



TUGAS AKHIR - MO141326

**ANALISIS TEGANGAN LOKAL MAKSIMUM PADA
BOLLARD AKIBAT MODIFIKASI SISTEM TAMBAT
FSO LADINDA**

YANI NURITA PURNAWANTI

NRP. 4311100028

Dosen Pembimbing :

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

Ir. J. J. Soedjono, M.Sc.

JURUSAN TEKNIK KELAUTAN

Fakultas Teknologi Kelautan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

2015

ANALYSIS OF MAXIMUM LOCAL STRESS ON BOLLARD DUE TO MOORING SYSTEM MODIFICATION OF FSO LADINDA

Student's Name : Yani Nurita Purnawanti
NRP : 4311100028
Department : Ocean Engineering
Advisors : Ir. Handayanu, M.Sc., Ph. D.
Ir. J.J. Soedjono, M. Sc

ABSTRACT

FSO Ladinda represents the conversion from tanker built in 1974 and changed the function as FSO in 1984. Since 1984, FSO started operations in the Strait of Lalang, the Malacca Strait, Riau. Mooring system of FSO Ladinda is SPOLS (Single Point Offshore Loading System) which uses tower yoke mooring system where mooring tower is connected to the yoke arm and there is a turntable used as the key where FSO can move according to the movement of waves without making FSO unmoored. The modifications of FSO Ladinda's mooring system were made during repairing to the mooring tower. They were applied by removing the yoke arm and the replacing it with a spread mooring system. In this case, a spread mooring system was moored on the aft and fore side bollards using anchor chain. The motion response of FSO Ladinda was reviewed in full load and light load conditions on heading 0° , 45° , 90° , 180° . The largest of translational motion response was swaying of 6.130 m/m, while the rotation motion was rolling of 5.452 deg/m in light load conditions. The motion response caused maximum tension occurred to the anchor chain. The maximum tension analysis of the anchor chain was performed in full load and light load on heading 0° , 45° , 60° , 90° , 120° , 135° , and 180° according to the OCIMF recommendations. The result of maximum tension occurred in line 4 of the aft side was 2.31 MN and in line 1 of the fore side was 2.30 MN in the light load conditions. The maximum tension occurred in the anchor chain due to heading 60° where in the direction, the load was properly on the anchor chain. The maximum tension on the anchor chain resulted maximum stress on the bollard. The maximum stress occurred on the aft side was 214.49 MPa, and the deformation was 3.65 mm. Otherwise, the maximum stress occurred on the fore side bollard was 219.69 MPa, and the deformation was 5.62 mm. The maximum stress did not exceed the 90% of yield stress (225 MPa), and the deformation was less than 4 mm in accordance with the safety standards of ABS.

Keywords: bollard, FSO, local stress, spread mooring

**ANALISIS TEGANGAN MAKSIMUM PADA *BOLLARD*
AKIBAT MODIFIKASI SISTEM TAMBAT FSO LADINDA**

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 :

YANI NURITA PURNAWANTI
NRP. 4311 100 028

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir :

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

2. Ir. J.J. Soedjono M.Sc (Pembimbing 2)

SURABAYA, AGUSTUS 2015

ANALISIS TEGANGAN LOKAL MAKSIMUM PADA *BOLLARD* AKIBAT MODIFIKASI SISTEM TAMBAT FSO LADINDA

Nama Mahasiswa : Yani Nurita Purnawanti
NRP : 4311100028
Jurusan : Teknik Kelautan – FTK ITS
Dosen Pembimbing : Ir. Handayanu, M.Sc., Ph. D.
Ir. J.J. Soedjono, M.Sc.

ABSTRAK

FSO Ladinda merupakan hasil konversi dari kapal tanker yang dibangun tahun 1974 dan berubah fungsi sebagai FSO pada tahun 1984. Sejak tahun 1984 FSO ini mulai beroperasi di Selat Lalang, Malaka Strait, Riau. Sistem tambat yang digunakan untuk penambatan FSO Ladinda adalah SPOLS (*Single Point Offshore Loading System*) yang menggunakan sistem tambat *Tower Yoke Mooring System* dengan *Mooring Tower* sebagai tambatan yang dihubungkan dengan *Yoke Arm* dan terdapat *turntable* yang berfungsi sebagai engsel agar FSO dapat bergerak sesuai dengan gerakan gelombang tanpa membuat FSO itu sendiri terlepas. Modifikasi sistem tambat FSO Ladinda ini dilakukan pada saat reparasi pada *tower mooring*. Modifikasi dilakukan dengan melepas *yoke arm* kemudian diganti dengan *spread mooring system*. Pada kasus ini *spread mooring system* ditambatkan pada *bollard* bagian depan dan belakang menggunakan rantai jangkar. Respon gerak FSO Ladinda ditinjau pada kondisi *full load* dan *light load* pada heading 0° , 45° , 90° , 180° . Respon gerak translasi FSO terbesar adalah gerakan *sway* sebesar 6.130 m/m, sedangkan untuk gerak rotasi adalah gerakan *roll* sebesar 5.452 deg/m dalam kondisi *light load*. Respon gerak FSO mengakibatkan *tension* maksimum terjadi pada rantai jangkar. Analisis *tension* maksimum pada rantai jangkar dilakukan pada kondisi *full load* dan *light load* pada heading 0° , 45° , 60° , 90° , 12° , 135° , dan 180° sesuai yang dianjurkan oleh OCIMF. Hasil *tension* maksimum yang terjadi pada *line 4* untuk bagian belakang sebesar 2,31 MN dan *line 1* untuk bagian depan sebesar 2,30 MN saat kondisi *light load*. *Tension* maksimum terjadi pada rantai jangkar akibat arah pembebanan 60° dimana pada arah tersebut beban tepat mengenai rantai jangkar. *Tension* maksimum pada rantai jangkar mengakibatkan tegangan maksimum pada konstruksi dudukan *bollard*. Tegangan maksimum yang terjadi pada konstruksi dudukan *bollard* bagian belakang yaitu 214.49 MPa, dan deformasi maksimumnya 3.65 mm terjadi pada konstruksi *bollard* bagian atas. Sedangkan tegangan maksimum pada konstruksi dudukan *bollard* bagian depan yaitu 219.69 MPa, dan deformasi maksimumnya 5.62 mm terjadi pada *forecastle deck*. Tegangan maksimum yang terjadi tidak melebihi 90% tegangan *yield* (225 MPa), dan deformasi maksimum yang terjadi juga tidak lebih dari 6 mm sesuai dengan standar keamanan dari ABS.

Kata Kunci : *bollard*, , FSO, *spread mooring*, tegangan lokal

ANALYSIS OF MAXIMUM LOCAL STRESS ON BOLLARD DUE TO MOORING SYSTEM MODIFICATION OF FSO LADINDA

Student's Name : Yani Nurita Purnawanti
NRP : 4311100028
Department : Ocean Engineering
Advisors : Ir. Handayanu, M.Sc., Ph. D.
Ir. J.J. Soedjono, M. Sc

ABSTRACT

FSO Ladinda represents the conversion from tanker built in 1974 and changed the function as FSO in 1984. Since 1984, FSO started operations in the Strait of Lalang, the Malacca Strait, Riau. Mooring system of FSO Ladinda is SPOLS (Single Point Offshore Loading System) which uses tower yoke mooring system where mooring tower is connected to the yoke arm and there is a turntable used as the key where FSO can move according to the movement of waves without making FSO unmoored. The modifications of FSO Ladinda's mooring system were made during repairing to the mooring tower. They were applied by removing the yoke arm and the replacing it with a spread mooring system. In this case, a spread mooring system was moored on the aft and fore side bollards using anchor chain. The motion response of FSO Ladinda was reviewed in full load and light load conditions on heading 0° , 45° , 90° , 180° . The largest of translational motion response was swaying of 6.130 m/m, while the rotation motion was rolling of 5.452 deg/m in light load conditions. The motion response caused maximum tension occurred to the anchor chain. The maximum tension analysis of the anchor chain was performed in full load and light load on heading 0° , 45° , 60° , 90° , 120° , 135° , and 180° according to the OCIMF recommendations. The result of maximum tension occurred in line 4 of the aft side was 2.31 MN and in line 1 of the fore side was 2.30 MN in the light load conditions. The maximum tension occurred in the anchor chain due to heading 60° where in the direction, the load was properly on the anchor chain. The maximum tension on the anchor chain resulted maximum stress on the bollard. The maximum stress occurred on the aft side was 214.49 MPa, and the deformation was 3.65 mm. Otherwise, the maximum stress occurred on the fore side bollard was 219.69 MPa, and the deformation was 5.62 mm. The maximum stress did not exceed the 90% of yield stress (225 MPa), and the deformation was less than 4 mm in accordance with the safety standards of ABS.

Keywords: bollard, FSO, local stress, spread mooring

KATA PENGANTAR

Puji Syukur kepada Tuhan yang Maha Kuasa atas segala nikmat yang diberikan sehingga penulis dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir yang berjudul **ANALISIS TEGANGAN LOKAL MAKSIMUM PADA *BOLLARD* AKIBAT MODIFIKASI SISTEM TAMBAT FSO LADINDA** dengan lancar. Laporan tugas akhir ini disusun untuk menyelesaikan mata kuliah Tugas Akhir sebagai syarat kelulusan untuk mendapatkan gelar Strata Satu (S1) di Jurusan Teknik Kelautan Fakultas Teknologi Kelautan Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Laporan ini berisi tentang analisis kekuatan konstruksi *bollard* akibat beban gaya tarik maksimum pada rantai jangkar yang mengenyainya. Diharapkan dengan selesainya laporan tugas akhir ini dapat memberikan kebermanfaatan pengetahuan tentang rekayasa teknologi kelautan dan industri kemaritiman. Penulisan laporan tugas akhir ini masih banyak terdapat kekurangan. Kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan oleh penulis sebagai bahan koreksi untuk penulisan laporan selanjutnya agar lebih baik. Penulis juga berharap semoga laporan ini bermanfaat bagi pembaca pada umumnya, dan bagi penulis pada khususnya.

Surabaya, Agustus 2015

Yani Nurita Purnawanti

DAFTAR ISI

| | |
|---|------|
| HALAMAN JUDUL..... | i |
| LEMBAR PENGESAHAN..... | iii |
| ABSTRAK..... | iv |
| ABSTRACT..... | v |
| KATA PENGANTAR..... | vi |
| UCAPAN TERIMA KASIH..... | vii |
| DAFTAR ISI..... | viii |
| DAFTAR GAMBAR..... | x |
| DAFTAR TABEL..... | xii |
| DAFTAR SIMBOL..... | xiii |
| DAFTAR LAMPIRAN..... | xvi |
| PENDAHULUAN..... | 1 |
| 1.1 Latar Belakang Masalah..... | 1 |
| 1.2 Perumusan Masalah..... | 3 |
| 1.3 Tujuan..... | 3 |
| 1.4 Manfaat..... | 4 |
| 1.5 Batasan Masalah..... | 4 |
| BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI..... | 5 |
| 2.1 Tinjauan Pustaka..... | 5 |
| 2.2 Dasar Teori..... | 6 |
| 2.2.1 Teori Gerak Kapal..... | 6 |
| 2.2.2 Gerakan <i>Surge</i> Murni..... | 7 |
| 2.2.3 Gerakan <i>Sway</i> Murni..... | 7 |
| 2.2.4 Gerakan <i>Heave</i> Murni..... | 8 |
| 2.2.5 Gerakan <i>Roll</i> Murni..... | 8 |
| 2.2.6 Gerakan <i>Pitch</i> Murni..... | 9 |
| 2.2.7 Gerakan <i>Yaw</i> Murni..... | 10 |
| 2.2.8 Gerakan <i>Couple Six Degree of Freedom</i> | 10 |
| 2.2.9 Beban Lingkungan..... | 11 |
| 2.2.10 Sistem Tambat..... | 12 |
| 2.2.11 RAO..... | 13 |
| 2.2.12 Respon Struktur..... | 14 |
| 2.2.13 Perhitungan Jarak Minimum Rantai Jangkar..... | 15 |
| 2.2.14 Simpangan (<i>Offset</i>)..... | 15 |

| | |
|--|-----------|
| 2.2.15 Tegangan Rantai jangkar..... | 16 |
| 2.2.16 Tegangan Aksial..... | 17 |
| 2.2.17 <i>Bending Stress</i> | 18 |
| 2.2.18 Tegangan <i>Von Misses</i> | 18 |
| BAB III METODOLOGI PENELITIAN | 21 |
| 3.2 Pengumpulan Data..... | 25 |
| 3.2.1 Data FSO <i>Ladinda</i> | 25 |
| 3.2.2 Data Lingkungan..... | 26 |
| 3.2.3 Konstruksi <i>Bollard</i> | 26 |
| BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN | 29 |
| 4.1 Pemodelan pada <i>Software</i> Maxsurf..... | 29 |
| 4.2 Validasi Model FSO <i>Ladinda</i> | 31 |
| 4.3 Analisis Gerakan Struktur Terapung Bebas pada Gelombang Reguler..... | 32 |
| 4.4 Dimensi Rantai jangkar..... | 39 |
| 4.5 Analisis Gerakan Struktur Tertambat pada Gelombang Reguler..... | 40 |
| 4.6 Analisis Gerakan Struktur pada Gelombang Acak..... | 47 |
| 4.7 Analisis Gaya Tarik Maksimum pada Rantai Jangkar..... | 55 |
| 4.8 Pemodelan Konstruksi <i>Bollard</i> | 59 |
| 4.9 Pembebanan pada Analisis Lokal..... | 61 |
| 4.10 <i>Meshing</i> dan <i>Sensitivity Analysis</i> | 63 |
| 4.11 Analisa Tegangan Lokal Konstruksi <i>Bollard</i> | 66 |
| BAB V KESIMPULAN DAN SARAN | 71 |
| 5.1 Kesimpulan..... | 71 |
| 5.2 Saran..... | 72 |
| DAFTAR PUSTAKA | 73 |
| LAMPIRAN | |

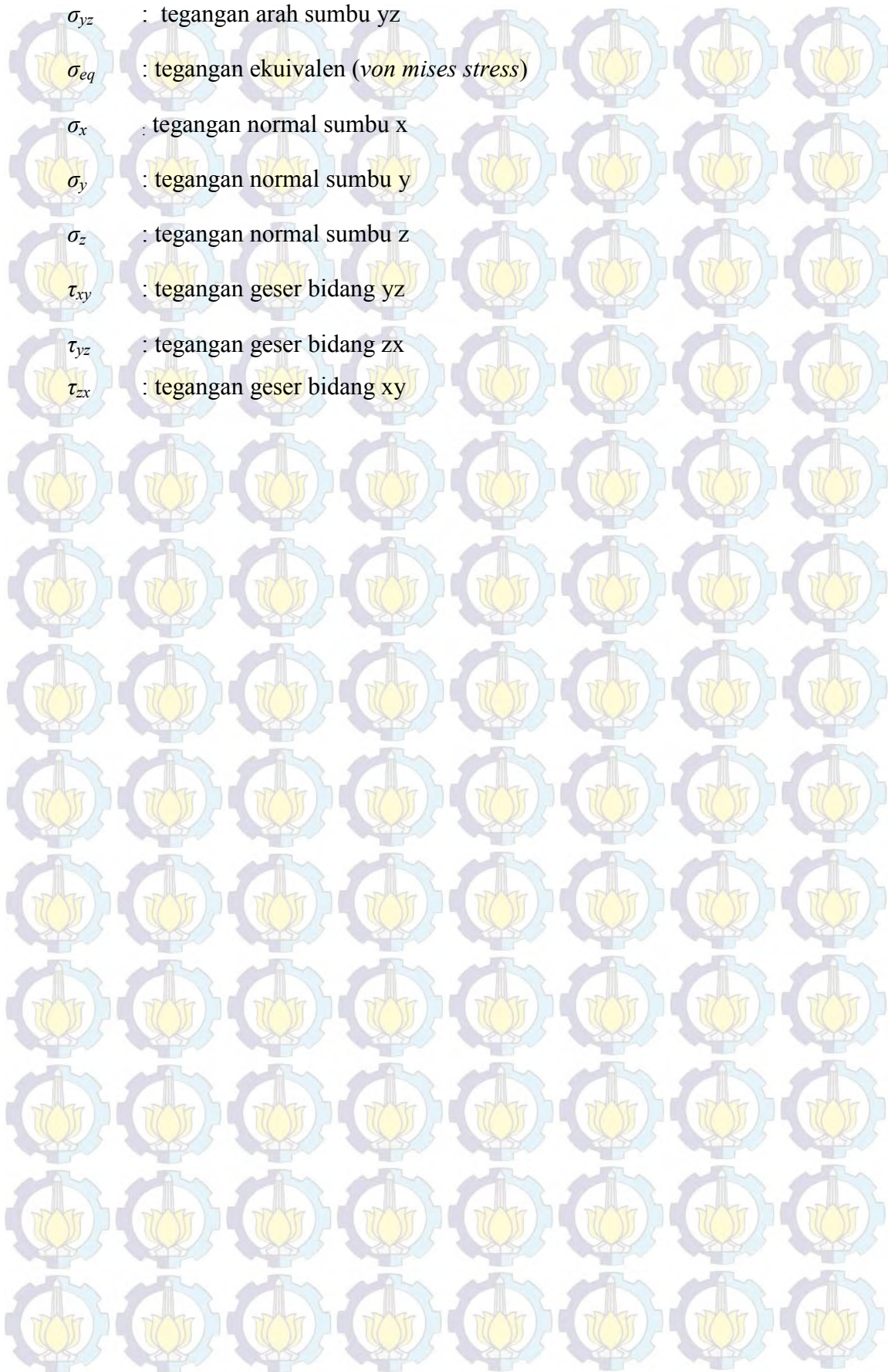
DAFTAR TABEL

| | |
|--|----|
| Tabel 3.1 Ukuran Utama FSO Ladinda..... | 25 |
| Tabel 3.2 Data Lingkungan di Selat Lalang..... | 26 |
| Tabel 3.3 Data Konstruksi <i>Bollard</i> | 26 |
| Tabel 3.4 Data Koordinat Konstruksi <i>Bollard</i> di FSO <i>Ladinda</i> | 27 |
| Tabel 4.1 Principle Dimension FSO Ladinda..... | 29 |
| Tabel 4.2 Validasi data hidrostatis FSO Ladinda Full load..... | 31 |
| Tabel 4.3 Validasi data hidrostatis FSO Ladinda Light load..... | 32 |
| Tabel 4.4 Resume RAO free floating full load..... | 35 |
| Tabel 4.5 Resume RAO free floating light load..... | 39 |
| Tabel 4.6 Data Rantai jangkar..... | 40 |
| Tabel 4.7 Resume RAO tertambat <i>full load</i> | 43 |
| Tabel 4.8 Resume RAO free floating light load..... | 47 |
| Tabel 4.9 Resume Respon Struktur..... | 54 |
| Tabel 4.10 Hasil simulasi <i>tension force</i> pada heading 0^0 | 57 |
| Tabel 4.11 Hasil simulasi <i>tension force</i> pada heading 45^0 | 57 |
| Tabel 4.12 Hasil simulasi <i>tension force</i> pada heading 60^0 | 58 |
| Tabel 4.13 Hasil simulasi <i>tension force</i> pada heading 90^0 | 58 |
| Tabel 4.14 Hasil simulasi <i>tension force</i> pada heading 120^0 | 58 |
| Tabel 4.15 Hasil simulasi <i>tension force</i> pada heading 135^0 | 58 |
| Tabel 4.16 Hasil simulasi <i>tension force</i> pada heading 180^0 | 59 |
| Tabel 4.17 <i>Meshing Sensitivity</i> untuk struktur <i>bollard</i> depan..... | 64 |
| Tabel 4.18 <i>Meshing Sensitivity</i> untuk struktur <i>bollard</i> depan..... | 65 |

DAFTAR SIMBOL

| | |
|------------------|---|
| $a\ddot{x}$ | : inertial force surge |
| $b\dot{x}$ | : damping force surge |
| cx | : restoring force surge |
| F_0 | : exciting force |
| ω_e | : frekuensi gelombang papasan |
| t | : waktu |
| $a\ddot{y}$ | : inertial force sway |
| $b\dot{y}$ | : damping force sway |
| cy | : restoring force sway |
| Δ | : displasmen kapal |
| G | : titik tangkap gaya berat (titik berat) |
| B | : titik tangkap gaya tekan keatas (titik <i>bouyancy</i>) |
| γV | : gaya tekan keatas |
| W_0L_0 | : water line keadaan awal |
| W_1L_1 | : water line keadaan <i>heave</i> |
| $a_z\ddot{z}$ | : tambahan gaya tekan keatas karena <i>added mass</i> |
| z | : besar jarak simpangan <i>heave</i> |
| $a\ddot{z}$ | : inertial force |
| $b\dot{z}$ | : damping force |
| cz | : restoring force |
| M_0 | : amplitudo momen eksitasi |
| $a\ddot{\phi}$ | : inertial moment roll |
| $b\dot{\phi}$ | : damping moment roll |
| $c\phi$ | : restoring moment roll |
| M_0 | : amplitudo momen eksitasi |
| $a\ddot{\theta}$ | : inertial moment pitch |
| $b\dot{\theta}$ | : damping moment pitch |
| $c\theta$ | : restoring moment pitch |
| $a\ddot{\psi}$ | : inertial moment yaw |
| $b\dot{\psi}$ | : damping moment yaw |

| | |
|----------------|---|
| $c\phi$ | : <i>restoring moment yaw</i> |
| M_{jk} | : komponen matriks massa kapal |
| A_{jk} | : matriks koefisien massa tambah |
| B_{jk} | : matriks koefisien redaman |
| C_{jk} | : koefisien-koefisien gaya hidrostatik pengembali |
| F_j | : amplitudo gaya eksitasi dalam besaran kompleks |
| D | : kedalaman perairan |
| λ | : panjang gelombang |
| $Xp(\omega)$ | : amplitude struktur |
| $\eta(\omega)$ | : amplitudo gelombang |
| S_R | : spektrum respon |
| $S(\omega)$ | : spektrum gelombang |
| ω | : frekuensi gelombang |
| g | : gravitasi bumi |
| X | : panjang <i>fetch</i> |
| U_w | : kecepatan angin |
| Y | : parameter puncak dapat dicari dengan persamaan |
| T_p | : periode puncak spektra |
| H_s | : tinggi gelombang signifikan |
| τ | : parameter bentuk |
| x | : jarak minimum rantai jangkar |
| l | : panjang keseluruhan rantai jangkar (<i>m</i>) |
| h | : jarak titik tumpu (<i>bollard</i>) ke <i>seabed</i> |
| W | : berat rantai jangkar |
| σ_0 | : tegangan utama yang bekerja pada sumbu |
| σ_x | : tegangan arah sumbu x |
| σ_y | : tegangan arah sumbu y |
| σ_z | : tegangan arah sumbu z |
| σ_{xy} | : tegangan arah sumbu xy |
| σ_{xz} | : tegangan arah sumbu xz |





DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN A *DRAWING*

LAMPIRAN B Perhitungan *Equipment Number*

LAMPIRAN C Tabel Properti *Anchor Chain*

LAMPIRAN D Perhitungan *Catenary Anchor Chain*

LAMPIRAN E Perhitungan Konstruksi *Forecastle Deck*

LAMPIRAN F *Mesh Sensitivity*

LAMPIRAN G Hasil *Maximum Tension Force* pada Rantai Jangkar

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

FSO (*Floating Storage and Offloading*) merupakan salah satu fasilitas apung berbentuk kapal atau tongkang yang berfungsi sebagai fasilitas penyimpanan minyak dan gas. Minyak dan gas yang ada dalam tangki FSO tersebut kemudian disalurkan atau ditransportasikan menggunakan *shuttle tanker*. FSO mempunyai kesamaan fisik dengan tanker, namun yang membedakan adalah FSO beroperasi dalam keadaan tertambat atau tidak berlayar seperti tanker.

Salah satu FSO yang saat ini sedang beroperasi di Indonesia yaitu FSO Ladinda. FSO Ladinda seperti pada Gambar 1.1 merupakan hasil konversi dari kapal tanker yang dibangun tahun 1974 dan berubah fungsi sebagai FSO pada tahun 1984. Sejak tahun 1984 FSO ini mulai beroperasi di Selat Lalang, Malaka Strait, Riau. Dalam operasinya *offloading* pada FSO Ladinda dilakukan dengan sistem *side by side* dengan *shuttle tanker*.



Gambar 1.1 FSO Ladinda (Sumber : www.energi-mp)

Sistem tambat yang digunakan untuk penambatan FSO harus mampu menahan beban lingkungan terutama beban gelombang. Sistem tambat yang biasa digunakan yaitu SPM (*Single Point Mooring*). SPM merupakan tipe sistem tambat yang mengikuti kondisi lingkungan (*weathervane*) sehingga dalam operasinya FSO dapat bergerak mengikuti arah gelombang namun tetap tertambat. Sistem

tambat SPM juga memudahkan saat proses *offloading side by side* ataupun tandem *offloading*. Sistem mooring SPM yang sering digunakan pada FSO yaitu SALM (*Single Anchored Leg Mooring*), CALM (*Catenary Anchored Leg Mooring*), dan *Turret Mooring*.

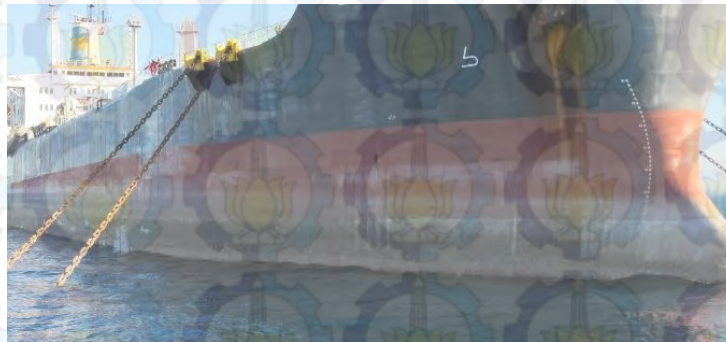
Sistem tambat yang terdapat pada FSO Ladinda saat ini yaitu SPOLS (*Single Point Offshore Loading System*) seperti Gambar 1.2 yang menggunakan sistem tambat *tower yoke mooring system* dengan *mooring tower* sebagai sistem tambatnya yang dihubungkan dengan *yoke arm* dan terdapat *turntable* yang berguna sebagai engsel agar FSO dapat bergerak sesuai dengan gerakan gelombang tanpa membuat FSO itu sendiri terlepas. Jenis mooring ini sangat cocok untuk *shallow Draft* dan lebih ekonomis untuk perairan dangkal (Wichers, 2013).



Gambar 1.2 Mooring FSO Ladinda (sumber : www.energi-mp.com)

Lokasi operasi FSO Lainya yaitu di Selat Lalang merupakan daerah pelayaran sehingga di lokasi tersebut sering dilewati oleh kapal. Kapal-kapal yang melewatinya sering kali menabrak *mooring tower* yang pada SPOLS FSO Ladinda. Hal ini mengakibatkan sedikit demi sedikit terjadi kerusakan pada *mooring tower*.

Perbaikan pada *mooring tower* yang akan dilakukan mengharuskan FSO Ladinda dimodifikasi sistem tambatnya. Modifikasi yang dilakukan yaitu dengan melepas *yoke arm* yang berfungsi sebagai penghubung antara FSO dengan *mooring tower* kemudian menggantinya dengan *Spread mooring system* dengan menambatkan rantai jangkar pada *bollard* bagian depan dan belakang (Gambar 1.3).



Gambar 1.3 *Spread mooring system* (sumber : www.jayasalvage.com)

Pada tugas akhir ini dilakukan analisis terhadap hasil modifikasi sistem tambat pada FSO Ladinda. Analisis yang dilakukan meliputi respon gerak FSO dengan sistem tambat yang baru yaitu *spread mooring system*, kekuatan atau *tension* maksimum yang terjadi pada rantai jangkar, dan kekuatan pada *bollard*. Contoh perlengkapan *spread mooring system* seperti pada Gambar 1.4.



(a)



(b)



(c)

Gambar 1.4 Perangkat *Spread mooring system* (a) *Bollard*; (b) Rantai Jangkar; (c) Jangkar
(sumber : www.maritimeworld.web.id)

1.2 Perumusan Masalah

1. Bagaimana perilaku gerak FSO Ladinda saat *free floating*?
2. Bagaimana perilaku gerak FSO Ladinda saat tertambat?
3. Berapa besar *tension* maksimum pada rantai jangkar?
4. Berapa tegangan lokal maksimum pada *bollard*?

1.3 Tujuan

1. Menghitung perilaku gerak FSO Ladinda saat *free floating*.
2. Menghitung perilaku gerak FSO Ladinda saat tertambat.

3. Menghitung besar gaya tarik maksimum pada rantai jangkar.
4. Menghitung tegangan lokal maksimum pada *bollard*.

1.4 Manfaat

Manfaat dari tugas akhir ini adalah:

1. Dapat mengetahui modifikasi pada konfigurasi mooring pada FSO Ladinda saat reparasi pada *mooring tower*.
2. Dapat mengetahui cara menghitung gaya tarik maksimum pada rantai jangkar serta tegangan lokal maksimum pada *bollard*.

1.5 Batasan Masalah

1. Merupakan studi kasus pada modifikasi sistem tambat FSO Ladinda.
2. Sistem tambat yang digunakan *Spread mooring system* dengan konfigurasi rantai jangkar sesuai dengan ABS dan API.
3. Validasi hidrostatis model hanya dilakukan pada FSO Ladinda saat kondisi *full load* dan *light load*.
4. Analisis perilaku gerak dilakukan dalam dua kondisi yaitu saat FSO dalam keadaan *full load* dan *light load*.
5. *Heading* pembebanan pada *heading angle* 0° , 45° , 90° , 180° .
6. *Riser* tidak dimodelkan dan pergerakan *hose* diabaikan.
7. Jangkar dianggap tidak mengalami perpindahan atau kuat menahan gaya tarik rantai jangkar.
8. Beban lingkungan yang ditinjau adalah beban arus, beban angin, dan beban gelombang dengan *heading* masing – masing beban searah.
9. Perhitungan tegangan maksimum *bollard* difokuskan pada beban gaya tarik maksimum maksimum rantai jangkar.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

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

Pada konfigurasi *spread mooring system*, kekuatan pada *mooring equipment* sangat penting untuk diperhatikan. Salah satunya adalah kekuatan *bollard* yang sebagai titik tumpu rantai jangkar yang terdapat pada FSO. Kekuatan pada *bollard* dapat ditentukan dari tegangan rantai jangkar (Cho, et.al., 2010). Sehingga perhitungan tegangan rantai jangkar yang terjadi juga perlu diperhitungkan.

Studi kasus yang akan dibahas dalam tugas akhir ini adalah modifikasi sistem tambat pada FSO Ladinda saat dilakukan reparasi pada komponen penambatnya, yaitu *mooring tower* pada SPOLS (*Single Point Offshore Loading System*). Selama dilakukan reparasi, sistem tambat ini dilepas dan digantikan dengan sistem tambat yang lain, yaitu *spread mooring system*. *Spread mooring system* didesain dengan konfigurasi dan jumlah tali yang sesuai dengan perhitungan rules yang digunakan, yaitu ABS.

Penelitian tentang sistem tambat FSO telah dilakukan. Salah satu diantaranya yaitu penelitian yang dilakukan oleh Irawati (2013) tentang analisis tegangan lokal konstruksi *windlass* pada *bow* FSO akibat pengaruh modifikasi sistem *offloading*. Sistem *offloading* pada FSO yang semula hanya *side by side* kemudian dilengkapi dengan sistem tandem *offloading* sehingga perlu dilakukan analisis

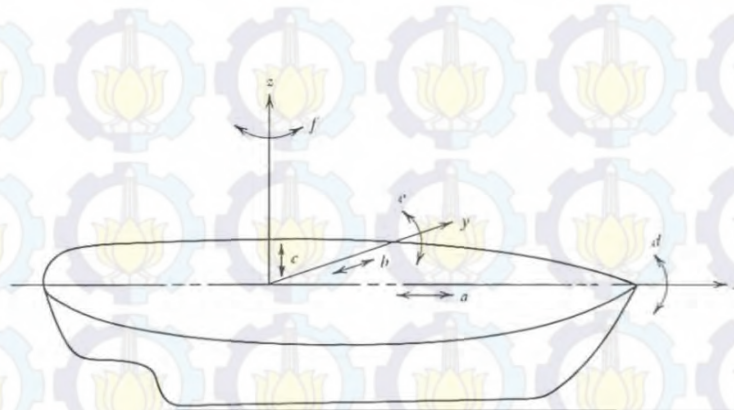
tegangan pada *hawser* yang menghubungkan FSO dengan SPM untuk menghitung tegangan lokal yang terjadi pada konstruksi *windlass* pada *bow* FSO. Penelitian tentang kekuatan pada sistem tandem FSO telah dilakukan oleh Pratiwi (2013). Analisis *tension* maksimum pada *hawser* dihitung untuk mendapatkan kekuatan *smit bracket* dan *panama chock*. Analisis dilakukan dalam kondisi tandem *offloading* dengan *shuttle* tanker 85.000 DWT. Penelitian tentang FSO Ladinda telah dilakukan oleh Athoillah (2014) yang melakukan analisis tentang tegangan lokal pada konstruksi *Bollard* akibat *side by side offloading*. Pada penelitian ini sistem tambat FSO Ladinda memakai SPOLS (salah satu jenis *eksternal turret mooring*). Modifikasi pada sistem tambat FSO Ladinda belum disimulasikan. Berdasarkan penelitian – penelitian yang telah dilakukan diatas, penulis melakukan analisis tegangan maksimum pada rantai jangkar dan tegangan lokal pada *bollard* akibat modifikasi yang dilakukan pada sistem tambat FSO Ladinda yang semula memakai SPOLS (*Single Point Offshore Loading System*) menjadi *spread mooring system*.

2.2 Dasar Teori

2.2.1. Teori Gerak Kapal

Bangunan apung yang terkena gaya mengalami 6 mode gerakan osilasi pada sumbu x,y,dan z yang terkelompok dalam gerakan translasi dan gerakan rotasi (Bhattacharyya, 1978). Ilustrasi gerakan translasi dapat dilihat seperti Gambar 2.1.

1. Gerakan Translasi adalah gerakan osilasi bangunan apung pada sumbu x, y, atau z tanpa mengalami perubahan sudut. Gerakan translasi meliputi :
 - a. *Surge* : gerakan translasi bangunan apung searah sumbu x
 - b. *Sway* : gerakan translasi bangunan apung searah sumbu y
 - c. *Heave* : gerakan translasi bangunan apung ke arah sumbu z
2. Gerakan Rotasi adalah gerakan osilasi pada bangunan apung pada sumbu x,y, dan z yang terjadi perubahan sudut. Gerakan rotasi meliputi :
 - d. *Roll* : gerakan rotasi bangunan apung searah sumbu y
 - e. *Pitch* : gerakan rotasi bangunan apung searah sumbu z
 - f. *Yaw* : gerakan rotasi bangunan apung searah sumbu x



Gambar 2.1 Gerak translasi dan rotasi pada kapal (sumber : Bhattacharyya, 1978)

2.2.2 Gerakan Surge Murni

Surge merupakan gerak translasi kapal dengan sumbu X sebagai pusat gerak.

Persamaan umum pada kapal kondisi surging adalah:

$$a\ddot{x} + b\dot{x} + cx = F_0 \cos \omega_e t \dots\dots\dots(1)$$

dengan:

- $a\ddot{x}$: Inertial force
- $b\dot{x}$: Damping force
- cx : Restoring force
- $F_0 \cos \omega_e t$: Exciting force

2.2.3 Gerakan Sway Murni

Sway merupakan gerak translasi kapal dengan sumbu Y sebagai pusat gerak.

Persamaan umum kapal pada kondisi swaying adalah :

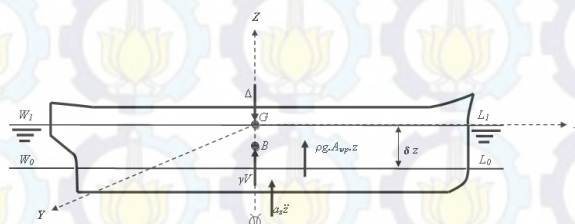
$$a\ddot{y} + b\dot{y} + cy = F_0 \cos \omega_e t \dots\dots\dots(2)$$

dengan:

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

2.2.4 Gerakan *Heave* Murni

Pada *heaving* gaya ke bawah akibat dari berat kapal membuat kapal tercelup ke air lebih dalam dan kembali ke awal hingga diperoleh kesetimbangan kapal. Ketika gaya *buoyancy* lebih besar akibat kapal tercelup, kapal akan bergerak vertikal ke atas, ketika posisi kapal telah setimbang kapal akan tetap naik dikarenakan ada pengaruh momentum. Ilustrasi gerakan *heave* dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Ilustrasi gerakan *heave* (Sumber: Murtedjo 1999)

Dengan keterangan gambar sebagai berikut:

- Δ : *Displacement* kapal
- G : Titik tangkap gaya berat (Titik Berat)
- B : Titik tangkap gaya tekan keatas (Titik *Bouyancy*)
- γV : Gaya tekan keatas
- W_0L_0 : *Water line* keadaan awal
- W_1L_1 : *Water line* keadaan *heave*
- $a_z \ddot{z}$: Tambahan gaya tekan keatas karena *added mass*
- δ_z : Besar jarak simpangan *heave*

Maka dapat dituliskan persamaan umum pada kapal kondisi *heaving* adalah :

$$a\ddot{z} + b\dot{z} + cz = F_0 \cos \omega_e t \dots \dots \dots (3)$$

dengan:

- $a\ddot{z}$: *Inertial force*
- $b\dot{z}$: *Damping force*
- cz : *Restoring force*
- $F_0 \cos \omega_e t$: *Exciting force*

2.2.5 Gerakan *Roll* Murni

Kapal menjalani gerakan harmonis sederhana terhadap koordinat axis secara transversal maupun longitudinal. *Rolling* merupakan gerak rotasional dengan sumbu X sebagai pusat gerakanya. Gerakan ini akan berpengaruh terhadap initial *velocity* sehingga perlu dilakukan perhitungan terhadap momen gaya. Ilustrasi gerakan *roll* dapat dilihat pada Gambar 2.3.

Rumus umum dari persamaan gerak akibat *rolling* ialah:

$$a\ddot{\phi} + b\dot{\phi} + c\phi = M_o \cos \omega_e t \dots\dots\dots(4)$$

Dengan:

M_o = Amplitudo momen eksitasi (m)

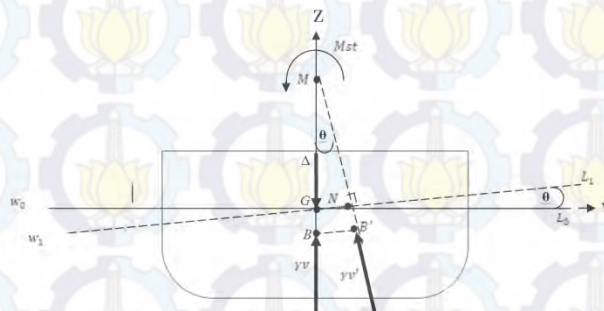
ω_e = Frekuensi gelombang *encountering* (hz)

$a\ddot{\phi}$ = *Inertial moment*

$b\dot{\phi}$ = *Damping Moment*

$c\phi$ = *Restoring Moment*

$M_o \cos \omega_e t$ = *Exciting moment*



Gambar 2.3 Ilustrasi kondisi *rolling* kapal pada saat *still water* (Sumber: Murtedjo 1999)

2.2.6 Gerakan *Pitch* Murni

Konstruksi benda apung dapat mengalami *simple harmonic motion* yang berupa gerakan dalam arah sumbu transversal maupun arah sumbu longitudinal apabila benda apung tersebut mengalami perpindahan posisi keseimbangannya dan kemudian dilepaskan atau pada benda apung tersebut dikenakan suatu kecepatan awal sehingga bergerak menjauh dari posisi keseimbangannya. *Pitching* merupakan gerak rotasional dengan sumbu Y sebagai pusat gerak. Karena gerak *pitching* akan berpengaruh terhadap kesetimbangan posisi, maka momen yang

terjadi akibat *pitching* perlu diperhitungkan. Rumus umum dari persamaan gerakan akibat *pitching* adalah:

$$a\ddot{\theta} + b\dot{\theta} + c\theta = M_o \cos \omega_e t \dots\dots\dots(5)$$

dengan:

M_o = amplitudo momen eksitasi (m)

ω_e = frekuensi gelombang *encountering* (hz)

$a\ddot{\theta}$ = *Inertial Moment*

$b\dot{\theta}$ = *Damping Moment*

$c\theta$ = *Restoring Moment*

$M_o \cos \omega_e t$ = *Exciting Moment*

2.2.7 Gerakan Yaw Murni

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

$$a\ddot{\phi} + b\dot{\phi} + c\phi = M_o \cos \omega_e t \dots\dots\dots(6)$$

dengan:

M_o = amplitudo momen eksitasi (m)

ω_e = frekuensi gelombang *encountering* (hz)

$a\ddot{\phi}$ = *Inertial Moment*

$b\dot{\phi}$ = *Damping Moment*

$c\phi$ = *Restoring Moment*

$M_o \cos \omega_e t$ = *Exciting Moment*

2.2.8 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:

$$\sum_{n=1}^6 [(M_{jk} + A_{jk})\xi_k + B_{jk}\xi_k + C_{jk}\xi_k] = F_j e^{i\omega t}, j = 1 \dots \dots \dots (7)$$

dengan:

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

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

2.2.9. Beban Lingkungan

Beban Lingkungan adalah beban pada bangunan lepas pantai akibat pengaruh lingkungan tempat struktur tersebut beroperasi. Beban lingkungan yang diperkirakan dalam analisis ini adalah :

a. 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 (λ) sebagai berikut (API, 2000):

- $D/\lambda > 1$ = Gelombang mendekati pemantulan murni, persamaan Morison tidak valid.
- $D/\lambda > 0.2$ = Difraksi gelombang perlu diperhitungkan, persamaan Morison tidak valid.
- $D/\lambda < 0.2$ = Persamaan Morison valid.

b. 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 *non-linier*. Sedangkan arus yang disebabkan oleh angin memiliki karakter yang sama, tetapi dalam fungsi *linier*.

c. Beban *Wave Drift*

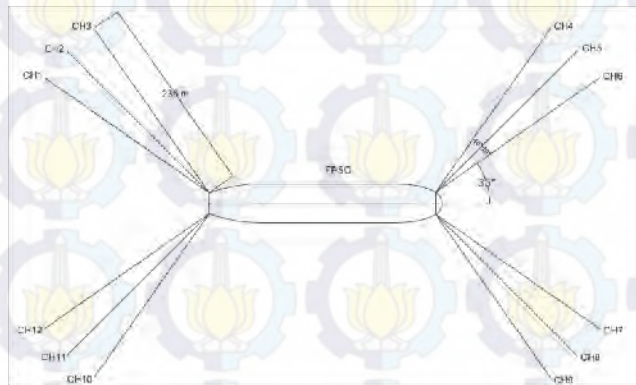
Gaya wave drift adalah gaya hanyut pada frekuensi rendah. Pada gelombang acak wave drift merupakan gaya dalam fungsi waktu yang berhubungan dengan kuadrat amplitudo gelombang (Yilmaz, 1994). Penyelesaian gaya *wave drift* dapat dilakukan dengan persamaan *low frequency second order wave drift force*.

2.2.10. Sistem Tambat

Sistem penambatan pada FSO dapat dikategorikan menjadi dua jenis, yaitu: *weathervaning* dan *non-weathervaning*. *Weathervaning* adalah respon bangunan apung yang bebas berputar terhadap beban lingkungan. *Turret mooring system* dan *tower yoke mooring system* termasuk dalam sistem tambat *weathervaning*, sedangkan *jetty mooring system* dan *spread mooring* termasuk dalam sistem tambat *non-weathervaning*. Pada *spread mooring system*, skema tandem menjadi lebih baik karena osilasi *stern* lebih tereduksi dengan baik.

a. *Spread mooring system*

Spread mooring system merupakan sistem tambat dengan konfigurasi rantai jangkar menyebar dengan tali yang tertambat di beberapa titik (Mentes, et.al., 2012). *Spread mooring system* yang biasa digunakan terdiri atas beberapa rantai jangkar yang terkelompok dalam beberapa grup (Gambar 2.4). *Spread mooring system* paling banyak dijumpai pada konfigurasi mooring FPSO. Pada sistem ini tidak memungkinkan bagi kapal untuk bergerak atau berputar guna mencapai posisi dimana efek-efek lingkungan semisal angin, arus dan gelombang relatif kecil.



Gambar 2.4 Contoh Konfigurasi *Spread mooring system*
(sumber : www.zebecmarine.com)

Konfigurasi rantai jangkar seperti diatas mengakibatkan beban lingkungan terhadap kapal semakin besar sehingga tegangan rantai jangkarnya juga semakin besar. Untuk mengantisipasinya digunakan satu set *anchor* dan *mooring lines* yang biasanya terletak pada bagian depan (*bow*) atau belakang (*stern*). *Spread mooring system* biasanya dipakai untuk sistem tambat sementara (Mentes, et.al, 2012), sehingga sesuai untuk menggantikan sistem mooring pada FPSO Ladinda selama reparasi.

2.2.11. RAO

Response Amplitude Operator (RAO) adalah fungsi transformasi gelombang menjadi respon gerakan struktur dalam rentang frekuensi tertentu. RAO juga dapat merepresentasikan rasio amplitudo struktur dengan amplitudo gelombang. RAO dapat digunakan untuk mengetahui respon struktur pada gelombang acak dengan cara mengalikan ordinat pada RAO dengan ordinat pada spektrum gelombang yang telah ditransformasi pada frekuensi pertemuan.

Menurut Chakrabarti (1987) RAO sendiri dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$RAO(\omega) = \frac{X_p(\omega)}{\eta(\omega)} \dots\dots\dots(8)$$

dengan :

- $X_p(\omega)$ = amplitude struktur
- $\eta(\omega)$ = amplitude gelombang

2.2.12. Respon Struktur

Respon struktur dapat diketahui melalui perkalian antara RAO kuadrat dengan spektrum gelombang. Spektrum respon dapat didefinisikan sebagai sebaran energi struktur akibat gelombang. Jika diformulasikan akan didapat persamaan :

$$S_R = [RAO(\omega)]^2 S(\omega) \dots\dots\dots(9)$$

dengan:

S_R = spektrum respons (m^2 -sec)

$S(\omega)$ = spektrum gelombang (m^2 -sec)

$RAO(\omega)$ = transfer function

ω = frekuensi gelombang (rad/sec)

Persamaan spektrum gelombang yang digunakan dalam analisis ini adalah persamaan spektrum JONSWAP karena parameter yang dimasukkan sesuai dengan karakteristik gelombang perairan tertutup atau kepulauan (Djarmiko, 2012). Persamaan spektrum JONSWAP adalah sebagai berikut :

$$S(\omega) = \alpha g^2 \omega^{-5} EXP \left[-1,25 \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^{-4} \right] \gamma^{EXP \left[\frac{-(\omega - \omega_0)^2}{2\tau^2 \omega_0^2} \right]} \dots\dots\dots(10)$$

dimana

$\alpha = 0,076 (X_0)^{-0,22}$

$X_0 = gX/Uw^2$

X = panjang fetch

Uw = kecepatan angin

$\alpha = 0,0081$ jika X tidak diketahui

γ = parameter puncak dapat dicari dengan persamaan :

dimana :

Tp = periode puncak spektra

Hs = tinggi gelombang signifikan

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

$\omega_0 = 2\pi \left(\frac{g}{Uw} \right) (X_0)^{-0,33}$

2.2.13 Perhitungan Jarak Minimum Rantai Jangkar

Perhitungan jarak minimum rantai jangkar dilakukan agar rantai jangkar tidak terlalu menegang sehingga tension yang dihasilkan tidak terlalu besar. Menurut Faltinsen 1990, perhitungan jarak minimum rantai jangkar dapat dicari dengan persamaan :

$$X = l - h \left(1 + 2 \frac{a}{h} \right)^{\frac{1}{2}} + a \cosh^{-1} \left(1 + \frac{h}{a} \right) \dots\dots\dots(11)$$

dimana :

- x = jarak minimum rantai jangkar (m)
- l = panjang keseluruhan rantai jangkar (m)
- h = jarak titik tumpu (*bollard*) ke seabed (m)
- a = MBL / W
- W = berat rantai jangkar (kg)

2.2.14 Simpangan (*Offset*)

Simpangan atau *offset* adalah perpindahan posisi pada FSO dengan jarak sejauh x meter setelah terkena gelombang dan merupakan salah satu bentuk respon dari FSO saat terkena beban lingkungan.

a. *Mean Offset*

Perpindahan pada FSO akibat kombinasi dari pengaruh beban arus, wave drift, dan beban angin.

b. *Maximum Offset*

Mean offset yang mendapat pengaruh dari kombinasi frekuensi gelombang dan *low frequency motion*. Menurut *API-RP2SK* (2005) simpangan maksimum dapat ditentukan dengan prosedur dibawah ini :

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

$$S_{max} = S_{mean} + S_{lfmax} + S_{wfsig} \dots\dots\dots(12)$$

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

$$S_{max} = S_{mean} + S_{wfmax} + S_{lfsig} \dots\dots\dots(13)$$

dengan:

$$S_{mean} = \text{mean offset}$$

$$S_{max} = \text{maximum offset}$$

S_{wfmax} = maximum wave frequency offset

S_{wfsig} = significant wave frequency offset

S_{lfmax} = maximum low-frequency offset

S_{lfsig} = significant low-frequency offset

2.2.15 Tegangan Rantai jangkar

Gerakan pada FSO dan akibat dari beban lingkungan menyebabkan adanya tarikan (*tension*) pada *chain*. *Tension* yang terjadi dapat dibedakan menjadi :

1. Mean Tension

Mean *tension* adalah *tension* pada *chain* yang berkaitan dengan mean offset pada FSO.

2. Maximum Tension

Maximum tension adalah *mean tension* yang mendapat pengaruh dari kombinasi frekuensi gelombang dan *low frequency tension*.

Menurut API-RP2SK (2005), *maximum tension force* dapat ditentukan dengan prosedur dibawah ini:

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

$$T_{max} = T_{mean} + T_{lfmax} + T_{wfsig} \dots\dots\dots(14)$$

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

$$T_{max} = T_{mean} + T_{wfmax} + T_{lfsig} \dots\dots\dots(15)$$

dengan:

T_{mean} = mean tension

T_{max} = maximum tension

T_{wfmax} = maximum wave frequency tension

T_{wfsig} = significant wave frequency tension

T_{lfmax} = maximum low-frequency tension

T_{lfsig} = significant low-frequency tension

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

$$\text{Safety Factor} = \frac{\text{Minimum Breaking Load}}{\text{Maximum Tension}} \dots\dots\dots(16)$$

2.2.16 Tegangan Aksial

Tegangan aksial adalah tegangan normal yang bekerja tegak lurus penampang struktur. Tegangan aksial dapat dihasilkan dari gaya tarik atau gaya tekan. Ilustrasi tegangan aksial dapat dilihat pada Gambar 2.5. Persamaan tegangan aksial adalah sebagai berikut (Popov, 1996) :

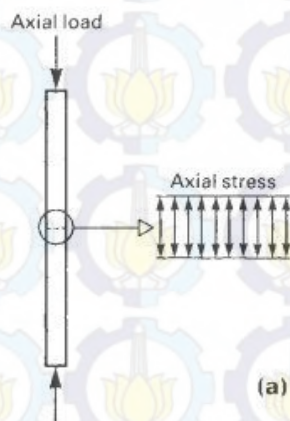
$$\tau = \frac{F}{A} \dots\dots\dots(17)$$

dengan:

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

A : luas penampang (m²)

τ : tegangan aksial (Pa)



Gambar 2.5 Ilustrasi tegangan normal akibat gaya aksial

2.2.17 Bending Stress

Bending stress atau tegangan lentur merupakan resultan dari momen luar dan momen dalam yang terjadi pada struktur. Ilustrasi *bending stress* dapat dilihat pada Gambar 2.6.

