser* yaitu 1,82. Sehinggadapat disimpulkan bahwa *hawser* 3 aman selama masa operasi dengan beban lingkungan 100 tahunan.

4. Tegangan maksimum dan deformasi pada pembebanan dengan variasi sudut terjadi ketika pembebanan mengenai struktur panama *chock* bagian samping kiri, dengan sudut posisi *hawser* terhadap panama *chock* sebesar 60°. Sedangkan tegangan maksimum dan deformasi yang terjadi ketika pembebanan dengan posisi relatif *hawser* atau *shuttle tanker* terhadap FSO adalah pada *heading* 90° dengan  $T = 9618,25$  s saat kondisi sistem *tandem offloading* SPM – FSO *light load* – *shuttle tanker full load*. Dimana pada kedua kondisi tersebut beban yang digunakan adalah nilai *tension* dari *hawser* 3, sehingga didapatkan tegangan maksimum dan deformasi yang terjadi pada konstruksi panama *chock* untuk metode variasi sudut adalah 224,43 MPa dan 0,7633 mm serta untuk metode dengan posisi relatif *hawser* atau *shuttle tanker* terhadap FSO adalah 223,4 MPa dan 3,3129 mm. Nilai tegangan maksimum tersebut masih lebih kecil jika dibandingkan dengan tegangan ijin yang diatur oleh ABS “*Safehull-Dynamic Loading Approach for Floating Production, Storage and Offloading (FPSO) Systems*” (2001) sebesar 225 MPa. Sedangkan untuk deformasi yang dihasilkan juga lebih kecil jika dibandingkan dengan syarat deformasi maksimum yang diatur oleh ABS “*Shipbuilding and Repair Quality Standard for Hull Structures during Construction*” (2001) yaitu 6 mm. Sehingga konstruksi panama *chock* aman untuk beroperasi.

## 5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan dari hasil Tugas Akhir ini adalah:

1. Tugas akhir ini hanya melakukan analisis berdasarkan formulasi kriteria desain *Ultimate Limit State* (ULS). Untuk analisis yang lebih spesifik, dapat dilakukan dengan formulasi kriteria desain *Accidental Limit State* (ALS).
2. Analisis lanjutan yang dapat dilakukan adalah analisis kelelahan atau *fatigue* pada konstruksi panama *chock*.



*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR PUSTAKA

- ABS. 2001. *Safehull-Dynamic Loading Approach for FPSO Systems*. Houston: American Bureau of Shipping.
- ABS. 2001. *Shipbuilding and Repair Quality Standard for Hull Structures during Construction*. Houston: American Bureau of Shipping.
- ABS. 2004. *Floating Production Installations*. Houston: American Bureau of Shipping.
- API RP 2A-WSD 21<sup>st</sup> Edition. 2000. *Recommended Practice for Planning, Designing, and Construction Fixed Offshore Platform-Working Stress Design*. Washington DC: API Publishing Services.
- API RP 2SK 3<sup>rd</sup> Edition. 2005. *Design and Analysis of Stationkeeping Systems for Floating Structures*. Washington DC: API Publishing Services.
- Azkie, N. N. 2013. Laporan Tugas Rancang I Rencana Garis (Lines Plan). *Tugas Mata Kuliah Rencana Garis*, Surabaya.
- Bhattacharyya, R. 1978. *Dynamic of Marine Vehicles*. New York: John Wiley & Sons Inc.
- Biro Klasifikasi Indonesia. 2009. *Rules for Hull Construction Vol.II*. Jakarta: Biro Klasifikasi Indonesia.
- Bureau Veritas. 2001. *Offshore Hydromechanics*. France: Bureau Veritas.
- Chakrabarti, S. K. 1987. *Hydrodynamics of Offshore Structures*. USA: Computational.
- Djarmiko, E. B. 2012. *Perilaku dan Operabilitas Bangunan Laut di Atas Gelombang Acak*. Surabaya: ITS Press.
- DNV RP C205. 2010. *Environmental Conditions and Environmental Loads*. Norway: Det Norske Veritas.
- Faltinsen, O. M. 1990. *Sea Loads on Ships and Offshore Structures*. United Kingdom: Cambridge University Press.
- Helmidadang. 2012. Single Point Mooring, (Online), (<https://helmidadang.wordpress.com/2012/12/29/single-point-mooring/>, diakses 21 Januari 2016).
- Hind, J. A. 1967. *Trim and Stability of Fishing Vessel*. London: Fishing News Ltd.