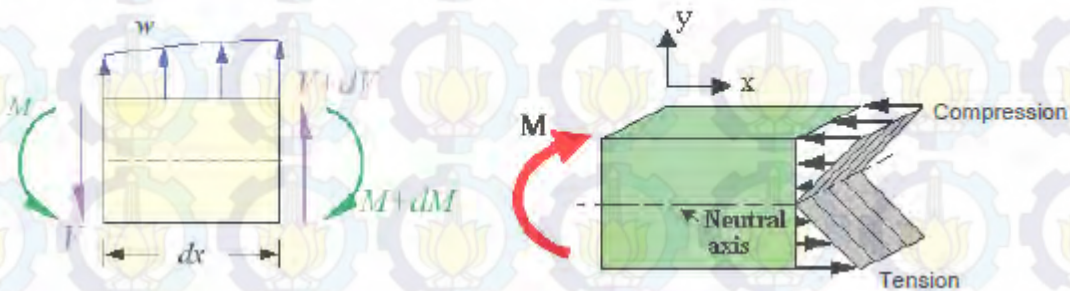
$$M = \int_A f \cdot dA \cdot y = \int_A \left(-\frac{y}{c} f_{\max} \right) dA \cdot y = -\frac{f_{\max}}{c} \int_A y^2 dA \quad \dots\dots\dots(18)$$

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

$$M = -\frac{f_{\max}}{c} I \quad \text{atau} \quad f_{\max} = -\frac{M c}{I} \quad \dots\dots\dots(19)$$

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

$$f = -\frac{M y}{I} \quad \dots\dots\dots(20)$$



Gambar 2.6 *Bending stress* pada suatu penampang (Sumber: Ronney, 2014)

2.2.18 Tegangan Von Misses

Pada elemen 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 (Ronney, 2014):

$$\begin{bmatrix} \sigma_x - \sigma_0 & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} & \sigma_y - \sigma_0 & \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_z - \sigma_0 \end{bmatrix} = 0 \quad \dots\dots\dots(23)$$

dengan:

σ_0 = tegangan utama yang bekerja pada sumbu (Pa)

σ_x = tegangan arah sumbu x (Pa)

σ_y = tegangan arah sumbu y (Pa)

σ_z = tegangan arah sumbu z (Pa)

σ_{xy} = tegangan arah sumbu xy (Pa)

σ_{xz} = tegangan arah sumbu xz (Pa)

σ_{yz} = tegangan arah sumbu yz (Pa)

Tegangan maksimum yang terjadi pada struktur didapatkan dari penggabungan tegangan yang terjadi pada masing-masing arah (Gambar 2.7). Persamaan tegangan gabungan dapat dinyatakan sebagai persamaan tegangan *Von Mises* :

$$\sigma_{eq} = \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \dots(24)$$

dengan:

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

σ_x = tegangan normal sumbu x (Pa)

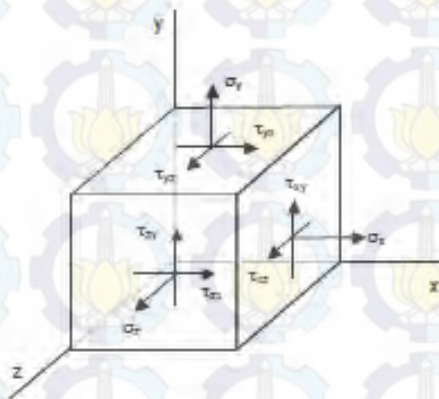
σ_y = tegangan normal sumbu y (Pa)

σ_z = tegangan normal sumbu z (Pa)

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

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

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



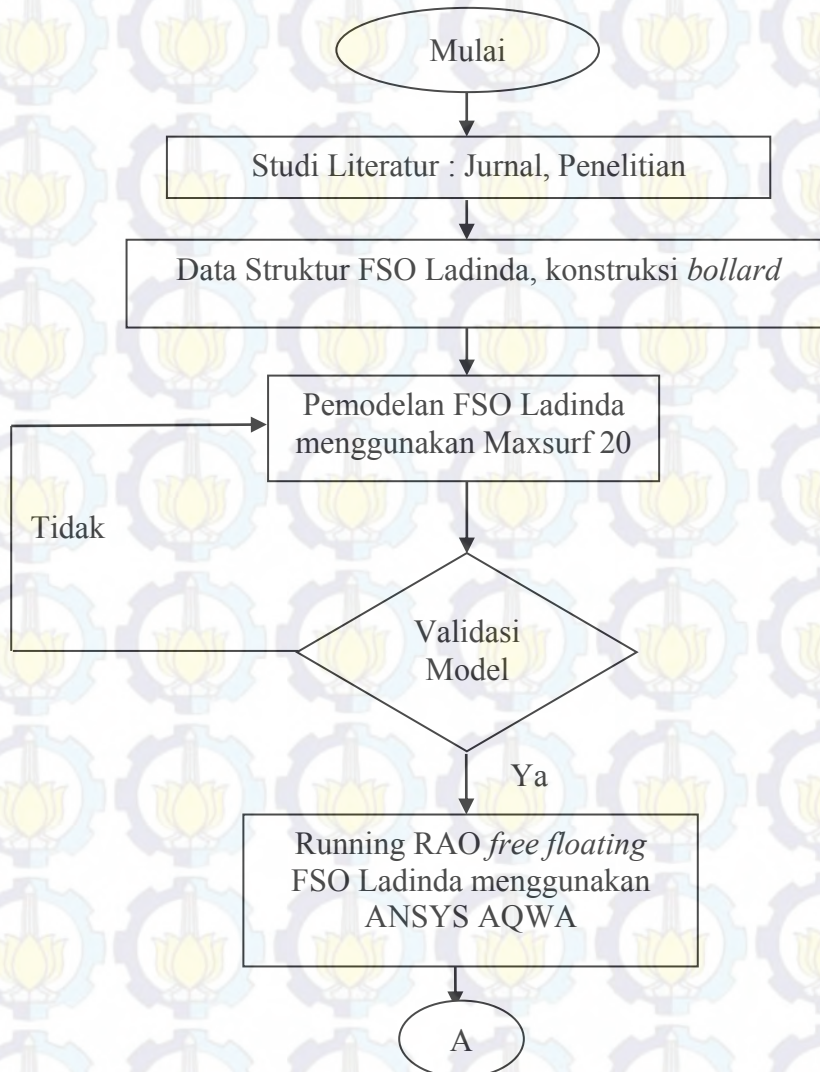
Gambar 2.7 *Von Mises stress* pada suatu penampang (Sumber: Ronney 2014)

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

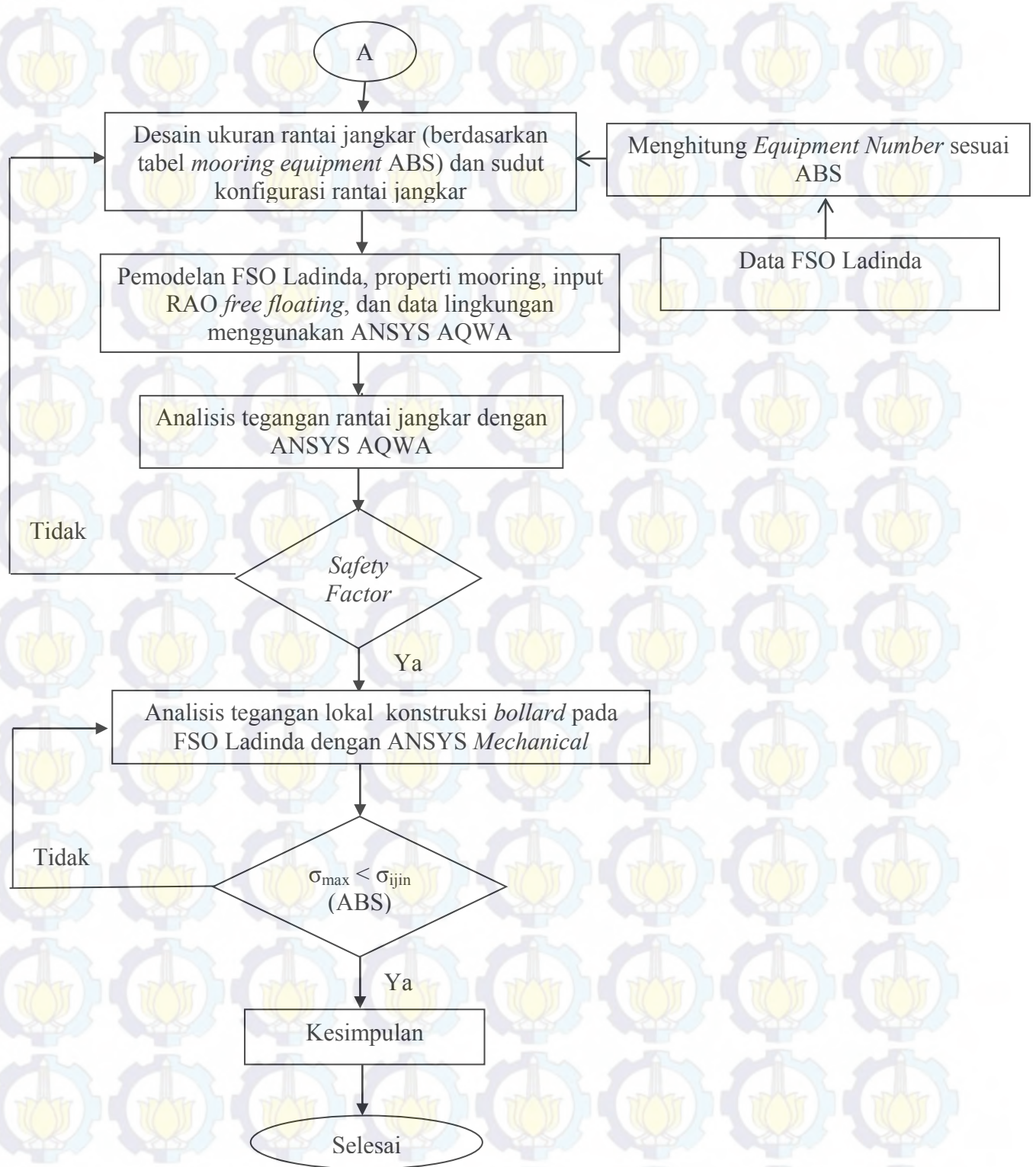
BAB III
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian dapat disajikan dalam diagram alir dibawah :



Gambar 3.1 Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir



Gambar 3.2 Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir (lanjutan)

Adapun langkah – langkah penelitian pada diagram alir diatas dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Penelusuran literatur ditujukan untuk mendapatkan informasi tentang FSO, serta mengetahui penelitian yang telah dilakukan mengenai FSO, khususnya FSO Ladinda. Studi literatur dari sumber yang digunakan adalah buku, materi perkuliahan, jurnal, penelitian sebelumnya termasuk tugas akhir terdahulu yang memiliki topik yang berkaitan.

2. Pengumpulan data struktur, dan data lingkungan.

Pengumpulan data struktur FSO Ladinda dan data lingkungan didapatkan dari PT. Energi Mega Persada. Untuk data *chain* didapatkan dari perhitungan sesuai dengan rules yang digunakan yaitu ABS.

3. Pemodelan struktur

Pemodelan struktur FSO Ladinda menggunakan Maxurf 20. Untuk pemodelan sistem tambatnya menggunakan ANSYS AQWA. Untuk pemodelan *bollard* menggunakan AutoCAD 3D.

4. Analisis RAO *motion*

Analisis RAO *motion* menghasilkan karakteristik gerak pada FSO Ladinda saat *free floating* pada gelombang reguler. Analisa RAO motion dilakukan saat FSO Ladinda dalam kondisi *full load* dan *light load*.

5. Desain rantai jangkar

Rantai jangkar pada FSO Ladinda didesain sesuai dengan perhitungan mooring equipment yang ada pada *rules* ABS. Desain rantai jangkar dilakukan untuk menentukan ukuran dan konfigurasi sudut yang sesuai.

5. Analisis tegangan rantai jangkar

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

6. Analisis tegangan lokal pada *bollard*

Model *bollard* yang telah dibuat pada AutoCAD 3D dikonversi menjadi *solid* dan juga dilakukan pemilihan material untuk model yang sesuai data menggunakan *software* ANSYS Mechanical. Tegangan lokal konstruksi *bollard* pada FSO dilakukan dengan *running* ANSYS Mechanical. Kemudian dilakukan analisis terhadap hasil yang didapat. Analisis dilakukan dengan mengacu pada standar yang digunakan, yaitu ABS untuk mengetahui apakah struktur tersebut sesuai dengan kriteria atau tidak.

7. Pengambilan kesimpulan dari hasil penelitian.

3.2 Pengumpulan Data

3.2.1 Data FSO *Ladinda*

Berikut ini adalah data FSO *Ladinda* yang terangkum pada Tabel 3.1:

Tabel 3.1 Ukuran Utama FSO *Ladinda*

| Ukuran Kapal | Unit | Kondisi Maksimum Operasi | Kondisi Minimum Operasi |
|------------------------------------|-------------|---------------------------------|--------------------------------|
| <i>Length, LOA</i> | M | 284 | |
| <i>Length, LBP</i> | M | 272 | |
| <i>Breadth, B</i> | M | 43.4 | |
| LWL | M | 278,8 | 261,63 |
| <i>Depth, D</i> | M | 20.6 | |
| <i>Draft, T</i> | M | 15.725 | 2.41 |
| <i>Displacement</i> | Ton | 161810 | 21614 |
| LCG | M | 144.11 <i>from AP</i> | 123.03 <i>from AP</i> |
| KG (VCG) | M | 10.76 | 12.57 |
| TCG | M | 0.1 | 0 |
| LCB | M | 143.83 <i>from AP</i> | 146.11 <i>from AP</i> |
| LCF | M | 138.176 <i>from AP</i> | 145.52 <i>from AP</i> |
| KB | M | 7.72 <i>from BL</i> | 1.35 <i>from BL</i> |
| KM | M | 17.69 <i>from BL</i> | 53.35 <i>from BL</i> |
| <i>Midship Section Coefficient</i> | | 0.995 | |
| <i>Water Plane Coefficient</i> | | 0.923 | |
| <i>Prismatic Coefficient</i> | | 0.84 | |
| <i>Block Coefficient</i> | | 0.83 | |
| <i>Cargo Tank Capacity</i> | Bbls | 1.012.000 | |
| <i>Production Level</i> | Bpd | 25.000 | |
| <i>General Arrangement</i> | FSO | <i>Ladinda</i> | terlampir |

(sumber : PT. Energi Mega Persada, 2014)

3.2.2 Data Lingkungan

Data lingkungan yang digunakan yaitu kondisi lingkungan yang paling berpengaruh di Selat Lalang, dimana lokasi FSO *Ladinda* beroperasi.

Tabel 3.2 adalah data lingkungan Perairan di Selat Lalang :

Tabel 3.2 Data Lingkungan di Selat Lalang

| Parameter | | Unit | 100 – Tahunan |
|-----------|----------------|-------|---------------|
| Gelombang | Tinggi (Hs) | m | 1.98 |
| | Periode (Ts) | s | 5 |
| Angin | Kecepatan (Vw) | knots | 22 |
| | Waktu Durasi | hrs | 1 |
| Arus | Kecepatan (Vc) | m/s | 2.41 |

(sumber : PT. Energi Mega Persada, 2014)

Kedalaman Selat Lalang, Malaka Strait adalah 25 m. (id.wikipedia.org/wiki/selat-malaka, 2015).

3.2.3 Konstruksi *Bollard*

Berikut ini adalah data Konstruksi *bollard* di FSO *Ladinda* yang terangkum pada tabel 3.3:

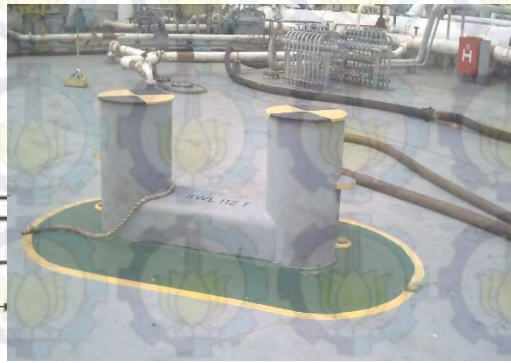
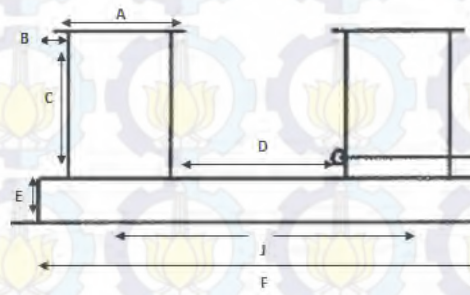
Tabel 3.3 Data Konstruksi *Bollard*

| No | Data | |
|----|----------------------------------|-----------------------|
| 1. | Jenis <i>Bollard</i> | <i>Double Bollard</i> |
| 2. | Jumlah di FSO <i>Ladinda</i> | 9 Buah |
| 3. | <i>Safety Working Load</i> (SWL) | 200 ton |
| 4. | <i>Material Baja</i> | ASTM A36 |
| 5. | <i>Yield Strength</i> | 250 MPa |

(sumber : PT. Energi Mega Persada, 2014)

Berikut ini adalah ukuran dimensi dari konstruksi *Bollard* di FSO *Ladinda*

1. A = 60 cm
2. B = 2 cm
3. C = 85 cm
4. E = 27 cm
5. F = 200 cm
8. H = 10 cm
10. J = 144 cm



Gambar 3.3 Konstruksi *Bollard*

Konstruksi *Bollard* (Gambar 3.3) terletak pada *main deck* bagian belakang dan *forecastle deck* dengan ketebalan 150 mm, pelat di *main deck* 13 mm, girder HP 220 x 12 sedangkan pelat *forecastle deck* mempunyai ketebalan 12 mm, girder T 200 x 90x 12, spacing 0.7 m (sumber : PT Energi Mega Persada, 2014).

Berikut ini adalah Tabel 3.4 yang berisi koordinat dari konstruksi *bollard* di FSO *Ladinda* dengan koordinat O (0,0,0) pada bagian tengah kapal (*midship*) (ilustrasi gambar terlampir), dimana koordinat cartesian X (horizontal memanjang), Y (vertical memanjang), dan Z (tinggi).

Tabel 3.4 Data Koordinat Konstruksi *Bollard* di FSO *Ladinda*

| Koordinat | X | Y | Z |
|-------------------|----------|---------|--------|
| <i>Bollard</i> 1A | 134 m | 8.68 m | 22.6 m |
| <i>Bollard</i> 1B | 134 m | 8.68 m | 22.6 m |
| <i>Bollard</i> 6A | -132,4 m | 13,02 m | 20.6 m |
| <i>Bollard</i> 6B | -132,4 m | 13.02 m | 20.6 m |

(sumber : PT. Energi Mega Persada, 2014)

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

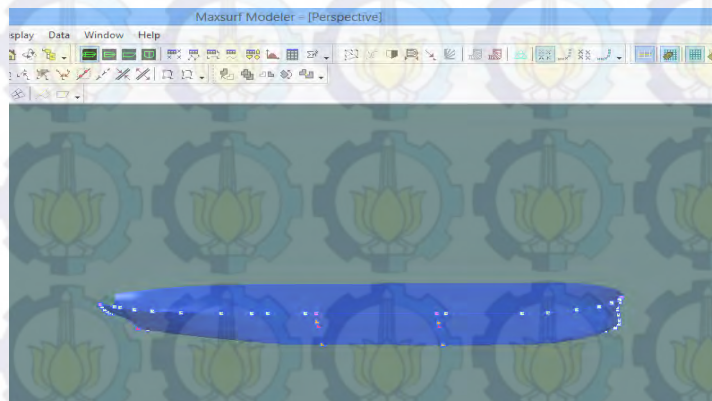
4.1 Pemodelan pada *Software* Maxsurf

Pemodelan *surface* FSO Ladinda dilakukan dengan menggunakan *software* Maxsurf. Pemodelan FSO Ladinda dilakukan untuk mendapatkan model dan data hidrostatis. Model FSO Ladinda dan data hidrostatis kemudian digunakan sebagai input untuk perhitungan RAO freefloating dan tertambat pada *software* ANSYS. Pemodelan dilakukan pada kondisi *light load* dan *full load*. Data yang digunakan sebagai input dalam pemodelan FSO Ladinda pada maxsurf yaitu tertera pada Tabel 4.1 :

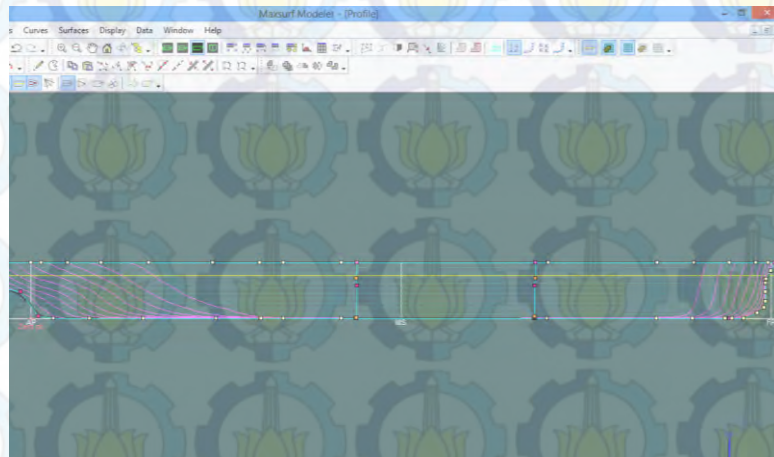
Tabel 4.1 *Principle Dimension* FSO Ladinda

| <i>Designation</i> | <i>Units</i> | <i>Maximum Operating Draft</i> | <i>Minimum Operating Draft</i> |
|--------------------|--------------|--|--|
| <i>Length, LOA</i> | m | 284 | |
| <i>Length, LBP</i> | m | 272 | |
| <i>Breadth, B</i> | m | 43.4 | |
| <i>Depth, D</i> | m | 20.6 | |
| <i>Draft, T</i> | m | 15.725 | 2.41 |
| LWL | m | 278,8 | 261.63 |

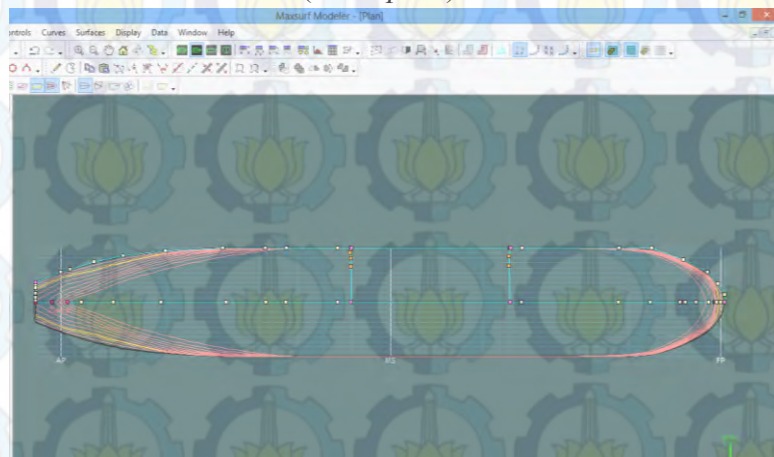
Hasil pemodelan FSO Ladinda pada Maxsurf dapat dilihat pada Gambar 4.1 sampai Gambar 4.4 :



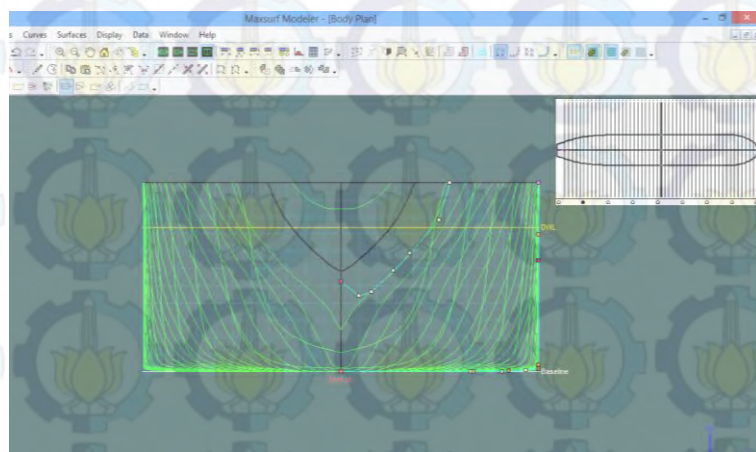
Gambar 4.1. Hasil pemodelan FSO Ladinda pada Maxsurf tampak isometri



Gambar 4.2. Hasil pemodelan FSO Ladinda pada Maxsurf tampak samping (*sheer plan*)



Gambar 4.3. Hasil pemodelan FSO Ladinda pada Maxsurf tampak atas (*half breadth plan*)



Gambar 4.4. Hasil pemodelan FSO Ladinda pada Maxsurf tampak depan (*body plan*)

4.2 Validasi Model FSO Ladinda

Validasi model FSO Ladinda perlu dilakukan agar model menyerupai bentuk sebenarnya. Koreksi yang diijinkan untuk selisih model dengan struktur aslinya adalah 5%. Validasi model dilakukan dengan membandingkan data hidrostatis model dengan data hidostatik FSO Ladinda yang sudah ada. Validasi FSO Ladinda dilakukan pada kondisi *full load* (Tabel 4.2)dan *light load* (Tabel 4.3).

Tabel 4.2 Validasi data hidrostatis FSO Ladinda *Full load*

| | Data | Maxsurf | Koreksi (%) |
|--------------------------|-----------|-----------|-------------|
| <i>Displacement</i> | 161810,00 | 161955,00 | 0,09 |
| Volume | 157863,41 | 158004,88 | 0,09 |
| <i>Draft to Baseline</i> | 15,73 | 15,73 | 0,00 |
| <i>Immersed Depth</i> | 15,73 | 15,74 | 0,04 |
| Cp | 0,84 | 0,827 | 1,55 |
| Cb | 0,83 | 0,825 | 0,60 |
| Cm | 1,00 | 1,00 | 0,20 |
| Cwp | 0,92 | 0,90 | 2,17 |
| LCB <i>from zero pt</i> | 143,83 | 141,42 | 1,68 |
| LCF <i>from zero pt</i> | 138,18 | 135,62 | 1,85 |
| KB | 7,75 | 8,12 | 4,71 |

Tabel 4.3 Validasi data hidrostatik FSO Ladinda *Light load*

| | Data | Maxsurf | Koreksi (%) |
|--------------------------|----------|----------|-------------|
| <i>Displacement</i> | 21614,00 | 22161,00 | 2,47 |
| Volume | 21086,83 | 21620,49 | 2,53 |
| <i>Draft to Baseline</i> | 2,41 | 2,41 | 0,00 |
| <i>Immersed Depth</i> | 2,41 | 2,41 | 0,00 |
| Cp | 0,84 | 0,800 | 4,76 |
| Cb | 0,83 | 0,800 | 3,61 |
| Cm | 1,00 | 0,99 | 0,90 |
| Cwp | - | 0,83 | - |
| LCB <i>from zero pt</i> | 146,11 | 146,75 | 0,44 |
| LCF <i>from zero pt</i> | 145,52 | 145,28 | 0,17 |
| KB | 1,20 | 1,24 | 3,33 |

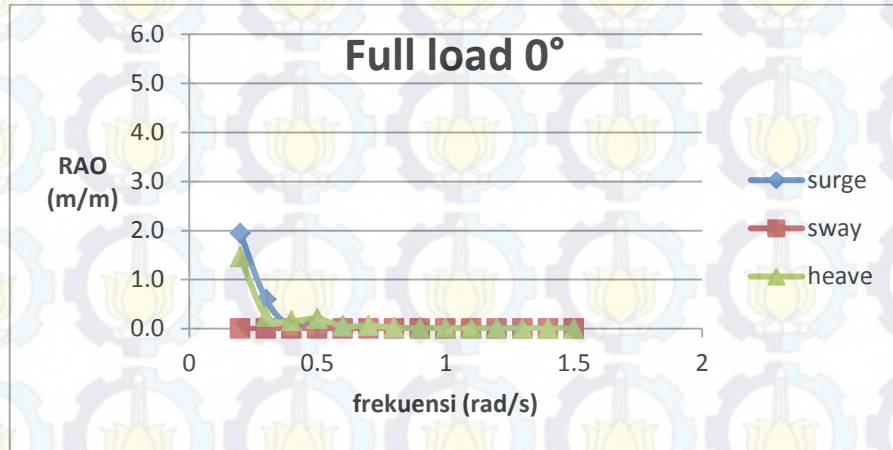
Dari validasi yang telah dilakukan pada kondisi *full load* dan *light load* terbukti tidak ada koreksi yang melebihi 5%. Hal ini menunjukkan bahwa model FSO Ladinda dapat diterima untuk analisis selanjutnya, yaitu perhitungan RAO *free floating* dan tertambat.

4.3 Analisis Gerakan Struktur Terapung Bebas pada Gelombang Reguler

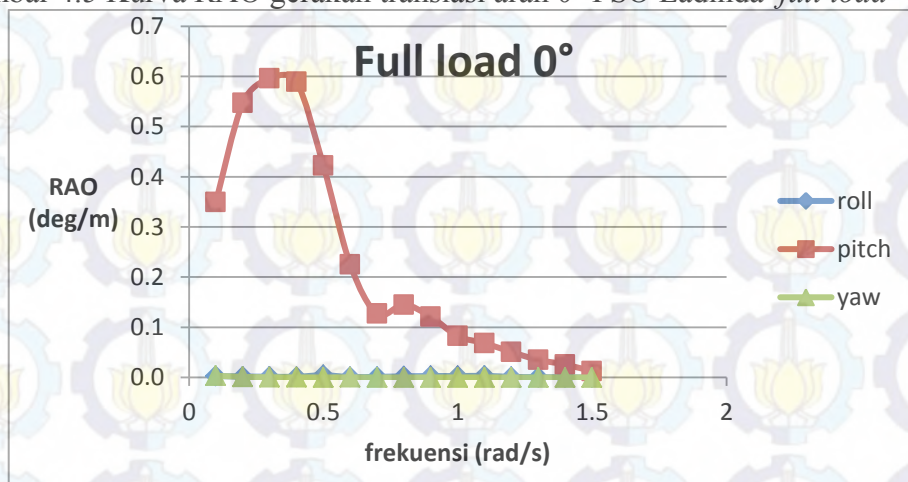
Analisis gerakan struktur dilakukan dalam kondisi terapung bebas (*free floating*) dan tertambat. Analisis gerakan struktur terapung bebas dilakukan tanpa ada pengaruh penambatan. Gerakan struktur juga dianalisis dalam kondisi *full load* dan *light load*. Amplitudo gerakan struktur dapat dilihat dari kurva RAO. Kurva RAO menunjukkan amplitudo gerakan yang terjadi per meter gelombang reguler pada frekuensi tertentu. Gerakan struktur berbeda pada tiap

arah gelombang datang (*heading*). Pada tugas akhir ini arah gelombang yang ditinjau yaitu 0° , 45° , 90° , dan 180° .

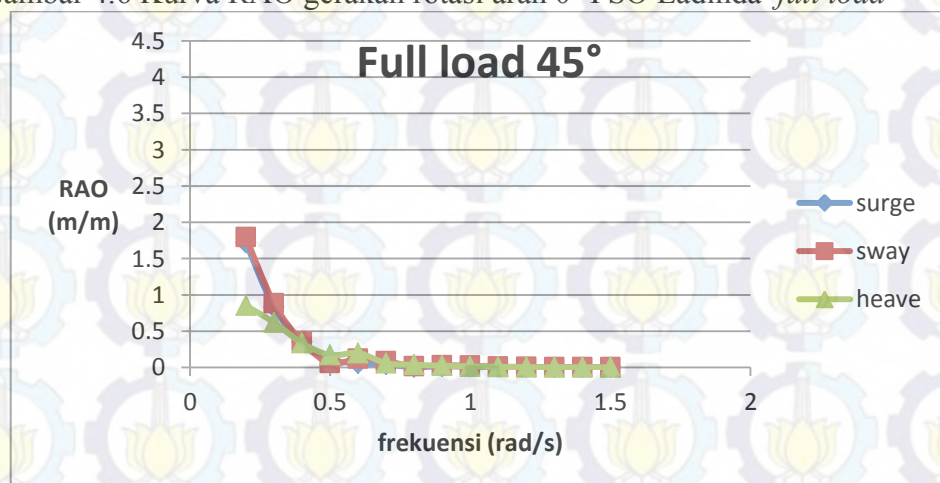
1. Kondisi *Full load*



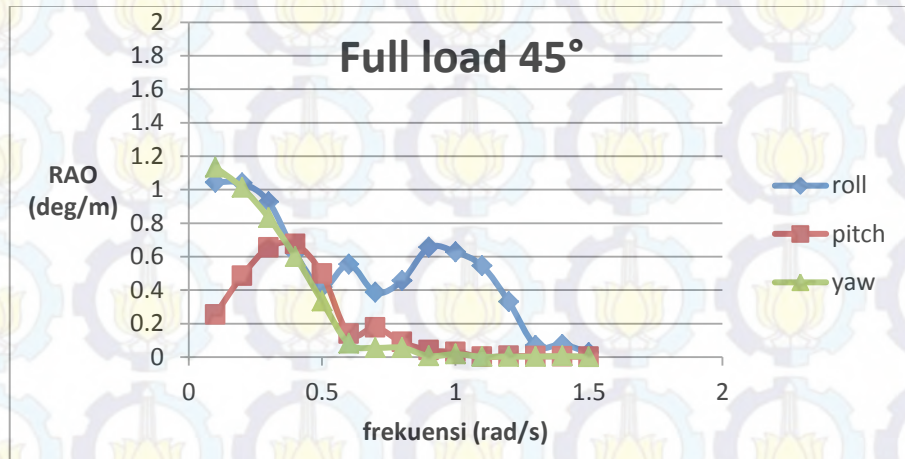
Gambar 4.5 Kurva RAO gerakan translasi arah 0° FSO Ladinda *full load*



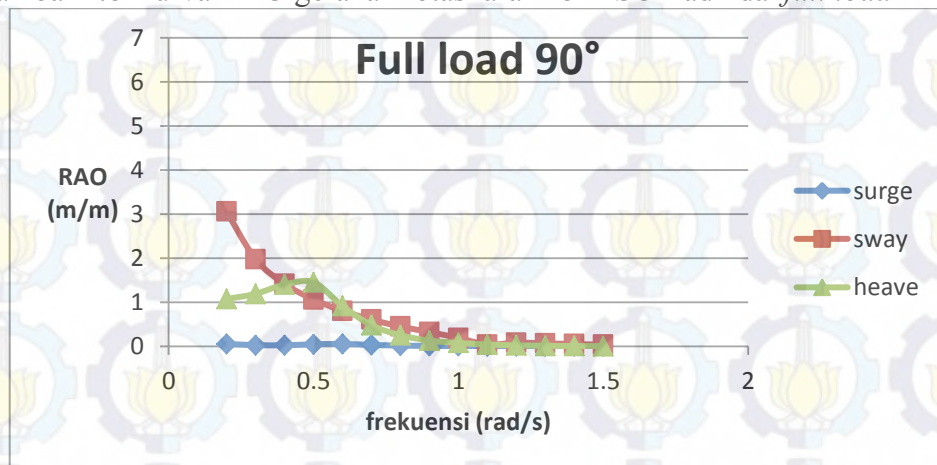
Gambar 4.6 Kurva RAO gerakan rotasi arah 0° FSO Ladinda *full load*



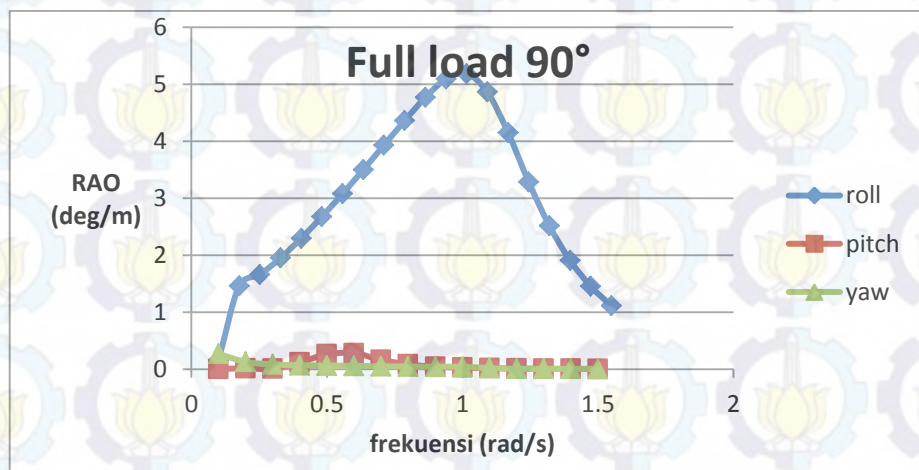
Gambar 4.7 Kurva RAO gerakan translasi arah 45° FSO Ladinda *full load*



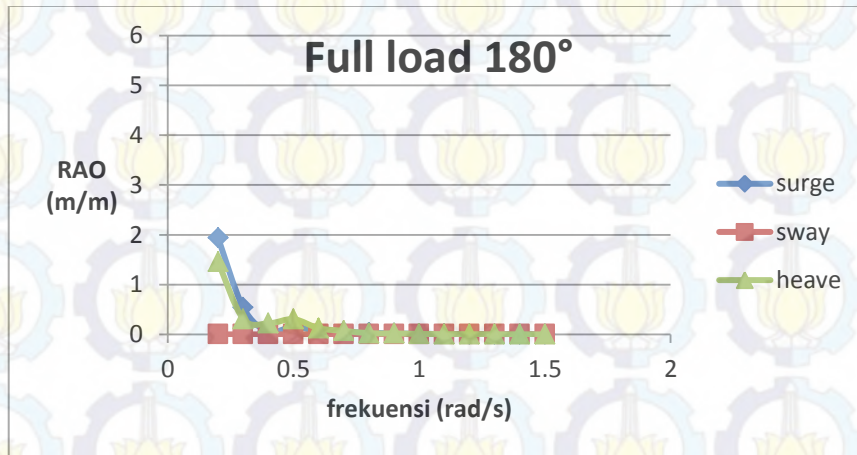
Gambar 4.8 Kurva RAO gerakan rotasi arah 45⁰ FSO Ladinda *full load*



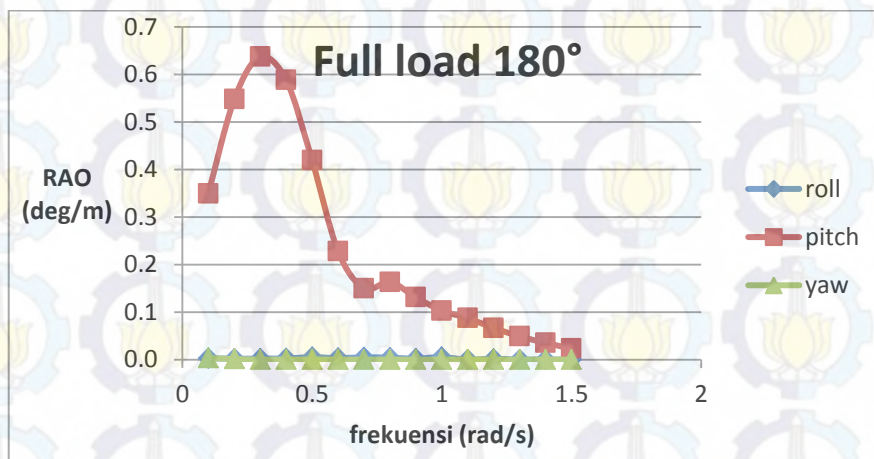
Gambar 4.9 Kurva RAO gerakan translasi arah 90⁰ FSO Ladinda *full load*



Gambar 4.10 Kurva RAO gerakan rotasi arah 90⁰ FSO Ladinda *full load*



Gambar 4.11 Kurva RAO gerakan translasi arah 180° FSO Ladinda *full load*



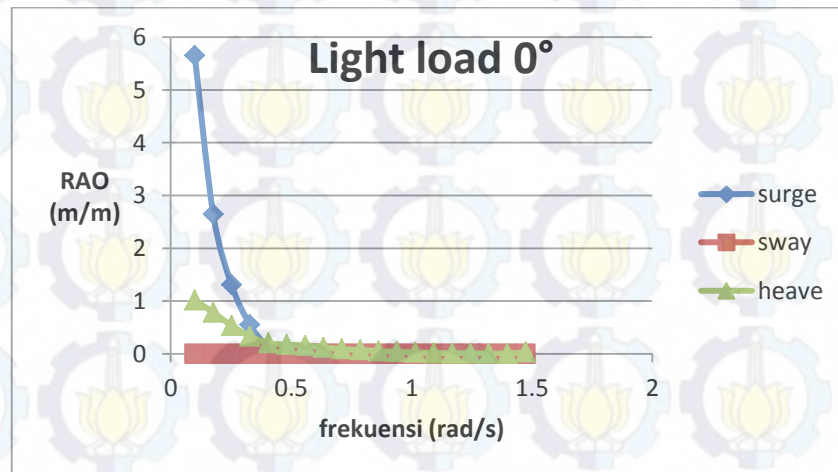
Gambar 4.12 Kurva RAO gerakan rotasi arah 180° FSO Ladinda *full load*

Tabel 4.4 Resume RAO free floating full load

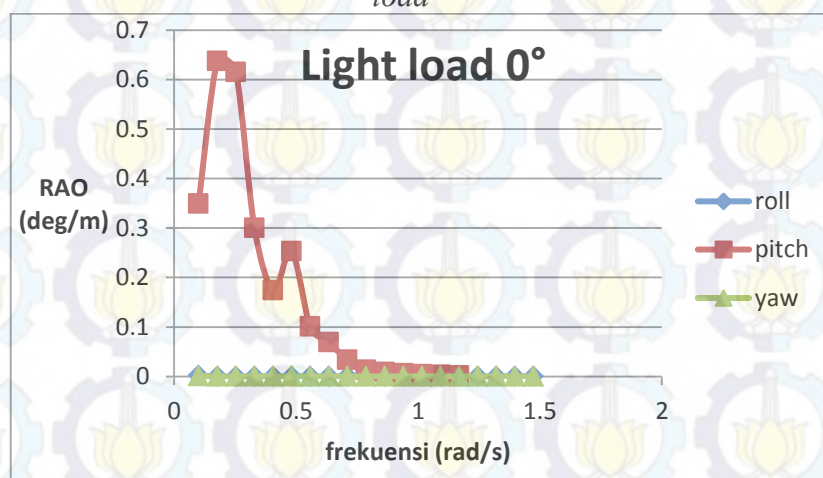
| Moda Gerakan | Unit | RAO Maksimum | | | | Max |
|--------------|-------|--------------|--------|--------|---------|-------|
| | | 0 deg | 45 deg | 90 deg | 180 deg | |
| <i>Surge</i> | m/m | 1.945 | 1.715 | 0.055 | 1.939 | 1.945 |
| <i>Sway</i> | m/m | 0.000 | 1.794 | 3.057 | 0.000 | 3.057 |
| <i>Heave</i> | m/m | 1.459 | 0.851 | 1.453 | 1.457 | 1.459 |
| <i>Roll</i> | deg/m | 0.004 | 1.043 | 5.185 | 0.005 | 5.185 |
| <i>Pitch</i> | deg/m | 0.596 | 0.637 | 0.280 | 0.673 | 0.673 |
| <i>Yaw</i> | deg/m | 0.003 | 1.133 | 0.270 | 0.003 | 1.133 |

Berdasarkan kurva pada Gambar 4.5 sampai Gambar 4.12 dan Tabel 4.4 dapat dilihat bahwa saat kondisi *full load* gerakan tertinggi struktur pada setiap arah datang gelombang berbeda-beda. Pada gerak osilasi translasional, *surge* tertinggi ialah sebesar 1.945 (m/m) yaitu pada *heading* 0° , *sway* tertinggi pada *heading* 90° sebesar 3.057 (m/m), dan *heave* tertinggi sebesar 1.459 (m/m) pada *heading* 0° . Untuk gerak osilasi rotasional *roll* maksimum pada *heading* 90° sebesar 5.185 (deg/m), *pitch* maksimum sebesar 0.673 (deg/m) pada *heading* 180° , dan *yaw* maksimum sebesar 1.133 (deg/m) pada *heading* 45° . RAO untuk semua moda gerakan terjadi pada frekuensi(ω) antara 0.2-1.5 rad/s.

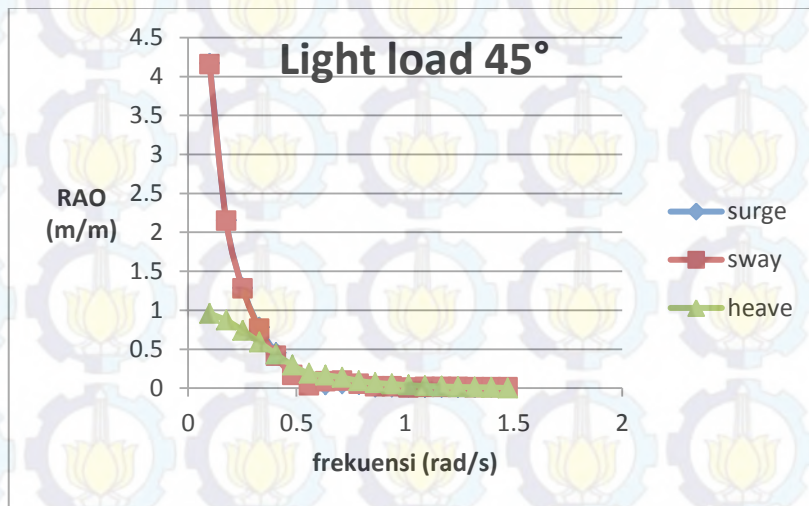
2. Kondisi *Light load*



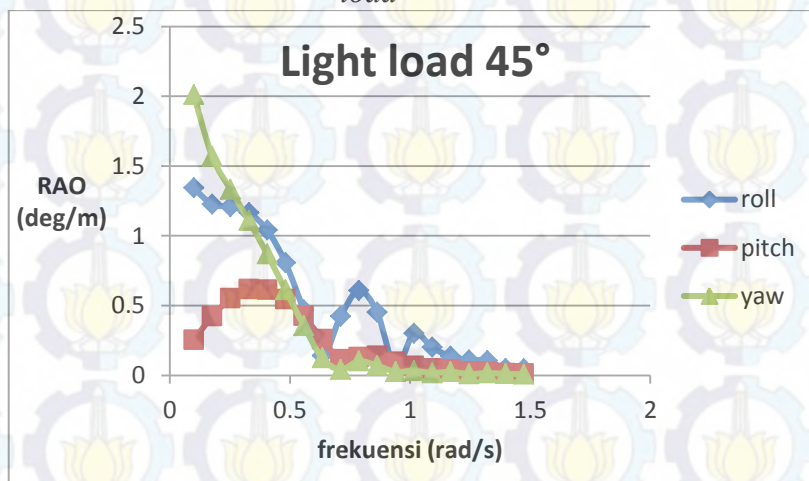
Gambar 4.13 Kurva RAO gerakan translasi FSO Ladinda arah 0° kondisi *light load*



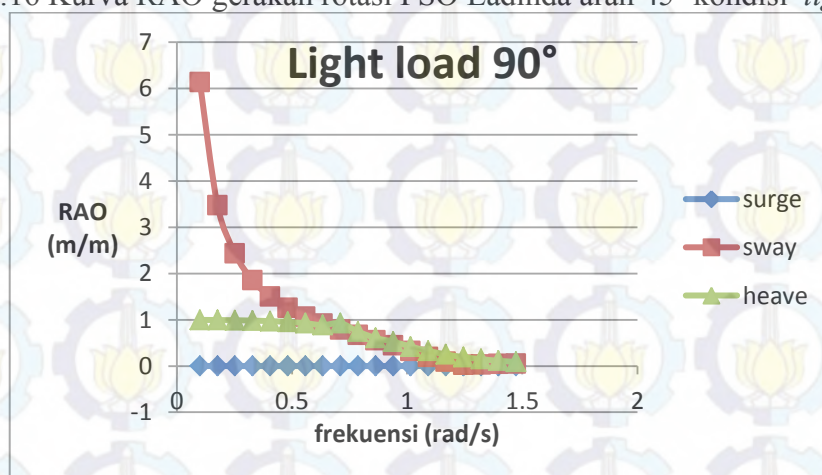
Gambar 4.14 Kurva RAO gerakan rotasi FSO Ladinda arah 0° kondisi *light load*



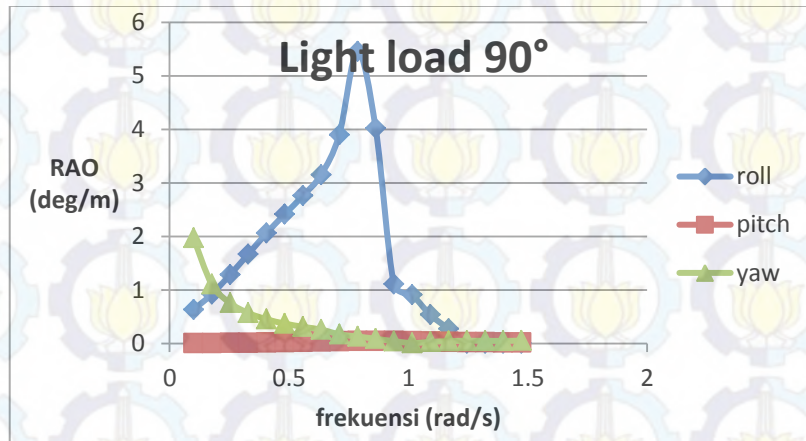
Gambar 4.15 Kurva RAO gerakan translasi FSO Ladinda arah 45⁰ kondisi *light load*



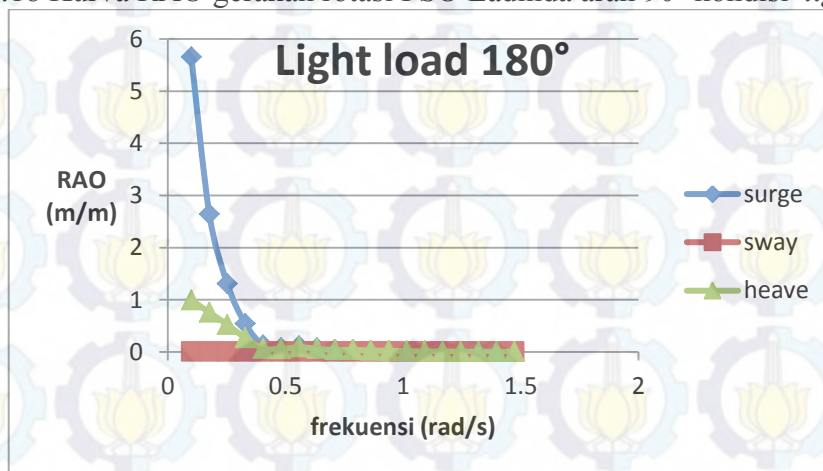
Gambar 4.16 Kurva RAO gerakan rotasi FSO Ladinda arah 45⁰ kondisi *light load*



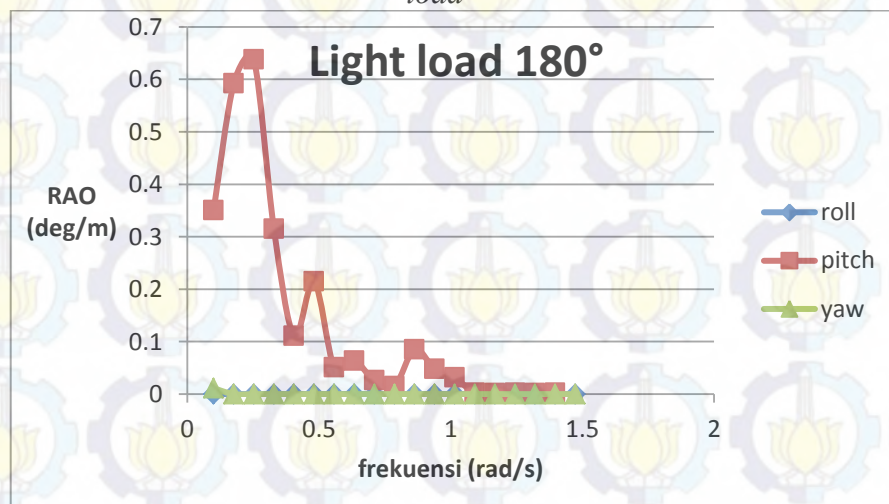
Gambar 4.17 Kurva RAO gerakan translasi FSO Ladinda arah 90⁰ kondisi *light load*



Gambar 4.18 Kurva RAO gerakan rotasi FSO Ladinda arah 90⁰ kondisi *light load*



Gambar 4.19 Kurva RAO gerakan translasi FSO Ladinda arah 180⁰ kondisi *light load*



Gambar 4.20 Kurva RAO gerakan translasi FSO Ladinda arah 180⁰ kondisi *light load*

Tabel 4.5 Resume RAO free floating light load

| Moda Gerakan | Unit | RAO Maksimum | | | | Max |
|--------------|-------|--------------|--------|--------|---------|-------|
| | | 0 deg | 45 deg | 90 deg | 180 deg | |
| <i>Surge</i> | m/m | 5.650 | 4.167 | 0.001 | 5.651 | 5.651 |
| <i>Sway</i> | m/m | 0.000 | 4.156 | 6.130 | 0.000 | 6.130 |
| <i>Heave</i> | m/m | 1.020 | 0.958 | 0.997 | 0.992 | 1.020 |
| <i>Roll</i> | deg/m | 0.002 | 1.342 | 5.452 | 0.000 | 5.452 |
| <i>Pitch</i> | deg/m | 0.637 | 0.616 | 0.043 | 0.638 | 0.638 |
| <i>Yaw</i> | deg/m | 0.001 | 2.011 | 1.971 | 0.011 | 2.011 |

Berdasarkan kurva pada Gambar 4.13 sampai Gambar 4.20 dan Tabel 4.5, gerakan struktur dalam kondisi *light load* lebih besar daripada gerakan pada saat kondisi *full load*. Pada gerakan osilasi transasional, RAO *surge* tertinggi terjadi pada arah gelombang 0° yaitu 5.651m/m. Untuk gerakan *sway* tertinggi yaitu 6.130 m/m terjadi saat *heading* 90° , sedangkan RAO *heave* tertinggi sebesar 1.020 juga terjadi pada *heading* 0° . Untuk gerakan osilasi rotasional RAO *roll* tertinggi yaitu 6.130 pada arah pembebanan 90° . RAO moda gerakan *pitch* terbesar terdapat pada *heading* 180° yaitu 0.638 deg/m. Untuk gerakan *yaw* RAO terbesar adalah 2.011 deg/m pada *heading* 45° . Sama halnya dengan kondisi *full load*, RAO untuk semua moda gerakan terjadi pada frekuensi(ω) antara 0.2-1.5 rad/s.

4.4 Dimensi Rantai jangkar

Perhitungan dimensi rantai jangkar pada FSO Ladinda dilakukan berdasarkan *rules* yang dipakai, yaitu ABS. Langkah awal yang dilakukan dalam perhitungan dimensi rantai jangkar adalah menghitung besar *equipment number*. Berdasarkan persamaan yang terdapat pada ABS, didapatkan *equipment number* sebesar 5190.52. Setelah mendapatkan angka tersebut dapat dilihat dimensi dan jumlah rantai jangkar yang sesuai pada *equipment table* dan tabel uji material pada (ABS, 2010) sehingga didapatkan data seperti Tabel 4.6 :

Tabel 4.6 Data Rantai jangkar

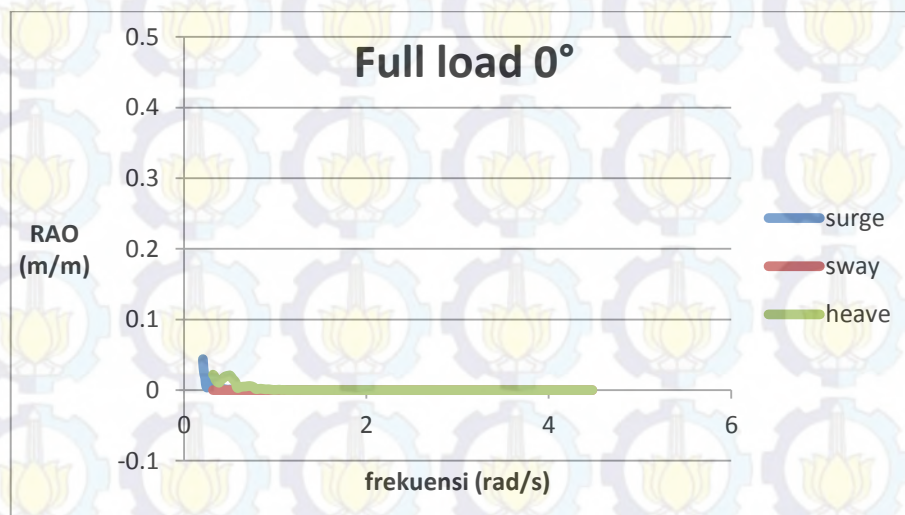
| | |
|-----------|--|
| Properti | |
| Diameter | 111 mm |
| Tipe | <i>Studlink Chain Cables (steel grade 2 ABS)</i> |
| Panjang | 742,5 m |
| MBL | 5942800 kN |
| Stiffness | 1063000 kN |

(Sumber : *ABS Anchoring, Mooring, and Towing Equipment* dan *ABS Rules for Testing and Certification of Materials*)

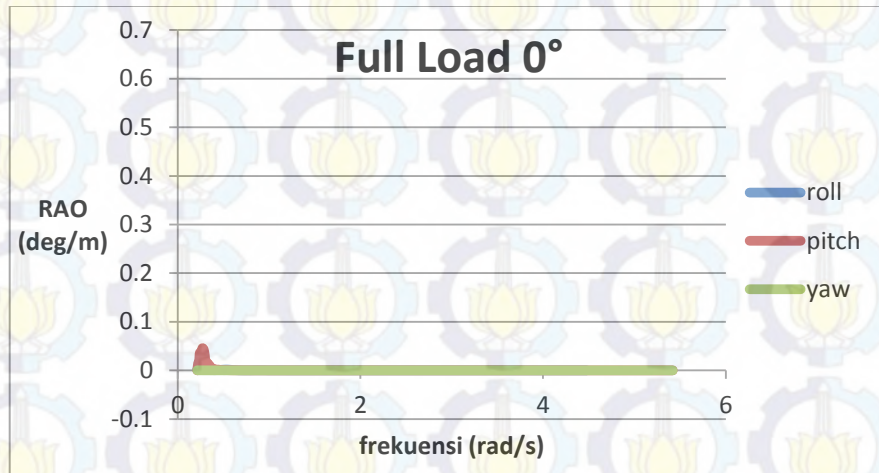
4.5 Analisis Gerakan Struktur Tertambat pada Gelombang Reguler

Struktur yang telah ditambat oleh rantai jangkar sesuai dengan dimensi diatas mengakibatkan respon gerak yang berbeda dari kondisi terapung bebas. Hal ini dikarenakan rantai jangkar mampu meredam gerakan struktur saat terapung bebas, sehingga RAO yang dihasilkan menjadi sangat kecil jika dibandingkan dengan RAO saat terapung bebas. Berikut ini adalah hasil dari RAO FSO Ladinda saat kondisi tertambat :

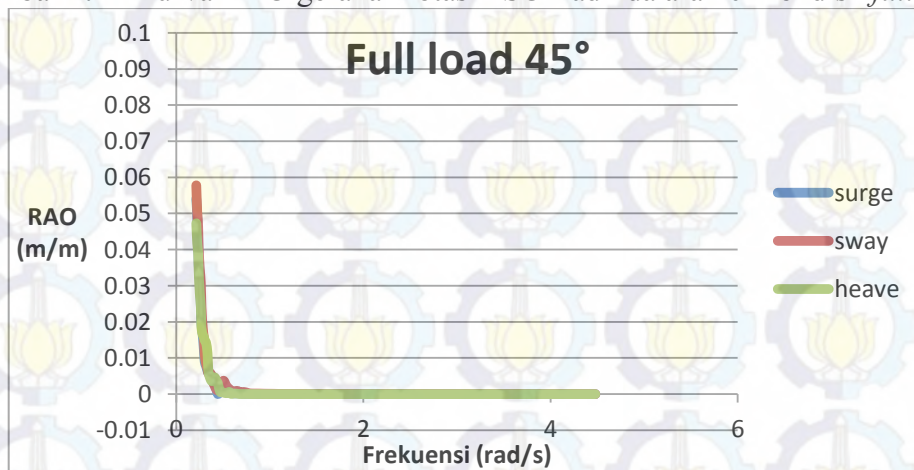
1. Kondisi *Full load*



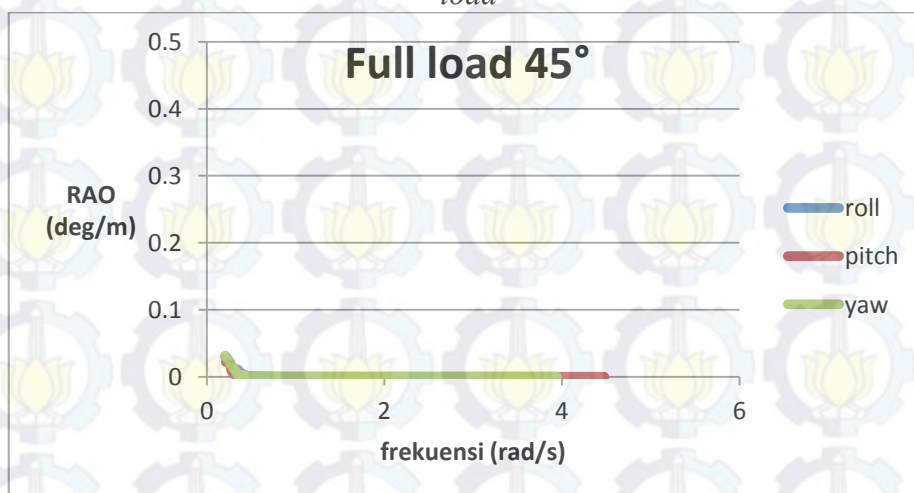
Gambar 4.21 Kurva RAO gerakan translasi FSO Ladinda arah 0^0 kondisi *full load*



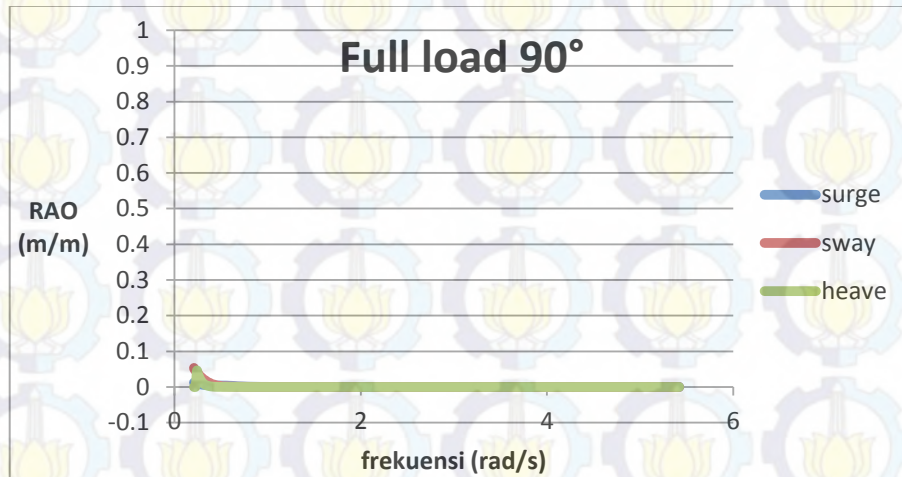
Gambar 4.22 Kurva RAO gerakan rotasi FSO Ladinda arah 0^0 kondisi *full load*



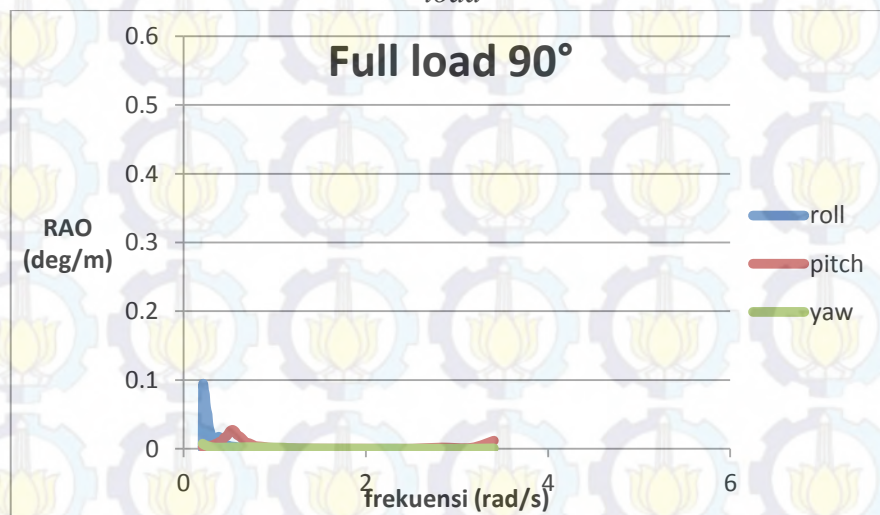
Gambar 4.23 Kurva RAO gerakan translasi FSO Ladinda arah 45^0 kondisi *full load*



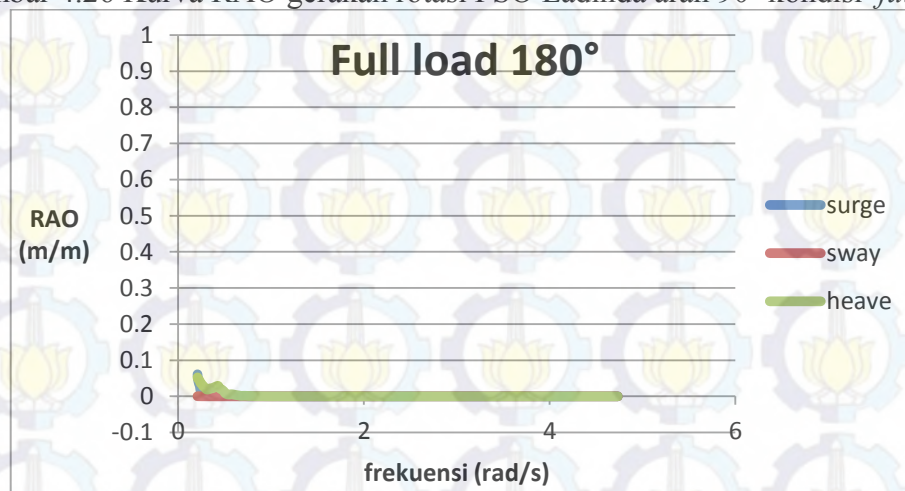
Gambar 4.24 Kurva RAO gerakan rotasi FSO Ladinda arah 45^0 kondisi *full load*



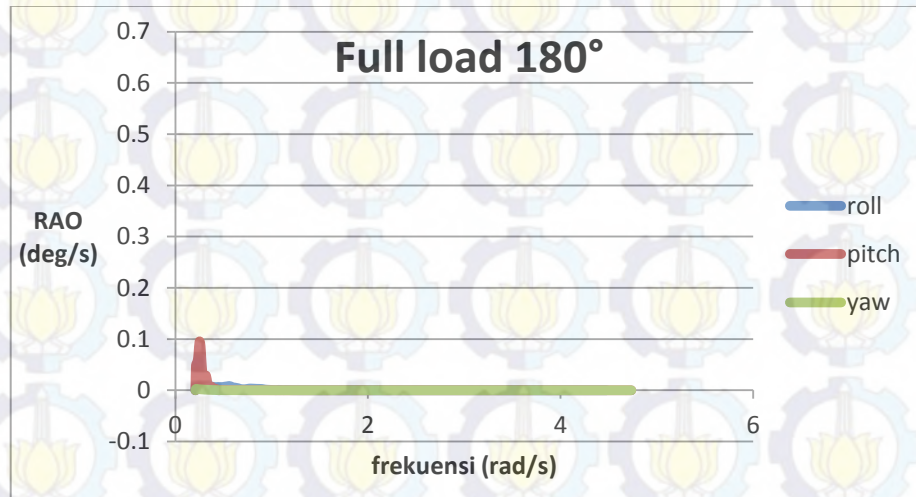
Gambar 4.25 Kurva RAO gerakan translasi FSO Ladinda arah 90⁰ kondisi *full load*



Gambar 4.26 Kurva RAO gerakan rotasi FSO Ladinda arah 90⁰ kondisi *full load*



Gambar 4.27 Kurva RAO gerakan translasi FSO Ladinda arah 180⁰ kondisi *full load*



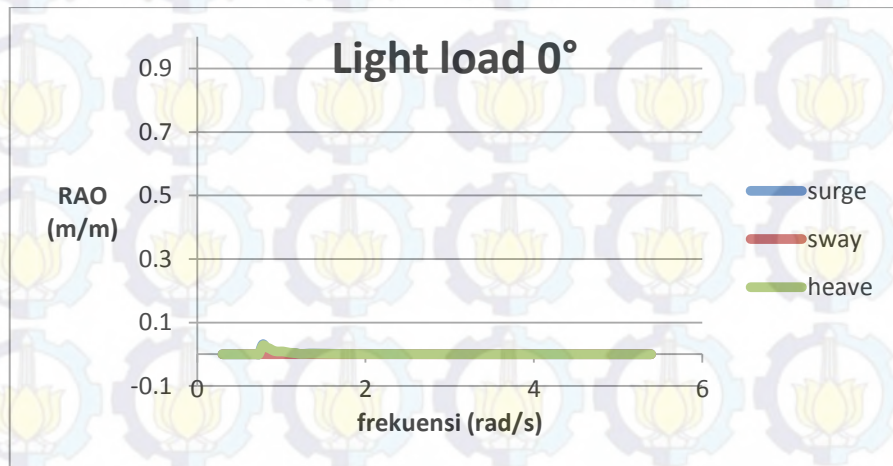
Gambar 4.28 Kurva RAO gerakan rotasi FSO Ladinda arah 180^0 kondisi *full load*

Tabel 4.7 Resume RAO tertambat *full load*

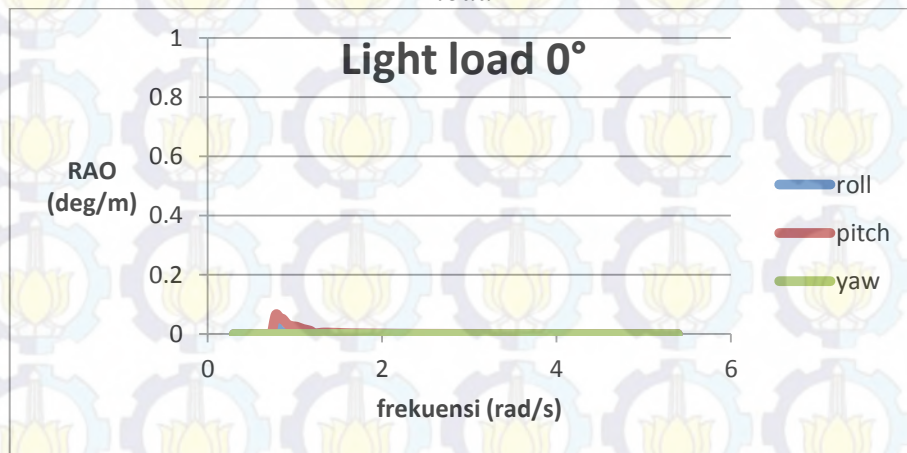
| Moda Gerakan | Unit | RAO Maksimum | | | | Max |
|--------------|-------|--------------|--------|--------|---------|-------|
| | | 0 deg | 45 deg | 90 deg | 180 deg | |
| <i>Surge</i> | m/m | 0.051 | 0.054 | 0.013 | 0.061 | 0.061 |
| <i>Sway</i> | m/m | 0.000 | 0.053 | 0.058 | 0.000 | 0.058 |
| <i>Heave</i> | m/m | 0.022 | 0.047 | 0.046 | 0.052 | 0.052 |
| <i>Roll</i> | deg/m | 0.002 | 0.030 | 0.093 | 0.001 | 0.093 |
| <i>Pitch</i> | deg/m | 0.046 | 0.024 | 0.027 | 0.095 | 0.095 |
| <i>Yaw</i> | deg/m | 0.000 | 0.031 | 0.007 | 0.003 | 0.031 |

Dilihat dari kurva pada Gambar 4.21 sampai Gambar 4.28 dan Tabel 4.7, RAO tertambat yang dihasilkan pada kondisi *full load* sangat lebih kecil dibandingkan dengan RAO pada kondisi *free floating*. Hal ini menunjukkan bahwa konfigurasi rantai jangkar dengan ukuran tersebut diatas telah mampu meredam gerakan struktur FSO. Gerakan translasional terbesar yang terjadi adalah *surge* yaitu 0,061 m/m pada *heading* pembebanan 180^0 . Untuk gerakan rotasional terbesar adalah *pitch* yaitu 0,095 deg/m yang juga terjadi pada *heading* pembebanan 180^0 . Sama halnya dengan kondisi *free floating*, *roll* terbesar terjadi pada *heading* 90^0 yaitu 0.093 deg/m. Untuk gerakan *yaw* terbesar juga masih sama dengan kondisi *free floating*, yaitu pada kondisi pembebanan 45^0 , 0.031 deg/m.

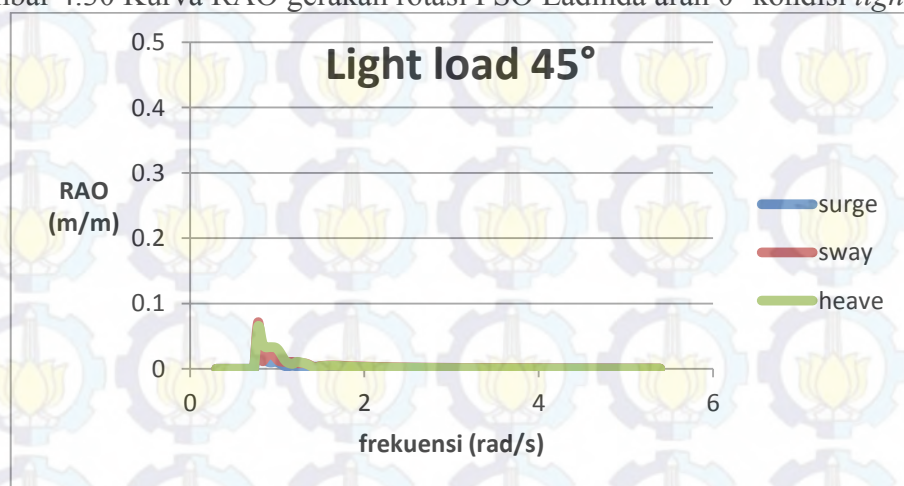
2. Kondisi *Light load*



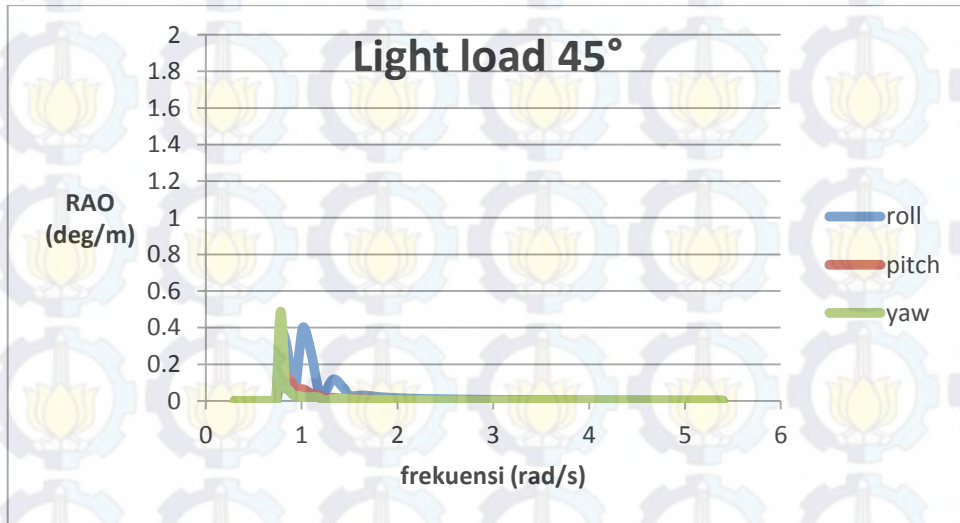
Gambar 4.29 Kurva RAO gerakan translasi FSO Ladinda arah 0^0 kondisi *light load*



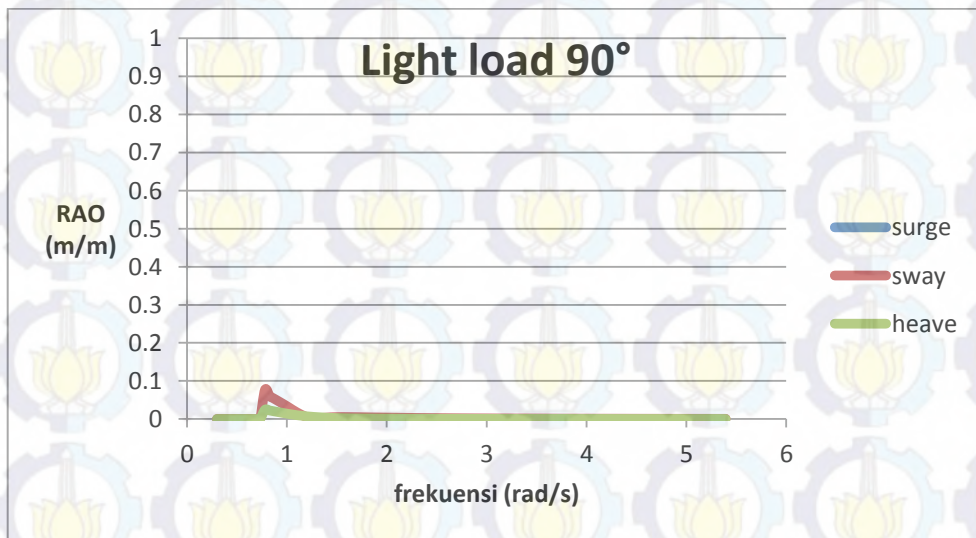
Gambar 4.30 Kurva RAO gerakan rotasi FSO Ladinda arah 0^0 kondisi *light load*



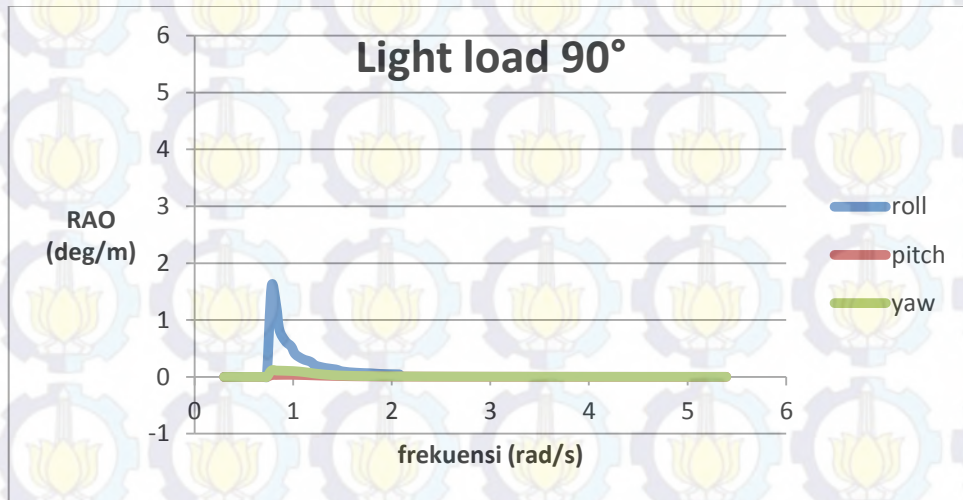
Gambar 4.31 Kurva RAO gerakan translasi FSO Ladinda arah 45^0 kondisi *light load*



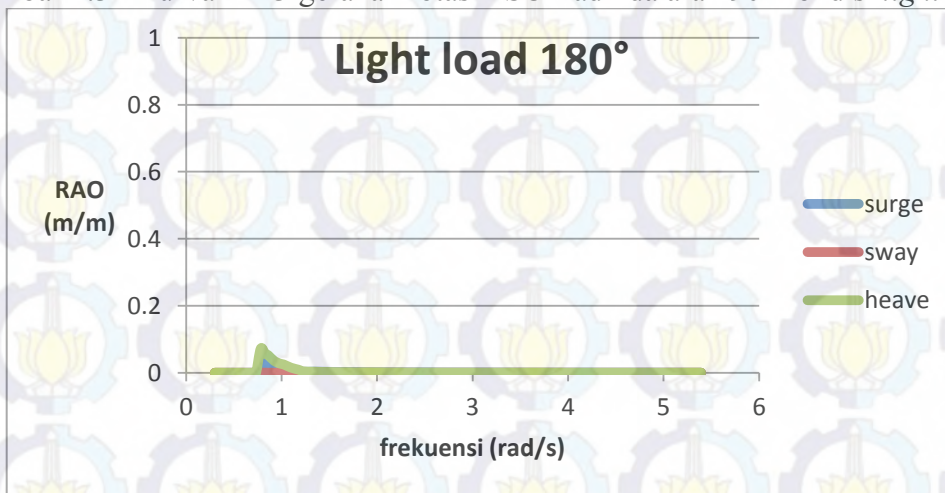
Gambar 4.32 Kurva RAO gerakan rotasi FSO Ladinda arah 45⁰ kondisi *light load*



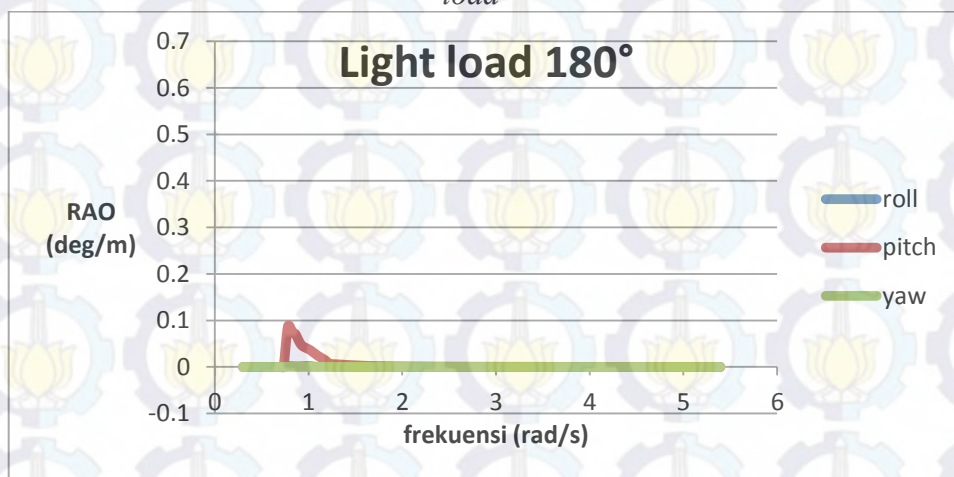
Gambar 4.33 Kurva RAO gerakan translasi FSO Ladinda arah 90⁰ kondisi *light load*



Gambar 4.34 Kurva RAO gerakan rotasi FSO Ladinda arah 90^0 kondisi *light load*



Gambar 4.35 Kurva RAO gerakan translasi FSO Ladinda arah 180^0 kondisi *light load*



Gambar 4.36 Kurva RAO gerakan rotasi FSO Ladinda arah 180^0 kondisi *light load*

Tabel 4.8 Resume RAO tertambat *light load*

| Moda Gerakan | Unit | RAO Maksimum | | | | Max |
|--------------|-------|--------------|--------|--------|---------|-------|
| | | 0 deg | 45 deg | 90 deg | 180 deg | |
| <i>Surge</i> | m/m | 0.032 | 0.033 | 0.001 | 0.040 | 0.040 |
| <i>Sway</i> | m/m | 0.000 | 0.071 | 0.077 | 0.000 | 0.077 |
| <i>Heave</i> | m/m | 0.028 | 0.065 | 0.024 | 0.072 | 0.072 |
| <i>Roll</i> | deg/m | 0.003 | 0.403 | 1.592 | 0.002 | 1.592 |
| <i>Pitch</i> | deg/m | 0.065 | 0.067 | 0.036 | 0.088 | 0.088 |
| <i>Yaw</i> | deg/m | 0.000 | 0.487 | 0.114 | 0.000 | 0.487 |

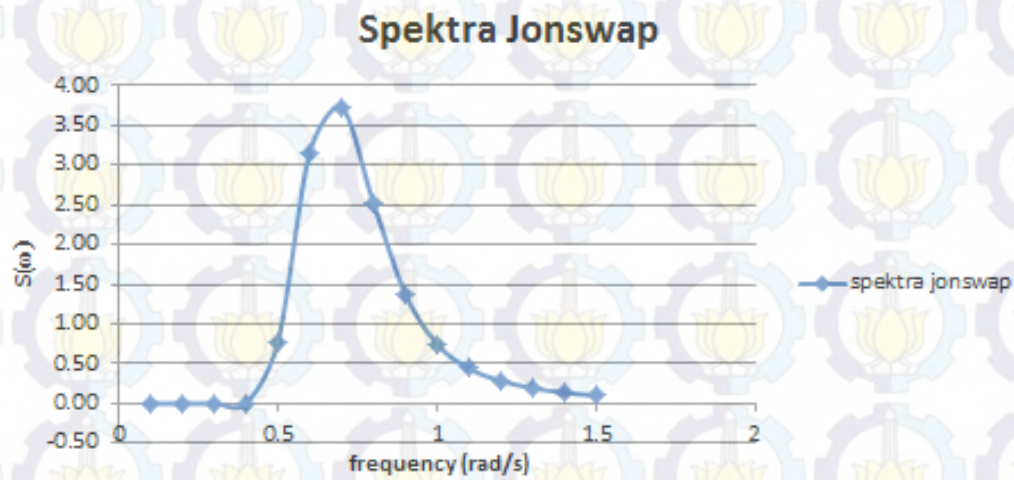
Gerakan FSO tertambat yang terjadi saat kondisi *light load* lebih besar daripada saat tertambat pada kondisi *full load*. Namun jika dibandingkan dengan kondisi *free floating light load*, gerakan FSO saat kondisi *light load* yang tertambat lebih kecil. Karakteristik gerakannya juga masih sama dengan kondisi sebelumnya. Ilustrasi gerakannya terdapat pada kurva Gambar 4.29 sampai Gambar 4.36 dan Tabel 4.8. Untuk arah *heading* 180⁰ didominasi gerakan *surge*, *heave*, dan *pitch* dengan besar *surge* 0.040 m/m, *heave* 0.072 m/m, dan *pitch* 0,088 deg/m. Untuk arah 90⁰, gerakan yang paling besar adalah *sway* dan *roll* dengan besar 0,077 m/m untuk *sway*, dan 1.592 deg/m untuk *roll*.

4.6 Analisis Gerakan Struktur pada Gelombang Acak

Analisis gerakan struktur pada gelombang acak dihitung berdasarkan spectrum gelombang yang sesuai dengan kondisi lingkungan dimana struktur tersebut beroperasi. FSO Ladinda beroperasi di daerah Selat Lalang, Malaka Strait. Perairan tersebut termasuk dalam daerah perairan tertutup, sehingga spektrum JONSWAP dapat digunakan. Pemilihan spektrum JONSWAP ini berdasarkan Chakrabarti (1987) yang menyatakan bahwa perairan tertutup dapat menggunakan spectra JONSWAP. Dari Chakrabarti juga didapatkan perhitungan untuk menentukan nilai γ yang sesuai dengan kondisi lingkungan. Data T_p untuk perairan Selat Lalang ini adalah 5s, dan H_s 1.98 m, sehingga $\frac{T_p}{\sqrt{H_s}} = 3.627$ dan mengikuti persamaan :

$$\gamma = \exp\left(5.75 - 1.15 \frac{T_p}{\sqrt{H_s}}\right) \text{ for } T_p/\sqrt{H_s} > 3.6 \dots\dots\dots(25)$$

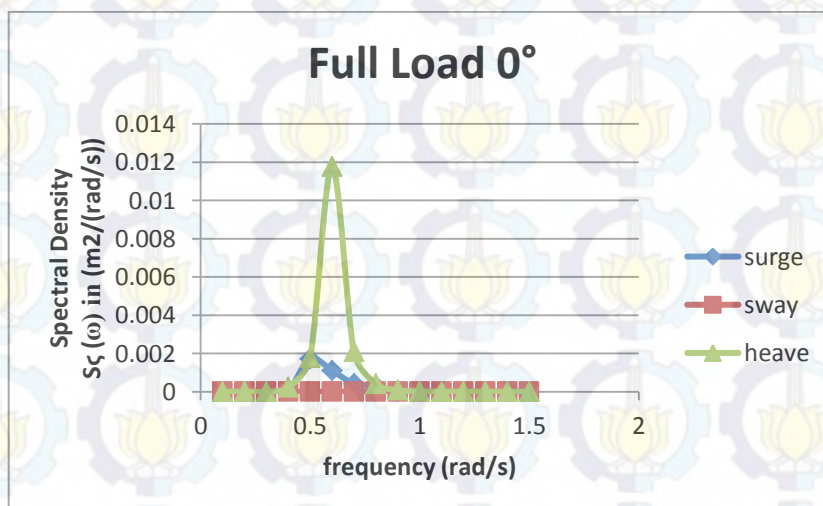
Dari perhitungan diatas didapatkan nilai γ sebesar 2.3 (Chakrabarti 1987). Berikut adalah kurva spectrum JONSWAP untuk perairan Selat Lalang (Gambar 4.37).



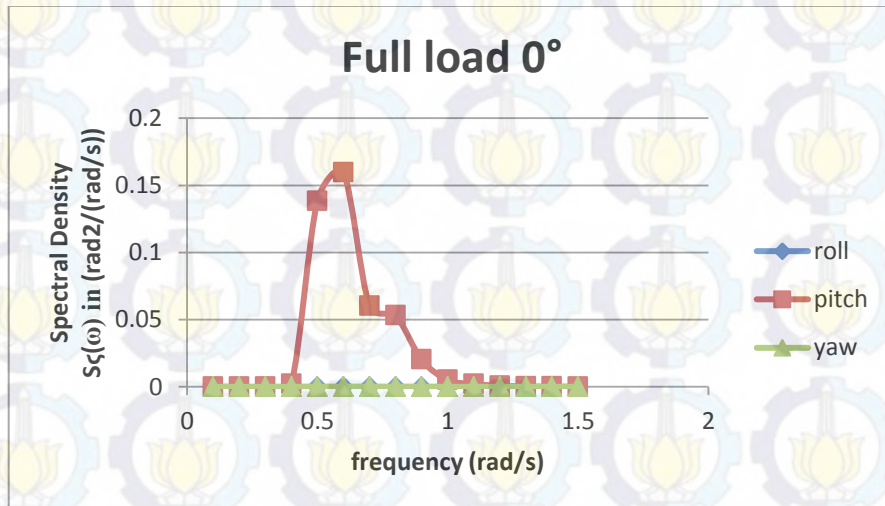
Gambar 4.37 Spektrum gelombang JONSWAP ($H_s = 1.98\text{m}$, $T_p = 5\text{s}$)

Tahap selanjutnya adalah menghitung respon struktur dari FSO Ladinda yang merupakan kerapatan energi pada struktur akibat gelombang. Spektra respon didapat dari perkalian spectra gelombang dengan RAO kuadrat. RAO yang digunakan adalah RAO saat *free floating* yang ditinjau pada kondisi fullload dan *light load* yang telah dihitung sebelumnya. Berikut adalah kurva hasil perhitungan spectra respon pada kondisi *full load* dan *light load*:

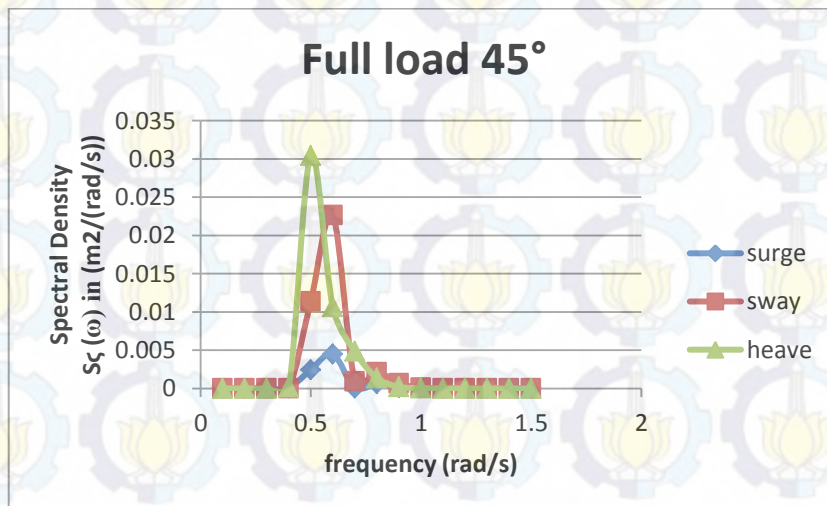
1. Spektra Respon Kondisi *Full load*



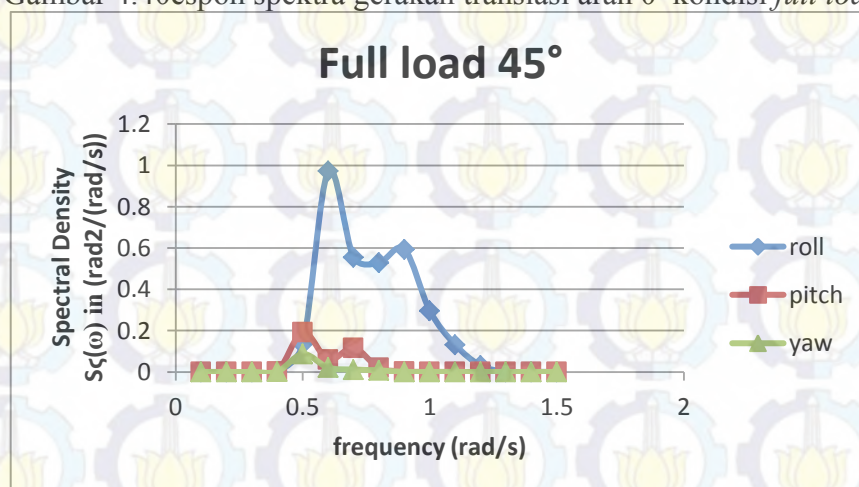
Gambar 4.38 Respon spektra gerakan translasi arah 0° kondisi *full load*



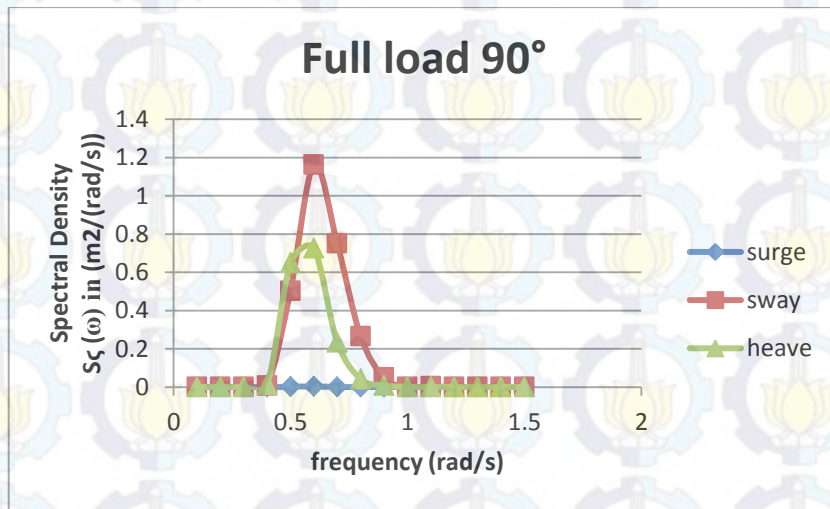
Gambar 4.39 Respon spektra gerakan rotasi arah 0° kondisi *light load*



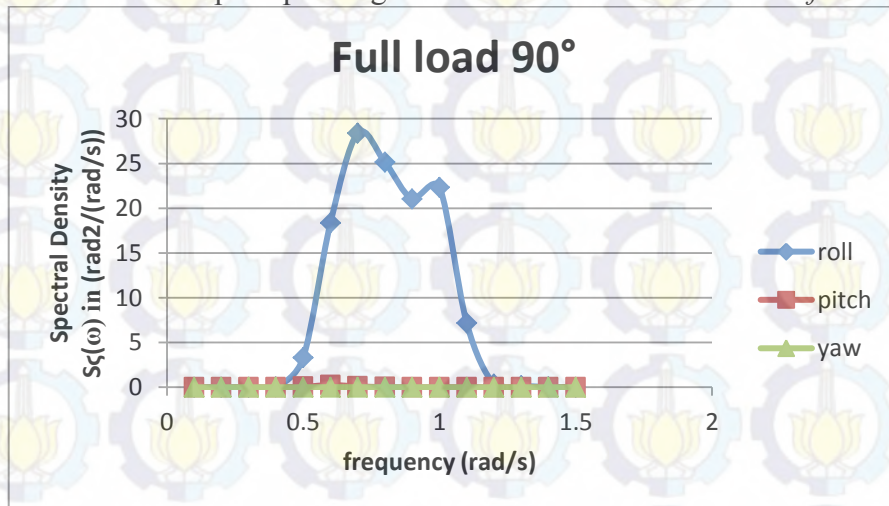
Gambar 4.40 respon spektra gerakan translasi arah 0° kondisi *full load*



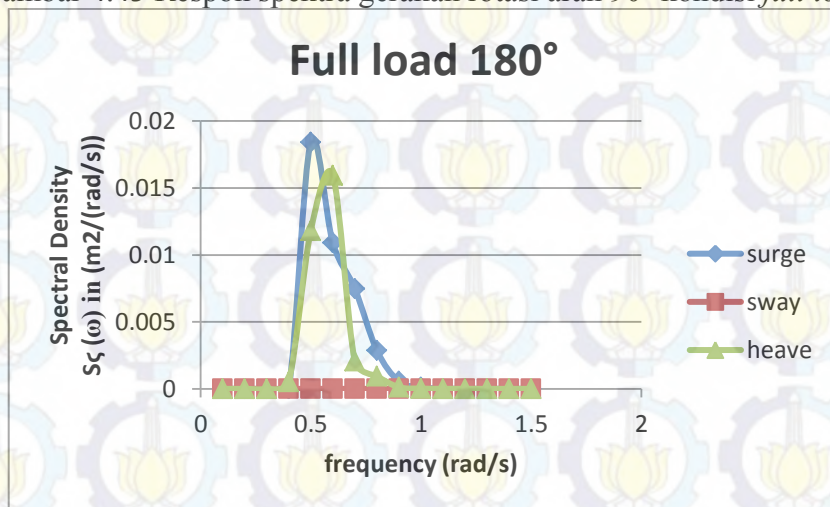
Gambar 4.41 Respon spektra gerakan rotasi arah 45° kondisi *full load*



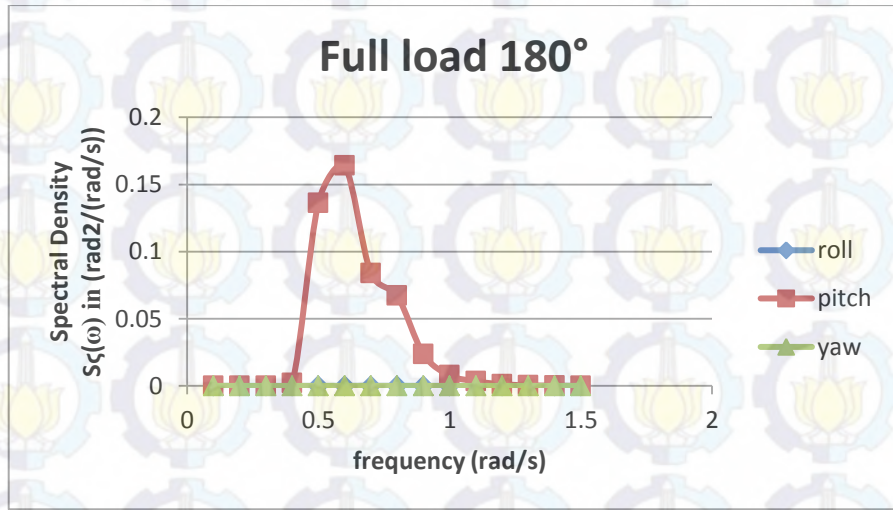
Gambar 4.42 Respon spektra gerakan translasi arah 90° kondisi *full load*



Gambar 4.43 Respon spektra gerakan rotasi arah 90° kondisi *full load*

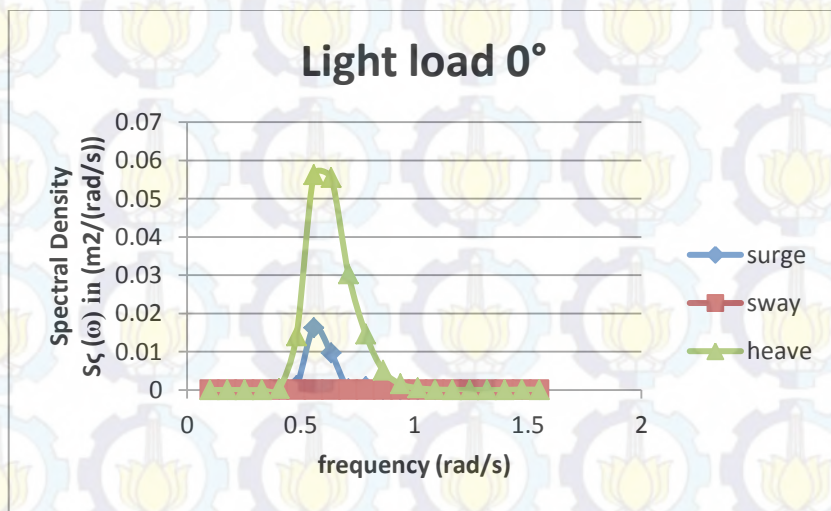


Gambar 4.44 Respon spektra gerakan translasi arah 180° kondisi *full load*

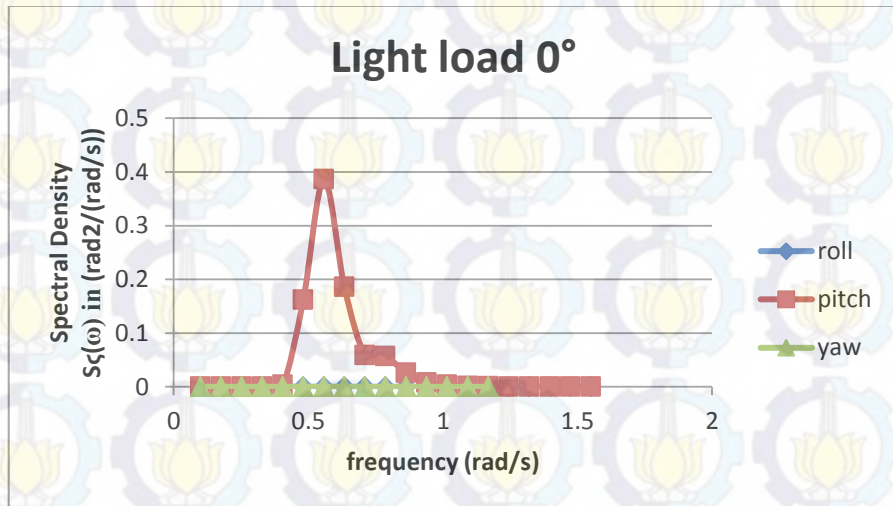


Gambar 4.45 Respon spektra gerakan rotasi arah 180° kondisi *full load*

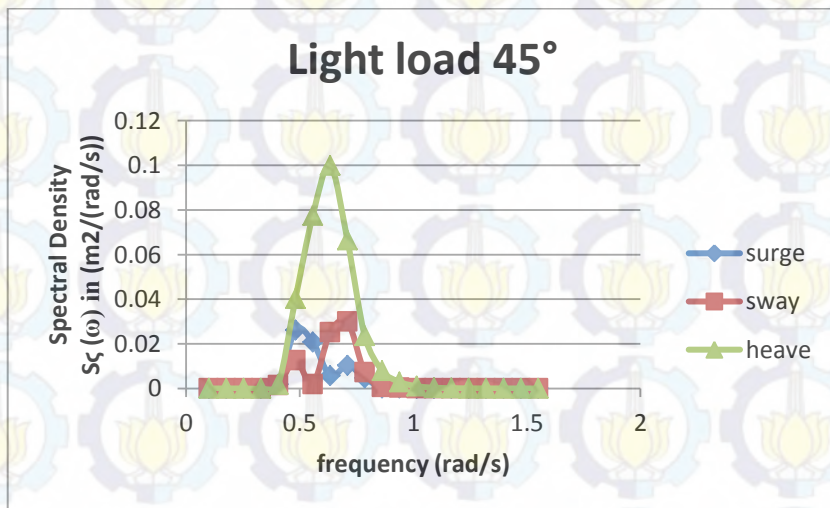
2. Kondisi *Light load*



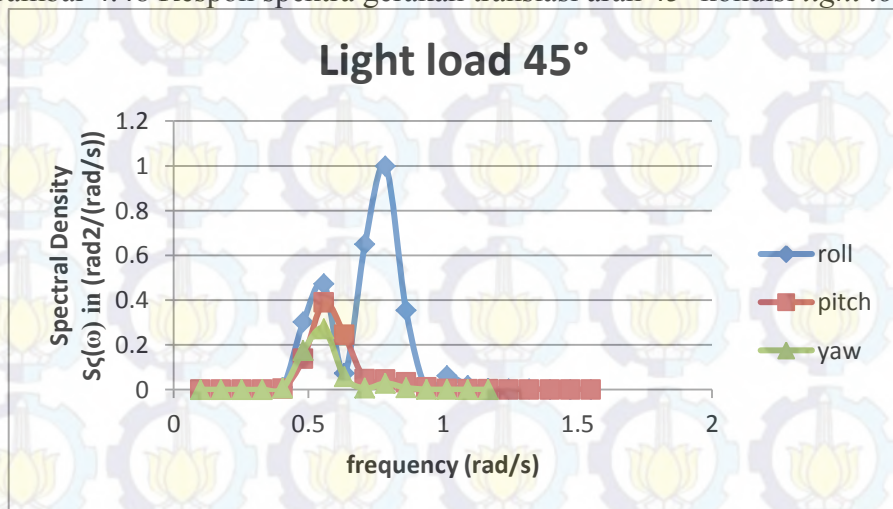
Gambar 4.46 Respon spektra gerakan translasi arah 0° kondisi *light load*