- Indiyono, P. 2010. *Hidrodinamika Dasar Bangunan Laut*. Surabaya: ITS Press.
- Irawati. 2013. Analisis Tegangan Lokal Konstruksi Windlass pada Bow FSO akibat Pengaruh Modifikasi Sistem *Offloading*. *Tugas Akhir*, Jurusan Teknik Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Mauliani, D. R. 2015. Analisis Kekuatan Struktur Global Buoy pada Single Point Mooring FSO Arco Ardjuna. *Tugas Akhir*, Jurusan Teknik Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Mitra, N. K. 2009. *Fundamental of Floating Production Systems*. New Delhi: Allied Publishers Pvt. Ltd.
- Murdjito. 2014. *Overview Bangunan Lepas Pantai*. Surabaya: Jurusan Teknik Kelautan.
- Murtedjo, M. 1999. *Handout Teori Bangunan Apung*. Surabaya: ITS.
- Nallayarasu, S. 2009. *Offshore Structure Analysis and Design*. India: Department of Ocean Engineering Indian Institute of Technology Madras.
- Oil Companies International Marine Forum. *Tandem Mooring & Offloading Guidelines for Conventional Tankers at F(P)SO Facilities*. United Kingdom: Witherby Seamanship International.
- Perwitasari, R. N. 2010. Hydrodynamic Interaction and Mooring Analysis for Offloading between FPSO and LNG Shuttle Tanker. *Master Thesis*, Department of Marine Technology, Faculty of Engineering Science and Technology, Norwegian University of Science and Technology (NTNU).
- Popov, E. P. 1996. *Mekanika Teknik (Mechanics of Materials)*. Jakarta: Erlangga.
- Pratiwi, H. I. 2013. Analisis Kekuatan Struktur Sistem Tambat FSO Arco Ardjuna pada saat *Offloading* dengan *Shuttle Tanker* 85000 DWT. *Tugas Akhir*, Jurusan Teknik Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- PT. Citra Mas. 2013. *Data Shuttle Tanker 85000 DWT*. Surabaya.
- PT. Pertamina Hulu Energi Offshore North West Java. 2013. *Tandem Equipment Calculation*. Jakarta.
- PT. Tender Indonesia. 2009. Outlook Floating Storage Offloading di Lepas Pantai Indonesia, (Online), (<http://www.tender-indonesia.com/poyo/marine-11august.pdf>, diakses 17 Januari 2016).

- Purnawanti, Y. N. 2015. Analisis Tegangan Lokal Maksimum pada Bollard akibat Modifikasi Sistem Tambat FSO Ladinda. *Tugas Akhir*, Jurusan Teknik Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Ronney, P. D. 2014. *Basic of Mechanical Engineering*. California: University of Southern California.
- Satria, B., dan D. Manfaat. 2012. “Aplikasi Formal Safety Assessment untuk Penilaian Risiko Kecelakaan pada Helipad FSO: Studi Kasus FSO Kakap Natuna”. *Jurnal Teknik POMITS* Vol.1 No.1: 1-6.
- Sii, H. S., J. Wang, A. G. Eleye-Datubo, J. B. Yang, dan J. Liu. 2005. “Safety Assessment of FPSO Turret-Mooring System using Approximate Reasoning and Evidential Reasoning”. *Marine Technology* 42 (2): 88-102.
- Soedjono, J. J. 1998. Diktat Mata Kuliah Konstruksi Bangunan Laut II. Surabaya: Jurusan Teknik Kelautan ITS.
- Sofec. 2012. Mooring Systems, (Online), (<http://www.sofec.com/productsbySubInfo.asp?intcategoryName=Mooring%20Systems&intsubCat=External%20Turret>, diakses 17 Januari 2016).
- Tsinker, G. P. 1986. *Port Engineering: Planning, Construction, Maintenance, and Security*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Wale Marine. 2010. Hawser Connector, (Online), (<http://www.walemarine.com/?m=10&s=2&idkey=546>, diakses 17 Januari 2016).
- Wischer, J. 1988. A Simulation Model for a Single Point Moored Tanker. Wageningen: Maritime Research Institute Netherland.
- Yilmas, O., dan A. Incecik. 1996. “Hydrodynamic Design of Moored Floating Platforms”. *Journal of Marine Structures*, 9: 545-75, Great Britain, UK.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## **BIODATA PENULIS**



Novia Noor Azkia dilahirkan di Banjarmasin pada 17 November 1993. Penulis menempuh pendidikan di SD Negeri Pemurus Dalam 3 Banjarmasin, SMP Negeri 3 Banjarmasin dan SMA Negeri 7 Banjarmasin. Setelah itu, tahun 2012 penulis melanjutkan pendidikan di Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Selama kuliah, penulis sempat aktif menjadi panitia kegiatan kampus dan beberapa kali mendapatkan dana dalam lomba PKM. Penulis juga pernah bekerja praktek di PT. Pertamina Hulu Energi West Madura Offshore (PHE WMO). Ketertarikan dibidang struktur dan hidrodinamika lepas pantai membuat penulis mengambil topik Tugas Akhir yang berhubungan dengan olah gerak bangunan apung dan analisis kekuatan struktur.

*Contact Person:* [novianoorazkia@gmail.com](mailto:novianoorazkia@gmail.com)