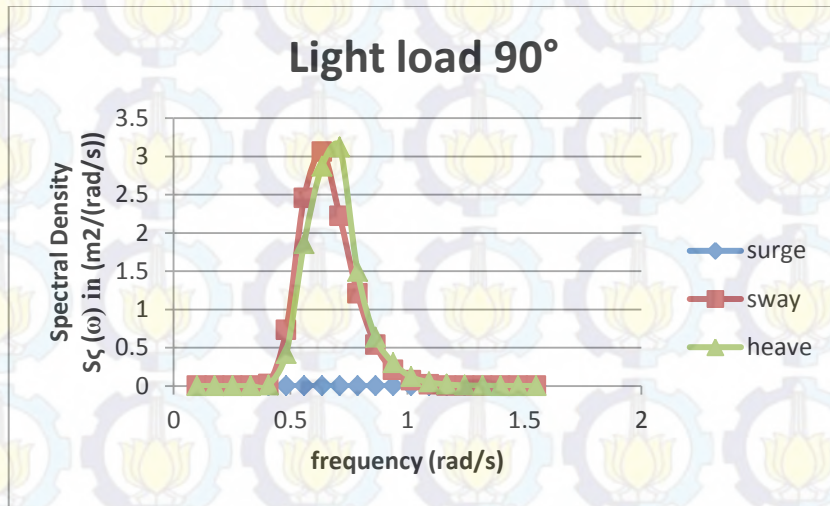
Gambar 4.47 Respon spektra gerakan rotasi arah 0° kondisi *light load*



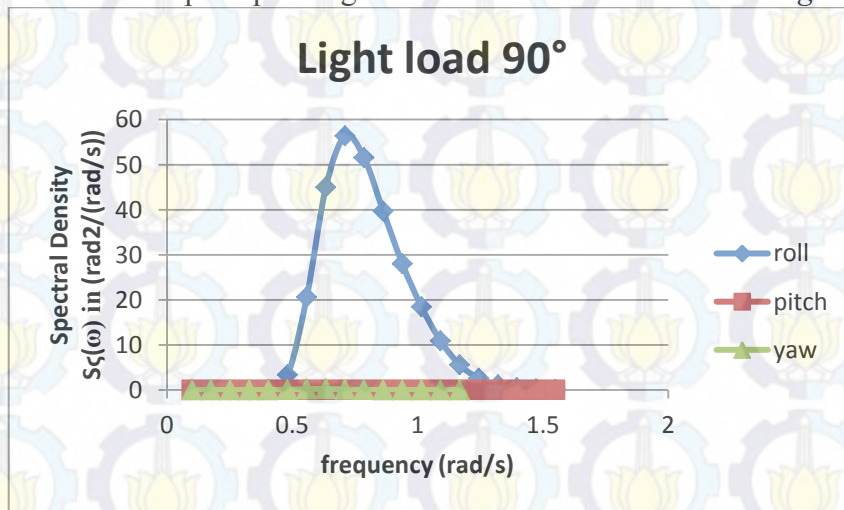
Gambar 4.48 Respon spektra gerakan translasi arah 45° kondisi *light load*



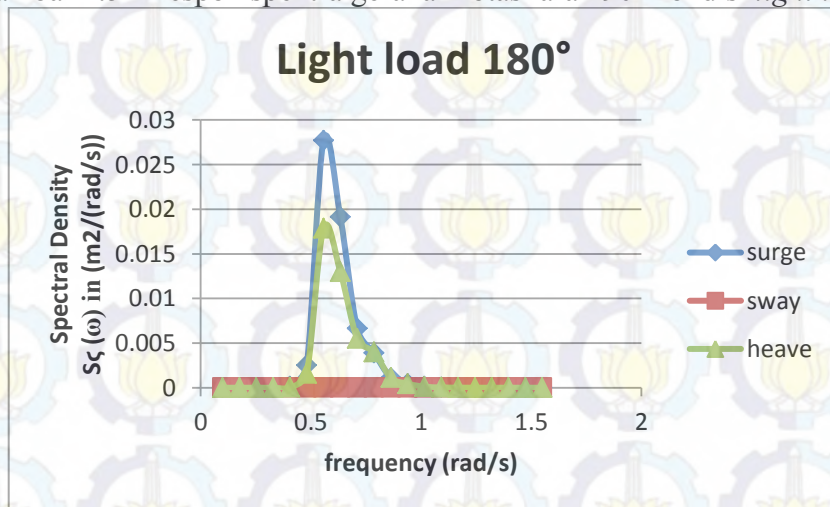
Gambar 4.49 Respon spektra gerakan rotasi arah 45° kondisi *light load*



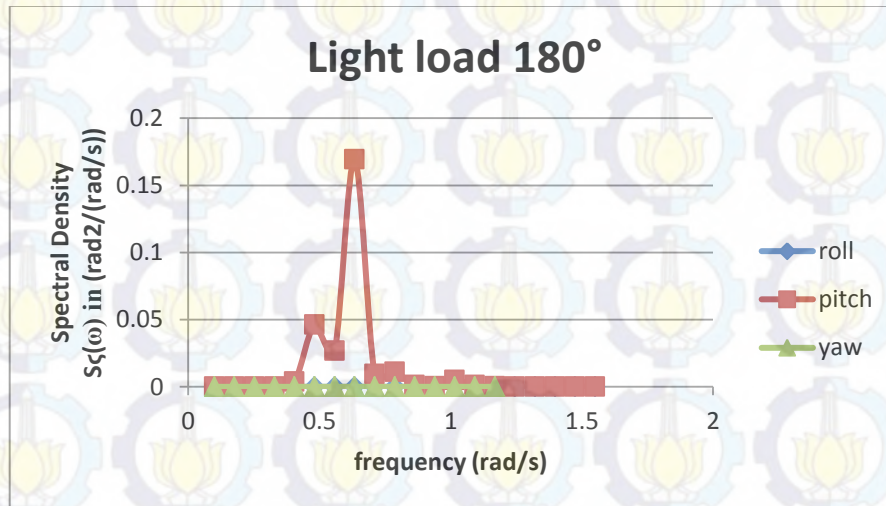
Gambar 4.50 Respon spektra gerakan translasi arah 90⁰ kondisi *light load*



Gambar 4.51 Respon spektra gerakan rotasi arah 90⁰ kondisi *light load*



Gambar 4.52 Respon spektra gerakan translasi arah 180⁰ kondisi *light load*



Gambar 4.53 Respon spektra gerakan rotasi arah 180⁰ kondisi *light load*

Tabel 4.9 Resume Respon Struktur

| Moda Gerakan | Unit | Respon Struktur Maksimum | | | | Max |
|--------------|---------------------------|------------------------------|--------|--------|---------|--------|
| | | Kondisi <i>Full load</i> | | | | |
| | | 0 deg | 45 deg | 90 deg | 180 deg | |
| <i>Surge</i> | m ² /(rad/s) | 0.002 | 0.005 | 0.003 | 0.018 | 0.018 |
| <i>Sway</i> | m ² /(rad/s) | 0.000 | 0.023 | 1.163 | 0.000 | 1.163 |
| <i>Heave</i> | m ² /(rad/s) | 0.012 | 0.030 | 0.727 | 0.016 | 0.727 |
| <i>Roll</i> | deg ² /(rad/s) | 0.000 | 0.972 | 28.370 | 0.000 | 28.370 |
| <i>Pitch</i> | deg ² /(rad/s) | 0.160 | 0.193 | 0.247 | 0.164 | 0.247 |
| <i>Yaw</i> | deg ² /(rad/s) | 0.000 | 0.087 | 0.011 | 0.000 | 0.087 |
| Moda Gerakan | Unit | Respon Struktur RAO Maksimum | | | | Max |
| | | Kondisi <i>Light load</i> | | | | |
| | | 0 deg | 45 deg | 90 deg | 180 deg | |
| <i>Surge</i> | m ² /(rad/s) | 0.016 | 0.026 | 0.000 | 0.028 | 0.028 |
| <i>Sway</i> | m ² /(rad/s) | 0.000 | 0.030 | 3.060 | 0.000 | 3.060 |
| <i>Heave</i> | m ² /(rad/s) | 0.056 | 0.100 | 3.121 | 0.018 | 3.121 |
| <i>Roll</i> | deg ² /(rad/s) | 0.000 | 0.999 | 56.338 | 0.000 | 56.338 |
| <i>Pitch</i> | deg ² /(rad/s) | 0.386 | 0.390 | 0.005 | 0.164 | 0.390 |
| <i>Yaw</i> | deg ² /(rad/s) | 0.000 | 0.272 | 0.250 | 0.000 | 0.272 |

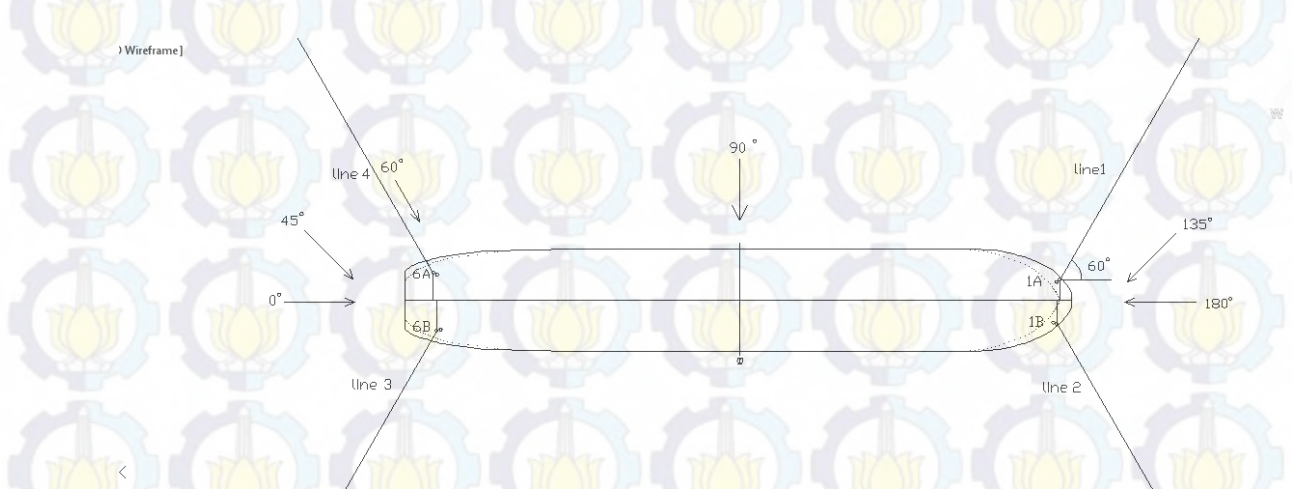
Dari kurva pada Gambar 4.38 sampai Gambar 4.53 dan Tabel 4.9, dapat dilihat bahwa respon spektra pada kondisi *light load* lebih besar daripada kondisi *full load*. Hal ini dikarenakan gerakan FSO saat kondisi *full load* lebih stabil jika dibandingkan saat kondisi kosong (*light load*), sehingga RAO pada kondisi *full load* dengan nilai yang lebih kecil menghasilkan respon struktur yang lebih kecil pula. Pada kondisi *full load*, respon struktur terbesar terjadi pada *heading* 90^0 yaitu pada gerakan *sway* dan *roll* dengan nilai respon struktur *sway* sebesar $1.163 \text{ m}^2/(\text{rad/s})$ dan nilai respon struktur *roll* sebesar $28.370 \text{ deg}^2/(\text{rad/s})$. Saat kondisi *light load* karakteristik respon struktur FSO terjadi kemiripan dengan saat kondisi *full load* untuk arah *heading* dengan respon struktur terbesar yaitu 90^0 . Respon struktur terbesar terjadi saat gerakan *roll* $S_R(\omega)_{roll} = 56.338 \text{ deg}^2/(\text{rad/s})$, kemudian terbesar kedua terjadi akibat gerakan *heave* $S_R(\omega)_{heave} = 3.121 \text{ m}^2/(\text{rad/s})$, lalu *sway* yang nilainya tidak jauh dari *heave* yaitu $S_R(\omega)_{sway} = 3.060 \text{ m}^2/(\text{rad/s})$.

4.7 Analisis Gaya Tarik Maksimum pada Rantai Jangkar

Analisis tegangan pada rantai jangkar dilakukan untuk mendapatkan nilai gaya tarik (*tension force*) maksimum pada rantai jangkar. Hasil gaya tarik maksimum tersebut digunakan sebagai input beban untuk analisis kekuatan *bollard* dimana rantai jangkar tersebut ditautkan. Beban yang dimasukkan dalam analisis ini adalah beban gelombang, beban angin, dan beban arus 100 tahunan. Analisis *tension* rantai jangkar dilakukan dengan bantuan *software* ANSYS AQWA dengan simulasi time domain analysis pada kondisi *full load* dan *light load*. Untuk menghasilkan teangan maksimum pada rantai jangkar diperlukan simulasi selama 3 jam (10800 s) sesuai anjuran dari DNV E301 (2004). Setelah didapatkan *tension* maksimum, perlu dilakukan cek safety factor . ABS menyatakan bahwa suatu mooring *line* dalam kasus ini adalah rantai jangkar dianggap memenuhi standar keamanan jika nilai :

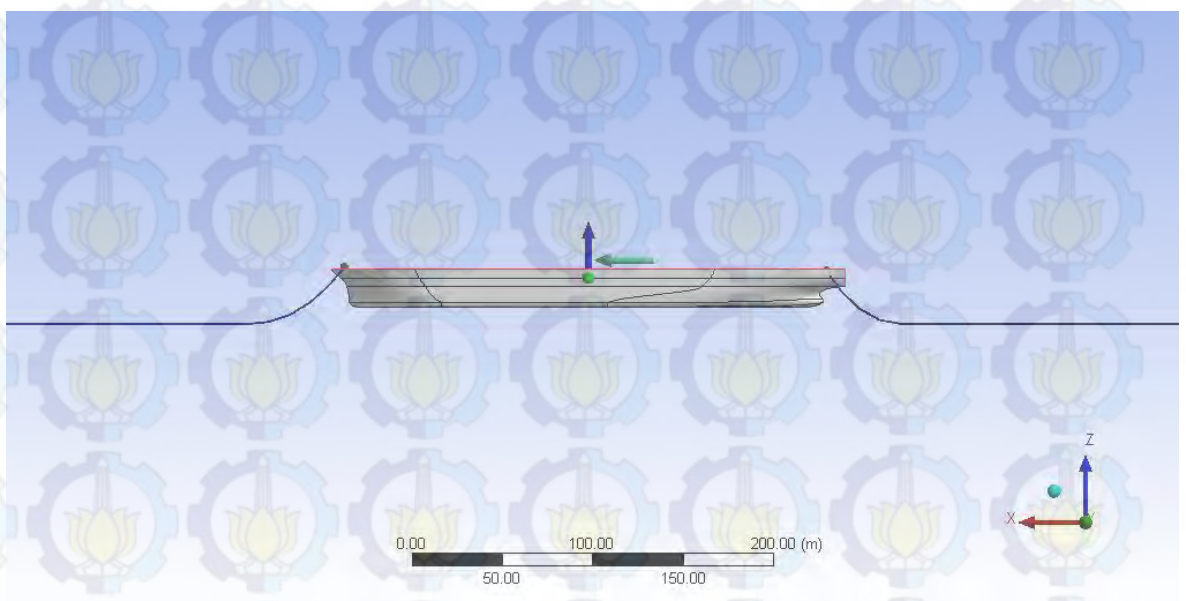
$$\frac{\text{Minimum Breaking Load}}{\text{Maximum Tension}} = 1,67 \dots \dots \dots (26)$$

Berikut adalah skema pembebanan untuk analisis tegangan pada rantai jangkar (Gambar 4.54):

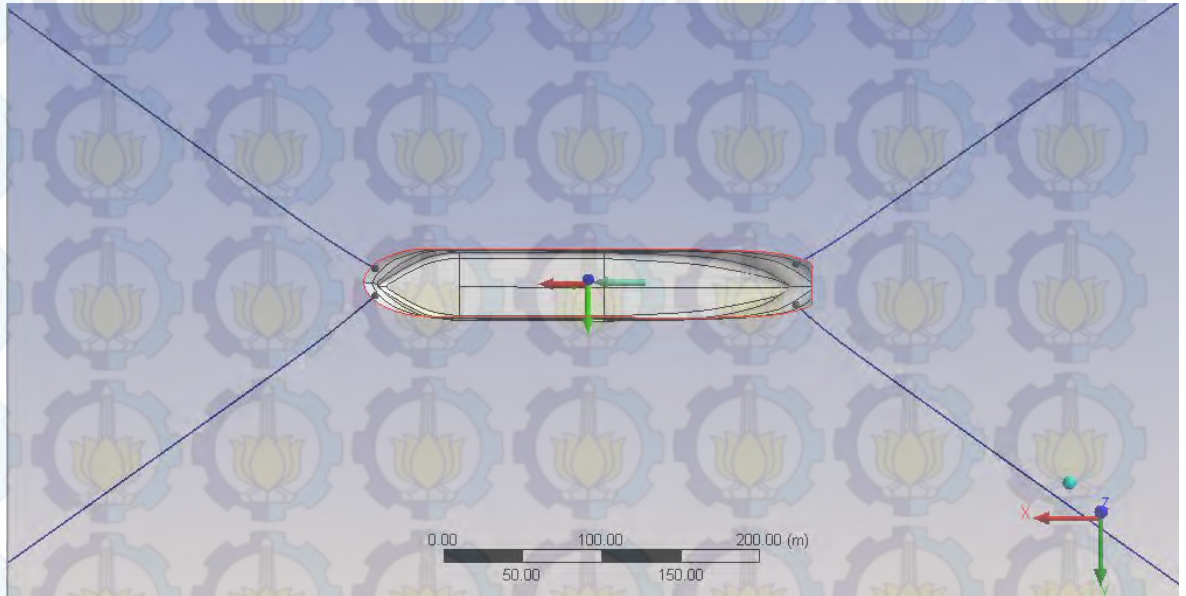


Gambar 4.54 Skema rantai jangkar dan arah pembebanan

Arah pembebanan ini dilakukan dengan mengacu pada OCIMF (*Oil Company International Forum*) 2nd edition (1997) yaitu pada *head seas*, *beam seas*, dan *quartering seas*, serta ditambah pada pembebanan dengan arah yang langsung mengenai rantai jangkar. Pada FSO Ladinda rantai jangkar di desain dengan sudut 60° dari FSO untuk masing – masing rantai jangkar, sehingga perlu ditambahkan arah pembebanan 60° dan 120°. Gambar 4.55 dan Gambar 4.56 adalah hasil pemodelan pada *software* ANSYS AQWA :



Gambar 4.55 Pemodelan FSO tertambat tampak samping



Gambar 4.56 Pemodelan FSO tertambat tampak atas

Setelah dilakukan simulasi selama 10800 detik didapatkan hasil *tension* pada rantai jangkar sebagai berikut :

Tabel 4.10 Hasil simulasi *tension force* pada heading 0°

| Rantai Jangkar | Kondisi <i>Full load</i> | | | Kondisi <i>Light load</i> | | |
|----------------|--------------------------|------|----------|---------------------------|------|----------|
| | <i>Tension</i> (N) | t(s) | SF | <i>Tension</i> (N) | t(s) | SF |
| <i>Line 1</i> | 217483 | 337 | 27.32535 | 558055.3 | 2039 | 10.64912 |
| <i>Line 2</i> | 219810 | 337 | 27.03608 | 576465.7 | 2039 | 10.30903 |
| <i>Line 3</i> | 347877 | 165 | 17.08305 | 692461.9 | 3133 | 8.582133 |
| <i>Line 4</i> | 341809 | 165 | 17.38632 | 696668.5 | 3133 | 8.530312 |

Tabel 4.11 Hasil simulasi *tension force* pada heading 45°

| Rantai Jangkar | Kondisi <i>Full load</i> | | | Kondisi <i>Light load</i> | | |
|----------------|--------------------------|------|----------|---------------------------|------|----------|
| | <i>Tension</i> (N) | t(s) | SF | <i>Tension</i> (N) | t(s) | SF |
| <i>Line 1</i> | 1531369 | 232 | 3.880711 | 1944925 | 2157 | 3.055542 |
| <i>Line 2</i> | 265708.5 | 503 | 22.36586 | 853990.3 | 367 | 6.958862 |
| <i>Line 3</i> | 311504.4 | 379 | 19.07774 | 678059.8 | 2193 | 8.764419 |
| <i>Line 4</i> | 1618687 | 272 | 3.671371 | 1878444 | 434 | 3.163683 |

Tabel 4.12 Hasil simulasi *tension force* pada heading 60°

| Rantai Jangkar | Kondisi <i>Full load</i> | | | Kondisi <i>Light load</i> | | |
|----------------|--------------------------|------|----------|---------------------------|------|----------|
| | <i>Tension</i> (N) | t(s) | SF | <i>Tension</i> (N) | t(s) | SF |
| Line 1 | 1943703 | 216 | 3.057463 | 2204319 | 2154 | 2.695981 |
| Line 2 | 344545.4 | 376 | 17.24823 | 1036040 | 4512 | 5.736071 |
| Line 3 | 231641.2 | 474 | 25.65519 | 775069 | 348 | 7.667446 |
| Line 4 | 2057584 | 249 | 2.888242 | 2306166 | 302 | 2.576918 |

Tabel 4.13 Hasil simulasi *tension force* pada heading 90°

| Rantai Jangkar | Kondisi <i>Full load</i> | | | Kondisi <i>Light load</i> | | |
|----------------|--------------------------|------|----------|---------------------------|------|----------|
| | <i>Tension</i> (N) | t(s) | SF | <i>Tension</i> (N) | t(s) | SF |
| Line 1 | 1866303 | 246 | 3.184263 | 1995035 | 5386 | 2.978795 |
| Line 2 | 313627.7 | 505 | 18.94858 | 601929.3 | 3085 | 9.872921 |
| Line 3 | 279740.7 | 505 | 21.24396 | 608668.3 | 3085 | 9.76361 |
| Line 4 | 1906571 | 304 | 3.117009 | 1932856 | 5386 | 3.074622 |

Tabel 4.14 Hasil simulasi *tension force* pada heading 120°

| Rantai Jangkar | Kondisi <i>Full load</i> | | | Kondisi <i>Light load</i> | | |
|----------------|--------------------------|------|----------|---------------------------|------|----------|
| | <i>Tension</i> (N) | t(s) | SF | <i>Tension</i> (N) | t(s) | SF |
| Line 1 | 2022190 | 268 | 2.938795 | 2300635 | 304 | 2.583113 |
| Line 2 | 345473.5 | 368 | 17.2019 | 721713.8 | 356 | 8.234289 |
| Line 3 | 138269.6 | 418 | 42.9798 | 642156.8 | 2204 | 9.254438 |
| Line 4 | 1943191 | 233 | 3.058268 | 2065427 | 300 | 2.877274 |

Tabel 4.15 Hasil simulasi *tension force* pada heading 135°

| Rantai Jangkar | Kondisi <i>Full load</i> | | | Kondisi <i>Light load</i> | | |
|----------------|--------------------------|------|----------|---------------------------|------|----------|
| | <i>Tension</i> (N) | t(s) | SF | <i>Tension</i> (N) | t(s) | SF |
| Line 1 | 1591914 | 267 | 3.733117 | 1742010 | 302 | 3.411461 |
| Line 2 | 448123.4 | 475 | 13.26153 | 663218.4 | 385 | 8.960548 |
| Line 3 | 338096.3 | 391 | 13.26153 | 616869.3 | 349 | 9.633807 |
| Line 4 | 494537.3 | 244 | 12.01689 | 1813192 | 2155 | 3.277535 |

Tabel 4.16 Hasil simulasi *tension force* pada *heading* 180⁰

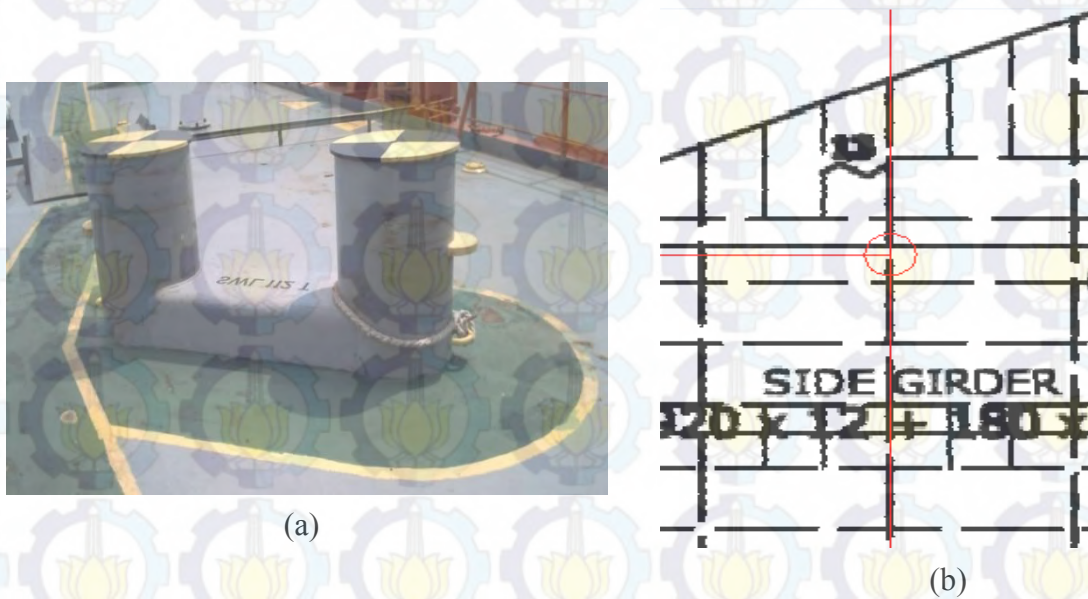
| Rantai Jangkar | Kondisi <i>Full load</i> | | | Kondisi <i>Light load</i> | | |
|----------------|--------------------------|------|----------|---------------------------|------|----------|
| | <i>Tension</i> (N) | t(s) | SF | <i>Tension</i> (N) | t(s) | SF |
| <i>Line 1</i> | 401157.9 | 7120 | 14.81412 | 740331.6 | 3117 | 8.027214 |
| <i>Line 2</i> | 393452 | 7120 | 15.10426 | 749128.8 | 3117 | 7.932948 |
| <i>Line 3</i> | 225647.5 | 7296 | 26.33665 | 572298.6 | 3154 | 10.38409 |
| <i>Line 4</i> | 222835.4 | 7296 | 26.66901 | 583724.2 | 3154 | 10.18084 |

Berdasarkan tabel diatas untuk semua kondisi pembebanan, tegangan yang terjadi pada rantai jangkar masih memenuhi standar keamanan yang disyaratkan oleh ABS. Hasil tegangan pada kondisi *light load* lebih besar dibandingkan dengan saat kondisi *full load*. Tegangan rantai jangkar yang paling besar terjadi ketika arah pembebanan 60⁰ untuk *line 4* (Tabel 4.12), dan arah 120⁰ untuk *line 1* (Tabel 4.14). *Line 4* mempunyai tegangan terbesar sebesar 2306166 N dalam kondisi *light load*. Tegangan tersebut terjadi ketika simulasi detik ke-302. *Line 4* merupakan rantai jangkar yang diikatkan pada *bollard* bagian belakang, sehingga nilai tegangan inilah yang nantinya digunakan sebagai input beban untuk analisis tegangan lokal maksimum pada *bollard* bagian belakang. Sedangkan rantai jangkar yang diikatkan pada *bollard* bagian depan adalah *line 1*, sehingga nilai tegangan rantai jangkar pada *line 1* yaitu 2300635 N digunakan sebagai input beban untuk analisis tegangan lokal maksimum *bollard* bagian depan.

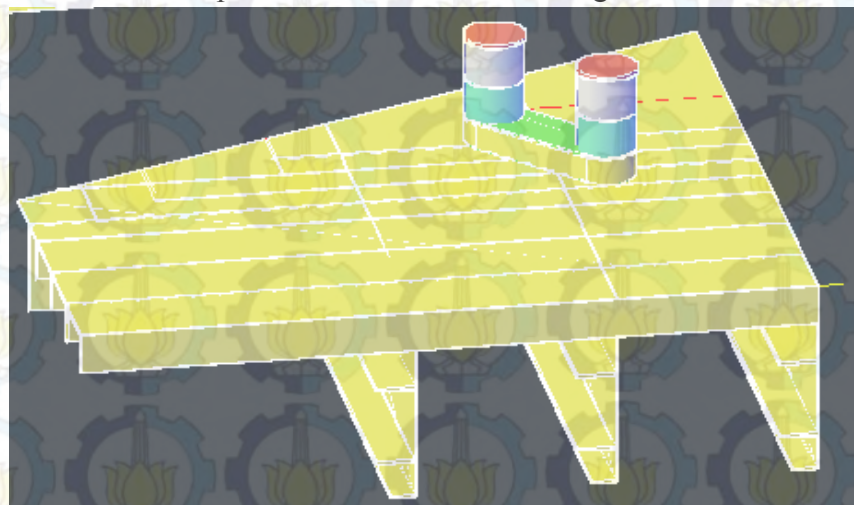
4.8 Pemodelan Konstruksi *Bollard*

Pemodelan detail konstruksi *bollard* dilakukan dengan bantuan *software* AutoCAD 3D. Pemodelan konstruksi *bollard* meliputi pemodelan konstruksi *bollard* itu sendiri dan konstruksi *deck* beserta *stiffener – stiffener* yang ada di sekitar konstruksi *bollard* ditempatkan. Pemodelan *bollard* dilakukan dengan memodelkan dimensi-dimensi ketebalannya sesuai dengan kondisi 80% dari desain awal sebagai toleransi korosi karena FSO Ladinda telah lama beroperasi (BKI Vol.II, 2009).

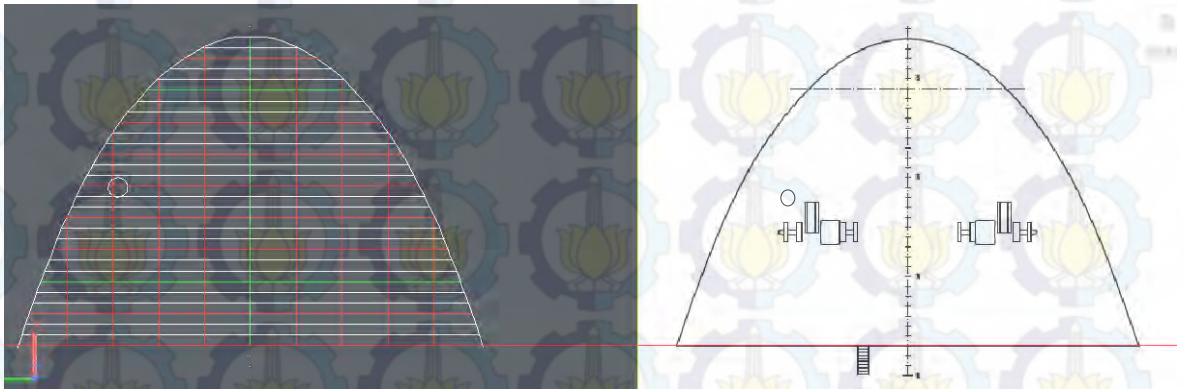
Pemodelan lokal konstruksi *bollard* ditempatkan pada *main deck* bagian belakang dan *forecastle deck* FSO *Ladinda* dengan ketebalan *bollard* 15 mm. Tebal pelat di *main deck* 13 mm, dan tebal pelat *forecastle deck* 12 mm. Struktur yang dimodelkan meliputi konstruksi *bollard* beserta dudukannya, *deck*, konstruksi melintang (*deck beam transverse*) dan konstruksi memanjang (*longitudinal girder*) di *main deck* dan *forecastle deck*. Luasan struktur yang dimodelkan untuk distribusi tegangan pada analisa lokal ini mengacu pada ketentuan ABS “*Safehull-Dynamic Loading Approach for FPSO Systems*”(2001) sekaligus dilakukan pemilihan material untuk struktur, yaitu Baja ASTM A36.



Gambar 4.57 Konstruksi *bollard* (a) foto kondisi fisik *bollard* (b) letak *bollard* pada konstruksi *deck* belakang



Gambar 4.58 Hasil pemodelan 3D *bollard* belakang



Gambar 4.59 letak *bollard* bagian depan



Gambar 4.60 hasil pemodelan 3D *bollard* belakang

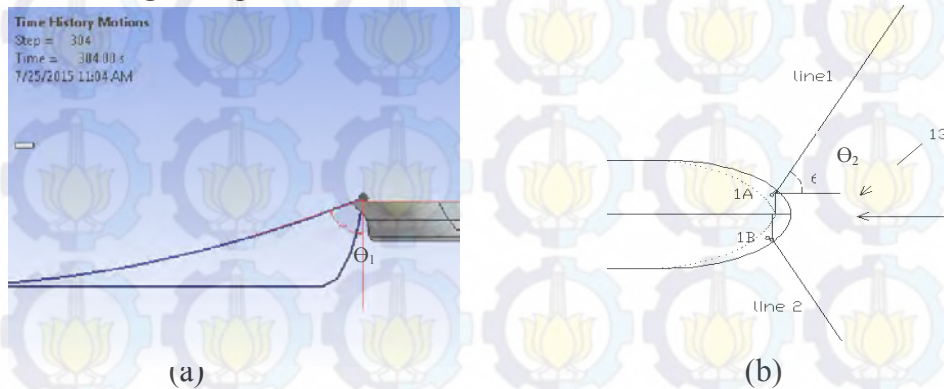
Konstruksi *Bollard* terletak pada *main deck* bagian belakang (Gambar 4.57, 4.58) dan *forecastle deck* (Gambar 4.59, 4.60) dengan ketebalan 15 mm, pelat di *main deck* 13 mm, *girder* HP 220 x 12 (EMP, 2014) sedangkan pelat *forecastle deck* mempunyai ketebalan 12 mm, *girder* T 200 x 90x 12, *spacing* 0.7 m. Pemodelan lokal dilakukan dengan kondisi batas 3 *frame* di sekitar *bollard* hingga struktur penegar yang terkuat untuk pendistribusian gayanya (ABS, 2001).

4.9 Pembebanan pada Analisis Lokal

Pada analisis lokal pada *bollard* menggunakan bantuan *software* ANSYS *Mechanical* dengan menggunakan satu beban, yaitu beban gaya tarik maksimum rantai jangkar. Dari hasil analisis *tension* rantai jangkar diatas didapatkan nilai

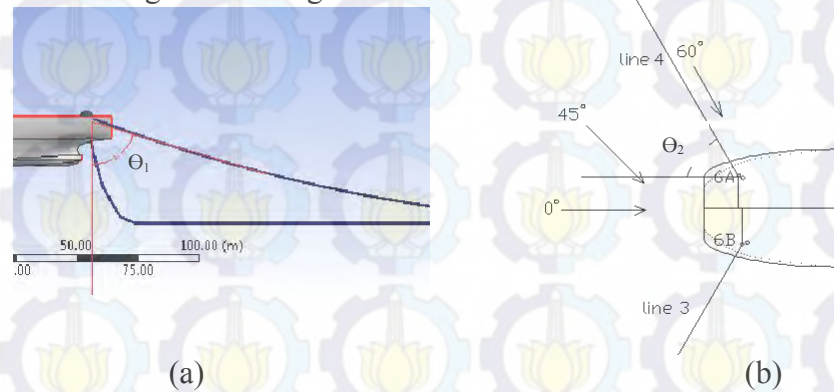
terbesar yang mengenai *bollard* bagian depan dan belakang. Untuk *bollard* bagian bagian belakang terdapat rantai jangkar no.4 yang mempunyai *tension force* terbesar 2306166 N, sedangkan untuk *bollard* bagian depan terdapat rantai jangkar no.1 dengan *tension force* terbesar 2204319 N. Karena *tension* yang didapatkan dari simulasi merupakan gaya dengan sudut tertentu, maka perlu diperhitungkan sudut yang dibentuk untuk melakukan pembebanan pada konstruksi *bollard*. Konfigurasi beban tersebut dapat dilihat pada ilustrasi 4.61 dan 4.62.

a. *Bollard* bagian depan



Gambar 4.61 Konfigurasi sudut rantai jangkar bagian depan (a) tampak samping (b) tampak atas

b. *Bollard* bagian belakang



Gambar 4.62 Konfigurasi sudut rantai jangkar bagian belakang (a) tampak samping (b) tampak atas

Berdasarkan gambar tampak samping dan tampak atas, dapat diketahui untuk *bollard* bagian depan nilai $\theta_1 = 71^\circ$ dan $\theta_2 = 60^\circ$, sedangkan untuk *bollard* bagian belakang nilai $\theta_1 = 73^\circ$ dan $\theta_2 = 60^\circ$. Nilai sudut θ_1 didapatkan dari hasil

simulasi *time domain* ketika rantai jangkar pada kondisi *tension* maksimum. Setelah didapatkan nilai sudutnya, maka dapat digunakan untuk menghitung input gaya yang akan dimasukkan dalam analisis. Hasil perhitungan dari gaya pada konstruksi *bollard* bagian depan ialah sebagai berikut :

$$F_x = 1081298 \text{ N}$$

$$F_y = 1872863 \text{ N}$$

$$F_z = 736203.2 \text{ N}$$

sedangkan untuk *bollard* bagian belakang adalah sebagai berikut :

$$F_x = 1102347 \text{ N}$$

$$F_y = 1909321 \text{ N}$$

$$F_z = 668788.1 \text{ N}$$

Pada analisa ini beban yang mengenai konstruksi bolder adalah beban horizontal memanjang arah sumbu -X , beban vertikal memanjang arah sumbu Y dan beban vertikal arah sumbu – Z. Dan untuk boundary condition dalam analisis ini yaitu bagian tepi struktur yang dimodelkan dianggap *fix*.

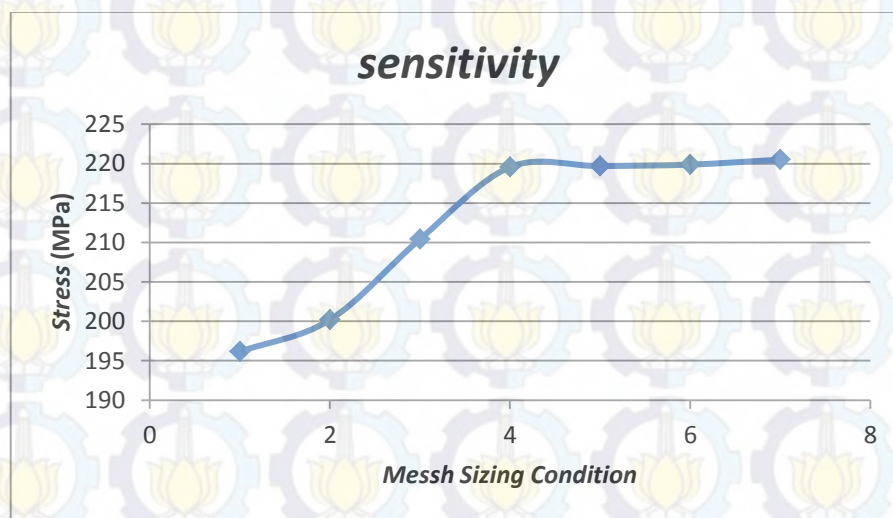
4.10 Meshing dan Sensitivity Analysis

Sensitivity Analysis dilakukan untuk mengecek apakah model dan tegangan yang dihasilkan dari hasil *running* sudah benar atau sudah mendekati nilai kebenaran. Pada Tugas Akhir ini, uji *sensitivity* dilakukan dengan cara variasi ukuran elemen *meshing*. Berdasarkan variasi ukuran elelmen *meshing* tersebut akan didapatkan hasil *equivalent stress* atau yang lebih dikenal dengan *Von Mises Stress*. Dari beberapa hasil tegangan yang dihasilkan dianalisis hingga didapat perbedaan hasil yang kurang dari 5%.

Pada Tugas Akhir ini dilakukan *running* uji elemen *meshing* dengan 7 kondisi kerapatan *meshing* untuk struktur *bollard* bagian depan, dan 9 kondisi untuk struktur *bollard* bagian belakang. Menurut ABS “*Safehull-Dynamic Loading Approach for FPSO Systems*”(2001) rentang kerapatan ukuran *meshing* yang digunakan untuk *local analysis* adalah 1/5 sampai 1/10 dari ukuran lebar *longitudinal girder*, sehingga didapatkan rentang ukuran untuk struktur *bollard* depan dan belakang yaitu 40 mm – 20 mm.

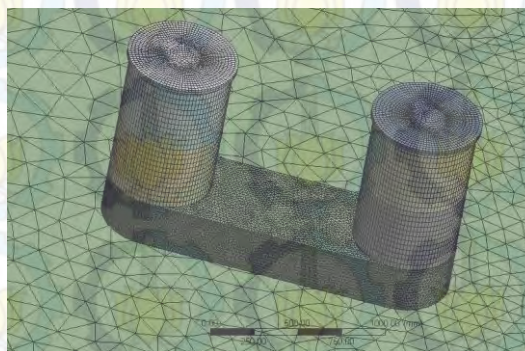
Tabel 4.17 *Meshing Sensitivity* untuk struktur *bollard* depan

| Kondisi | Ukuran (mm) | Nodes | Elemen | Tegangan (Mpa) | Koreksi (%) |
|---------|-------------|--------|--------|----------------|-------------|
| 1 | 40 | 141935 | 48787 | 196.15 | |
| 2 | 35 | 156766 | 53051 | 200.18 | 2.013188131 |
| 3 | 30 | 169038 | 58910 | 210.42 | 4.866457561 |
| 4 | 25 | 195714 | 69014 | 219.56 | 4.162871197 |
| 5 | 24 | 200211 | 70497 | 219.69 | 0.059174291 |
| 6 | 23 | 214814 | 75696 | 219.88 | 0.08641077 |
| 7 | 20 | 242108 | 86146 | 220.51 | 0.285701329 |



Gambar 4.63 Sensitivitas struktur *bollard* depan

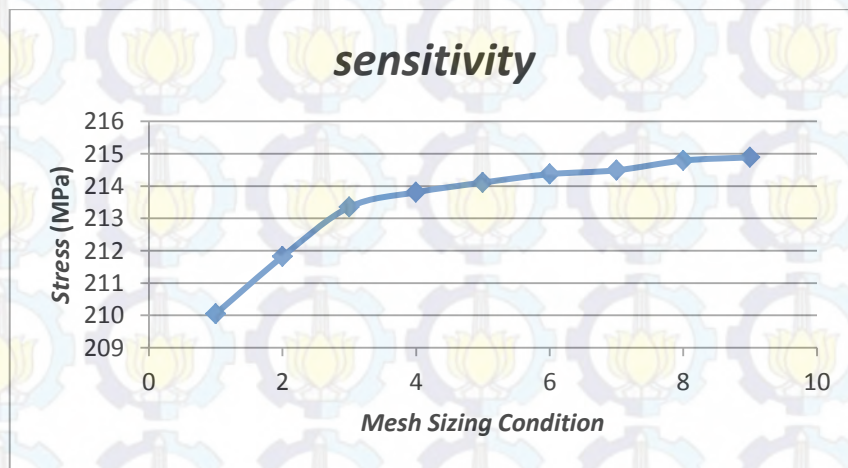
Berdasarkan Tabel 4.17 dan grafik pada Gambar 4.63, ukuran elemen *meshing* untuk struktur *bollard* bagian depan efektif dimodelkan pada ukuran *meshing* 24 mm dengan *error* terkecil yaitu 0.059 % dan menghasilkan tegangan sebesar 219.69 Mpa.



Gambar 4.64 Model elemen *meshing* struktur *bollard* depan ukuran 24 mm

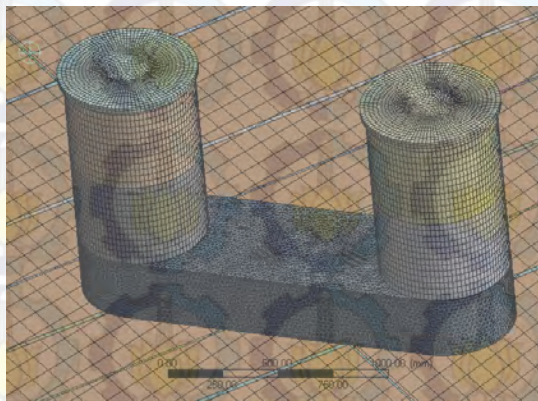
Tabel 4.18 *Meshing Sensitivity* untuk struktur *bollard* belakang

| Kondisi | Ukuran (mm) | Nodes | Elemen | Tegangan (MPa) | Koreksi (%) |
|---------|-------------|--------|--------|----------------|-------------|
| 1 | 40 | 136208 | 26099 | 210.05 | |
| 2 | 35 | 145246 | 30011 | 211.82 | 0.835615 |
| 3 | 30 | 157765 | 35945 | 213.35 | 0.717131 |
| 4 | 25 | 186593 | 47313 | 213.81 | 0.215144 |
| 5 | 24 | 191008 | 48623 | 214.11 | 0.140115 |
| 6 | 23 | 207364 | 54938 | 214.37 | 0.121286 |
| 7 | 22 | 216096 | 57641 | 214.49 | 0.055947 |
| 8 | 21 | 222756 | 60553 | 214.79 | 0.139671 |
| 9 | 20 | 237720 | 66842 | 214.89 | 0.046535 |



Gambar 4.65 Sensitivitas struktur *bollard* belakang

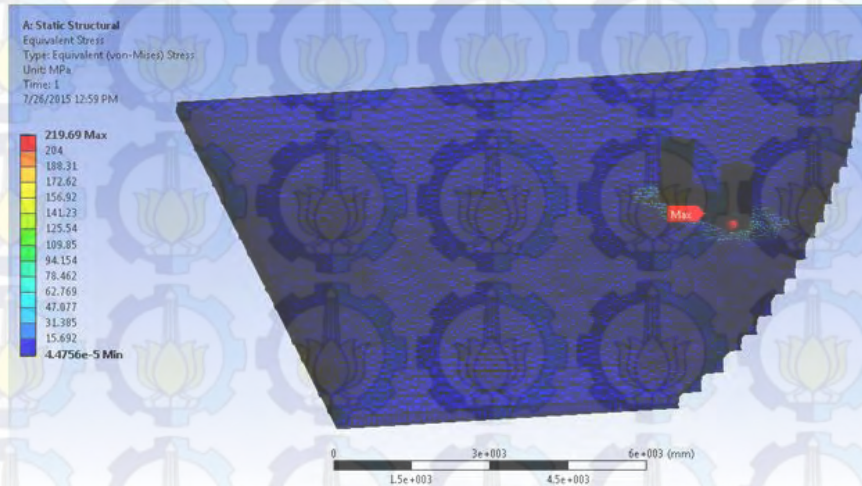
Berdasarkan Tabel 4.18 dan grafik pada Gambar 4.65, ukuran elemen *meshing* untuk struktur *bollard* bagian belakang efektif dimodelkan pada ukuran *meshing* 22 mm dengan *error* terkecil yaitu 0.056 % dan menghasilkan tegangan sebesar 214.49 Mpa.



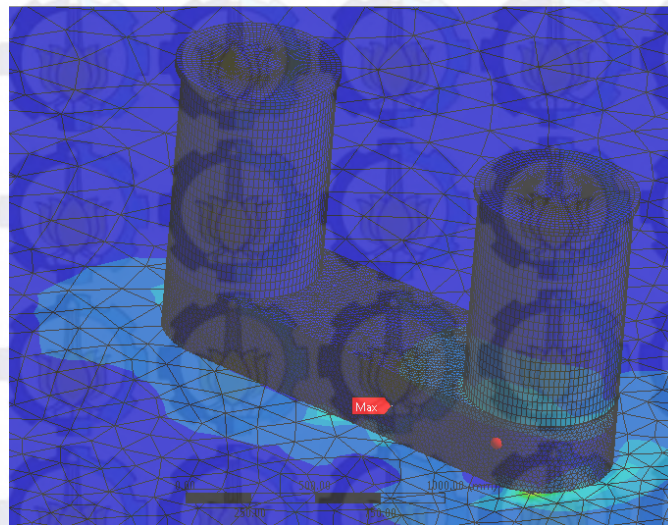
Gambar 4.66 Model elemen *meshing* struktur *bollard* belakang ukuran 22 mm

4.11 Analisa Tegangan Lokal Konstruksi *Bollard*

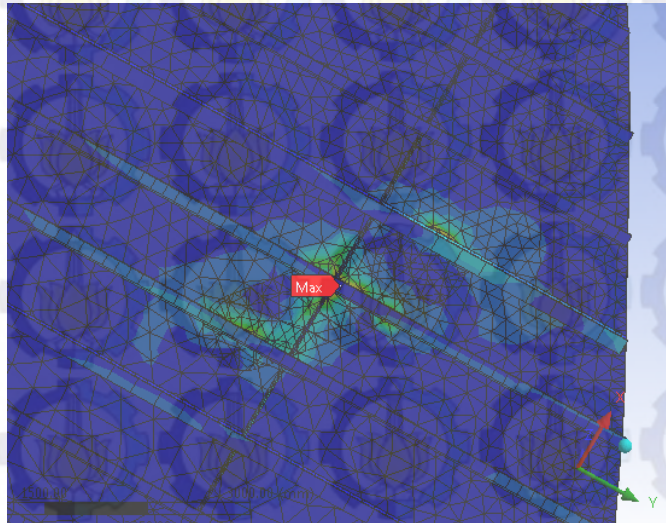
Berikut ini adalah hasil tegangan *Von Mises* dan deformasi maksimum untuk *bollard* bagian belakang dan bagian depan.



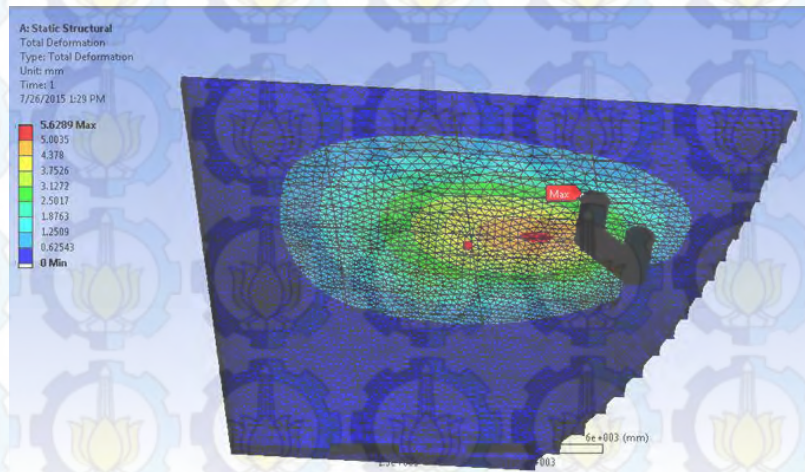
Gambar 4.67 Hasil *Stress* maksimum *Bollard* Bagian Depan



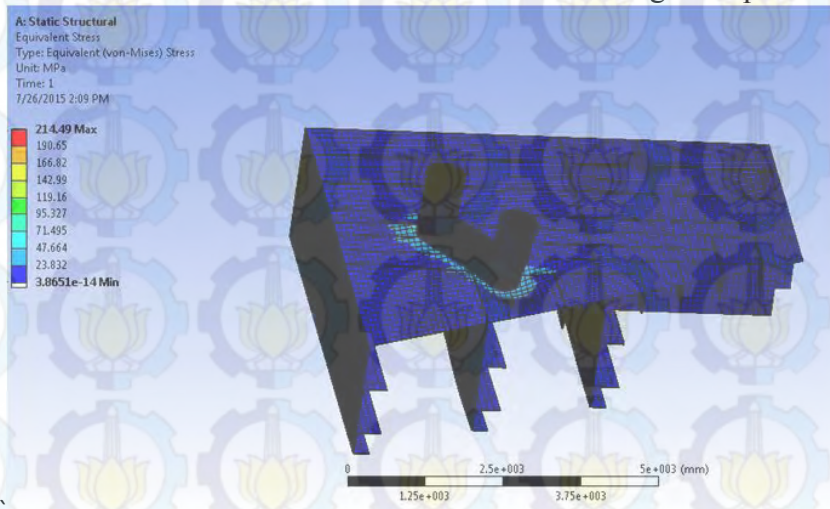
Gambar 4.68 *Stress* pada konstruksi dudukan *bollard*



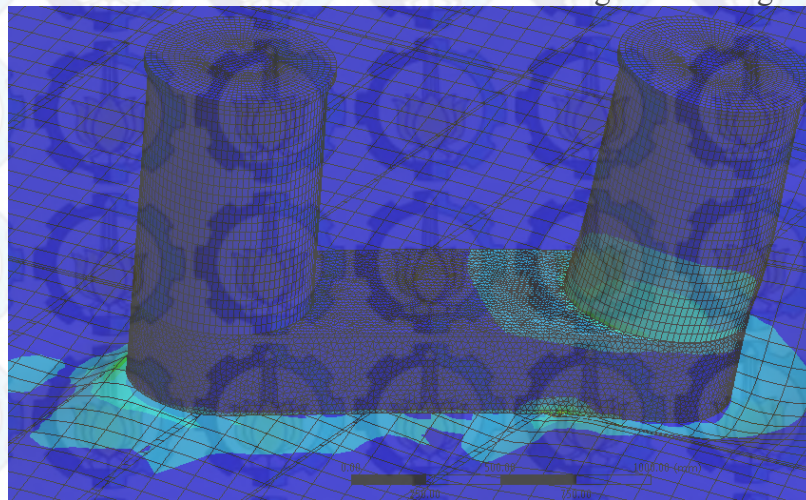
Gambar 4.69 Stress pada konstruksi dudukan *bollard* bagian bawah



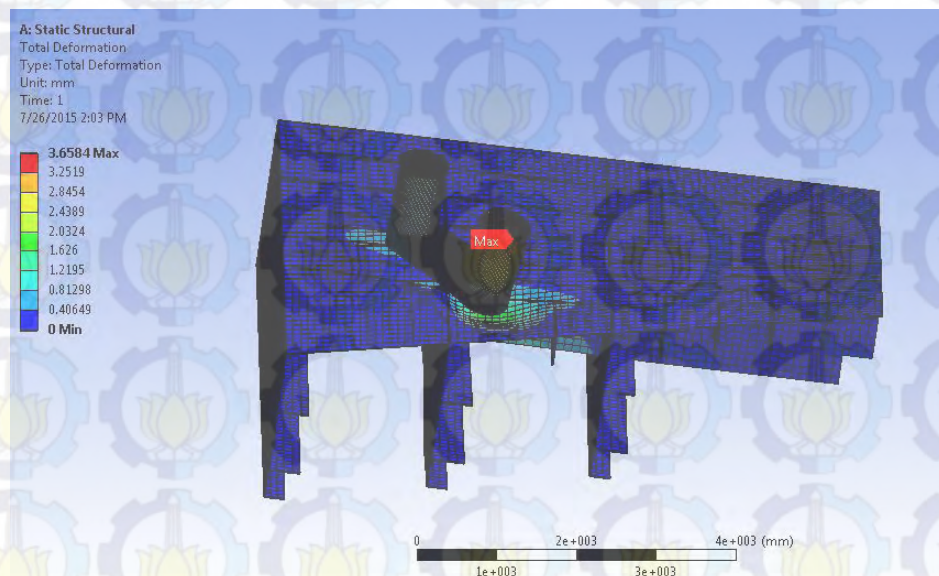
Gambar 4.70 Hasil deformasi maksimum *bollard* bagian depan



Gambar 4.71 Hasil stress maksimum *bollard* bagian belakang



Gambar 4.72 Stress pada konstruksi dukungan *bollard* bagian belakang



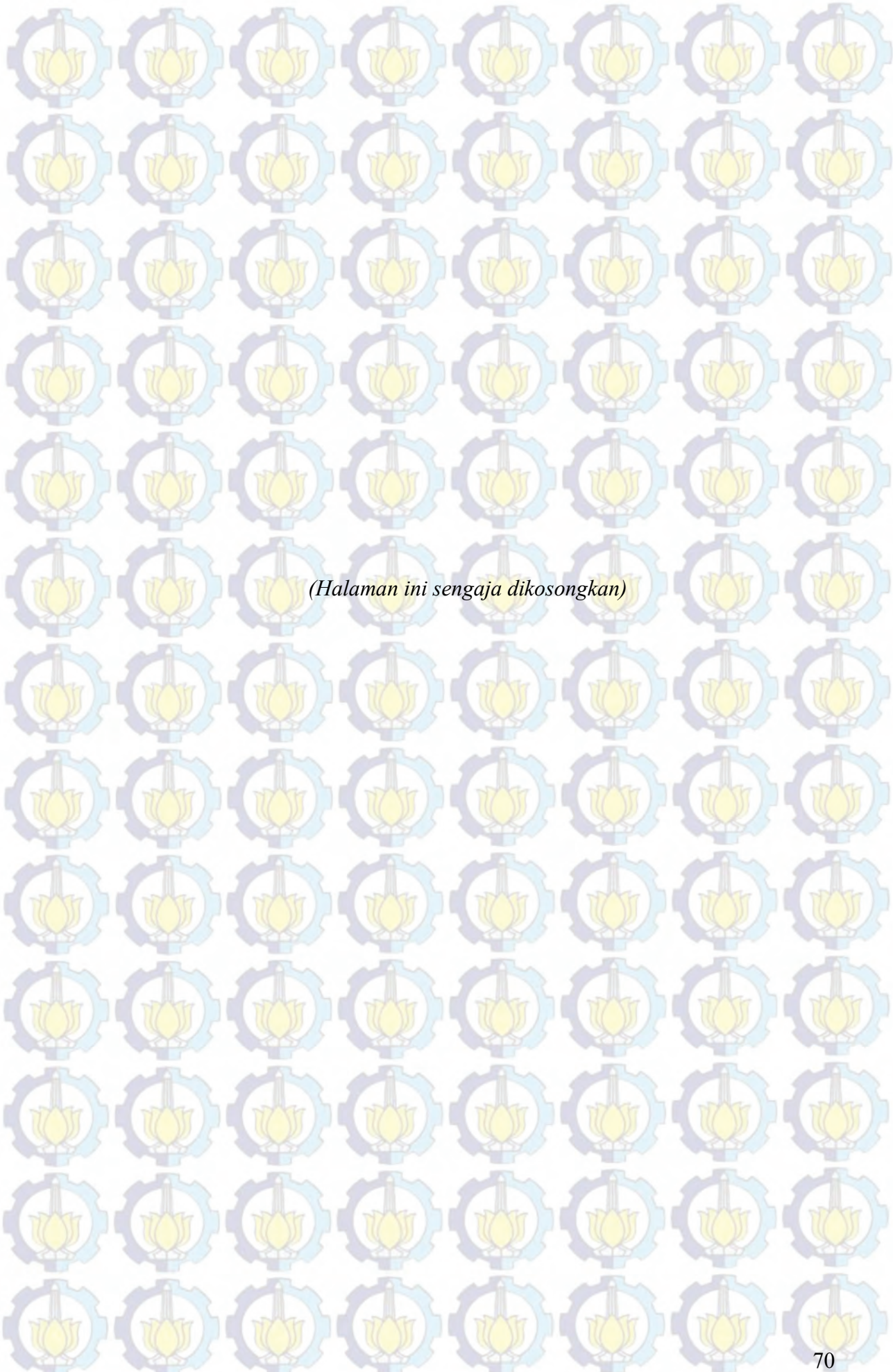
Gambar 4.73 Hasil deformasi maksimum *bollard* bagian depan

Berdasarkan hasil running dari analisis *stress* dan deformasi pada *software ANSYS Mechanical* untuk *bollard* bagian depan didapatkan *stress* terbesar berada pada konstruksi dukungan *bollard* bagian atas (Gambar 4.68) dan bawah (Gambar 4.69). *Stress* yang dihasilkan sebesar 219.69 Mpa (Gambar 4.67). Deformasi terbesar pada *bollard* bagian depan terjadi pada bagian atas konstruksi *bollard* dengan nilai deformasi 5.62 mm (Gambar 4.70).

Untuk *bollard* bagian belakang, *stress* terbesar yang dihasilkan adalah sebesar 214.49 Mpa pada bagian yang sama dengan *bollard* bagian depan, yaitu kontak antara konstruksi dudukan *bollard* dengan pelat diatas dan dibawahnya (Gambar 4.71). Sedangkan deformasi maksimum yang dihasilkan sebesar 3.65 mm (Gambar 4.73) terjadi pada bagian atas *bollard* dan pelat *deck* tepatnya dibawah dudukan *bollard*.

Menurut ABS “*Safehull-Dynamic Loading Approach for FPSO Systems*” (2001) struktur dikatakan aman jika tegangan yang terjadi tidak melebihi 90% dari *yield strength* material yang digunakan yaitu 225 MPa. Dari hasil analisis diatas, tegangan maksimum pada *bollard* bagian depan dan bagian belakang masih tidak melebihi 225 MPa, sehingga masih bisa dikatakan aman beroperasi.

Untuk batas deformasi yang diijinkan menurut ABS “*Shipbuilding and Repair Quality Standard for Hull Structures during Construction*” (2001) adalah 6 mm untuk bagian depan (*fore*) dan belakang (*aft*). Dari hasil analisis deformasi bagian belakang dan bagian depan masih memiliki nilai lebih kecil dari batas yang diijinkan, sehingga struktur tersebut masih layak beroperasi.



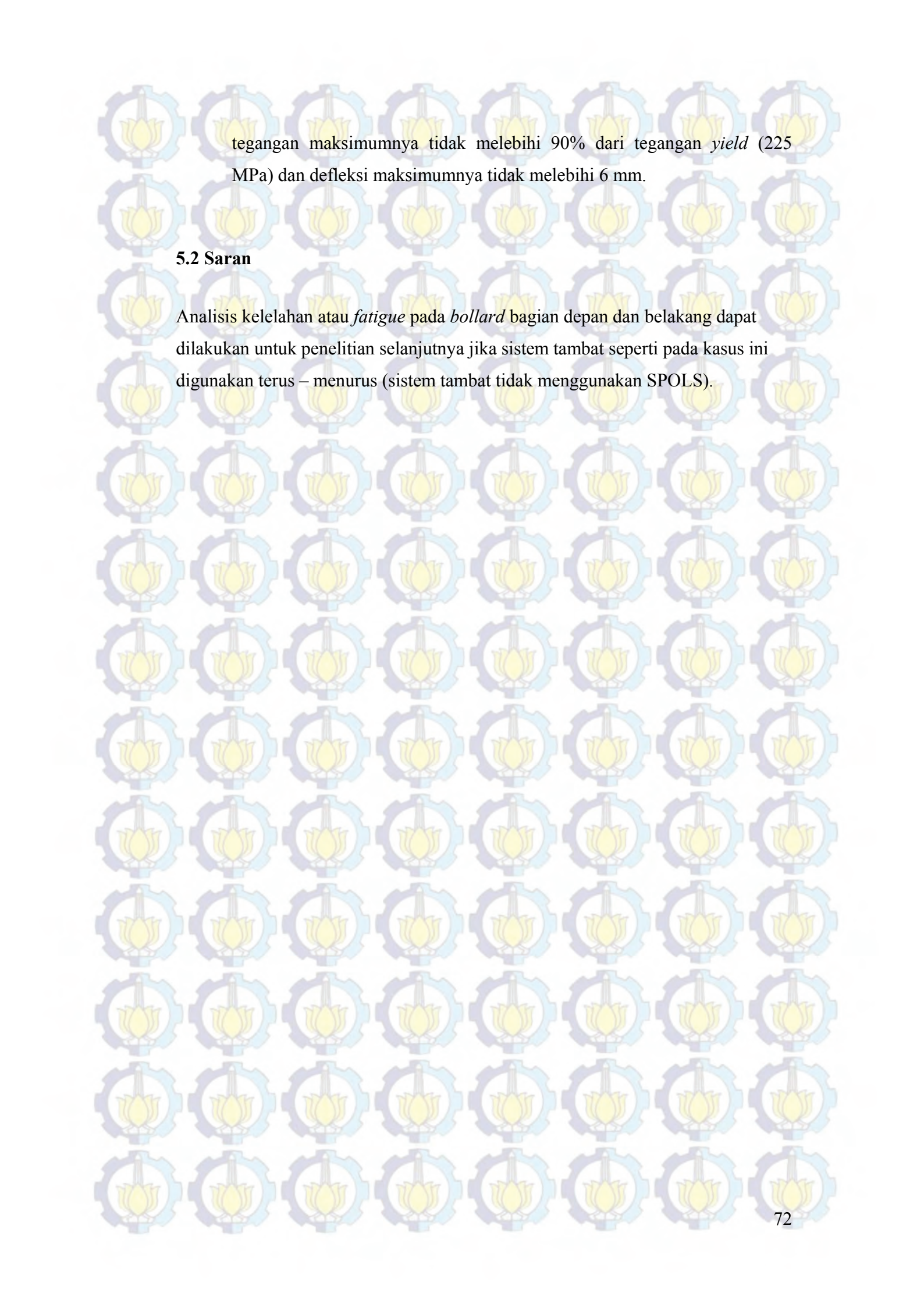
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat dibuat berdasarkan pengerjaan Tugas Akhir ini adalah :

1. Perilaku gerak FSO Ladinda saat kondisi *free floating* dapat dilihat dari nilai terbesar terjadi pada kondisi *light* dengan *surge* terbesar 5.651 m/m, *sway* terbesar 6.130 m/m, *heave* terbesar 1.020 m/m, *roll* terbesar 5.452 deg/m, *pitch* terbesar 0.638 deg/m, *yaw* terbesar 2.011 deg/m. Hal ini menunjukkan FSO lebih stabil pada kondisi *full load*.
2. Perilaku gerak FSO Ladinda saat tertambat dapat dilihat dari nilai terbesar terjadi pada kondisi *light* dengan *surge* terbesar 0.040 m/m, *sway* terbesar 0.077 m/m, *heave* terbesar 0.072 m/m, *roll* terbesar 1.592 deg/m, *pitch* terbesar 0.088 deg/m, *yaw* terbesar 0.487 deg/m. RAO tertambat dengan nilai yang sangat lebih kecil daripada RAO *free floating* menunjukkan bahwa sistem tambat telah mampu menahan gerakan FSO.
3. Hasil tegangan terbesar pada rantai jangkar terdapat pada *line 4* untuk bagian belakang dengan nilai 2.31 MN dan *line 1* untuk bagian depan dengan nilai 2.30 MN. Hasil diperoleh dari simulasi *time domain* dalam durasi 10800 detik (3 jam) pada kondisi *light load*.
4. Tegangan lokal yang dihasilkan untuk *bollard* bagian depan sebesar 219.69 Mpa dengan deformasi maksimum sebesar 5.62 mm. Untuk *bollard* bagian belakang, tegangan maksimum yang terjadi sebesar 214.49 Mpa dengan deformasi sebesar 3.65 mm. Struktur dengan sistem ini masih dikatakan aman sesuai standart keamanan yang ditetapkan oleh ABS “*Safehull-Dynamic Loading Approach for FPSO Systems*” (2001) dan ABS “*Shipbuilding and Repair Quality Standard for Hull Structures during Construction*” (2001) bahwa struktur masih aman beroperasi jika



tegangan maksimumnya tidak melebihi 90% dari tegangan *yield* (225 MPa) dan defleksi maksimumnya tidak melebihi 6 mm.

5.2 Saran

Analisis kelelahan atau *fatigue* pada *bollard* bagian depan dan belakang dapat dilakukan untuk penelitian selanjutnya jika sistem tambat seperti pada kasus ini digunakan terus – menerus (sistem tambat tidak menggunakan SPOLS).

DAFTAR PUSTAKA

ABS, 1996, *Rules for Building and Classing Single Point Moorings*, USA: American Bureau of Shipping.

ABS, 2004, *Guide For Building and Classing Floating Production Installations*, USA: American Bureau of Shipping.

ABS, 2010, *Rules For Testing And Certification Of Materials*, USA : American Bureau of Shipping.

ABS, 2001, *Safehull-Dynamic Loading Approach' for Floating Production, Storage and Offloading (FPSO) Installations*, USA: American Bureau of Shipping ABS Plaza.

ABS, 2001, *Shipbuilding and Repair Quality Standard for Hull Structures during Construction*, USA: American Bureau of Shipping ABS Plaza.

API RP 2SK 3th edition, 2005, *Recommended Practice for Design and Analysis of Station Keeping Systems for Floating Structures*, Washington DC.

API RP 2A-WSD 21st Edition, 2000. *Recommended Practice for Planning, Design, and Constructing Fixed Offshore Platforms – Working Stress Design*. USA.

Athoillah, M., 2014. *Analisa Tegangan Lokal Dan Umur Kelelahan Konstruksi Bollard Pada FSO Ladinda Akibat Pengaruh Side By Side Offloading Process*, Surabaya: ITS.

Bhattacharyya. R., 1978, *Dynamics of Marine Vehicles*, New York: John Wiley & Sons Inc.

BKI Vol.II . 2009. *Rules for The Classification and Construction of Seagoing Steel Ships*. Jakarta : Biro Klasifikasi Indonesia.

Chakrabarti, S.K., 1987, *Hydrodynamics of Offshore Structures*, USA: Computational

Cho, et.al. 2010. *Ultimate Load Capacities Of Mooring Bollards And Hull Foundation Structures*. Elseiver, hal. 770-776.

Djarmiko, E. B. 2012. *Perilaku dan Operabilitas Bangunan Laut diatas Gelombang Acak*. Surabaya: ITS Press.

DNV OS E301, 2004, *Position Mooring*, Det Norske Veritas, Norway.

Faltinsen, O. M. 1990. *Sea Loads on Ships and Offshore Structures*. United Kingdom : Cambridge University Press.

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*, Surabaya: ITS.

Mentes, et.al. 2012. *Fuzzy decision support system for spread mooring system selection*. Elseiver, hal. 3283-3297.

Murtedjo, Mas., 1999, *Handout Teori Bangunan Apung*, Surabaya: ITS.

OCIMF 2nd Edition. 1997. *Mooring Equipment Guidelines*. England: Witherby & CO. LTD.

Paik, et al. 2007. *Ship-Shaped Offshore Installations*. USA: Cambridge University Press.

Pratiwi, H. I., 2013. *Analisis Kekuatan Struktur Sistem Tandem Fso Arco Ardjuna Pada Saat Offloading Dengan Shuttle Tanker 85000 DWT*, Surabaya: ITS.

Popov, E. P., 1996, *Mekanika Teknik*, Jakarta: Erlangga

PT Energi Mega Persada. 2014. *FSO Ladinda*. Jakarta.

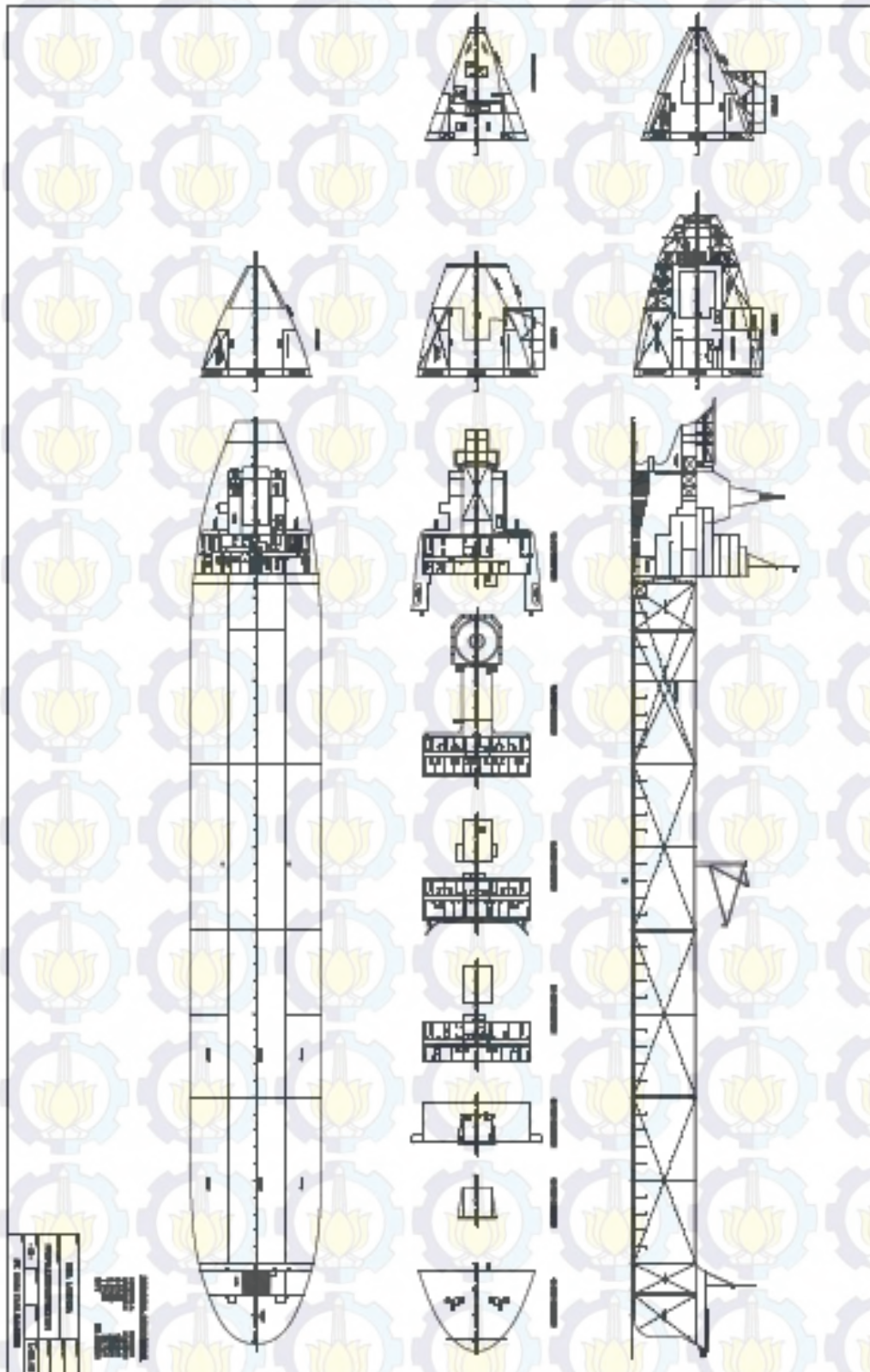


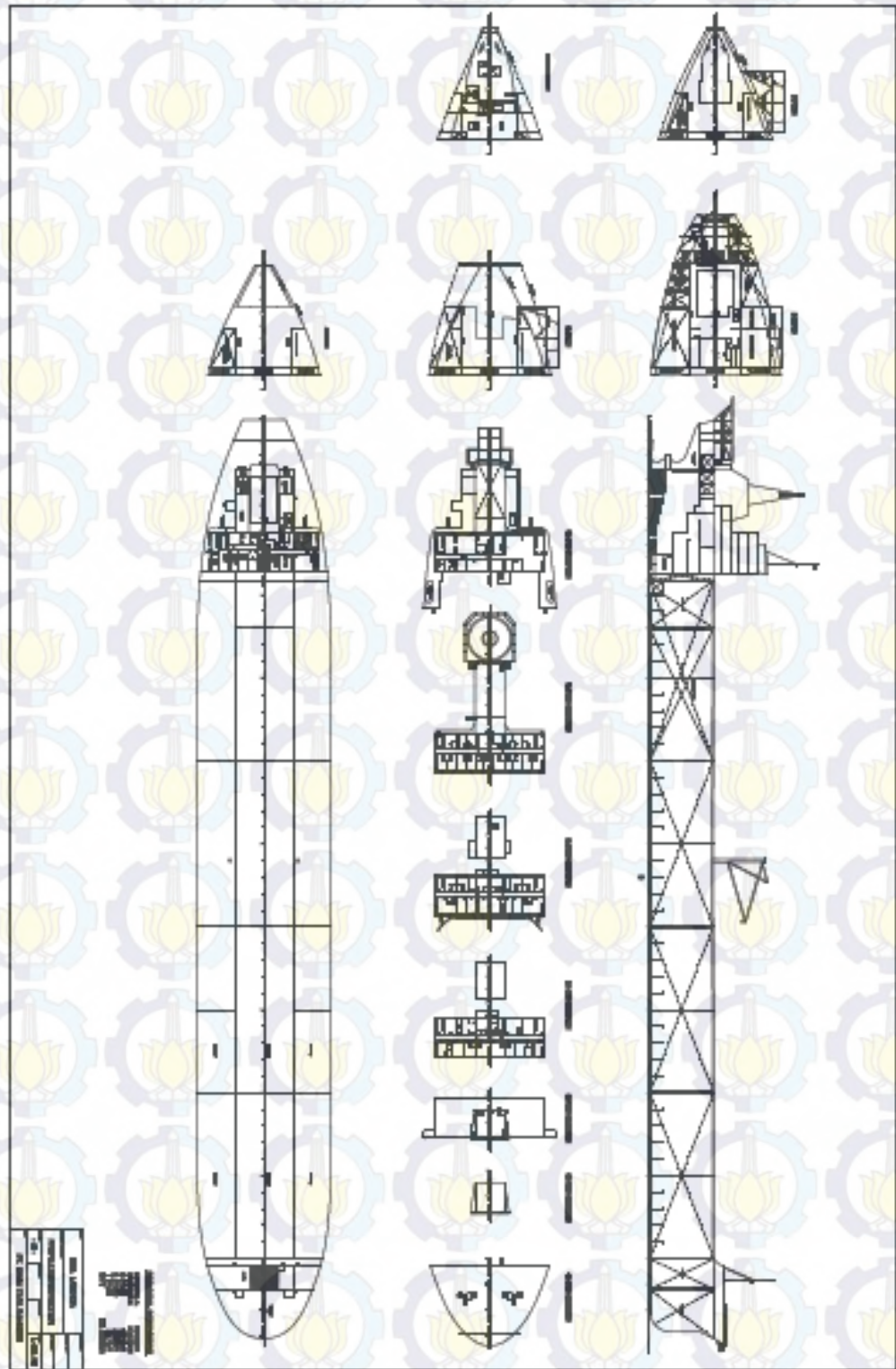
Ronney, P. D. (2014). *Basic of Mechanical Engineering*. California: University of Southern California.

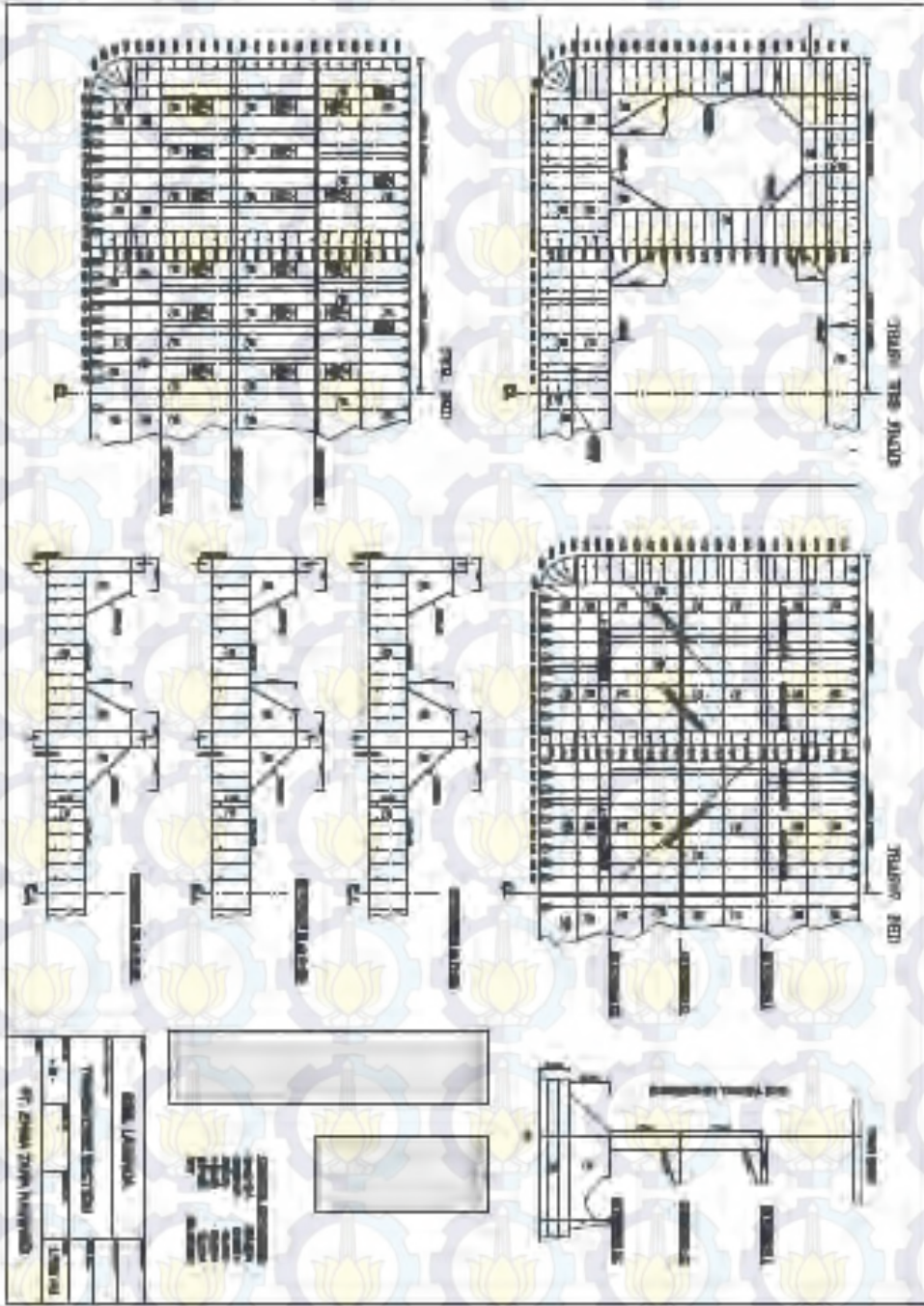
Wichers, J. 2013. *Guide to Single Point Moorings*. V.Moorings, Inc.: Netherlands.

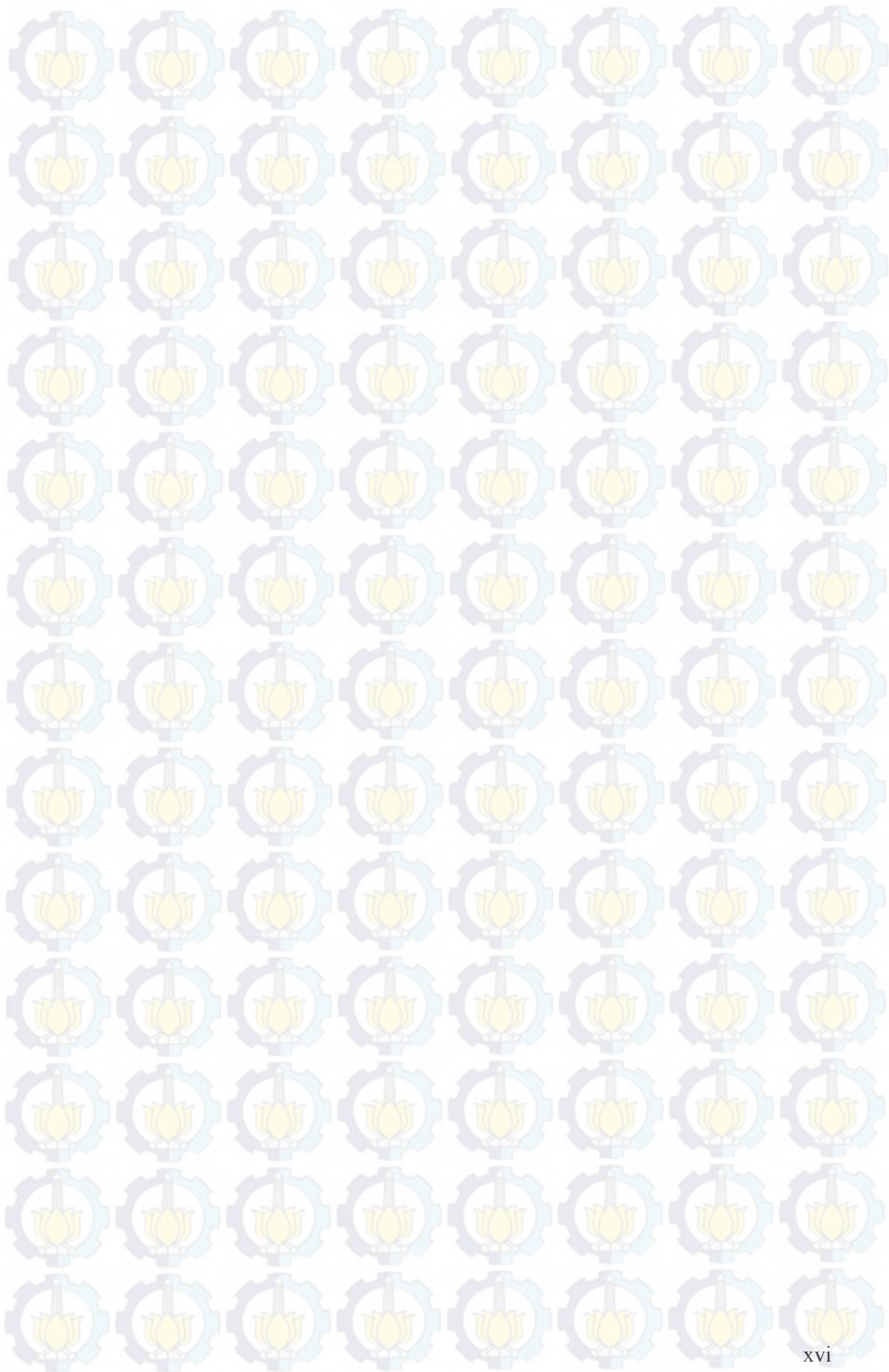
Yilmaz, O., dan Incecik, A., 1994, *Hydrodynamic Design of Moored Floating Platforms, Journal of Marine Structures*, Great Britain, UK.

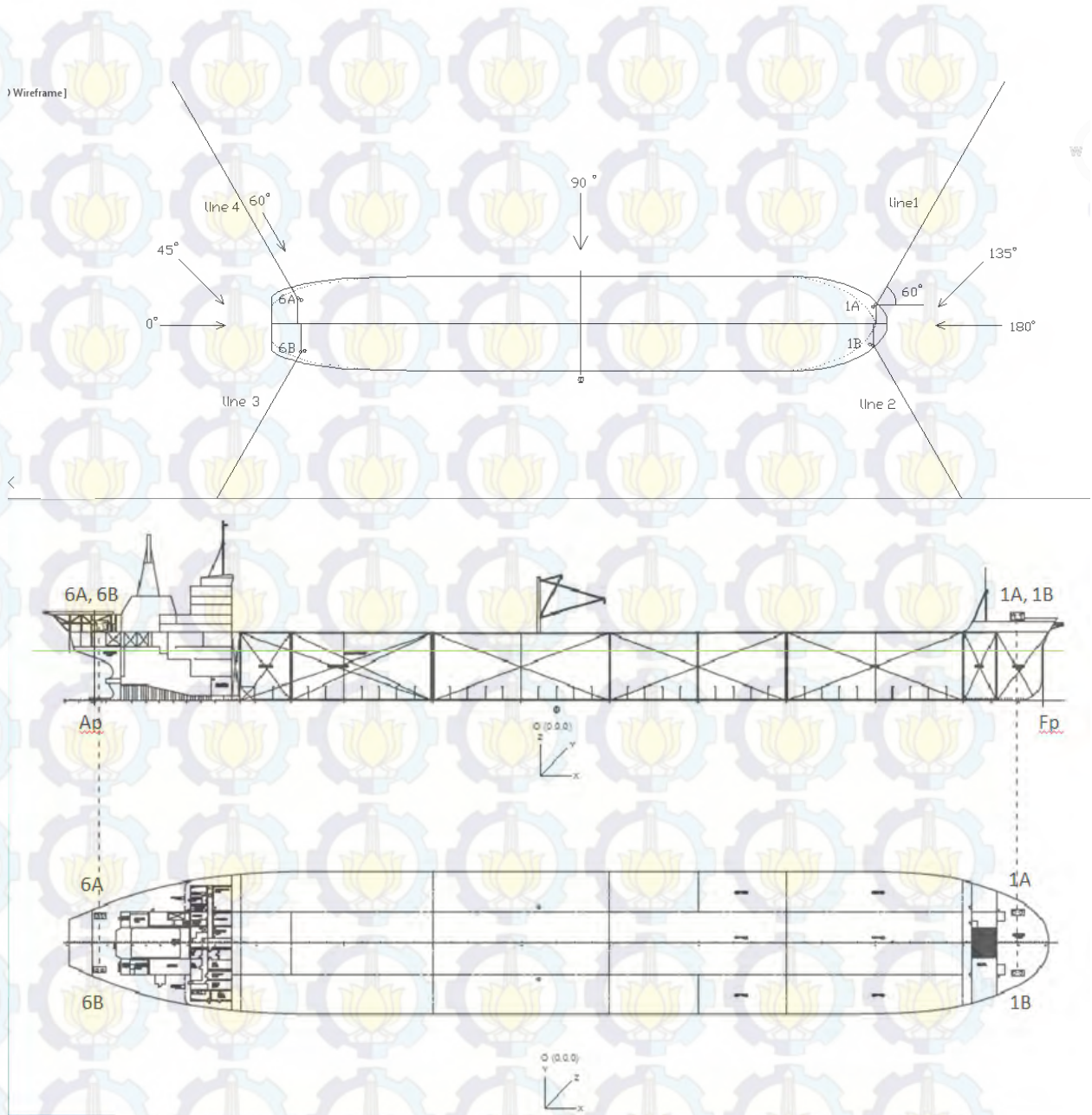
LAMPIRAN A *DRAWING*











| Koordinat | X | Y | Z |
|-------------------|----------|---------|--------|
| <i>Bollard 1A</i> | 134 m | 8.68 m | 22.6 m |
| <i>Bollard 1B</i> | 134 m | 8.68 m | 22.6 m |
| <i>Bollard 6A</i> | -132,4 m | 13,02 m | 20.6 m |
| <i>Bollard 6B</i> | -132,4 m | 13.02 m | 20.6 m |

(sumber : PT. Energi Mega Persada, 2014)

LAMPIRAN B Perhitungan *Equipment Number*

LOA 284 m B 43.4 m H 20.6m
 Lpp 272 m T 15.725 m
 Displasmen 161810 ton fb 4.875 m

Perhitungan h_s (tinggi super stuktur) dan A (Luas super stuktur)

| Deck | Length (m) | Height (m) | Area (m ²) |
|------------|------------|------------|------------------------|
| fb | 278.8 | 4.875 | 1359.15 |
| forecastle | 23.96 | 2 | 47.92 |
| Deck A | 20.87 | 5 | 104.35 |
| Deck B | 12.2 | 7.93 | 96.746 |
| Deck C | 9 | 2.79 | 25.11 |
| bulwark | 9.6 | 1.1 | 10.56 |
| | | 23.695 | 1643.836 |

$$EN = k\Delta^{2/3} + mBh + nA$$

EN = 5190.52

k = 1
 Δ = 161810 Displasmen
 m = 2
 B = 43.4 Lebar
 h = fb + Σh_s
 23.695
 n = 0.1
 A = 1643.836 Luas area super struktur

ABS Equipment Table

| EQUIPMENT FOR SELF-PROPELLED OCEAN-GOING STEEL VESSELS | | | | | | | |
|--|-------------------|----------------------|-------------------------|-----------------|---|---------------------------------------|---|
| Equipment Number | Equipment Number* | Stockless Bow Anchor | | | Chain Cable Stud Link Bower Chain | | |
| | | Number | Mass per Anchor, pounds | Length, fathoms | Diameter | | |
| | | | | | Normal-Strength Steel (Grade 1), Inches | High-Strength Steel (Grade 2), Inches | Extra High-Strength Steel (Grade 3), Inches |
| U6 | 150 | 3 | 1060 | 150 | 7/8 | 3/4 | |
| U7 | 175 | 3 | 1255 | 165 | 15/16 | 13/16 | |
| U8 | 205 | 3 | 1455 | 165 | 1 | 7/8 | 13/16 |
| U9 | 240 | 3 | 1720 | 180 | 1-1/8 | 15/16 | 7/8 |
| U10 | 280 | 3 | 1965 | 195 | 1-3/16 | 1 | 15/16 |
| U11 | 320 | 3 | 2250 | 195 | 1-1/4 | 1-1/8 | 15/16 |
| U12 | 360 | 3 | 2510 | 210 | 1-5/16 | 1-3/16 | 1 |
| U13 | 400 | 3 | 2840 | 210 | 1-7/16 | 1-1/4 | 1-1/8 |
| U14 | 450 | 3 | 3170 | 225 | 1-1/2 | 1-5/16 | 1-3/16 |
| U15 | 500 | 3 | 3500 | 225 | 1-9/16 | 1-5/16 | 1-3/16 |
| U16 | 550 | 3 | 3830 | 240 | 1-5/8 | 1-7/16 | 1-1/4 |
| U17 | 600 | 3 | 4230 | 240 | 1-3/4 | 1-1/2 | 1-5/16 |
| U18 | 660 | 3 | 4630 | 240 | 1-13/16 | 1-9/16 | 1-7/16 |
| U19 | 720 | 3 | 5020 | 255 | 1-7/8 | 1-5/8 | 1-7/16 |
| U20 | 780 | 3 | 5420 | 255 | 2 | 1-3/4 | 1-1/2 |
| U21 | 840 | 3 | 5820 | 255 | 2-1/16 | 1-13/16 | 1-9/16 |
| U22 | 910 | 3 | 6260 | 270 | 2-1/8 | 1-7/8 | 1-5/8 |
| U23 | 980 | 3 | 6740 | 270 | 2-3/16 | 1-15/16 | 1-3/4 |
| U24 | 1050 | 3 | 7270 | 270 | 2-5/16 | 2 | 1-13/16 |
| U25 | 1140 | 3 | 7800 | 285 | 2-3/8 | 2-1/8 | 1-13/16 |
| U26 | 1220 | 3 | 8330 | 285 | 2-7/16 | 2-1/8 | 1-7/8 |
| U27 | 1300 | 3 | 8930 | 285 | 2-1/2 | 2-3/16 | 2 |
| U28 | 1390 | 3 | 9520 | 300 | 2-5/8 | 2-5/16 | 2 |
| U29 | 1480 | 3 | 10120 | 300 | 2-11/16 | 2-3/8 | 2-1/16 |
| U30 | 1570 | 3 | 10800 | 300 | 2-3/4 | 2-7/16 | 2-1/8 |
| U31 | 1670 | 3 | 11600 | 315 | 2-7/8 | 2-1/2 | 2-3/16 |
| U32 | 1790 | 3 | 12400 | 315 | 3 | 2-5/8 | 2-5/16 |
| U33 | 1930 | 3 | 13200 | 315 | 3-1/16 | 2-11/16 | 2-3/8 |
| U34 | 2080 | 3 | 14200 | 330 | 3-3/16 | 2-3/4 | 2-7/16 |
| U35 | 2230 | 3 | 15200 | 330 | 3-5/16 | 2-7/8 | 2-1/2 |
| U36 | 2380 | 3 | 16200 | 330 | 3-7/16 | 3 | 2-5/8 |
| U37 | 2530 | 3 | 17200 | 345 | 3-9/16 | 3-1/16 | 2-11/16 |
| U38 | 2700 | 3 | 18300 | 345 | 3-5/8 | 3-3/16 | 2-3/4 |
| U39 | 2870 | 3 | 19200 | 345 | 3-3/4 | 3-5/16 | 2-7/8 |
| U40 | 3040 | 3 | 20500 | 360 | 3-7/8 | 3-5/16 | 3 |



www.dcl-usa.com • email: sales@dcl-usa.com • Fax (504) 947-8557 • 1-800-228-7680

ABS Equipment Table

| EQUIPMENT FOR SELF-PROPELLED OCEAN-GOING STEEL VESSELS ¹ | | | | | | | |
|---|-------------------|----------------------|-------------------------|-----------------|---|---------------------------------------|---|
| Equipment Number | Equipment Number* | Stockless Bow Anchor | | | Chain Cable Stud Link Bower Chain | | |
| | | Number | Mass per Anchor, pounds | Length, fathoms | Diameter | | |
| | | | | | Normal-Strength Steel (Grade 1), Inches | High-Strength Steel (Grade 2), Inches | Extra High-Strength Steel (Grade 3), Inches |
| U41 | 3210 | 3 | 21600 | 360 | 3-15/16 | 3-7/16 | 3-1/16 |
| U42 | 3400 | 3 | 23100 | 360 | 4 | 3-9/16 | 3-1/16 |
| U43 | 3600 | 3 | 24500 | 375 | 4-1/8 | 3-5/8 | 3-3/16 |
| U44 | 3800 | 3 | 25800 | 375 | 4-1/4 | 3-3/4 | 3-5/16 |
| U45 | 4000 | 3 | 27100 | 375 | 4-3/8 | 3-7/8 | 3-7/16 |
| U46 | 4200 | 3 | 28400 | 390 | 4-1/2 | 3-15/16 | 3-7/16 |
| U47 | 4400 | 3 | 29800 | 390 | 4-5/8 | 4 | 3-9/16 |
| U48 | 4600 | 3 | 31100 | 390 | 4-3/4 | 4-1/8 | 3-5/8 |
| U49 | 4800 | 3 | 32400 | 405 | 4-3/4 | 4-1/4 | 3-3/4 |
| U50 | 5000 | 3 | 33900 | 405 | 4-7/8 | 4-3/8 | 3-7/8 |
| U51 | 5200 | 3 | 35500 | 405 | 5 | 4-3/8 | 3-7/8 |
| U52 | 5500 | 3 | 37200 | 405 | 5-1/8 | 4-1/2 | 3-15/16 |
| U53 | 5800 | 3 | 39200 | 405 | 5-1/8 | 4-5/8 | 4 |
| U54 | 6100 | 3 | 41400 | 405 | | 4-3/4 | 4-1/4 |
| U55 | 6500 | 3 | 44000 | 420 | | 4-7/8 | 4-3/8 |
| U56 | 6900 | 3 | 47400 | 420 | | 5 | 4-1/2 |
| U57 | 7400 | 3 | 50700 | 420 | | 5-1/8 | 4-5/8 |
| U58 | 7900 | 3 | 54000 | 420 | | 5-3/8 | 4-3/4 |
| U59 | 8400 | 3 | 57300 | 420 | | 5-5/8 | 5 |
| U60 | 8900 | 3 | 60600 | 420 | | 5-3/4 | 5-1/8 |
| U61 | 9400 | 3 | 63900 | 420 | | 6 | 5-1/8 |
| U62 | 10000 | 3 | 68000 | 420 | | | 5-3/8 |
| U63 | 10700 | 3 | 72500 | 420 | | | 5-5/8 |
| U64 | 11500 | 3 | 78000 | 420 | | | 5-3/4 |
| U65 | 12400 | 3 | 85000 | 420 | | | 6 |
| U66 | 13400 | 3 | 92500 | 420 | | | 6-1/8 |
| U67 | 14600 | 3 | 101500 | 420 | | | 6-3/8 |

¹ For intermediate values of equipment number use equipment complement in sizes and weights given for the lower equipment number in the table.

² American Bureau of Shipping (1998). *Rules for Building and Classing Steel Vessels 1998-1999, Part 3 Hull Construction and Equipment*, pp. 140-141.

The requirements as contained in this table are subject to change.



www.dcl-usa.com • email: sales@dcl-usa.com • Fax (504) 947-8557 • 1-800-228-7880

TABLE 2
Shackle-Link Anchor-chain Proof and Break Tests

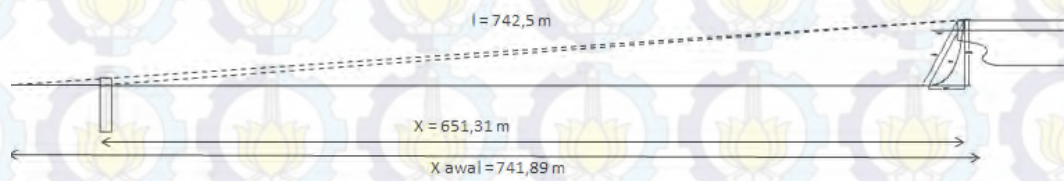
| | Normal Strength Grade 1 | | | | High Strength Grade 2 | | | | Ultra-high Strength Grade 3 | | | | | | | |
|------|-------------------------|------------------------|---------------|------------------|-----------------------|------------------------|---------------|------------------|-----------------------------|------------------------|---------------|------------------|--------|---------|---------|-------|
| | Chain Diameter mm | Length of Rise Link mm | Proof Load kN | Breaking Load kN | Chain Diameter mm | Length of Rise Link mm | Proof Load kN | Breaking Load kN | Chain Diameter mm | Length of Rise Link mm | Proof Load kN | Breaking Load kN | | | | |
| 12.5 | 25 | 86.1 | 65.7 | 92.2 | 92.2 | 92.2 | 92.2 | 110 | 70 | 1540 | 1298.5 | 1843.7 | 1943.7 | 2579.1 | 3673.3 | 2880 |
| 14 | 30 | 77.9 | 82.4 | 115.7 | 115.7 | 115.7 | 115.7 | 130 | 73 | 1606 | 1392.5 | 1990.7 | 1990.7 | 2798.9 | 3991.3 | 3180 |
| 16 | 32 | 75.5 | 106.9 | 150.0 | 150.0 | 150.0 | 150.0 | 170 | 76 | 1672 | 1500.6 | 2147.6 | 2147.6 | 3010.6 | 4295.3 | 3470 |
| 17.5 | 35 | 89.3 | 127.5 | 179.5 | 179.5 | 179.5 | 179.5 | 180 | 78 | 1716 | 1578.9 | 2235.5 | 2235.5 | 3157.7 | 4513.3 | 3690 |
| 19 | 41.8 | 104.9 | 150.0 | 210.8 | 210.8 | 210.8 | 210.8 | 220 | 81 | 1782 | 1686.7 | 2412.4 | 2412.4 | 3383.3 | 4824.9 | 3960 |
| 20.5 | 41 | 122.6 | 174.6 | 244.2 | 244.2 | 244.2 | 244.2 | 260 | 84 | 1848 | 1804.4 | 2579.1 | 2579.1 | 3608.8 | 5188.3 | 4250 |
| 22 | 44 | 146.2 | 200.1 | 286.5 | 286.5 | 286.5 | 286.5 | 300 | 87 | 1914 | 1922.1 | 2745.9 | 2745.9 | 3854.0 | 5515.3 | 4600 |
| 24 | 52.8 | 166.7 | 237.5 | 332.4 | 332.4 | 332.4 | 332.4 | 340 | 90 | 1980 | 2049.6 | 2922.4 | 2922.4 | 4089.4 | 5844.8 | 4800 |
| 26 | 57.2 | 194.2 | 277.5 | 389.3 | 389.3 | 389.3 | 389.3 | 420 | 92 | 2024 | 2128.0 | 3040.1 | 3040.1 | 4261.1 | 6000.1 | 5100 |
| 28 | 61.6 | 224.6 | 320.7 | 449.1 | 449.1 | 449.1 | 449.1 | 480 | 95 | 2090 | 2252.5 | 3226.4 | 3226.4 | 4511.0 | 6443.0 | 5400 |
| 30 | 66.0 | 254.9 | 367.7 | 513.9 | 513.9 | 513.9 | 513.9 | 550 | 97 | 2134 | 2343.8 | 3344.1 | 3344.1 | 4677.8 | 6838.1 | 5670 |
| 32 | 70.4 | 291.3 | 416.8 | 582.5 | 582.5 | 582.5 | 582.5 | 610 | 98 | 2156 | 2383.0 | 3402.9 | 3402.9 | 4766.0 | 7083.6 | 5750 |
| 34 | 74.8 | 327.8 | 467.8 | 655.1 | 655.1 | 655.1 | 655.1 | 700 | 100 | 2200 | 2471.3 | 3530.4 | 3530.4 | 4942.6 | 7460.8 | 6000 |
| 36 | 79.2 | 363.8 | 522.7 | 731.6 | 731.6 | 731.6 | 731.6 | 800 | 102 | 2244 | 2559.5 | 3637.9 | 3637.9 | 5119.1 | 7815.8 | 6200 |
| 38 | 83.6 | 400.0 | 580.6 | 812.0 | 812.0 | 812.0 | 812.0 | 880 | 105 | 2310 | 2696.8 | 3834.0 | 3834.0 | 5393.7 | 8298.2 | 6600 |
| 40 | 88.0 | 448.2 | 640.4 | 896.3 | 896.3 | 896.3 | 896.3 | 970 | 107 | 2354 | 2785.1 | 3981.5 | 3981.5 | 5570.2 | 8663.0 | 6820 |
| 42 | 92.4 | 492.3 | 703.1 | 980.7 | 980.7 | 980.7 | 980.7 | 1070 | 108 | 2376 | 2834.1 | 4040.3 | 4040.3 | 5638.4 | 8904.4 | 6950 |
| 44 | 96.8 | 538.4 | 768.8 | 1078.7 | 1078.7 | 1078.7 | 1078.7 | 1170 | 110 | 2442 | 2971.4 | 4246.3 | 4246.3 | 5923.8 | 9453.8 | 7250 |
| 46 | 101.2 | 583.5 | 836.5 | 1167.0 | 1167.0 | 1167.0 | 1167.0 | 1270 | 114 | 2508 | 3103.7 | 4442.4 | 4442.4 | 6227.2 | 9994.6 | 7600 |
| 48 | 105.6 | 633.5 | 908.1 | 1278.9 | 1278.9 | 1278.9 | 1278.9 | 1380 | 117 | 2574 | 3235.8 | 4648.4 | 4648.4 | 6511.6 | 10598.7 | 7900 |
| 50 | 110.0 | 688.5 | 980.7 | 1372.9 | 1372.9 | 1372.9 | 1372.9 | 1480 | 120 | 2640 | 3492.9 | 4854.3 | 4854.3 | 6805.8 | 11184.4 | 8210 |
| 52 | 114.4 | 739.8 | 1059.1 | 1480.8 | 1480.8 | 1480.8 | 1480.8 | 1600 | 122 | 2684 | 3501.0 | 5001.4 | 5001.4 | 7001.9 | 11801.9 | 8620 |
| 54 | 118.8 | 798.3 | 1137.6 | 1588.7 | 1588.7 | 1588.7 | 1588.7 | 1720 | 124 | 2728 | 3599.0 | 5138.7 | 5138.7 | 7198.1 | 12577.4 | 8900 |
| 56 | 123.2 | 851.2 | 1216.0 | 1706.4 | 1706.4 | 1706.4 | 1706.4 | 1850 | 127 | 2794 | 3746.1 | 5354.4 | 5354.4 | 7492.3 | 13308.9 | 9280 |
| 58 | 127.6 | 909.1 | 1294.5 | 1814.2 | 1814.2 | 1814.2 | 1814.2 | 1990 | 130 | 2860 | 3903.0 | 5570.2 | 5570.2 | 7796.3 | 14140.4 | 9840 |
| 60 | 132.0 | 968.9 | 1382.7 | 1941.7 | 1941.7 | 1941.7 | 1941.7 | 2120 | 132 | 2904 | 4001.1 | 5717.3 | 5717.3 | 8002.2 | 14924.7 | 10440 |
| 62 | 136.4 | 1029.7 | 1471.0 | 2036.4 | 2036.4 | 2036.4 | 2036.4 | 2260 | 137 | 3014 | 4230.1 | 6001.4 | 6001.4 | 8312.2 | 15760.2 | 10910 |
| 64 | 140.8 | 1098.3 | 1559.3 | 2186.9 | 2186.9 | 2186.9 | 2186.9 | 2400 | 142 | 3124 | 4520.9 | 6432.8 | 6432.8 | 8631.9 | 16705.6 | 11670 |
| 66 | 145.2 | 1157.2 | 1637.3 | 2318.4 | 2318.4 | 2318.4 | 2318.4 | 2560 | 147 | 3234 | 4785.6 | 6833.2 | 6833.2 | 8961.3 | 17660.7 | 12440 |
| 68 | 149.6 | 1225.8 | 1745.6 | 2481.7 | 2481.7 | 2481.7 | 2481.7 | 2730 | 152 | 3344 | 5030.4 | 7217.7 | 7217.7 | 9310.8 | 18632.6 | 13300 |
| | | | | 2631.7 | 2631.7 | 2631.7 | 2631.7 | | 157 | 3454 | 5325.0 | 7600.2 | 7600.2 | 9660.2 | 19645.3 | 14100 |
| | | | | | | | | | 162 | 3564 | 5599.6 | 8002.2 | 8002.2 | 10022.2 | 20694.6 | 14910 |

Note: The weight of chain is not to be more than 2% under the weight specified.

LAMPIRAN D Perhitungan *Catenary Anchor Chain*

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

| | | |
|----|------------------------------|------------|
| l: | panjang keseluruhan | 742,5 m |
| h: | kedalaman ditambah freeboard | 29,875 m |
| a: | T/w | 31,9997 |
| T: | MBL | 8482,8 kN |
| W: | berat chain | 265,090 kg |



Sumber : *Sea Loads on Ships and Offshore Structures*
(O.M. Faltinsen)

LAMPIRAN E Perhitungan Konstruksi *Forecastle Deck*

Ukuran Utama

$$\begin{aligned} L &= 272.68 \\ B &= 43.4 \\ H &= 20.6 \\ T &= 15.75 \\ C_b &= 0.83 \end{aligned}$$

Beban Dinamis

$$\begin{aligned} P_0 &= 2,1 \cdot (C_B + 0,7) \cdot C_0 \cdot C_L \cdot f \cdot C_{RW} \quad [\text{kN/m}^2] && \text{BKl sec} \\ &= 2,6 (C_b + 0,7) \cdot C_0 \cdot C_L \cdot f \cdot C_{RW} && 4 \\ P_{01} &= C_0 \cdot C_L \quad [\text{kN/m}^2] \\ C_0 &= [10,75 - (300 - L/100)^{1,5}] C_{RW} && \text{untuk } 90 \leq L \leq 300 \\ &= [10,75 - (300 - 272,68/100)^{1,5}] \cdot 0,75 \\ C_0 &= 7,96 \\ f &= 1,00 && \text{Untuk Pelat} \\ f &= 0,75 && \text{Untuk Penegar} \\ f &= 0,60 && \text{Untuk Penumpu} \\ C_L &= 1,74 && \text{Untuk } L < 90\text{m} \quad \sqrt{L/90} \\ C_{RW} &= 0,75 && \text{Pelayaran Lokal} \end{aligned}$$

Maka

$$\begin{aligned} P_0 &= 2,1 (0,78 + 0,7) \times 7,96 \times 1,74 \times 1 \times 0,75 \quad [\text{kN/m}^2] \\ &= 33,37 \quad [\text{kN/m}^2] \quad \text{Pelat} \\ P_0 &= 2,1 (0,78 + 0,7) \times 7,96 \times 1,74 \times 0,75 \times 0,75 \quad [\text{kN/m}^2] \\ &= 25,03 \quad [\text{kN/m}^2] \quad \text{Penegar} \\ P_0 &= 2,1 (0,78 + 0,7) \times 7,96 \times 1,74 \times 0,6 \times 0,75 \quad [\text{kN/m}^2] \\ &= 20,02 \quad [\text{kN/m}^2] \quad \text{Penumpu} \\ \text{dan} \\ P_{01} &= 2,6 (0,78 + 0,7) \times 7,05 \times 1 \quad [\text{kN/m}^2] \\ &= 55,08 \quad [\text{kN/m}^2] \end{aligned}$$

Beban Pada Sisi Kapal (pelat)

* Di bawah garis air :

$$\begin{aligned} P_s &= 10 (T - Z) + P_0 \times C_f \times (1 + Z / T) \\ P_{s1} &= 10(T-Z) + P_{01}(1+(Z/T)) \times 2 \times |y|/B \end{aligned}$$

* Di atas garis air :

$$P_s = P_0 \times C_f \times 20 / (10 + Z - T)$$

$$P_{s2} = P_{01} \times 20 / (5 + Z - T) \times |y|/B$$

dimana :

$$P_0 = 33.37 \text{ kN/m}^2 \text{ Pelat}$$

$$P_0 = 25.03 \text{ kN/m}^2 \text{ Penegar}$$

$$P_0 = 20.02 \text{ kN/m}^2 \text{ Penumpu}$$

$$P_{01} = 55.08 \text{ kN/m}^2$$

Untuk C_f pada F ($0.7 < X/L \leq 1$)

$$C_f = 1.0 + 20 \times (X/L - 0.7)^2 / C_b \quad X/L \text{ diambil } 0.90L$$

$$= 1.0 + 20 \times (0.9 - 0.7)^2 / 0.83$$

$$= 1.96$$

Beban sisi untuk daerah $0.7 \leq X/L \leq 1$

$$\# \quad z_1 = 19.90 \text{ m} \quad (\text{diatas garis air})$$

$$P_s(z_1) = 33.37 \times 1.96 \times 20 / (10 + 19.90 - 15.75)$$

$$= 92.62 \text{ [kN/m}^2]$$

$$y_1 = 14.70 \text{ m}$$

$$P_{s1}(y_1) = 55.08 \times 20 / (5 + 19.90 - 17.75) \times |15.8| /$$

$$43.4$$

$$= 40.78 \text{ [kN/m}^2]$$

$$\# \quad z_2 = 21.30 \text{ m} \quad (\text{diatas garis air})$$

$$P_s(z_2) = 33.37 \times 1.96 \times 20 / (10 + 19.90 - 15.75)$$

$$= 84.28 \text{ [kN/m}^2]$$

$$y_2 = 15.80 \text{ m}$$

$$P_{s1}(y_2) = 55.08 \times 20 / (5 + 19.90 - 17.75) \times |15.8| /$$

$$43.4$$

$$= 38.02 \text{ [kN/m}^2]$$

Beban Pada Geladak Cuaca (P_d)

Ditentukan dengan rumus :

$$P_d = \frac{(P_0 \times 20 \times T) / ((10 + Z - T)H) \times C_d}{C_d}$$

$$P_d \text{ min} = 16 \times f$$

$$= 16.00 \text{ kN/m}^2 \quad (\text{pelat})$$

$$= 12.00 \text{ kN/m}^2 \quad (\text{penegar})$$

$$= 9.60 \text{ kN/m}^2 \quad (\text{penumpu})$$

$$\begin{aligned}
 P_d \text{ min} &= 0.7 \times P_o \\
 &= 23.36 \text{ kN/m}^2 \text{ (pelat)} \\
 &= 17.52 \text{ kN/m}^2 \text{ (penegar)} \\
 &= 14.01 \text{ kN/m}^2 \text{ (penumpu)}
 \end{aligned}$$

untuk Cd Pada F ($0.7 < X/L < 1$) pada Gd 111-144 X/L diambil 0.90

$$\begin{aligned}
 C_d &= 1.0 + c/3 (X/L - 0.7) \quad (c=0.15 L-10) \\
 &= 1 + (0.15 \times 100 - 10)/3 ((0.9-0.7)) \quad L \text{ min} = 100 \text{ m} \\
 &= 1.33 \quad L \text{ max} = 250 \text{ m} \\
 z &= 20.6 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Beban geladak cuaca untuk daerah $0.7 \leq X/L \leq 1$ atau pada gading 111 - 144

$$\begin{aligned}
 P_{D1} &= (33.37 \times 20 \times 15.75 \times 1.33) / ((10 + 22.46 - 17.75) 20.6) \\
 &= 45.81 \text{ kN/m}^2 \text{ (pelat)} \\
 P_{D2} &= (25.03 \times 20 \times 15.75 \times 1.33) / ((10 + 22.46 - 17.75) 20.6) \\
 &= 34.36 \text{ kN/m}^2 \text{ (penegar)} \\
 P_{D3} &= (20.02 \times 20 \times 15.75 \times 1.33) / ((10 + 22.46 - 17.75) 20.6) \\
 &= 27.49 \text{ kN/m}^2 \text{ (penumpu)}
 \end{aligned}$$

Beban Pada Geladak Bangunan Atas dan Rumah Geladak

$$P_{DA} = P_D \cdot n \text{ kN/m}^2$$

Dari halaman sebelumnya telah diperoleh sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 P_D &= 45.81 \text{ kN/m}^2 \text{ (pelat)} \\
 P_D &= 34.36 \text{ kN/m}^2 \text{ (penegar)} \\
 P_D &= 27.49 \text{ kN/m}^2 \text{ (penumpu)} \\
 n &= 1 - [(z - H)/10] ; n_{\text{min}} = 0,5
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_{DA \text{ min}} &= 4 \text{ kN/m}^2 \\
 \# \quad z &= 6.5 + 2.5 \\
 &= 22.60 \text{ m} \\
 n \text{ forecastle} &= 1 \\
 &= 1
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_{DA1} &= 45.81 \times 1 \text{ (pelat)} \\
 &= 45.81 \text{ kN/m}^2 \\
 P_{DA2} &= 34.36 \times 1 \text{ (penegar)} \\
 &= 34.36 \text{ kN/m}^2 \\
 P_{DA3} &= 27.49 \times 1 \text{ (penumpu)} \\
 &= 27.49 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

Tebal Pelat Sisi Pada Forecastle

$$\begin{aligned} \emptyset P_s &= 92.62 \quad [\text{kN/m}^2] \quad (\text{hal 13}) \\ t &= 1,21 \cdot 0,7 (\sqrt{92.62 \times 1}) + t_k \quad [\text{mm}] \\ &= 6.99 + t_k \\ t_k &= 1.50 \quad \text{mm} \\ t &= 8.49 \quad \text{mm} \\ t \text{ diambil} &= 10.00 \quad \text{mm} \end{aligned}$$

Tebal Pelat Geladak Forecastle deck

$$\begin{aligned} t &= C \cdot a \sqrt{p \cdot k} \\ C &= 1.21 \quad \text{jika } p = p_{DA} \\ &= 1.10 \quad \text{jika } p = p_L \\ P &= P_{DA} = 45.81 \quad \text{KN/m}^2 \quad (\text{hal 10}) \\ &= 1.21 \times 0.7 \sqrt{(24.43 \times 1)} \\ t_1 &= 6.41 \\ t_1 &= 6.41 \quad \text{mm} \\ t_{\min} &= 10.95 \quad \text{mm} \\ t \text{ diambil} &= 11.00 \quad \text{mm} \sim \begin{matrix} 12 \text{ mm} & \text{pelat geladak} \\ & \text{corrothion} \\ & \text{allowance} \\ & 2 \text{ mm} \\ & 14 \text{ mm} \end{matrix} \end{aligned}$$

Gading Biasa Pada Forecastle

$$\begin{aligned} \# \quad z_1 &= 19.90 \quad \text{m} \quad (\text{diatas garis air}) & a &= 0.7 \\ P_s(z_1) &= 12.00 \times 1.96 \times 20 / (10 + 19.90 - 15.75) & l &= 2 \\ &= 55.57 \quad [\text{kN/m}^2] & C_r &= 0.75 \\ y_1 &= 14.70 \quad \text{m} & k &= 1 \\ P_{s1}(y_1) &= 12.00 \times 20 / (5 + 19.90 - 17.75) \times |15.8| / \\ &= 43.4 & & \\ &= 40.78 \quad [\text{kN/m}^2] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_s \\ \text{diambil} &= 55.57 \quad \text{kN/m}^2 \end{aligned}$$

sehingga modulus gading dapat dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned} W &= 0,55 \cdot a \cdot l^2 \cdot P_s \cdot C_r \cdot k \\ &= 0.55 \times 0.7 \times 2.0^2 \times 55.57 \times 0.75 \times 1 \\ &= 55.02 \quad \text{cm}^3 \end{aligned}$$

Pemilihan profil:

BKI 2006. Annex, A-5

Profile : L 90x60x8

Modulus : 57 cm³

Balok Biasa Forecastle deck

Modulus balok geladak tidak boleh kurang dari:

$$W = c \times a \times P \times \ell^2 \times k \quad \text{sec} \quad 15/16$$

Dimana :

c = 0.75 untuk balok geladak

a = 0.7 Jarak Gading (jarak balok geladak)

P = P_{DA} = Beban pada geladak (untuk balok geladak)

ℓ = panjang balok geladak

k = 1

P_{DA} = 34.36 KN/m²

ℓ = 5.7 m

(asumsi ada 3 pembujur geladak)

sehingga modulus balok biasa :

$$\begin{aligned} W &= c \times a \times P_{DA} \times \ell^2 \\ &= 0.75 \times 0.7 \times 34.36 \times 5.67^2 \\ &= 496.51 \quad \text{cm}^3 \end{aligned}$$

Pemilihan profil:

BKI 2007, Annex,A - 7

Profile : L 250x90x14

kecil

Modulus : 250 cm³

Balok Besar Forcastle Deck

Modulus balok geladak besar tidak boleh kurang dari

$$W = \frac{c \cdot e \cdot \ell^2 \cdot P}{k}$$

Dimana,

c = 0.55

e = jarak balok besar

= 2.1 m (3 jarak gading) --> dari konspro

$$\ell = 17 \text{ m}$$

$P = P_{DA} =$ Beban pada geladak (untuk balok geladak)

$$k = 1$$

$$P_{DA} = 27.49 \text{ KN/m}^2$$

$$\ell = 5.56 \text{ m}$$

sehingga modulus balok besar :

$$W = \frac{c.e.\ell^2.P}{k} \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$= 0.55 \times 2.1 \times 5.56^2 \times 27.49 \times 1$$

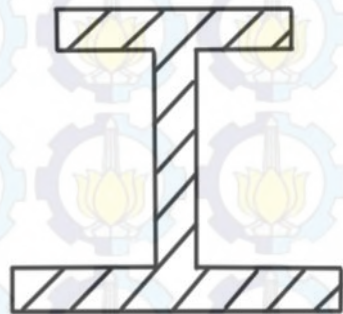
$$= 841.26 \text{ cm}^3$$

Perancangan profil (BKI 2006 bab 3)

$$\ell/e = 9.4$$

$$em1 = 1.98 \text{ (interpolasi)}$$

$$\text{lebar efektif} = em1 \times e = 3564 \text{ mm}$$



$$125 \times 10$$

$$200 \times 10$$

$$3564 \times 12$$

$$F = 42768$$

$$f = 1250$$

$$f_s = 2000$$

$$f/F = 0.03$$

$$f_s/F = 0.05$$

$$w = 0.1 \text{ (dari grafik modulus section BKI 2006 Annex A12)}$$

$$W = w.F.h$$

$$= 855.36 \text{ cm}^3 \text{ (Memenuhi)}$$

$$A = 2000 \text{ mm}^2$$

$$= 20 \text{ cm}^2$$

Pemilihan profil:

BKI 2006, Annex, A - 6

Profile : T 200x125x10

besar

Modulus : 855.36 cm³

Penumpu Geladak Forecastle

Modulus penumpu geladak tidak boleh kurang dari:

$$W = c.e.\ell^2.P.k$$

dimana,

$$c = 0.55$$

jarak antara

$$e = \text{penumpu}$$

$$\ell = \text{Panjang penumpu (unsupported span)}$$

$$P = P_{DA} = \text{Beban pada geladak bangunan atas}$$

$$k = 1$$

$$P_{DA} = 14.66 \text{ KN/ m}^2$$

$$e = 3.95 \text{ m}$$

$$\ell = 3 \text{ m}$$

sehingga modulus penumpu tengah geladak :

$$W = c.e.\ell^2.P.k \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$= 0.55 \times 3.95 \times 3.0^2 \times 14.66 \times 1$$

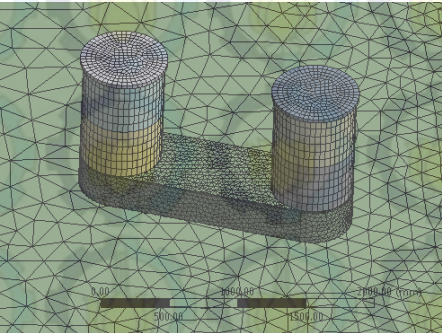
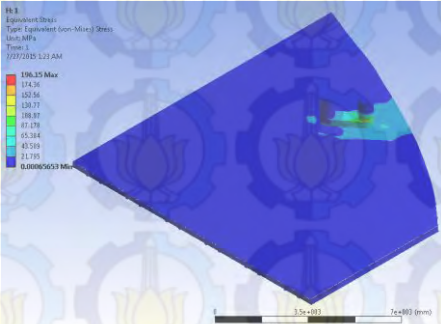
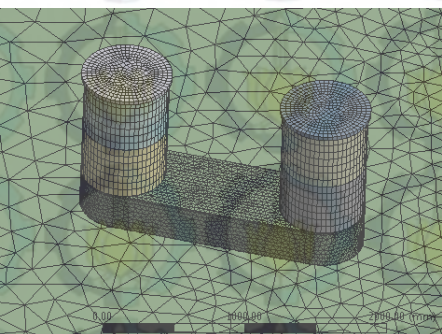
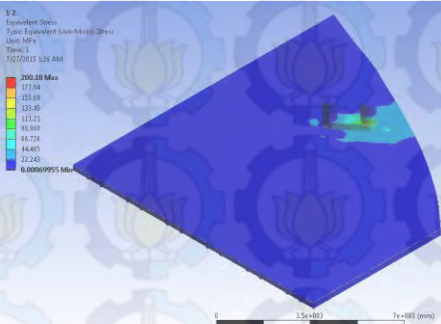
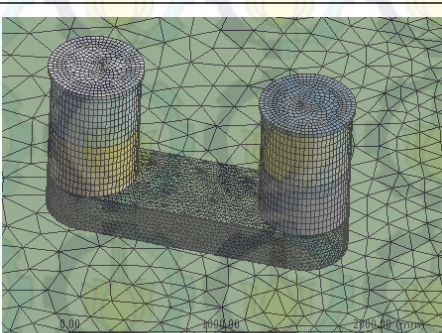
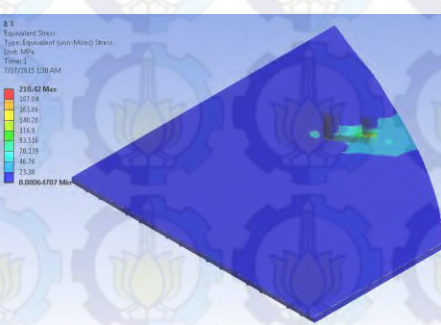
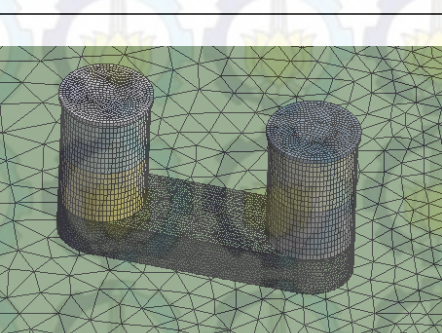
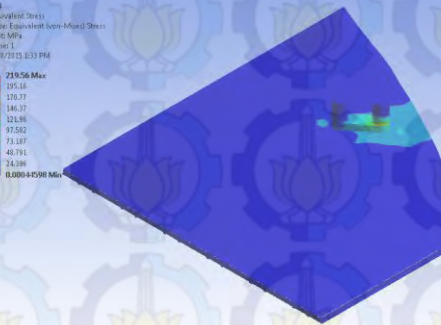
$$= 286.66 \text{ cm}^3$$

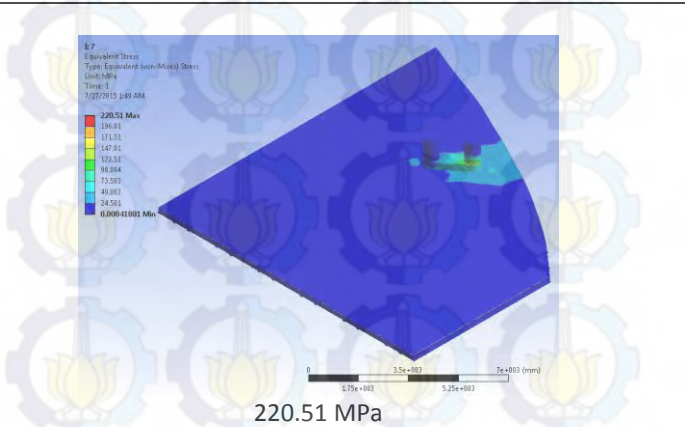
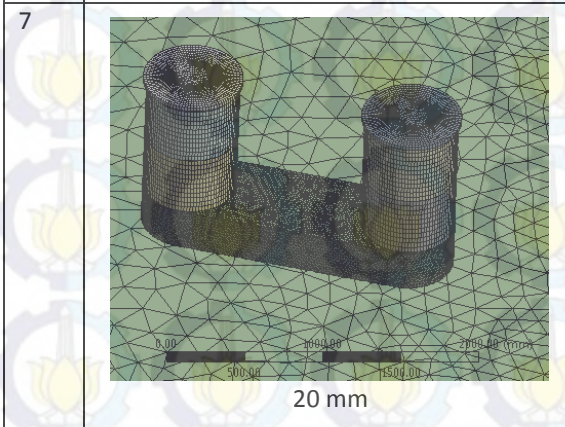
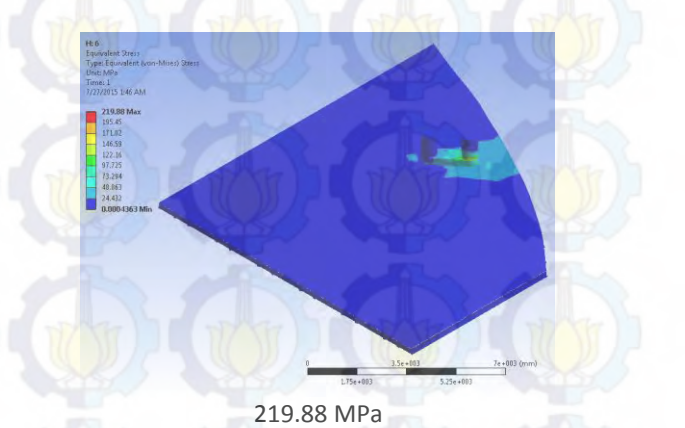
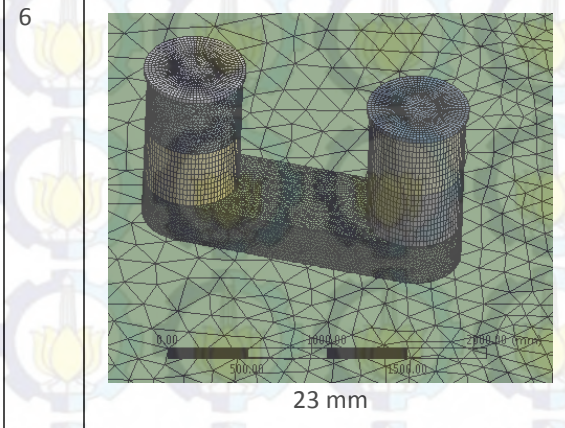
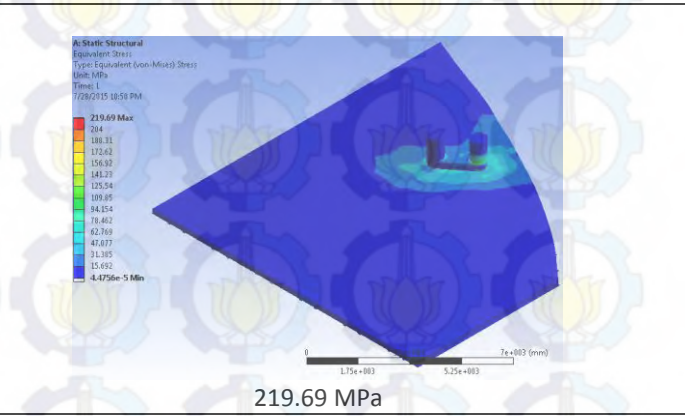
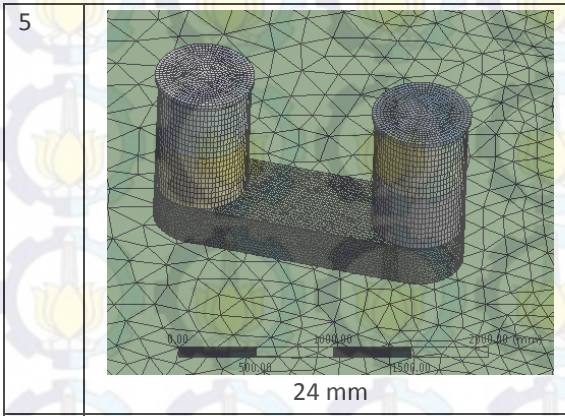
Pemilihan profil:

Profile : L 180x90x12

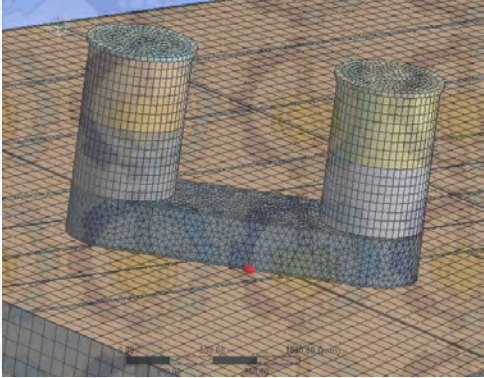
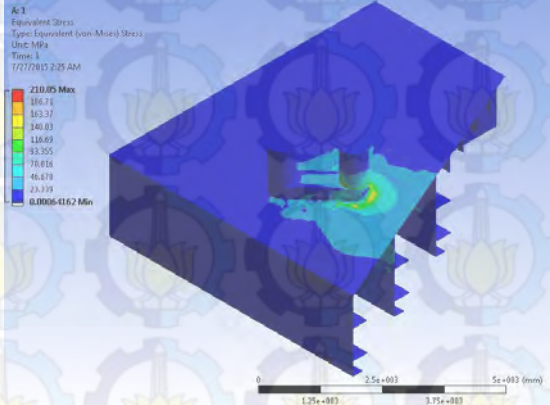
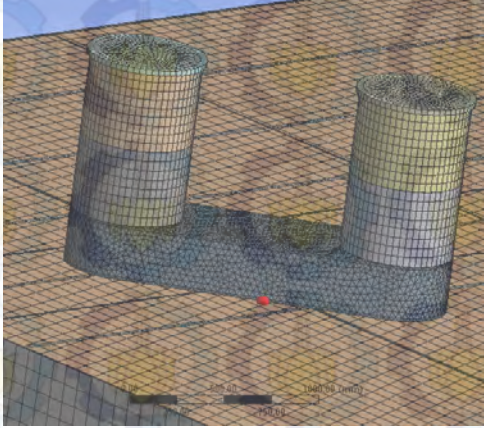
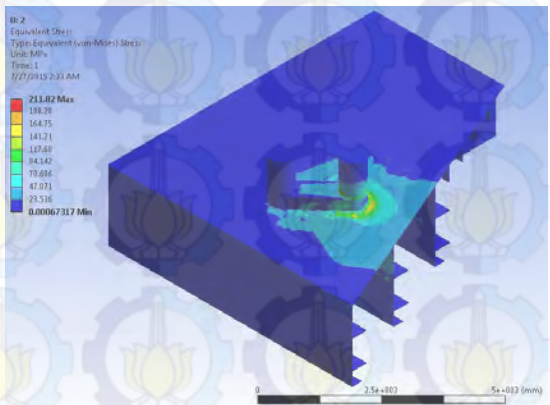
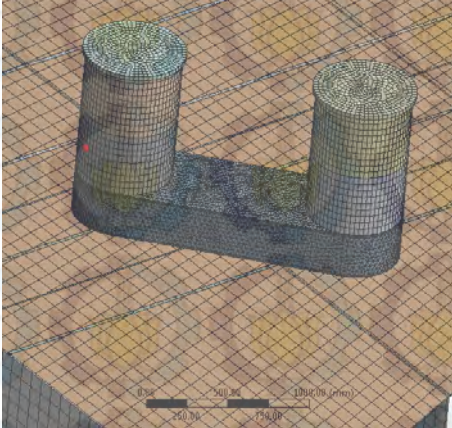
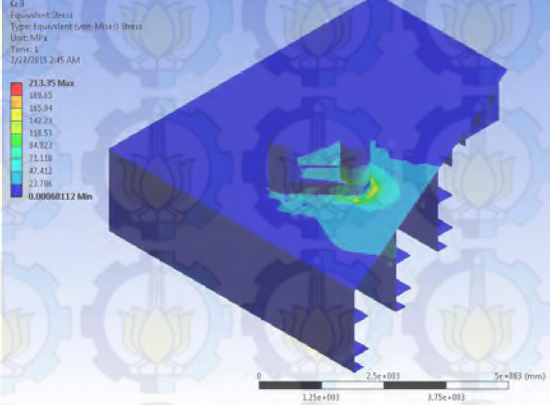
Modulus : 290 cm^3

LAMPIRAN F *Mesh Sensitivity*
Mesh Sensitivity Bollard Depan

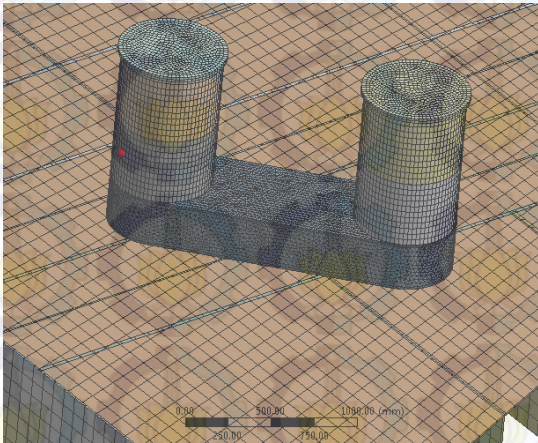
| No | Mesh | Stress |
|----|--|--|
| 1 |  <p data-bbox="464 703 544 730">40 mm</p> |  <p data-bbox="1054 703 1187 730">196.15 MPa</p> |
| 2 |  <p data-bbox="464 1093 544 1120">35 mm</p> |  <p data-bbox="1054 1115 1187 1142">200.18 MPa</p> |
| 3 |  <p data-bbox="464 1509 544 1536">30 mm</p> |  <p data-bbox="1054 1527 1187 1554">210.42 MPa</p> |
| 4 |  <p data-bbox="464 1926 544 1953">25 mm</p> |  <p data-bbox="1054 1926 1187 1953">219.56 MPa</p> |



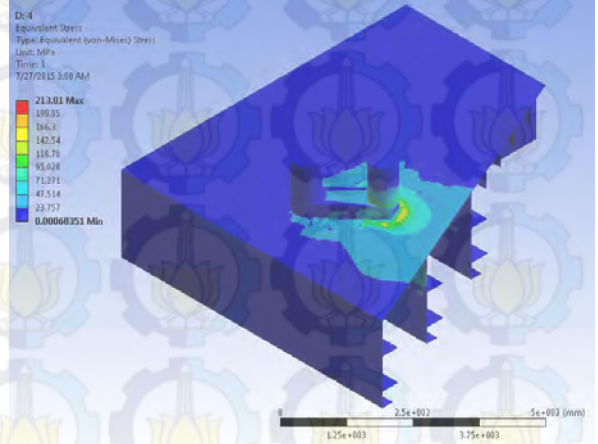
Mesh Sensitivity Bollard

| No | Mesh | Stress |
|----|--|--|
| 1 |  <p data-bbox="459 819 544 853">40 mm</p> |  <p data-bbox="1098 824 1235 857">210.05 MPa</p> |
| 2 |  <p data-bbox="459 1350 544 1384">35 mm</p> |  <p data-bbox="1098 1344 1235 1377">211.82 MPa</p> |
| 3 |  <p data-bbox="459 1872 544 1906">30 mm</p> |  <p data-bbox="1098 1854 1235 1888">213.35 MPa</p> |

4

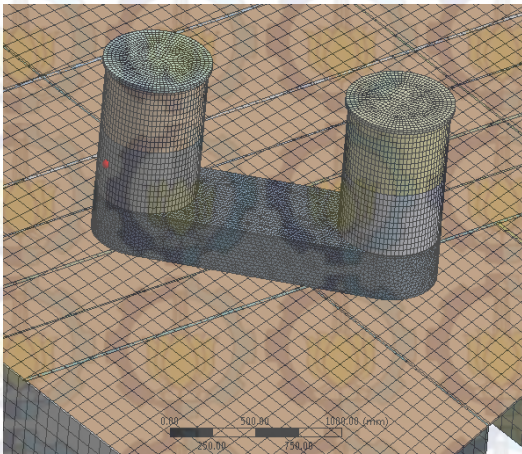


25 mm

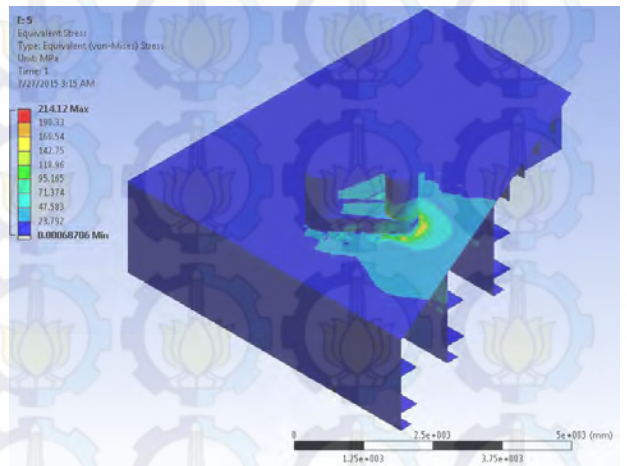


213.81 MPa

5

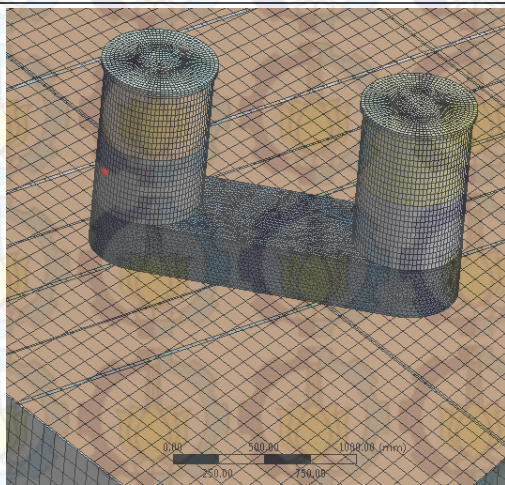


24 mm

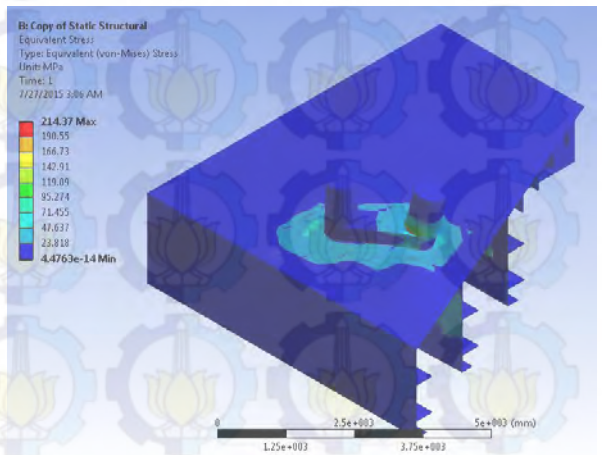


214.12 MPa

6

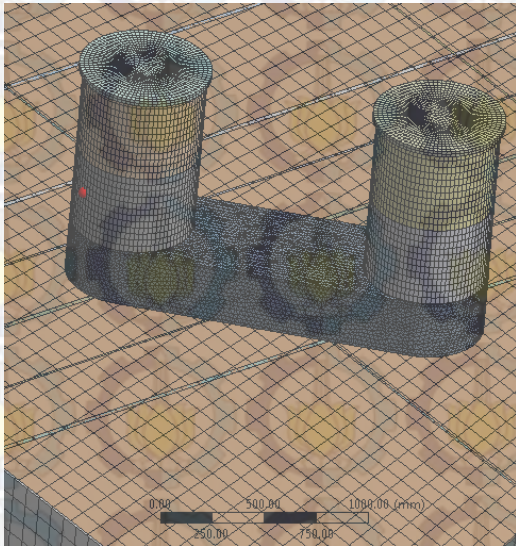


23 mm

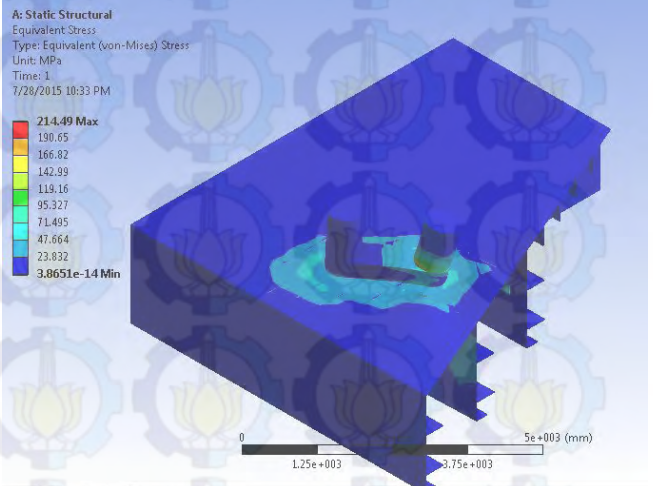


214.37 MPa

7

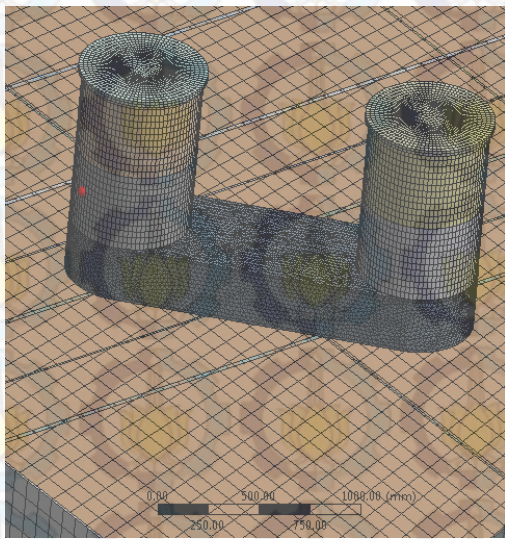


22 mm

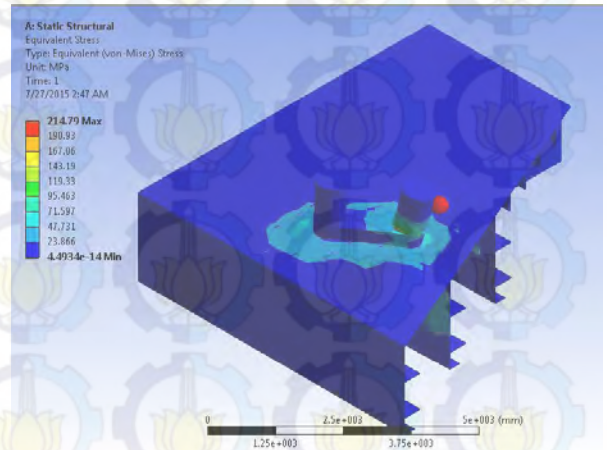


214.49 MPa

8

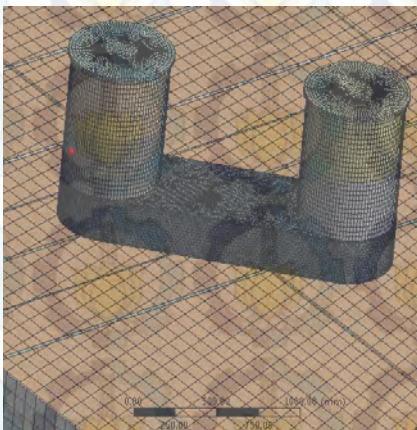


21 mm

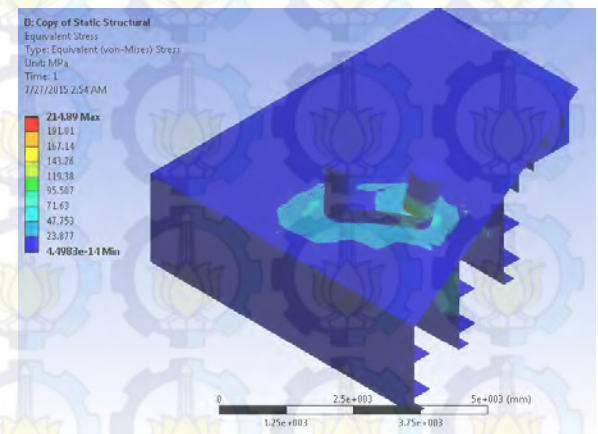


214.79 MPa

9



20 mm

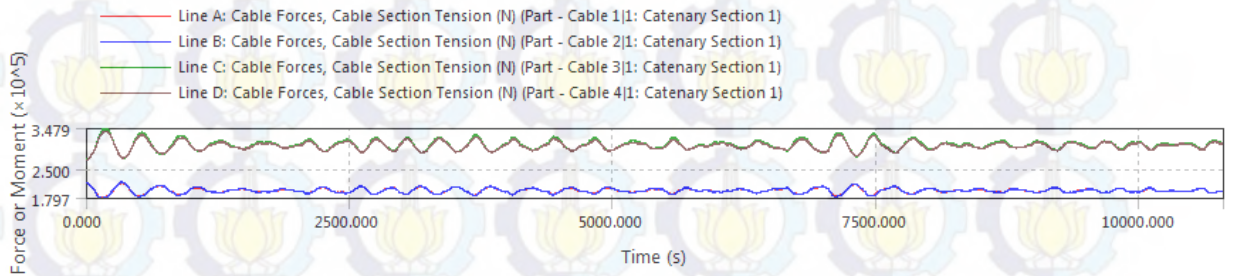


214.89 MPa

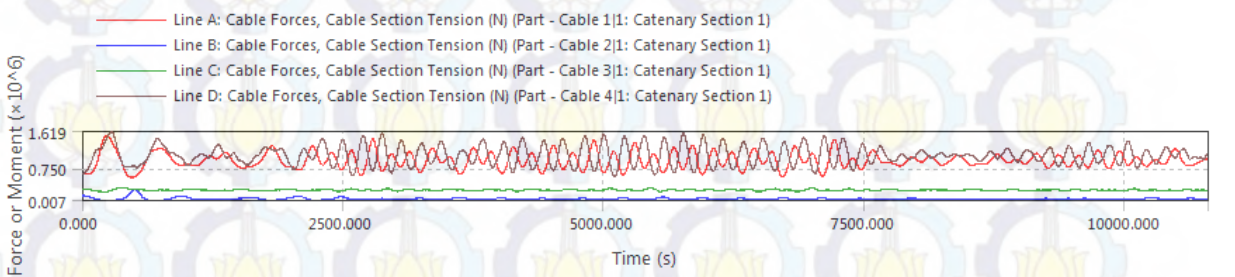
LAMPIRAN G Hasil *Maximum Tension Force* pada Rantai Jangkar

Kondisi *Full Load*

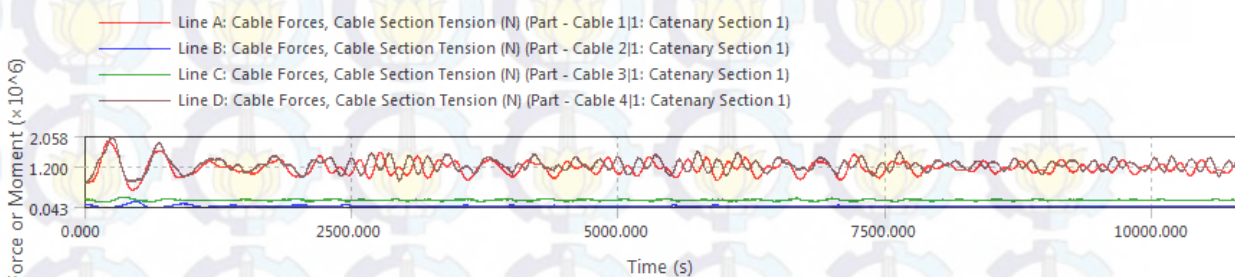
0°



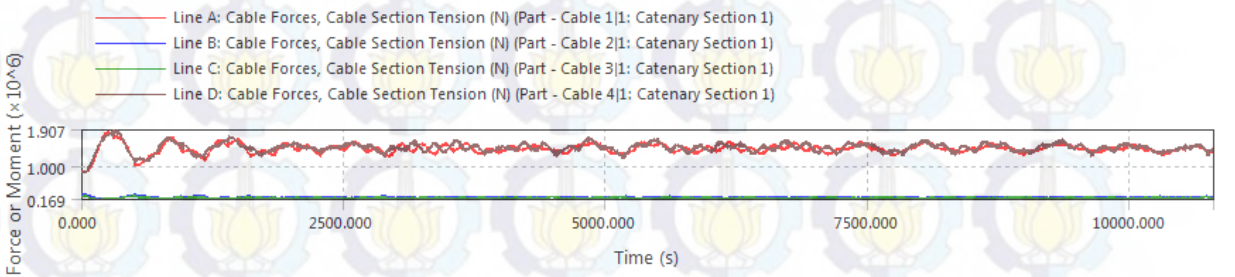
45°



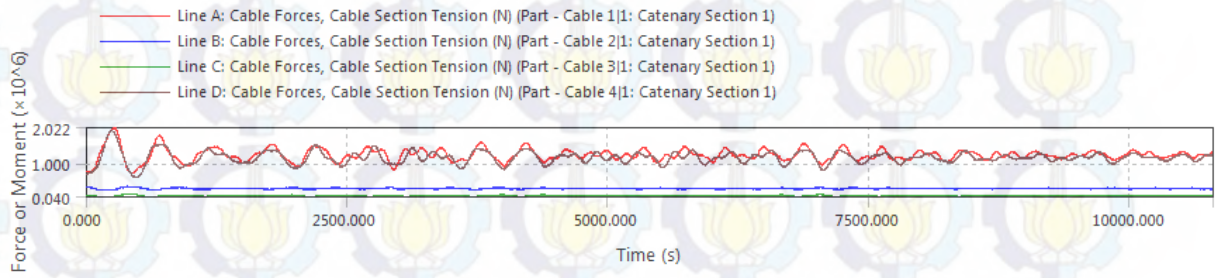
60°



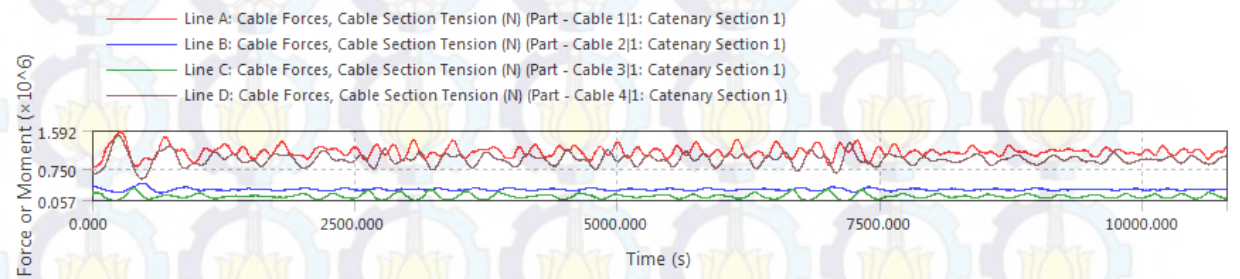
90°



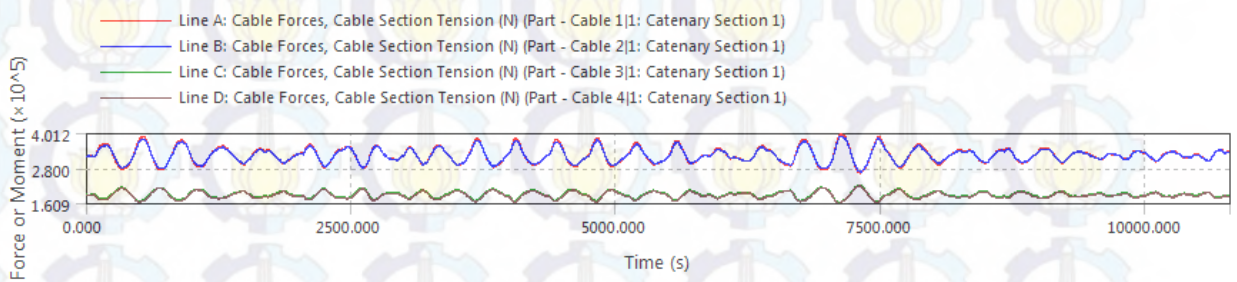
120°



135°

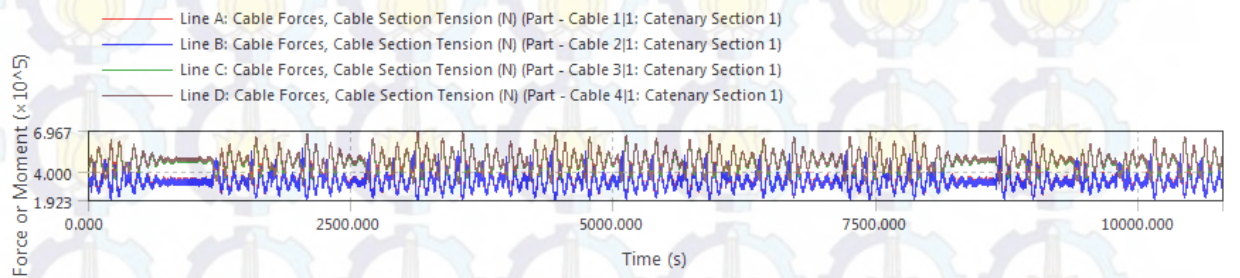


180°

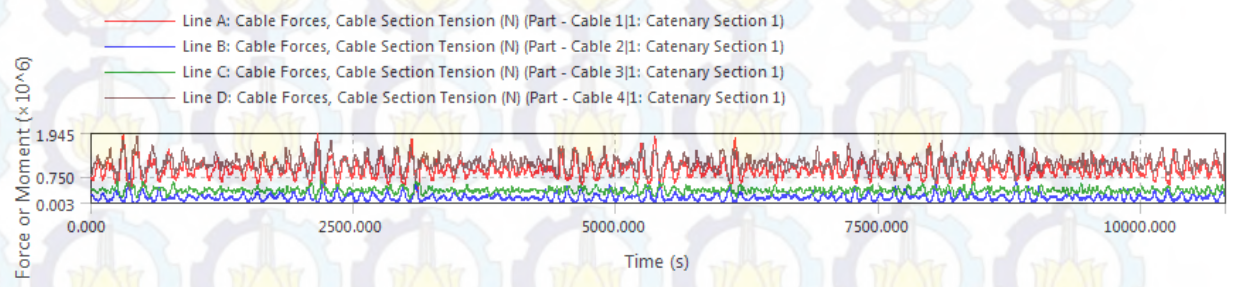


Kondisi Light Load

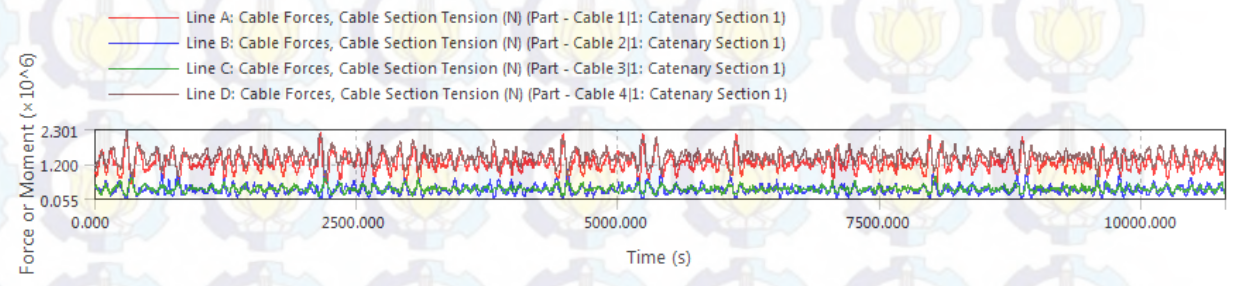
0°



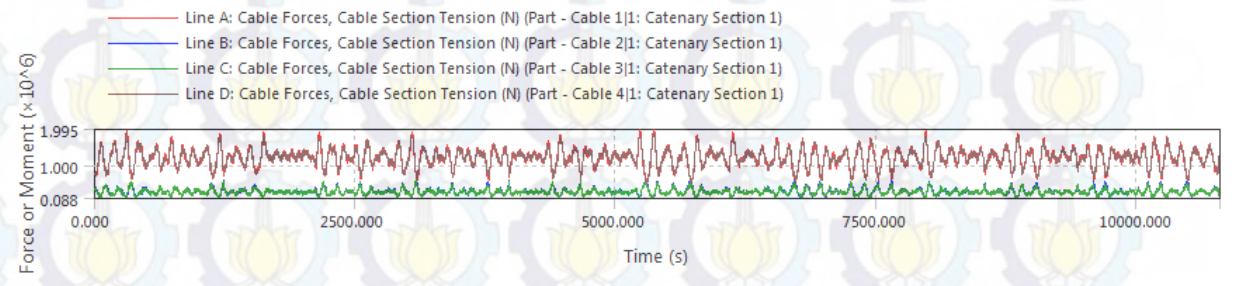
45°



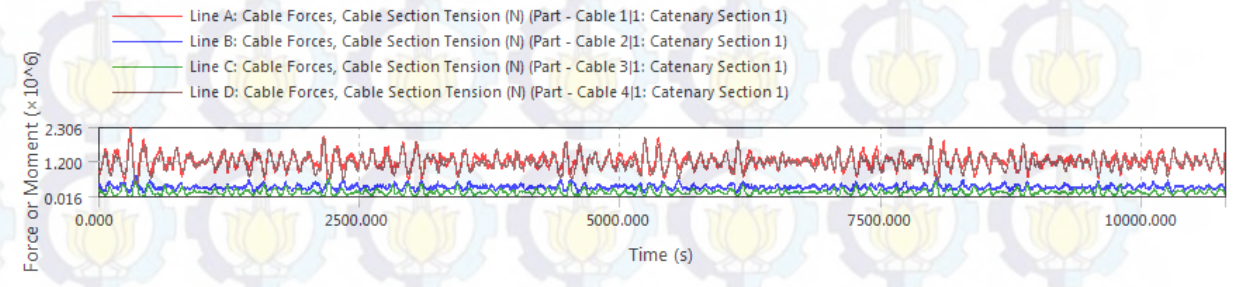
60°



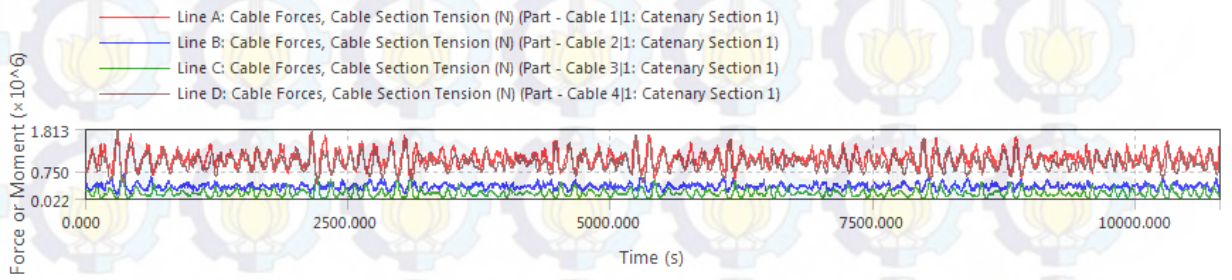
90°



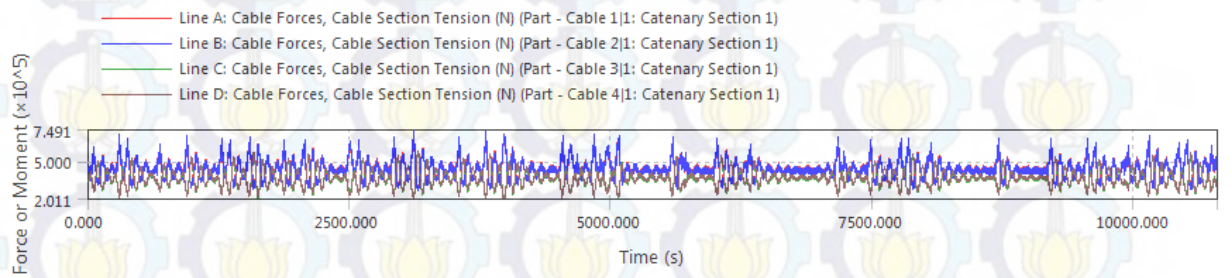
120°



135°



180°



BIODATA PENULIS



Yani Nurita Purnawanti, lahir di Jember – Jawa Timur pada 10 Mei 1993 sebagai anak pertama dari dua bersaudara dari pasangan Satuwanto dan Edy Hariyani. Penulis mengawali pendidikan formalnya di SDN Rowotengah II, kemudian melanjutkan ke SMPN 03 Tanggul, dan SMAN 2 Lumajang. Penulis menempuh pendidikan tinggi di Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, ITS – Surabaya dengan NRP 4311100028. Selama masa perkuliahan penulis aktif di bidang akademik dan non akademik. Penulis pernah menjabat sebagai Sekretaris Biro Media Informasi HIMATEKLA tahun 2012-2013 sekaligus sebagai staf UKK (Unit Kerja Kabinet) BEM FTK – ITS. Pada tahun 2013-2014 penulis menjabat sebagai Kepala Departemen Komunikasi dan Informasi BEM FTK – ITS. Dalam bidang keprofesian, pengalaman yang dimiliki penulis antara lain pernah menjalani 2 bulan masa kerja praktik di PT BKI (Persero) Jakarta Divisi SBU (Strategi Bisnis Unit) Industri. Selama menempuh masa perkuliahan, penulis mendapatkan beasiswa PPA (Peningkatan Prestasi Akademik) dari Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi (Dikti). Penulis dapat dihubungi melalui email yaninurita@gmail.com atau melalui nomor seluler 085746745928.

DAFTAR GAMBAR

| | |
|--|----|
| Gambar 1.1 FSO Ladinda | 1 |
| Gambar 1.2 Mooring FSO Ladinda | 2 |
| Gambar 1.3 <i>Spread mooring system</i> | 3 |
| Gambar 1.4 Perangkat <i>Spread mooring system</i> | 3 |
| Gambar 2.1 Gerak translasi dan rotasi pada kapal | 7 |
| Gambar 2.2 Ilustrasi gerakan <i>heave</i> | 8 |
| Gambar 2.3 Ilustrasi kondisi <i>rolling</i> kapal pada saat <i>still water</i> | 9 |
| Gambar 2.4 Contoh Konfigurasi <i>Spread mooring system</i> | 13 |
| Gambar 2.5 Ilustrasi tegangan normal akibat gaya aksial | 17 |
| Gambar 2.6 <i>Bending stress</i> pada suatu penampang | 18 |
| Gambar 2.7 <i>Von Misses stress</i> pada suatu penampang | 19 |
| Gambar 3.1 Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir | 21 |
| Gambar 3.2 Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir (lanjutan) | 22 |
| Gambar 3.3 Konstruksi <i>Bollard</i> | 27 |
| Gambar 4.1. Hasil pemodelan FSO Ladinda pada Maxsurf tampak isometri | 29 |
| Gambar 4.2. Hasil pemodelan FSO Ladinda pada Maxsurf tampak samping (<i>sheer plan</i>) | 30 |
| Gambar 4.3. Hasil pemodelan FSO Ladinda pada Maxsurf tampak atas | 30 |
| Gambar 4.4. Hasil pemodelan FSO Ladinda pada Maxsurf tampak depan (<i>body plan</i>) | 30 |
| Gambar 4.5 Kurva RAO gerakan translasi arah 0^0 FSO Ladinda <i>full load</i> | 33 |
| Gambar 4.6 Kurva RAO gerakan rotasi arah 0^0 FSO Ladinda <i>full load</i> | 33 |
| Gambar 4.7 Kurva RAO gerakan translasi arah 45^0 FSO Ladinda <i>full load</i> | 33 |
| Gambar 4.8 Kurva RAO gerakan rotasi arah 45^0 FSO Ladinda <i>full load</i> | 34 |
| Gambar 4.9 Kurva RAO gerakan translasi arah 90^0 FSO Ladinda <i>full load</i> | 34 |
| Gambar 4.10 Kurva RAO gerakan rotasi arah 90^0 FSO Ladinda <i>full load</i> | 34 |
| Gambar 4.11 Kurva RAO gerakan translasi arah 180^0 FSO Ladinda <i>full load</i> ... | 35 |
| Gambar 4.12 Kurva RAO gerakan rotasi arah 180^0 FSO Ladinda <i>full load</i> | 35 |
| Gambar 4.13 Kurva RAO gerakan translasi FSO Ladinda arah 0^0 kondisi <i>light load</i> | 36 |

| | |
|---|----|
| Gambar 4.14 Kurva RAO gerakan rotasi FSO Ladinda arah 0^0 kondisi <i>light load</i> | 36 |
| Gambar 4.15 Kurva RAO gerakan translasi FSO Ladinda arah 45^0 kondisi <i>light load</i> | 37 |
| Gambar 4.16 Kurva RAO gerakan rotasi FSO Ladinda arah 45^0 kondisi <i>light load</i> | 37 |
| Gambar 4.17 Kurva RAO gerakan translasi FSO Ladinda arah 90^0 kondisi <i>light load</i> | 37 |
| Gambar 4.18 Kurva RAO gerakan rotasi FSO Ladinda arah 90^0 kondisi <i>light load</i> | 38 |
| Gambar 4.19 Kurva RAO gerakan translasi FSO Ladinda arah 180^0 kondisi <i>light load</i> | 38 |
| Gambar 4.20 Kurva RAO gerakan translasi FSO Ladinda arah 180^0 kondisi <i>light load</i> | 38 |
| Gambar 4.21 Kurva RAO gerakan translasi FSO Ladinda arah 0^0 kondisi <i>full load</i> | 40 |
| Gambar 4.22 Kurva RAO gerakan rotasi FSO Ladinda arah 0^0 kondisi <i>full load</i> | 41 |
| Gambar 4.23 Kurva RAO gerakan translasi FSO Ladinda arah 45^0 kondisi <i>full load</i> | 41 |
| Gambar 4.24 Kurva RAO gerakan rotasi FSO Ladinda arah 45^0 kondisi <i>full load</i> | 41 |
| Gambar 4.25 Kurva RAO gerakan translasi FSO Ladinda arah 90^0 kondisi <i>full load</i> | 42 |
| Gambar 4.26 Kurva RAO gerakan rotasi FSO Ladinda arah 90^0 kondisi <i>full load</i> | 42 |
| Gambar 4.27 Kurva RAO gerakan translasi FSO Ladinda arah 180^0 kondisi <i>full load</i> | 42 |
| Gambar 4.28 Kurva RAO gerakan rotasi FSO Ladinda arah 180^0 kondisi <i>full load</i> | 43 |
| Gambar 4.29 Kurva RAO gerakan translasi FSO Ladinda arah 0^0 kondisi <i>light load</i> | 44 |

| | |
|---|----|
| Gambar 4.30 Kurva RAO gerakan rotasi FSO Ladinda arah 0^0 kondisi <i>light load</i> | 44 |
| Gambar 4.31 Kurva RAO gerakan translasi FSO Ladinda arah 45^0 kondisi <i>light load</i> | 44 |
| Gambar 4.32 Kurva RAO gerakan rotasi FSO Ladinda arah 45^0 kondisi <i>light load</i> | 45 |
| Gambar 4.33 Kurva RAO gerakan translasi FSO Ladinda arah 90^0 kondisi <i>light load</i> | 45 |
| Gambar 4.34 Kurva RAO gerakan rotasi FSO Ladinda arah 90^0 kondisi <i>light load</i> | 46 |
| Gambar 4.35 Kurva RAO gerakan translasi FSO Ladinda arah 180^0 kondisi <i>light load</i> | 46 |
| Gambar 4.36 Kurva RAO gerakan rotasi FSO Ladinda arah 180^0 kondisi <i>light load</i> | 46 |
| Gambar 4.37 Spektrum gelombang JONSWAP ($H_s = 1.98\text{m}$, $T_p = 5\text{s}$) | 48 |
| Gambar 4.38 Respon spektra gerakan translasi arah 0^0 kondisi <i>full load</i> | 48 |
| Gambar 4.39 Respon spektra gerakan rotasi arah 0^0 kondisi <i>light load</i> | 49 |
| Gambar 4.40 Respon spektra gerakan translasi arah 0^0 kondisi <i>full load</i> | 49 |
| Gambar 4.41 Respon spektra gerakan rotasi arah 45^0 kondisi <i>full load</i> | 49 |
| Gambar 4.42 Respon spektra gerakan translasi arah 90^0 kondisi <i>full load</i> | 50 |
| Gambar 4.43 Respon spektra gerakan rotasi arah 90^0 kondisi <i>full load</i> | 50 |
| Gambar 4.44 Respon spektra gerakan translasi arah 180^0 kondisi <i>full load</i> | 50 |
| Gambar 4.45 Respon spektra gerakan rotasi arah 180^0 kondisi <i>full load</i> | 51 |
| Gambar 4.46 Respon spektra gerakan translasi arah 0^0 kondisi <i>light load</i> | 51 |
| Gambar 4.47 Respon spektra gerakan rotasi arah 0^0 kondisi <i>light load</i> | 52 |
| Gambar 4.48 Respon spektra gerakan translasi arah 45^0 kondisi <i>light load</i> | 52 |
| Gambar 4.49 Respon spektra gerakan rotasi arah 45^0 kondisi <i>light load</i> | 52 |
| Gambar 4.50 Respon spektra gerakan translasi arah 90^0 kondisi <i>light load</i> | 53 |
| Gambar 4.51 Respon spektra gerakan rotasi arah 90^0 kondisi <i>light load</i> | 53 |
| Gambar 4.52 Respon spektra gerakan translasi arah 180^0 kondisi <i>light load</i> | 53 |
| Gambar 4.53 Respon spektra gerakan rotasi arah 180^0 kondisi <i>light load</i> | 54 |
| Gambar 4.54 skema rantai jangkar dan arah pembebanan | 56 |

| | |
|--|----|
| Gambar 4.55 pemodelan FSO tertambat tampak samping | 56 |
| Gambar 4.56 pemodelan FSO tertambat tampak atas..... | 57 |
| Gambar 4.57 konstruksi <i>bollard</i> (a) foto kondisi fisik <i>bollard</i> (b) letak <i>bollard</i> pada konstruksi <i>deck</i> belakang..... | 60 |
| Gambar 4.58 hasil pemodelan 3D <i>bollard</i> belakang..... | 60 |
| Gambar 4.59 letak <i>bollard</i> bagian depan | 61 |
| Gambar 4.60 hasil pemodelan 3D <i>bollard</i> belakang..... | 61 |
| Gambar 4.61 Konfigurasi sudut rantai jangkar bagian depan..... | 62 |
| Gambar 4.62 Konfigurasi sudut rantai jangkar bagian belakang | 62 |
| Gambar 4.63 Sensitivitas struktur <i>bollard</i> depan..... | 64 |
| Gambar 4.64 Model elemen <i>meshing</i> struktur <i>bollard</i> depan ukuran 24 mm..... | 64 |
| Gambar 4.65 Sensitivitas struktur <i>bollard</i> belakang..... | 65 |
| Gambar 4.66 Model elemen <i>meshing</i> struktur <i>bollard</i> depan ukuran 22 mm..... | 65 |
| Gambar 4.67 Hasil <i>Stress</i> maksimum <i>Bollard</i> Bagian Depan | 66 |
| Gambar 4.68 <i>Stress</i> pada konstruksi dudukan <i>bollard</i> | 66 |
| Gambar 4.69 <i>Stress</i> pada konstruksi dudukan <i>bollard</i> bagian bawah | 67 |
| Gambar 4.70 Hasil deformasi maksimum <i>bollard</i> bagian depan..... | 67 |
| Gambar 4.71 Hasil <i>stress</i> maksimum <i>bollard</i> bagian belakang | 67 |
| Gambar 4.72 <i>Stress</i> pada konstruksi dudukan <i>bollard</i> bagian belakang | 68 |
| Gambar 4.73 Hasil deformasi maksimum <i>bollard</i> bagian depan..... | 68 |

ANALISIS TEGANGANGAN LOKAL MAKSIMUM PADA *BOLLARD* AKIBAT MODIFIKASI SISTEM TAMBAT FSO LADINDA

Y.N. Purnawanti¹⁾, Handayanu²⁾, dan J.J. Soedjono³⁾

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Kelautan, ^{2,3}Staf Pengajar Jurusan Teknik Kelautan
Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111
E-mail: handayanu@oe.its.ac.id

Abstrak – FSO Ladinda merupakan hasil konversi dari kapal tanker yang dibangun tahun 1974 dan berubah fungsi sebagai FSO pada tahun 1984. Sejak tahun 1984 FSO ini mulai beroperasi di Selat Lalang, Malaka Strait, Riau. Sistem tambat yang digunakan untuk penambatan FSO Ladinda adalah SPOLS (*Single Point Offshore Loading System*) yang menggunakan sistem tambat *Tower Yoke Mooring System* dengan *Mooring Tower* sebagai tambatan yang dihubungkan dengan *Yoke Arm* dan terdapat *turntable* yang berfungsi sebagai engsel agar FSO dapat bergerak sesuai dengan gerakan gelombang tanpa membuat FSO itu sendiri terlepas. Modifikasi sistem tambat FSO Ladinda ini dilakukan pada saat reparasi pada *tower mooring*. Modifikasi dilakukan dengan melepas *yoke arm* kemudian diganti dengan *spread mooring system*. Pada kasus ini *spread mooring system* ditambatkan pada *bollard* bagian depan dan belakang menggunakan rantai jangkar. Respon gerak FSO Ladinda ditinjau pada kondisi *full load* dan *light load* pada heading $0^{\circ}, 45^{\circ}, 90^{\circ}, 180^{\circ}$. Respon gerak terbesar adalah gerakan *roll* sebesar 5.452 deg/m dalam kondisi *light load*. Respon gerak FSO mengakibatkan *tension* maksimum terjadi pada rantai jangkar. Analisis *tension* maksimum pada rantai jangkar dilakukan pada kondisi *full load* dan *light load* pada heading $0^{\circ}, 45^{\circ}, 60^{\circ}, 90^{\circ}, 12^{\circ}, 135^{\circ}$, dan 180° sesuai yang dianjurkan oleh OCIMF. Hasil *tension* maksimum yang terjadi pada *line 4* untuk bagian belakang sebesar 2,31 MN dan *line 1* untuk bagian depan sebesar 2,30 MN saat kondisi *light load*. *Tension* maksimum terjadi pada rantai jangkar akibat arah pembebanan 60° dimana pada arah tersebut beban tepat mengenai rantai jangkar. *Tension* maksimum pada rantai jangkar mengakibatkan tegangan maksimum pada konstruksi dudukan *bollard*. Tegangan maksimum yang terjadi pada konstruksi dudukan *bollard* bagian belakang yaitu 214.49 Mpa, dan deformasi maksimumnya 3.65 mm terjadi pada konstruksi *bollard* bagian atas. Sedangkan tegangan maksimum pada konstruksi dudukan *bollard* bagian depan yaitu 219.69 Mpa, dan deformasi maksimumnya 5.62 mm terjadi pada *forecastle deck*. Tegangan maksimum yang terjadi tidak melebihi 90% tegangan *yield* (225 MPa), dan deformasi maksimum yang terjadi juga tidak lebih dari 4 mm sesuai dengan standar keamanan dari ABS.

Kata Kunci : *bollard*, FSO, *spread mooring* tegangan lokal,

I. PENDAHULUAN

FSO (*Floating Storage Offloading*) Ladinda merupakan salah satu bangunan apung hasil modifikasi dari kapal tanker. FSO Ladinda (Gambar 1) merupakan hasil konversi dari kapal tanker yang dibangun tahun 1974 dan berubah fungsi sebagai FSO pada tahun 1984. Sejak tahun 1984 FSO ini mulai beroperasi di Selat Lalang, Malaka Strait, Riau.

Dalam operasinya *offloading* pada FSO Ladinda dilakukan dengan sistem *side by side* dengan *shuttle tanker*.



Gambar 1 FSO Ladinda (Sumber : www.energi-mp)

Sistem tambat yang terdapat pada FSO Ladinda saat ini yaitu SPM tipe SPOLS (*Single Point Offshore Loading System*) (Gambar 2) yang menggunakan sistem tambat *tower yoke mooring system* dengan *mooring tower* sebagai sistem tambatnya yang dihubungkan dengan *yoke arm* dan terdapat *turntable* yang berguna sebagai kunci agar FSO dapat bergerak sesuai dengan gerakan gelombang tanpa membuat FSO itu sendiri terlepas. Jenis mooring ini sangat cocok untuk *shallow draft* dan lebih ekonomis untuk perairan dangkal (Wichers, 2013).



Gambar 2 Mooring FSO Ladinda (sumber : www.energi-mp.com)

Lokasi operasi FSO Ladinda yaitu di Selat Lalang merupakan daerah pelayaran sehingga di lokasi tersebut sering dilewati oleh kapal. Kapal-kapal yang melewatinya sering kali menabrak *tower mooring* yang pada SPOLS FSO Ladinda. Hal ini mengakibatkan sedikit demi sedikit terjadi kerusakan pada *mooring tower*.

Perbaikan pada *mooring tower* yang akan dilakukan mengharuskan FSO Ladinda dimodifikasi sistem tambatnya. Modifikasi yang dilakukan yaitu dengan melepas *yoke arm* yang berfungsi sebagai penghubung antara FSO dengan

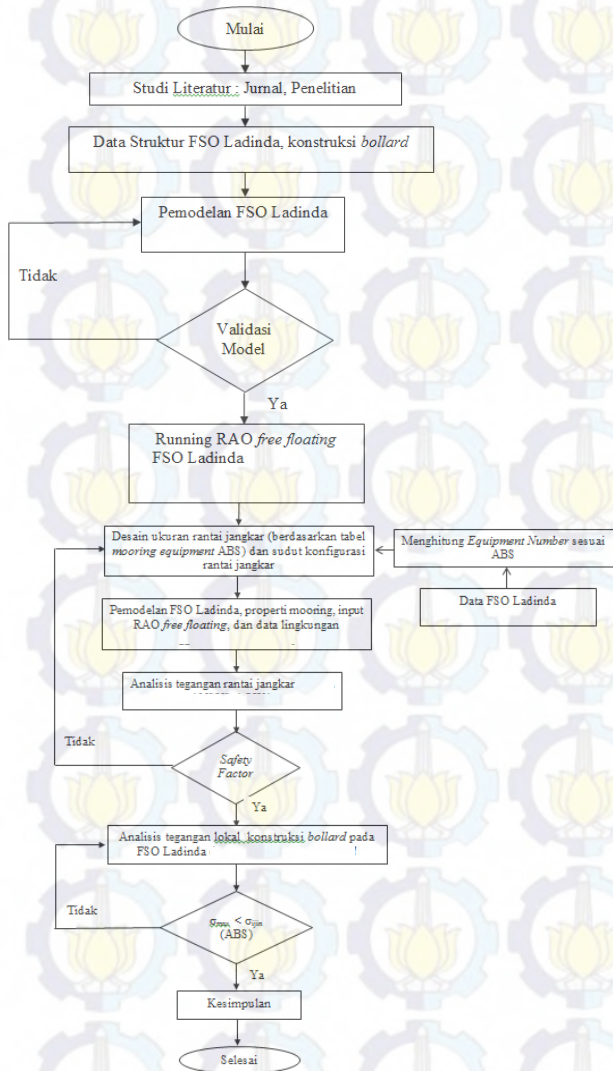
mooring tower dan menggantinya dengan *Spread Mooring System*. *Spread Mooring System* yang akan digunakan dirancang sesuai dengan *rules* yang ada di ABS (*American Bureau Shipping*) dan API (*American Petroleum Institute*).

Pada penelitian ini dilakukan analisis terhadap hasil modifikasi sistem tambat pada FSO Ladinda. Analisis yang dilakukan meliputi respon gerak FSO dengan sistem tambat yang baru yaitu *spread mooring system*, kekuatan atau *tension* maksimum yang terjadi pada rantai jangkar, dan kekuatan pada *bollard* yang merupakan pusat yang terkena beban *tension force* rantai jangkar (Cho, et.al., 2010).



(a) (b) (c)
Gambar 3 Perangkat *Spread Mooring System* (a) *Bollard*; (b) Rantai Jangkar; (c) Jangkar (sumber : www.maritimeworld.web.id)

II. URAIAN PENELITIAN



Gambar 4 Metodologi Penelitian

A. Data FSO Ladinda
Berikut adalah data FSO Ladinda :

Tabel 1 Ukuran Utama FSO Ladinda

| Ukuran Kapal | Unit | Kondisi Maksimum Operasi | Kondisi Minimum Operasi |
|--------------|------|--------------------------|-------------------------|
| Length, LOA | m | 284 | |
| Length, LBP | m | 272 | |
| Breadth, B | m | 43.4 | |
| LWL | m | 278,8 | 261,63 |
| Depth, D | m | 20.6 | |
| Draft, T | m | 15.725 | 2.41 |
| Displacement | ton | 161810 | 21614 |
| LCG | m | 144.11 from AP | 123.03 from AP |
| KG (VCG) | m | 10.76 | 12.57 |
| TCG | m | 0.1 | 0 |
| LCB | m | 143.83 from AP | 146.11 from AP |
| LCF | m | 138.176 from AP | 145.52 from AP |
| KB | m | 7.72 from BL | 1.35 from BL |
| KM | m | 17.69 from BL | 53.35 from BL |
| Cm | | 0.995 | |
| Cwp | | 0.923 | |
| Cp | | 0.84 | |
| Cb | | 0.83 | |

(sumber : PT. Energi Mega Persada, 2014)

B. Data Lingkungan

Data lingkungan yang digunakan yaitu kondisi lingkungan yang paling berpengaruh di Selat Lalang, dimana lokasi FSO Ladinda beroperasi.

Berikut ini adalah data lingkungan Perairan di Selat Lalang (Tabel 2) :

Tabel 2 Data Lingkungan di Selat Lalang

| Parameter | | Unit | 100 – Tahunan |
|-----------|----------------|-------|---------------|
| Gelombang | Tinggi (Hs) | m | 1.98 |
| | Periode (Ts) | m | 5 |
| Angin | Kecepatan (Vw) | knots | 22 |
| | Waktu Durasi | hrs | 1 |
| Arus | Kecepatan (Vc) | m/s | 2.41 |

(sumber : PT. Energi Mega Persada, 2014)

Kedalaman Selat Lalang, Malaka Strait adalah 25 m. (id.wikipedia.org/wiki/selat-malaka, 2015).

C. Konstruksi Bollard

Tabel 3 adalah data Konstruksi *bollard* di FSO Ladinda :

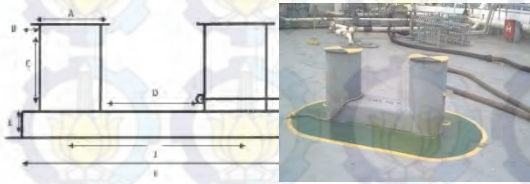
Tabel 3 Data Konstruksi *Bollard*

| No | Data | |
|----|----------------------------------|-----------------------|
| 1. | Jenis <i>Bollard</i> | <i>Double Bollard</i> |
| 2. | Jumlah di FSO Ladinda | 9 Buah |
| 3. | <i>Safety Working Load</i> (SWL) | 200 ton |
| 4. | <i>Material Baja</i> | ASTM A36 |
| 5. | <i>Yield Strength</i> | 250 MPa |

(sumber : PT. Energi Mega Persada, 2014)

Berikut ini adalah ukuran dimensi dari konstruksi *Bollard* FSO *Ladinda* :

- A = 60 cm G = 62 cm
- B = 2 cm H = 10 cm
- C = 61 cm I = 22 cm
- E = 27 cm J = 144 cm
- F = 200 cm



Gambar 5 Konstruksi *Bollard* (sumber : PT. Energi Mega Persada, 2014)

Properti rantai jangkar yang digunakan adalah sebagai berikut (Tabel 4) :

Tabel 4 Data Rantai jangkar

| Properti | |
|-----------|---|
| Diameter | 111 mm |
| Tipe | Studlink Chain Cables (steel grade 2 ABS) |
| Panjang | 742,5 m |
| MBL | 5942800 kN |
| Stiffness | 1063000 kN |

(Sumber: *ABS Anchoring, Mooring, and Towing Equipment* dan *ABS Rules for Testing and Certification of Materials*)

III. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

A. Pemodelan Geometri

Pemodelan struktur dilakukan dalam tiga tahap, yaitu pemodelan hull FSO *Ladinda*, pemodelan sistem tambat, kemudian pemodelan struktur lokal *bollard*.

1. Pemodelan Hull

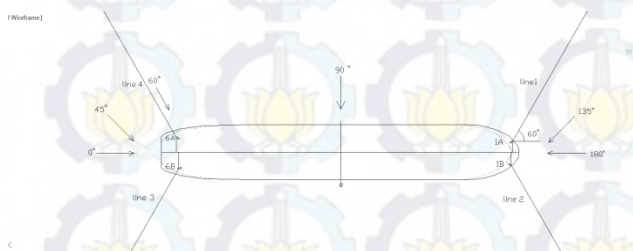
Pemodelan *hull* FSO *Ladinda* dilakukan dengan menggunakan software *Hull Modeler*. Pemodelan FSO *Ladinda* dilakukan untuk mendapatkan model dan data hidrostatis. Model FSO *Ladinda* dan data hidorstatik kemudian digunakan sebagai input untuk perhitungan RAO freefloating dan tertambat. Pemodelan dilakukan pada kondisi *light load* dan *full load*. Hasil pemodelan FSO *Ladinda* dapat dilihat pada Gambar 6 :



Gambar 6 Hasil pemodelan FSO *Ladinda* tampak isometri

2. Pemodelan Sistem Tambat

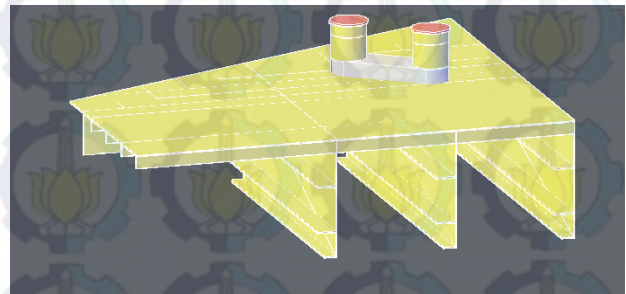
Pemodelan sistem tambat dilakukan untuk mengetahui gerakan FSO *Ladinda* saat tertambat serta mendapatkan *tension* rantai jangkar. Sistem tambat didesain *spread mooring system* dengan konfigurasi rantai jangkar sebanyak empat, dengan sudut masing-masing rantai jangkar 60° dari sumbu x FSO sesuai dengan anjuran dari rules ABS (2001) dan API RP 2 SK (2005). Berikut Gambar 7 adalah konfigurasi rantai jangkar beserta *heading* pembebanan yang dilakukan pada FSO *Ladinda*.



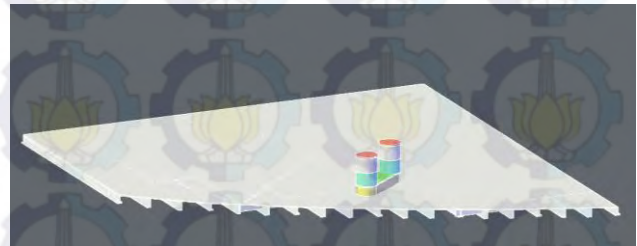
Gambar 7 Konfigurasi rantai jangkar

3. Pemodelan Lokal Struktur *Bollard*

Pemodelan struktur local pada *bollard* dilakukan dengan membuat struktur 3D seperti Gambar 8 dan Gambar 9, kemudian dilakukan analisis menggunakan software *Finite Element Method*. Pemodelan lokal konstruksi *bollard* ditempatkan pada *main deck* bagian belakang dan *forecastle deck* FSO *Ladinda* dengan ketebalan 15 mm dan tebal pelat di *main deck* 13 mm, dan tebal plat *forecastle deck* 12 mm (EMP, 2014). Struktur yang dimodelkan meliputi konstruksi *bollard* beserta dudukannya, *deck*, konstruksi melintang (*deck beam transverse*) dan konstruksi memanjang (*longitudinal girder*) di *main deck* dan *forecastle deck*. Luasan struktur yang dimodelkan untuk distribusi tegangan pada analisa lokal ini mengacu pada ketentuan ABS “*Safehull-Dynamic Loading Approach for FPSO Systems*” [2001] sekaligus dilakukan pemilihan material untuk struktur, yaitu Baja ASTM A36.



Gambar 8 Pemodelan 3D konstruksi *bollard* bagian belakang



Gambar 9 Pemodelan 3D konstruksi *bollard* bagian belakang

B. Analisis Gerakan Struktur

Analisa gerakan struktur dilakukan berdasarkan hasil dari perhitungan RAO (*Respon Amplitude Operator*) saat terapung bebas dan terambat. RAO merupakan alat untuk mentransfer gaya gelombang menjadi respon gerakan dinamis struktur. Menurut Chakrabarti (1987), persamaan RAO dapat dicari dengan persamaan sebagai berikut:

$$RAO(\omega) = \frac{X_p(\omega)}{\eta(\omega)}$$

dimana :
 $X_p(\omega)$ = amplitudo

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 (Bhattacharyya, 1978):

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

Keterangan :

- M_{jk} : Komponen matriks massa kapal.
- A_{jk}, B_{jk} : Matriks koefisien massa tambah dan redaman.
- C_{jk} : Koefisien-koefisien gaya hidrostatis pengembali.
- F_j : amplitudo gaya eksitasi dalam besaran kompleks.

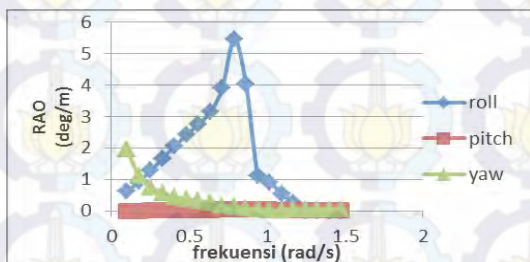
F_1, F_2 dan F_3 adalah amplitudo gaya-gaya eksitasi yang mengakibatkan *surge, sway,* dan *heave*, sedangkan $F_4, F_5,$ dan F_6 adalah amplitudo momen eksitasi untuk *roll, pitch,* dan *yaw*.

Analisis gerakan struktur dilakukan pada saat kondisi *free floating* dan tertambat. Hasil dari analisis RAO didapatkan informasi bahwa pada saat kondisi *light load* gerakannya relatif lebih besar dibandingkan dengan kondisi *full load*.

Tabel 5 Resume RAO free floating light load

| Moda Gerakan | Unit | RAO Maksimum | | | | Max |
|--------------|-------|--------------|-------|-------|-------|-------|
| | | 0 | 45 | 90 | 180 | |
| Surge | m/m | 5.650 | 4.167 | 0.001 | 5.651 | 5.651 |
| Sway | m/m | 0.000 | 4.156 | 6.130 | 0.000 | 6.130 |
| Heave | m/m | 1.020 | 0.958 | 0.997 | 0.992 | 1.020 |
| Roll | deg/m | 0.002 | 1.342 | 5.452 | 0.000 | 5.452 |
| Pitch | deg/m | 0.637 | 0.616 | 0.043 | 0.638 | 0.638 |
| Yaw | deg/m | 0.001 | 2.011 | 1.971 | 0.011 | 2.011 |

Untuk kondisi terapung bebas, RAO terbesar terjadi saat gerakan *roll* pada heading 90° pada saat muatan kosong (*light load*). Berdasarkan Gambar 10 nilai RAO untuk gerakan *roll* pada heading 90° adalah 5.452 deg/m.

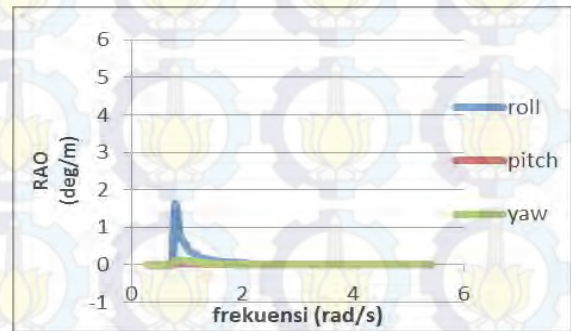


Gambar 10 Kurva RAO gerakan rotasi FSO Ladinda 90° kondisi *light load*

Analisis gerakan saat tertambat dilakukan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh konfigurasi rantai jangkar yang digunakan. Berdasarkan Gambar 10 nilai RAO untuk gerakan *roll* pada heading 90° adalah 1.592 deg/m. Hal ini memberikan informasi bahwa konfigurasi *spread mooring* telah mampu menahan gerakan struktur.

Tabel 6 Resume RAO tertambat light load

| Moda Gerakan | Unit | RAO Maksimum | | | | Max |
|--------------|-------|--------------|-------|-------|-------|-------|
| | | 0 | 45 | 90 | 180 | |
| Surge | m/m | 0.032 | 0.033 | 0.001 | 0.040 | 0.040 |
| Sway | m/m | 0.000 | 0.071 | 0.077 | 0.000 | 0.077 |
| Heave | m/m | 0.028 | 0.065 | 0.024 | 0.072 | 0.072 |
| Roll | deg/m | 0.003 | 0.403 | 1.592 | 0.002 | 1.592 |
| Pitch | deg/m | 0.065 | 0.067 | 0.036 | 0.088 | 0.088 |
| Yaw | deg/m | 0.000 | 0.487 | 0.114 | 0.000 | 0.487 |



Gambar 11 Kurva RAO gerakan rotasi FSO Ladinda arah 90° kondisi *light load*

C. Analisis Respon Struktur

Respon struktur dapat diketahui melalui perkalian antara RAO kuadrat dengan spektrum gelombang. Spektrum respon dapat didefinisikan sebagai sebaran energi struktur akibat gelombang. Jika diformulasikan akan didapat persamaan :

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

dengan:

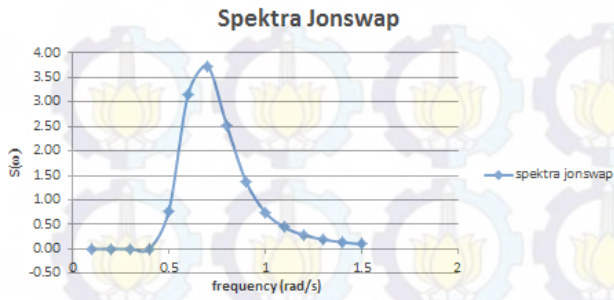
S_R = spektrum respons (m²-sec)

$S(\omega)$ =spektrum gelombang (m²-sec)

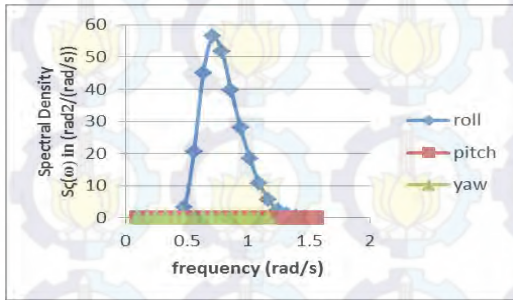
$RAO(\omega)$ = transfer function

ω = frekuensi gelombang (rad/sec)

Spektra gelombang yang digunakan untuk perairan Selat Lalang mengikuti persamaan dari spectra JONSWAP dengan nilai gamma 2,3 (Chakrabarti, 1987). Dari RAO dan spectra gelombang pada Gambar 12 didapatkan respon struktur terbesar ketika gerakan *roll* pada kondisi *light load* (Gambar 13) sebesar 56.338 deg²/(rad/s).



Gambar 12 Spektrum gelombang JONSWAP (Hs = 1.98m, Tp = 5s)



Gambar 13 Respon spektra gerakan rotasi arah 90° kondisi light load

D. Analisis Tension Force Maksimum Rantai Jangkar

Analisis tegangan pada rantai jangkar dilakukan untuk mendapatkan nilai gaya tarik (*tension force*) maksimum pada rantai jangkar. Hasil gaya tarik maksimum tersebut digunakan sebagai input beban untuk analisis kekuatan *bollard* dimana rantai jangkar tersebut ditautkan. Beban yang dimasukkan dalam analisis ini adalah beban gelombang, beban angin, dan beban arus 100 tahunan dengan arah pembebanan 0°, 45°, 60°, 90°, 120°, 135°, 180° (OCIMF, 1997). Analisis *tension* rantai jangkar dilakukan dengan simulasi time domain analysis pada kondisi *full load* dan *light load*. Untuk menghasilkan teangan maksimum pada rantai jangkar diperlukan simulasi selama 3 jam (10800 s) sesuai anjuran dari DNV E301 (2004). Setelah didapatkan *tension* maksimum, perlu dilakukan cek *safety factor*. Hasil dari analisis *tension force maximum* pada rantai jangkar masih memenuhi standar keamanan dari ABS (2004) yaitu:

$$\frac{\text{Minimum Breaking Load}}{\text{Maximum Tension}} = 1,67$$

Tabel 7 Hasil simulasi *tension force* maksimum pada heading 60°

| Rantai Jangkar | Kondisi Full load | | | Kondisi Light load | | |
|----------------|-------------------|------|-------|--------------------|------|------|
| | Tension (N) | t(s) | SF | Tension (N) | t(s) | SF |
| Line 1 | 1943703 | 216 | 3.05 | 2204319 | 2154 | 2.69 |
| Line 2 | 344545.4 | 376 | 17.24 | 1036040 | 4512 | 5.73 |
| Line 3 | 231641.2 | 474 | 25.65 | 775069 | 348 | 7.66 |
| Line 4 | 2057584 | 249 | 2.88 | 2306166 | 302 | 2.57 |

Tabel 8 Hasil simulasi *tension force* maksimum pada heading 120°

| Rantai Jangkar | Kondisi Full load | | | Kondisi Light load | | |
|----------------|-------------------|------|-------|--------------------|------|------|
| | Tension (N) | t(s) | SF | Tension (N) | t(s) | SF |
| Line 1 | 2022190 | 268 | 2.93 | 2300635 | 304 | 2.58 |
| Line 2 | 345473.5 | 368 | 17.20 | 721713.8 | 356 | 8.23 |
| Line 3 | 138269.6 | 418 | 42.97 | 642156.8 | 2204 | 9.25 |
| Line 4 | 1943191 | 233 | 3.05 | 2065427 | 300 | 2.87 |

Dari Tabel 7 dan Tabel 8 dapat diketahui bahwa tegangan rantai jangkar yang paling besar terjadi ketika arah pembebanan 60° untuk *line 4* (Tabel 7), dan arah 120° untuk *line 1* (Tabel 8). *Line 4* mempunyai tegangan terbesar sebesar 2306166 N dalam kondisi *light load*. Tegangan tersebut terjadi ketika simulasi detik ke-302. *Line 4* merupakan rantai jangkar yang diikatkan pada *bollard* bagian belakang, sehingga nilai tegangan inilah yang nantinya digunakan sebagai input beban untuk analisis tegangan lokal maksimum pada *bollard* bagian belakang. Sedangkan rantai jangkar yang diikatkan pada *bollard* bagian depan adalah *line 1*, sehingga nilai tegangan rantai jangkar pada *line 1* yaitu 2300635 N digunakan sebagai input beban untuk analisis tegangan lokal maksimum *bollard* bagian depan.

E. Pembebanan pada Analisis Lokal

Pada analisis lokal pada *bollard* menggunakan bantuan *software* Finite Elemen Method dengan menggunakan satu beban, yaitu beban gaya tarik maksimum rantai jangkar. Untuk *bollard* bagian bagian belakang terdapat rantai jangkar no.4 yang mempunyai *tension force* terbesar 2306166 N, sedangkan untuk *bollard* bagian depan terdapat rantai jangkar no.1 dengan *tension force* terbesar 2204319 N. Karena *tension* yang didapatkan dari simulasi merupakan gaya dengan sudut tertentu, maka perlu diperhitungkan sudut yang dibentuk untuk melakukan pembebanan pada konstruksi *bollard*. Hasil perhitungan dari gaya pada konstruksi *bollard* bagian depan ialah sebagai berikut :

$$\begin{aligned} F_x &= 1081298 \text{ N} \\ F_y &= 1872863 \text{ N} \\ F_z &= 736203.2 \text{ N} \end{aligned}$$

sedangkan untuk *bollard* bagian belakang adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned} F_x &= 1102347 \text{ N} \\ F_y &= 1909321 \text{ N} \\ F_z &= 668788.1 \text{ N} \end{aligned}$$

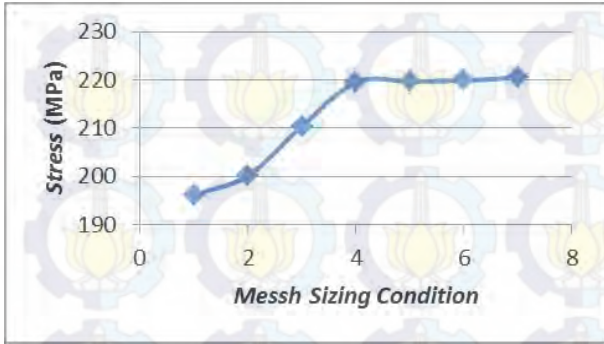
Pada analisa ini beban yang mengenai konstruksi *bolder* adalah beban horizontal memanjang arah sumbu -X, beban vertikal memanjang arah sumbu Y dan beban vertikal arah sumbu - Z. Dan untuk boundary condition dalam analisis ini yaitu bagian tepi struktur yang dimodelkan dianggap *fix*.

F. Meshing Sensitivity

Tabel 9 Meshing Sensitivity untuk struktur *bollard* depan

| No. | Ukuran (mm) | Nodes | Elemen | Tegangan (Mpa) | Koreksi (%) |
|-----|-------------|--------|--------|----------------|-------------|
| 1 | 40 | 141935 | 48787 | 196.15 | |
| 2 | 35 | 156766 | 53051 | 200.18 | 2.013 |
| 3 | 30 | 169038 | 58910 | 210.42 | 4.866 |
| 4 | 25 | 195714 | 69014 | 219.56 | 4.162 |
| 5 | 24 | 200211 | 70497 | 219.69 | 0.059 |
| 6 | 23 | 214814 | 75696 | 219.88 | 0.086 |
| 7 | 20 | 242108 | 86146 | 220.51 | 0.285 |

Berdasarkan Tabel 9 dan grafik pada Gambar 14, ukuran elemen *meshing* untuk struktur *bollard* bagian depan efektif dimodelkan pada ukuran *meshing* 24 mm dengan *error* terkecil yaitu 0.059 % dan menghasilkan tegangan sebesar 219.69 Mpa.

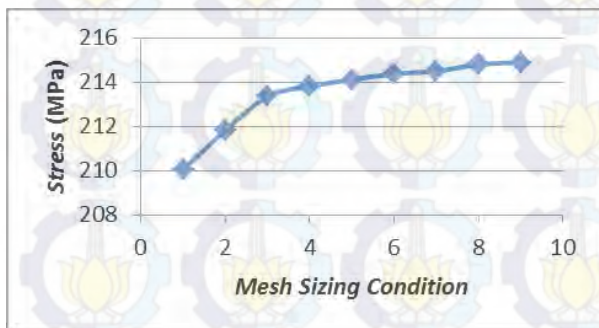


Gambar 14 Sensitivitas struktur bollard depan

Tabel 10 Meshing Sensitivity untuk struktur bollard belakang

| No. | Ukuran (mm) | Nodes | Elemen | Tegangan (MPa) | Koreksi (%) |
|-----|-------------|--------|--------|----------------|-------------|
| 1 | 40 | 136208 | 26099 | 210.05 | |
| 2 | 35 | 145246 | 30011 | 211.82 | 0.835 |
| 3 | 30 | 157765 | 35945 | 213.35 | 0.717 |
| 4 | 25 | 186593 | 47313 | 213.81 | 0.215 |
| 5 | 24 | 191008 | 48623 | 214.11 | 0.140 |
| 6 | 23 | 207364 | 54938 | 214.37 | 0.121 |
| 7 | 22 | 216096 | 57641 | 214.49 | 0.055 |
| 8 | 21 | 222756 | 60553 | 214.79 | 0.139 |
| 9 | 20 | 237720 | 66842 | 214.89 | 0.046 |

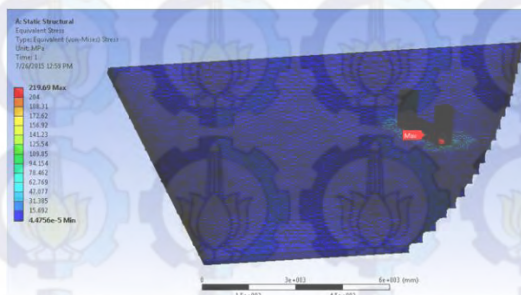
Berdasarkan Tabel 10 dan grafik pada Gambar 15, ukuran elemen meshing untuk struktur bollard bagian belakang efektif dimodelkan pada ukuran meshing 22 mm dengan error terkecil yaitu 0.056 % dan menghasilkan tegangan sebesar 214.49 Mpa.



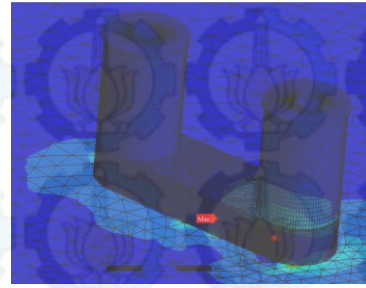
Gambar 15 Sensitivitas struktur bollard belakang

G. Hasil Tegangan

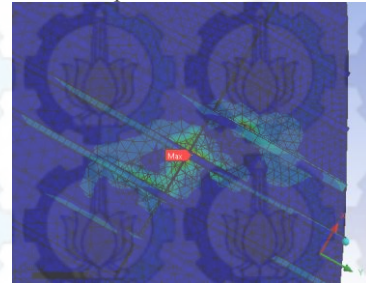
Berikut ini adalah hasil tegangan Von Mises dan deformasi maksimum untuk bollard bagian belakang dan bagian depan.



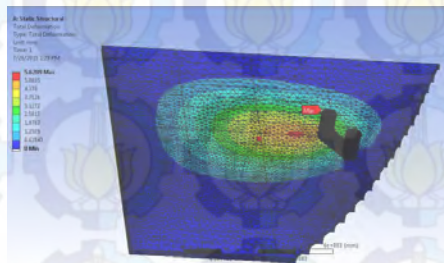
Gambar 16 Hasil Stress maksimum Bollard Bagian Depan



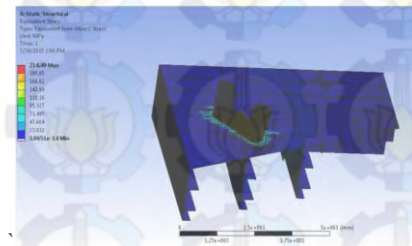
Gambar 17 Stress pada konstruksi dukungan bollard



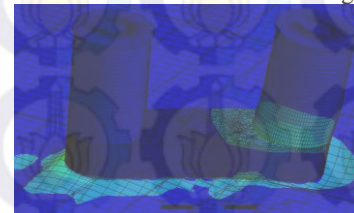
Gambar 18 Stress pada konstruksi dukungan bollard bagian bawah



Gambar 19 Hasil deformasi maksimum bollard bagian depan



Gambar 20 Hasil stress maksimum bollard bagian belakang



Gambar 21 Stress pada konstruksi dukungan bollard bagian belakang



Gambar 22 Hasil deformasi maksimum bollard bagian depan

Berdasarkan hasil running dari analisis *stress* dan deformasi untuk *bollard* bagian depan didapatkan *stress* terbesar berada pada konstruksi dudukan *bollard* bagian atas (Gambar 17) dan bawah (Gambar 18). *Stress* yang dihasilkan sebesar 219.69 Mpa (Gambar 16). Deformasi terbesar pada *bollard* bagian belakang terjadi pada bagian atas konstruksi *bollard* dengan nilai deformasi 5.62 mm (Gambar 19).

Untuk *bollard* bagian belakang, *stress* terbesar yang dihasilkan adalah sebesar 214.49 Mpa pada bagian yang sama dengan *bollard* bagian depan, yaitu kontak antara konstruksi dudukan *bollard* dengan pelat diatas dan dibawahnya (Gambar 20). Sedangkan deformasi maksimum yang dihasilkan sebesar 3.65 mm (Gambar 22) terjadi pada bagian atas *bollard* dan pelat *deck* tepatnya dibawah dudukan *bollard*.

Menurut ABS “*Safehull-Dynamic Loading Approach for FPSO Systems*” (2001) struktur dikatakan aman jika tegangan yang terjadi tidak melebihi 90% dari *yield Strength* material yang digunakan yaitu 225 Mpa, maka :

Tabel 11 Hasil Tegangan Maksimum *Bollard*

| Letak <i>Bollard</i> | Tegangan Von Mises | 90% Yield Strength | Check |
|----------------------|--------------------|--------------------|----------|
| Depan | 219,69 MPa | 225 MPa | Memenuhi |
| Belakang | 214,49 MPa | 225 MPa | Memenuhi |

Untuk batas deformasi yang diijinkan menurut ABS “*Shipbuilding and Repair Quality Standard for Hull Structures during Construction*” (2001) adalah 6 mm untuk bagian depan (*fore*) dan belakang (*aft*), maka :

Tabel 12 Hasil Deformasi Maksimum *Bollard*

| Letak <i>Bollard</i> | Deformasi | Deformasi Standar | Check |
|----------------------|-----------|-------------------|----------|
| Depan | 5,62 mm | 6 mm | Memenuhi |
| Belakang | 3,65 mm | 6 mm | Memenuhi |

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

- Perilaku gerak FSO Ladinda terbesar adalah gerakan *roll* pada kondisi *free floating* dan tertambat *heading* 900 saat muatan koong (*light load*). Besarnya gerakan *roll* saat *free floating* adalah 5.452 deg/m sedangkan untuk kondisi tertambat sebesar 1.592 deg/m.
- Hasil tegangan terbesar pada rantai jangkar terdapat pada *line* 4 untuk bagian belakang dengan nilai 2.31 MN dan *line* 1 untuk bagian depan dengan nilai 2.30 MN. Hasil diperoleh dari simulasi *time domain* dalam durasi 10800 detik (3 jam) pada kondisi *light load*.

- Tegangan lokal yang dihasilkan untuk *bollard* bagian depan sebesar 219.69 Mpa dengan deformasi maksimum sebesar 5.62 mm. Untuk *bollard* bagian belakang, tegangan maksimum yang terjadi sebesar 214.49 Mpa dengan deformasi sebesar 3.65 mm. Struktur dengan sistem ini masih dikatakan aman sesuai standart keamanan yang ditetapkan oleh ABS “*Safehull-Dynamic Loading Approach for FPSO Systems*” (2001) dan ABS “*Shipbuilding and Repair Quality Standard for Hull Structures during Construction*” (2001) bahwa struktur masih aman beroperasi jika tegangan maksimumnya tidak melebihi 90% dari tegangan *yield* (225 MPa) dan defleksi maksimumnya tidak melebihi 6 mm.

B. Saran

Analisis kelelahan atau *fatigue* pada *bollard* bagian depan dan belakang dapat dilakukan untuk penelitian selanjutnya jika sistem tambat seperti pada kasus ini digunakan terus – menerus (sistem tambat tidak menggunakan SPOLS).

V. DAFTAR PUSTAKA

- ABS, 1996, *Rules for Building and Classing Single Point Moorings*, USA: American Bureau of Shipping.
- ABS, 2004, *Guide For Building and Classing Floating Production Installations*, USA: American Bureau of Shipping
- ABS, 2010, *Rules For Testing And Certification Of Materials*, USA : American Bureau of Shipping.
- ABS, 2001, *Safehull-Dynamic Loading Approach' for Floating Production, Storage and Offloading (FPSO) Installations*, USA: American Bureau of Shipping ABS Plaza.
- ABS, 2001, *Shipbuilding and Repair Quality Standard for Hull Structures during Construction*, USA: American Bureau of Shipping ABS Plaza.
- API RP 2SK 3th edition, 2005, *Recommended Practice for Design and Analysis of Station Keeping Systems for Floating Structures*, Washington DC.
- Bhattacharyya, R., 1978, *Dynamics of Marine Vehicles*, New York: John Wiley & Sons Inc.
- Chakrabarti, S.K., 1987, *Hydrodynamics of Offshore Structures*, USA: Computational
- Wichers, J. 2013. *Guide to Single Point Moorings*. V.Mooring, Inc.: Netherlands.
- Cho, et.al. 2010. *Ultimate Load Capacities Of Mooring Bollards And Hull Foundation Structures*. Elseiver, hal. 770-776.
- DNV OS E301, 2004, *Position Mooring*, Det Norske Veritas, Norway.
- OCIMF 2nd Edition. 1997. *Mooring Equipment Guidelines*. England: Witherby & CO. LTD.
- PT Energi Mega Persada. 2014. *FSO Ladinda*. Jakarta.

Analisis Tegangan Lokal Maksimum pada *Bollard* akibat Modifikasi Sistem Tambat FSO Ladinda

Oleh :

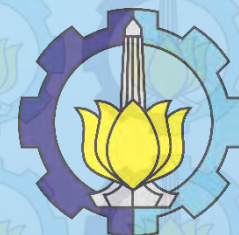
Yani Nurita Purnawanti

4311100028

DOSEN PEMBIMBING :

Ir. Handayanu, M.Sc. Ph.D

Ir. J.J. Soedjono



Jurusan Teknik Kelautan
Fakultas Teknologi Kelautan
ITS Surabaya

FSO Ladinda



Gambar 1. FSO Ladinda (Sumber : www.energi-mp)

- Merupakan hasil konversi dari kapal tanker yang dibangun tahun 1974 dan berubah fungsi sebagai FSO pada tahun 1984.
- Beroperasi di Selat Lalang, Malaka Strait, Riau
- Offloading menggunakan side by side
- Tertambat pada SPOLS (Single Point Offshore Loading System)

Latar Belakang



Gambar 2. Mooring FSO Ladinda

(sumber : www.energi-mp.com)

- Selat Lalang merupakan daerah pelayaran sehingga banyak kapal lewat dan menabrak tower mooring pada SPOLS FSO Ladinda.
- Reparasi pada tower mooring mengakibatkan SPOLS dilepas dari FSO Ladinda dan digantikan dengan *spread mooring*.
- Tegangan chain yang terjadi mengakibatkan tegangan maksimum pada *bollard*.

Rumusan Masalah

1. Bagaimana perilaku gerak FSO Ladinda saat *free floating*?
2. Bagaimana perilaku gerak FSO Ladinda saat tertambat?
3. Berapa besar *tension force* maksimum pada rantai jangkar?
4. Berapa tegangan lokal maksimum pada *bollard*?

Tujuan

1. Menghitung perilaku gerak FSO Ladinda saat *free floating*.
2. Menghitung perilaku gerak FSO Ladinda saat tertambat.
3. Menghitung besar *tension force* maksimum pada rantai jangkar.
4. Menghitung tegangan lokal maksimum pada *bollard*.

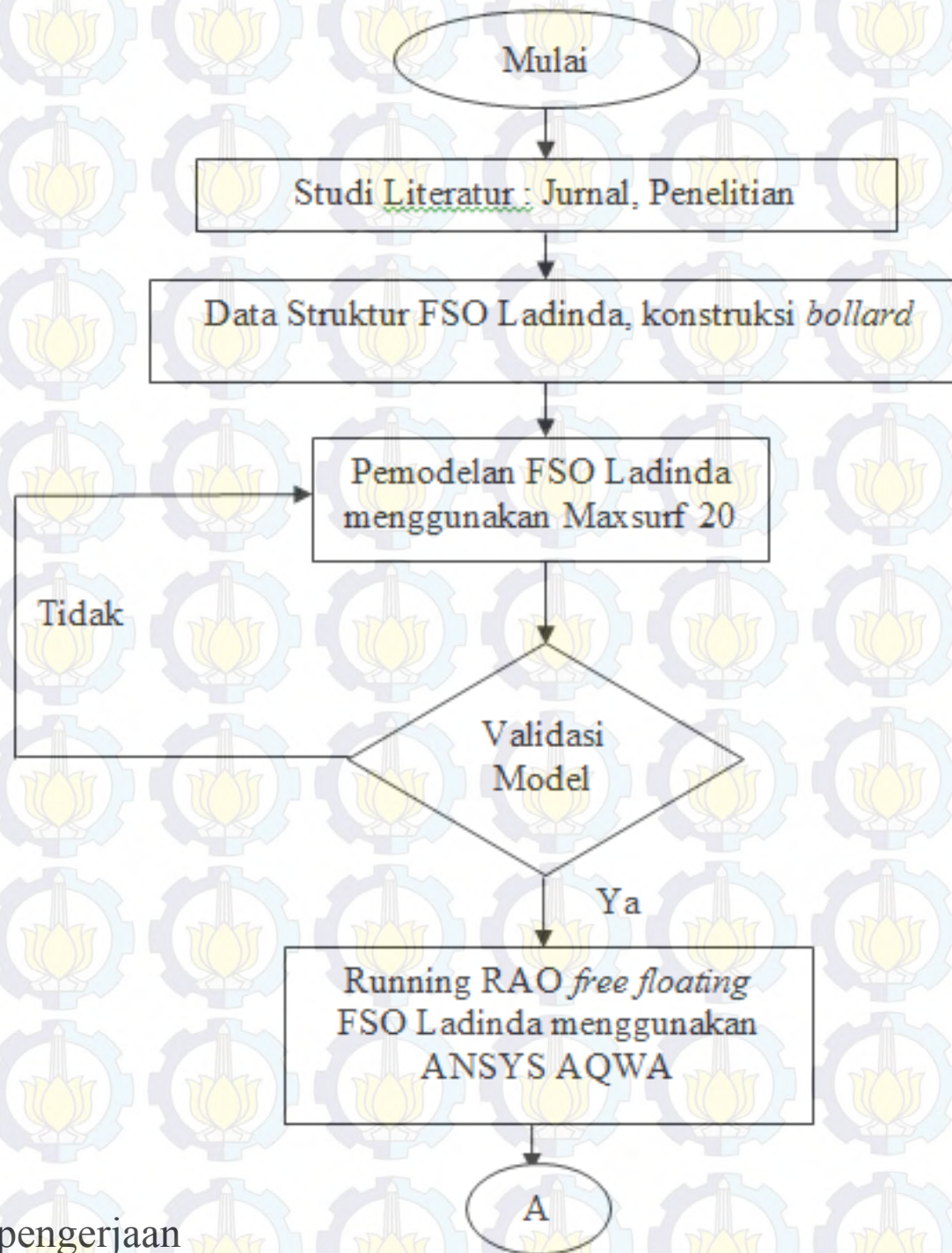
Manfaat

1. Dapat mengetahui modifikasi pada konfigurasi mooring pada FSO Ladinda saat reparasi pada *tower mooring*.
2. Dapat mengetahui perhitungan *tension force* pada rantai jangkar serta tegangan lokal maksimum pada *bollard*.

Batasan Masalah

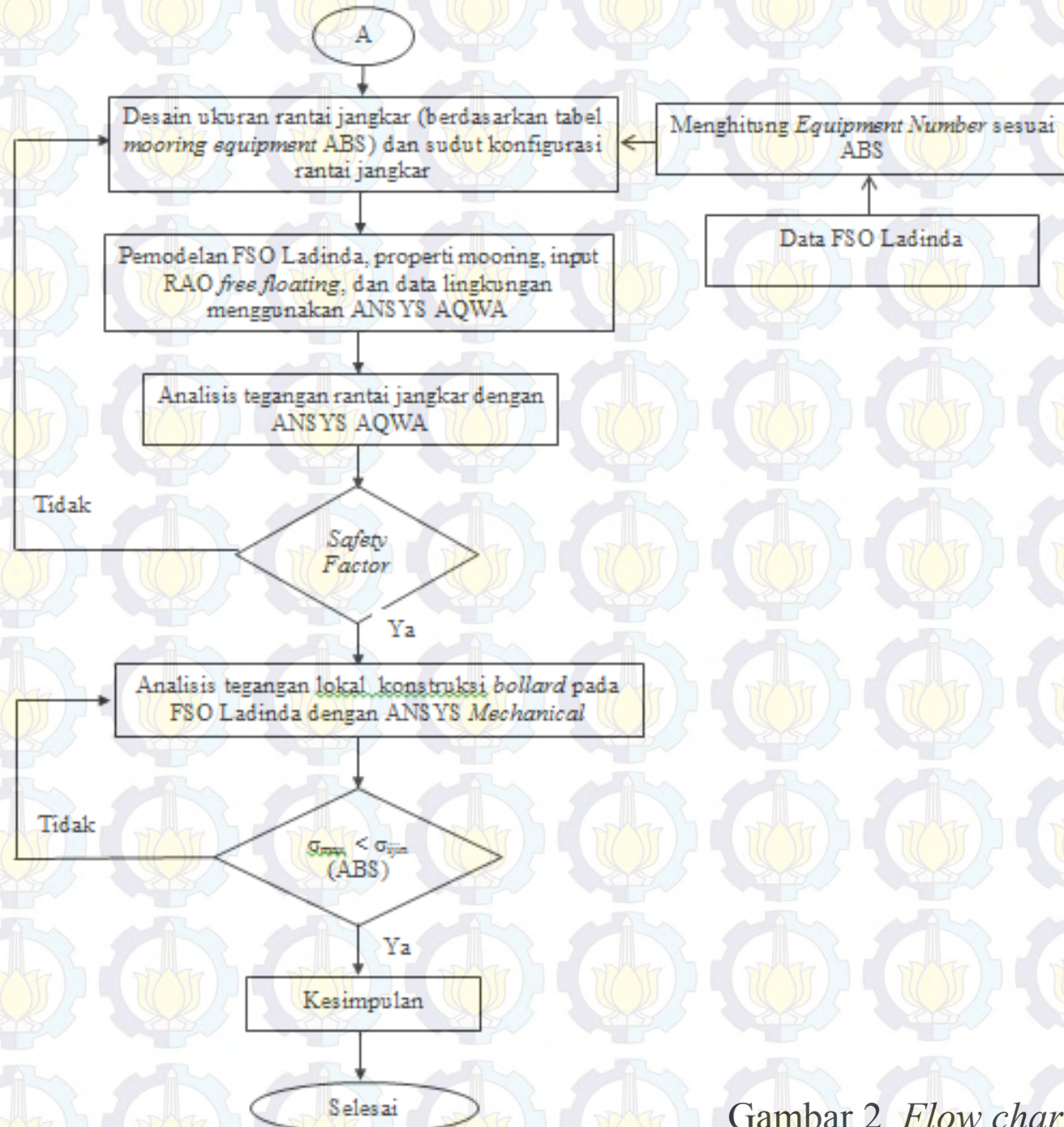
1. Merupakan studi kasus pada modifikasi sistem tambat FSO Ladinda.
2. Sistem tambat yang digunakan *Spread Mooring System* dengan konfigurasi rantai jangkar sesuai dengan ABS dan API.
3. Validasi hidrostatis model hanya dilakukan pada FSO Ladinda saat kondisi *full load* dan *light load*.
4. Analisis perilaku gerak dilakukan dalam dua kondisi yaitu saat FSO dalam keadaan *full load* dan *light load*.
5. *Heading* pembebanan pada *heading angle* 0° , 45° , 90° , 180° .
6. Riser tidak dimodelkan dan pergerakan hose diabaikan.
7. Jangkar dianggap tidak mengalami perpindahan atau kuat menahan gaya tarik rantai jangkar
8. Beban lingkungan yang ditinjau adalah beban arus, beban angin, dan beban gelombang dengan heading beban searah.
9. Perhitungan tegangan maksimum *bollard* difokuskan pada beban *tension force* maksimum rantai jangkar.

Metodologi



Gambar 2. Flow chart pengerjaan

Metodologi



Gambar 2. Flow chart pengerjaan (lanjutan)

Data FSO Ladinda

| Ukuran Kapal | Unit | Kondisi Maksimum Operasi | Kondisi Minimum Operasi |
|-----------------------------|------|--------------------------|-------------------------|
| Length, LOA | m | 284 | |
| Length, LBP | m | 272 | |
| LWL | m | 278.8 | 261.63 |
| Breadth, B | m | 43.4 | |
| Depth, D | m | 20.6 | |
| Draft, T | m | 15.725 | 2.41 |
| Displacement | Ton | 161810 | 21614 |
| LCG | m | 144.11 from AP | 123.03 from AP |
| KG (VCG) | m | 10.76 | 12.57 |
| TCG | m | 0.1 | 0 |
| LCB | m | 143.83 from AP | 146.11 from AP |
| LCF | m | 138.176 from AP | 145.52 from AP |
| KB | m | 7.72 from BL | 1.35 from BL |
| KM | m | 17.69 from BL | 53.35 from BL |
| Midship Section Coefficient | | 0.995 | |
| Water Plane Coefficient | | 0.923 | |
| Prismatic Coefficient | | 0.84 | |
| Block Coefficient | | 0.83 | |

(sumber : PT. Energi Mega Persada, 2014)

Data Lingkungan

| Parameter | | Unit | 100 – Tahunan |
|-----------|----------------|-------|---------------|
| Gelombang | Tinggi (Hs) | m | 1.9812 |
| | Periode (Ts) | s | 5 |
| Angin | Kecepatan (Vw) | knots | 22 |
| | Waktu Durasi | hrs | 1 |
| Arus | Kecepatan (Vc) | m/s | 2.41 |

(sumber : PT. Energi Mega Persada, 2014)

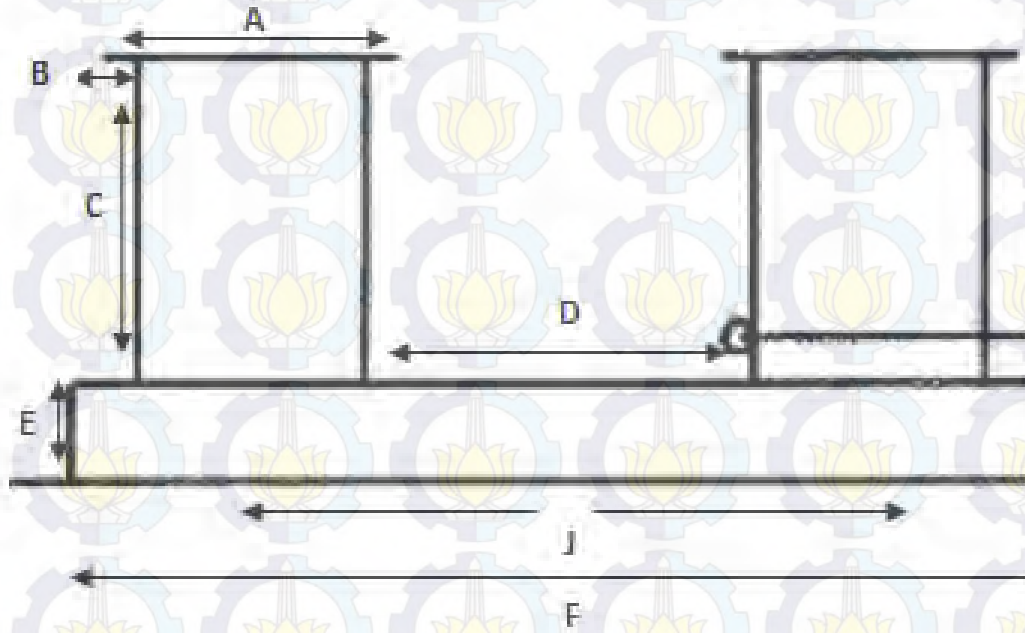
Kedalaman Selat Lalang, Malaka Strait adalah 25 m.

(id.wikipedia.org/wiki/selat-malaka, 2015).

Data Konstruksi *Bollard*

| No | Data | |
|----|---------------------------|----------------|
| 1. | Jenis Bollard | Double Bollard |
| 2. | Jumlah di FSO Ladinda | 9 Buah |
| 3. | Safety Working Load (SWL) | 200 ton |
| 4. | Material Baja | ASTM A36 |
| 5. | Yield Strength | 250 MPa |

(sumber : PT. Energi Mega Persada, 2014)



Gambar Konstruksi *Bollard*

(sumber : PT. Energi Mega Persada, 2014)

A = 60 cm

B = 2 cm

C = 85 cm

E = 27 cm

F = 200 cm

7. G = 62 cm

8. H = 10 cm

9. I = 22 cm

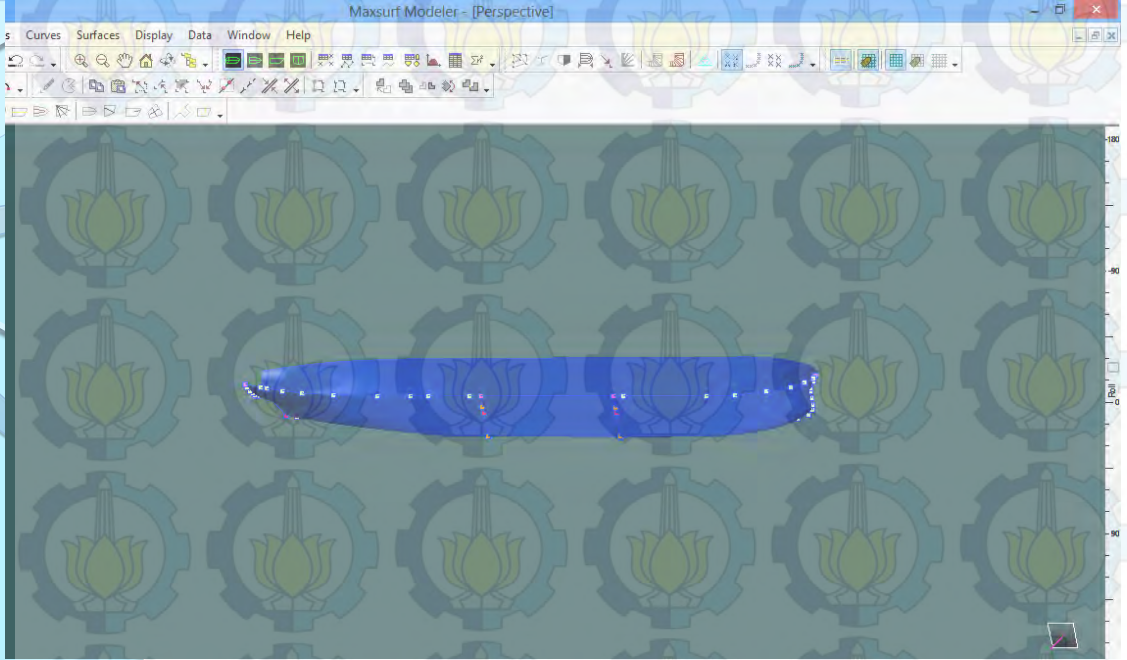
10. J = 144 cm

11. K = 53 cm

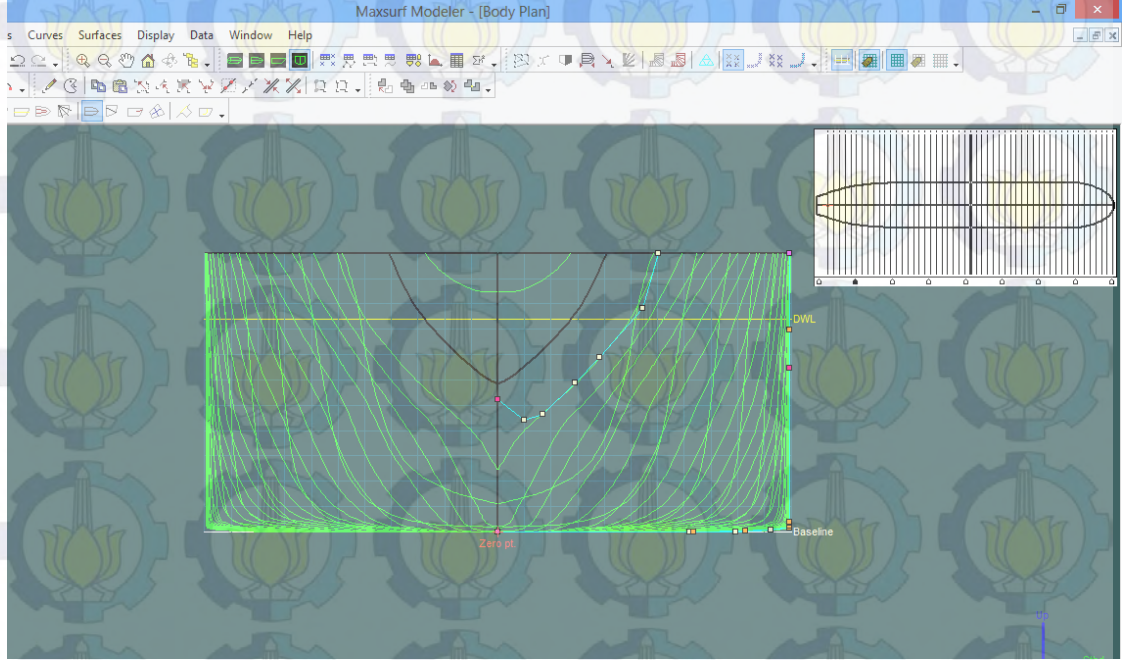
The background of the slide features a repeating pattern of light blue gears with yellow lotus flowers inside them. On the left side, there is a vertical blue bar with a white circular graphic element that overlaps the gear pattern.

Pembahasan

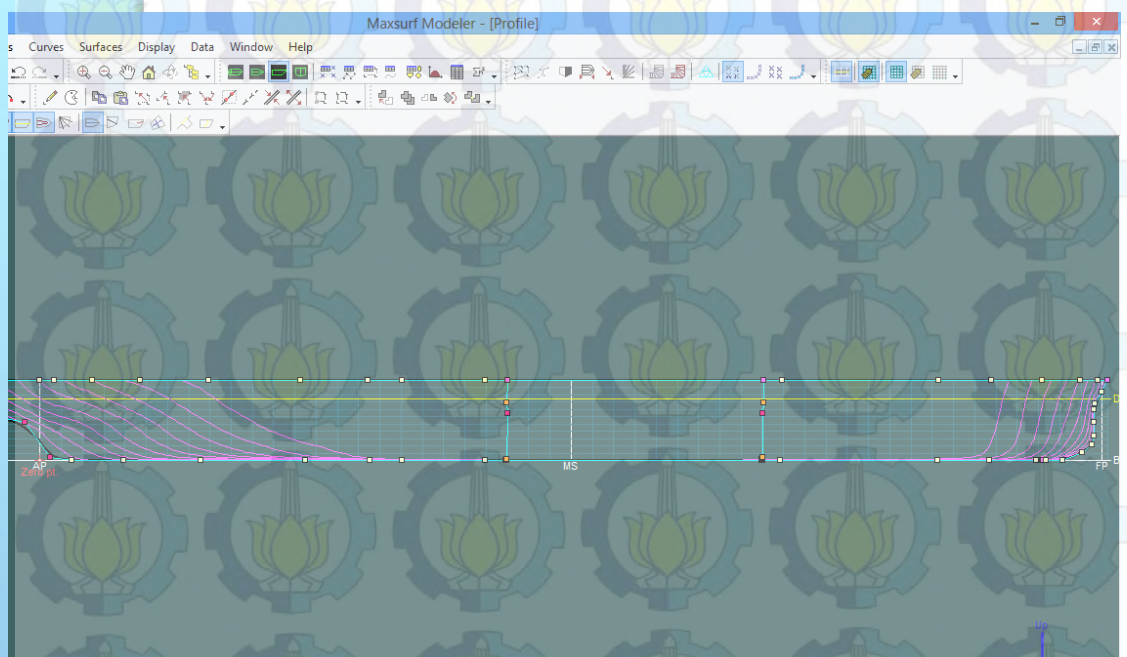
Pemodelan FSO Ladinda menggunakan software Maxsurf



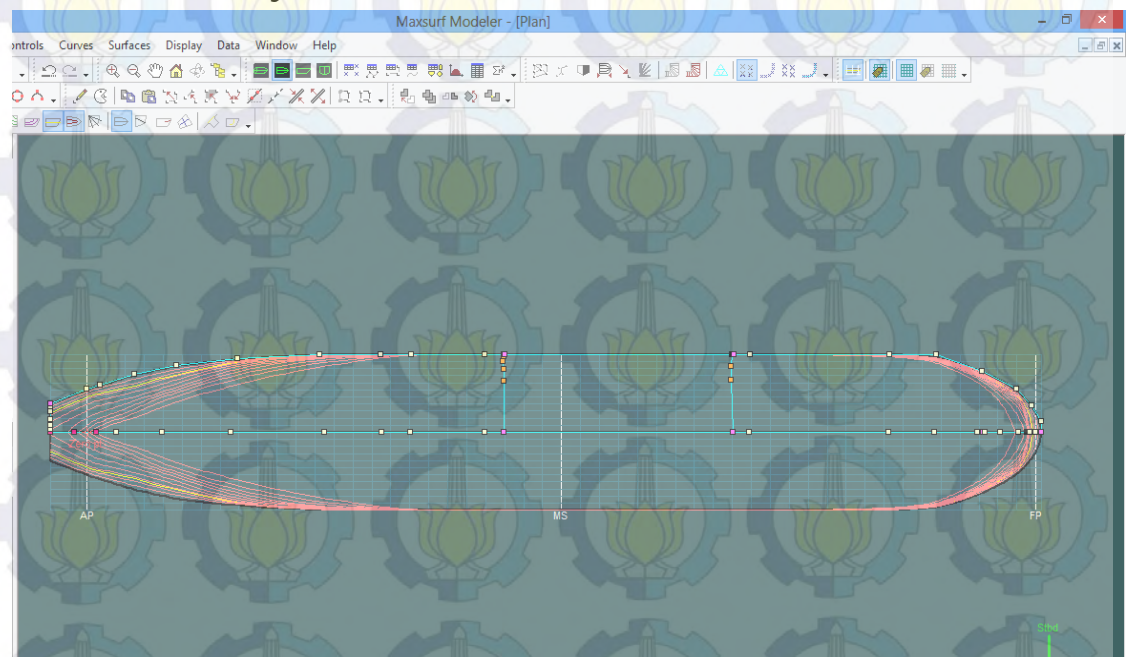
Isometric View



Body Plan



Sheer Plan



Half Breadth Plan

Validasi Model FSO Ladinda

| FULL LOAD | | | |
|--------------------------|-------------|----------------|--------------------|
| | Data | Maxsurf | Koreksi (%) |
| Displacement | 161810,00 | 161955,00 | 0,09 |
| Volume | 157863,41 | 158004,88 | 0,09 |
| Draft to Baseline | 15,73 | 15,73 | 0,00 |
| Immersed depth | 15,73 | 15,74 | 0,04 |
| Beam wl | 43,40 | 43,25 | 0,34 |
| Cp | 0,84 | 0,827 | 1,55 |
| Cb | 0,83 | 0,825 | 0,60 |
| Cm | 1,00 | 1,00 | 0,20 |
| Cwp | 0,92 | 0,90 | 2,17 |
| LCB from zero pt | 143,83 | 141,42 | 1,68 |
| LCF from zero pt | 138,18 | 135,62 | 1,85 |
| KB | 7,75 | 8,12 | 4,71 |

| LIGHT LOAD | | | |
|--------------------------|-------------|----------------|--------------------|
| | Data | Maxsurf | Koreksi (%) |
| Displacement | 21614,00 | 22161,00 | 2,47 |
| Volume | 21086,83 | 21620,49 | 2,53 |
| Draft to Baseline | 2,41 | 2,41 | 0,00 |
| Immersed depth | 2,41 | 2,41 | 0,00 |
| Beam wl | 43,40 | 43,34 | 0,13 |
| Cp | 0,84 | 0,800 | 4,76 |
| Cb | 0,83 | 0,800 | 3,61 |
| Cm | 1,00 | 0,99 | 0,90 |
| Cwp | - | 0,83 | - |
| LCB from zero pt | 146,11 | 146,75 | 0,44 |
| LCF from zero pt | 145,52 | 145,28 | 0,17 |
| KB | 1,20 | 1,24 | 3,33 |

Analisis RAO free floating pada ANSYS

● Input :

- Model
- Displasmen
- Titik Berat
- Jari – Jari Girasi
- Heading

RAO Free Floating

Jari – Jari Girasi

Perhitungan Jari-Jari Girasi

Kondisi Full Load

$$\begin{aligned}k_{xx} &= 0,4 \times B = 0,4 \times 43,4 = 17,36\text{m} \\k_{yy} &= 0,25 \times L = 0,25 \times 278,8 = 69,7\text{m} \\k_{zz} &= 0,25 \times L = 0,26 \times 278,8 = 69,7\text{m}\end{aligned}$$

$$\text{VCG} = 10,76 \text{ m}$$

$$\text{TCG} = 0,1 \text{ m}$$

$$\text{LCG} = 8,11 \text{ m (dari midship)}$$

Perhitungan Jari-Jari Girasi

Kondisi Light Load

$$\begin{aligned}k_{xx} &= 0,333 \times B = 0,4 \times 43,4 = 17,36\text{m} \\k_{yy} &= 0,25 \times L = 0,25 \times 261,63 = 65,4\text{m} \\k_{zz} &= 0,25 \times L = 0,25 \times 261,63 = 65,4\text{m}\end{aligned}$$

$$\text{VCG} = 12,57 \text{ m}$$

$$\text{TCG} = 0 \text{ m}$$

$$\text{LCG} = -12,97 \text{ m (dari midship)}$$

Model FSO Ladinda pada ANSYS

The screenshot displays the ANSYS DesignModeler interface for a hydrodynamic diffraction analysis. The main window shows a 3D model of a floating structure (FSO) in a dark gray color. The interface includes a menu bar (File, Create, Concept, Tools, View, Help), a toolbar with various modeling tools, and a Tree Outline on the left. The Tree Outline shows the following structure:

- A: Hydrodynamic Diffraction
 - XYPlane
 - ZXPlane
 - YZPlane
 - Import1
 - 1 Part, 1 Body

The Details View on the left shows the properties of the selected object (Import1):

| Details of Import1 | |
|--------------------|----------------------------|
| Import | Import1 |
| Source | E:\AKADE...Ladinda NEW.igs |
| Base Plane | XYPlane |
| Operation | Add Material |
| Solid Bodies | Yes |
| Surface Bodies | Yes |
| Line Bodies | No |
| Simplify Geometry | No |

The 3D graphics area shows a coordinate system with X, Y, and Z axes. A scale bar is visible below the model, indicating dimensions in meters (m) from 0,00 to 100,00. The ANSYS 14.0 logo is visible in the top right corner. The status bar at the bottom shows "Ready", "No Selection", and "Meter".

Model FSO Ladinda pada ANSYS

ANSYS 14.0

A: Hydrodynamic Diffraction [ANSYS AQWA - HYDRO-DIFFRACT]

File Edit View Units Help Solve Solve Hydrostatics

Mesh Generate Mesh Insert Mesh Control

Outline

- Project
 - Model (A3)
 - Geometry
 - Part
 - Connections
 - Catenary Data
 - Mesh
 - Hydrodynamic Diffraction (A4)
 - Analysis Settings
 - Gravity
 - Structure Selection
 - Wave Directions
 - Wave Frequencies
 - Solution (A5)

Details

Details of Mesh

| | |
|------------------------|--------------------|
| Name | Mesh |
| Defeaturing Tolerance | 2 m |
| Max Element Size | 5 m |
| Max Allowed Frequen... | 0,228 Hz |
| Meshing Type | Program Controlled |

Generated Mesh Information

| | |
|--------------------------|------|
| Number of Nodes | 2580 |
| Number of Elements | 2499 |
| Number of Nodes (Dif... | 2182 |
| Number of Elements (...) | 2103 |

0,00 25,00 50,00 75,00 100,00 (m)

Geometry Properties Graph Report Preview

Press F1 for Help Length units: m

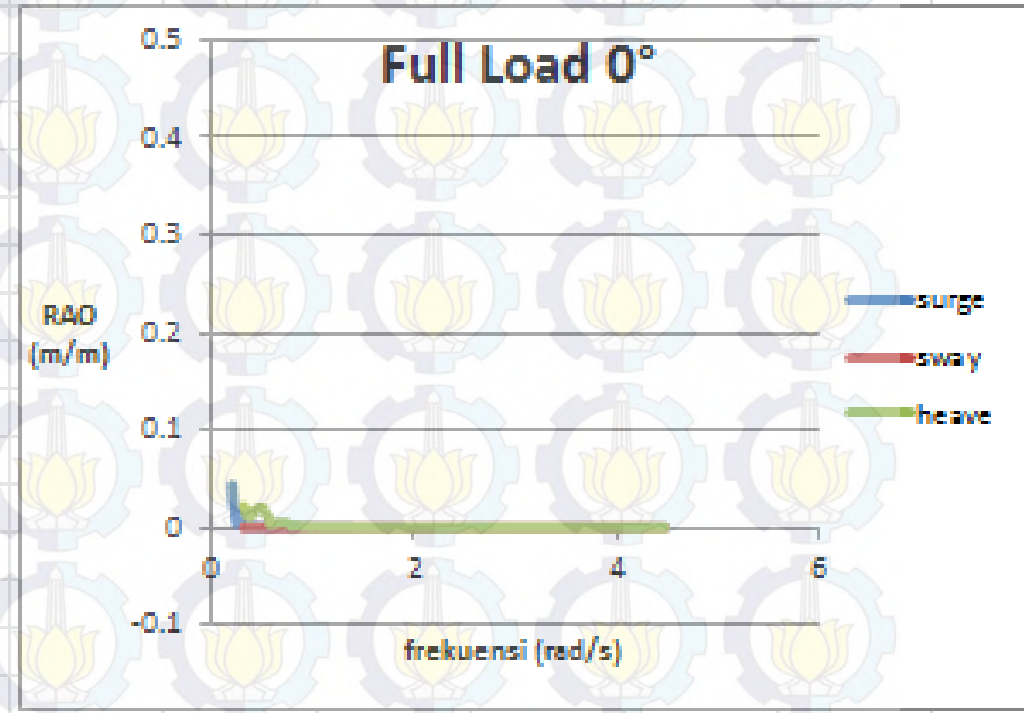
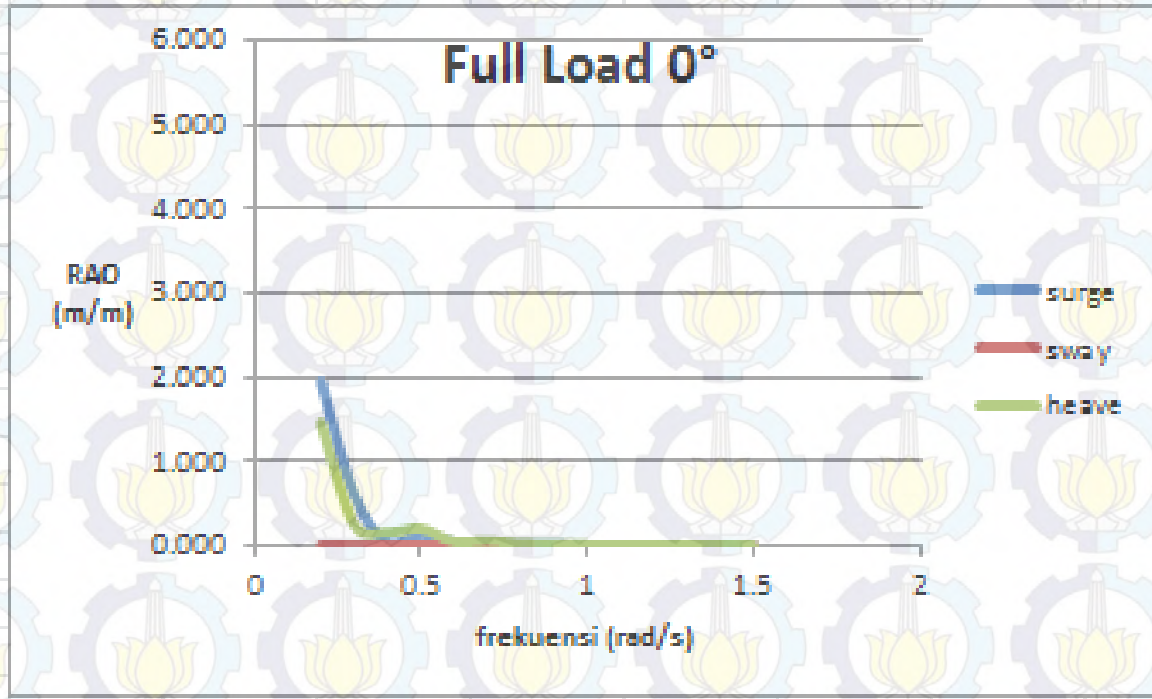
The background features a repeating pattern of light blue gears with yellow lotus flowers inside them. On the left side, there is a vertical blue gradient bar with a white circular graphic element.

Hasil RAO full Load pada ANSYS

Gerak Translational

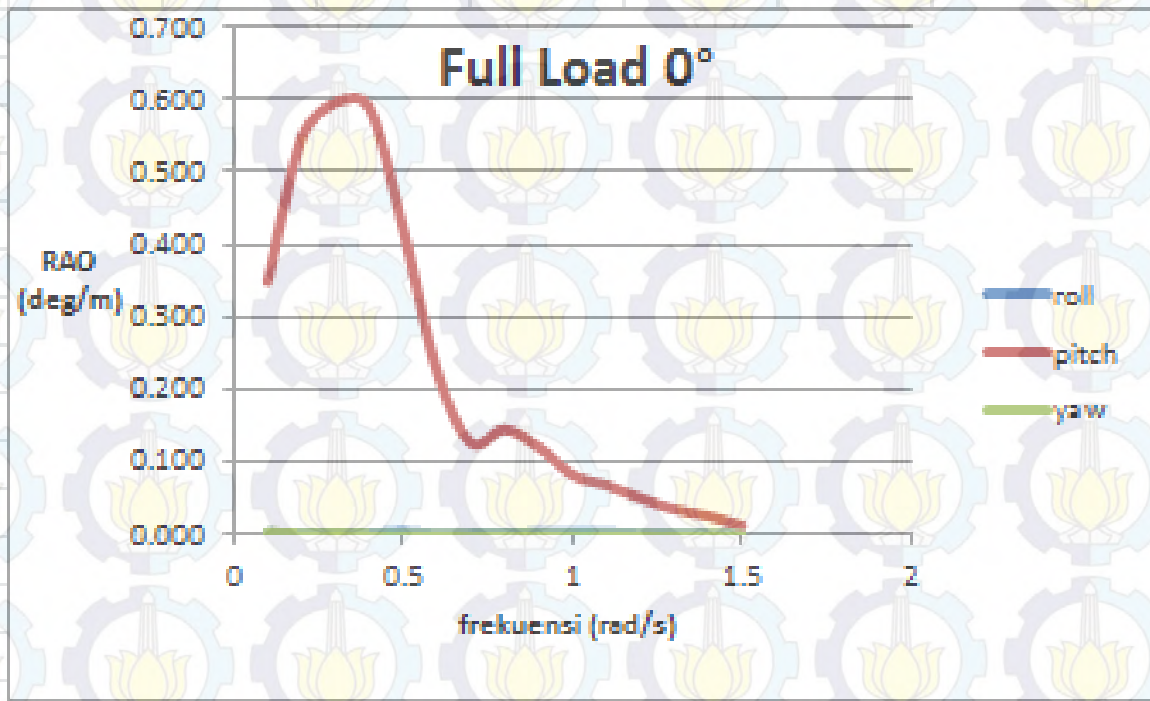
Free Floating

Moored

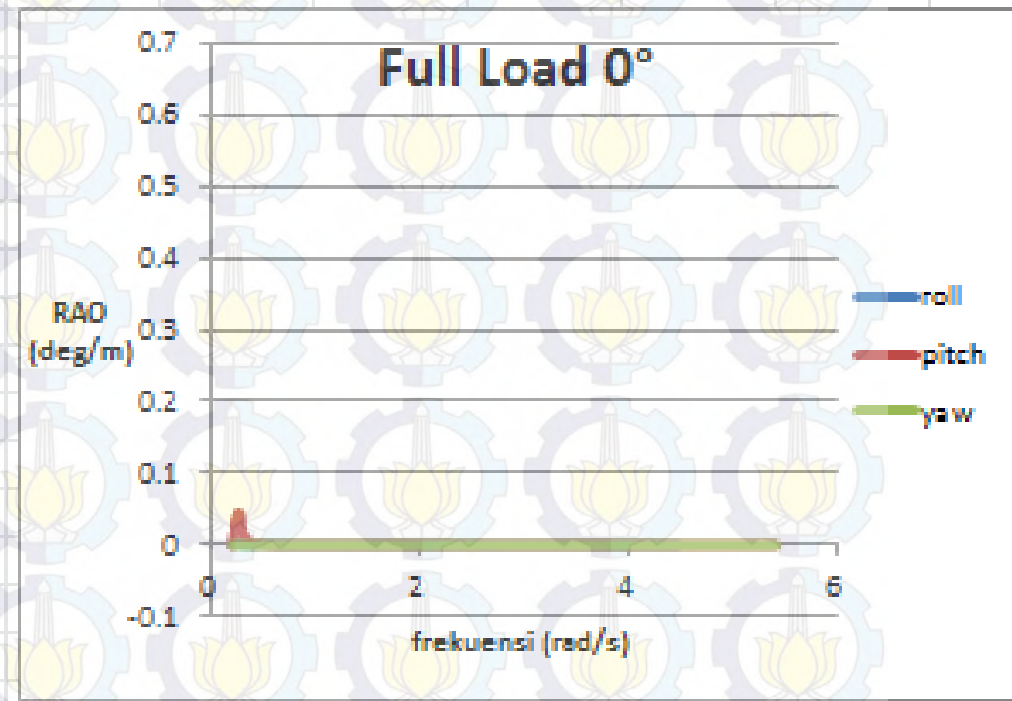


Gerak Rotasional

Free Floating



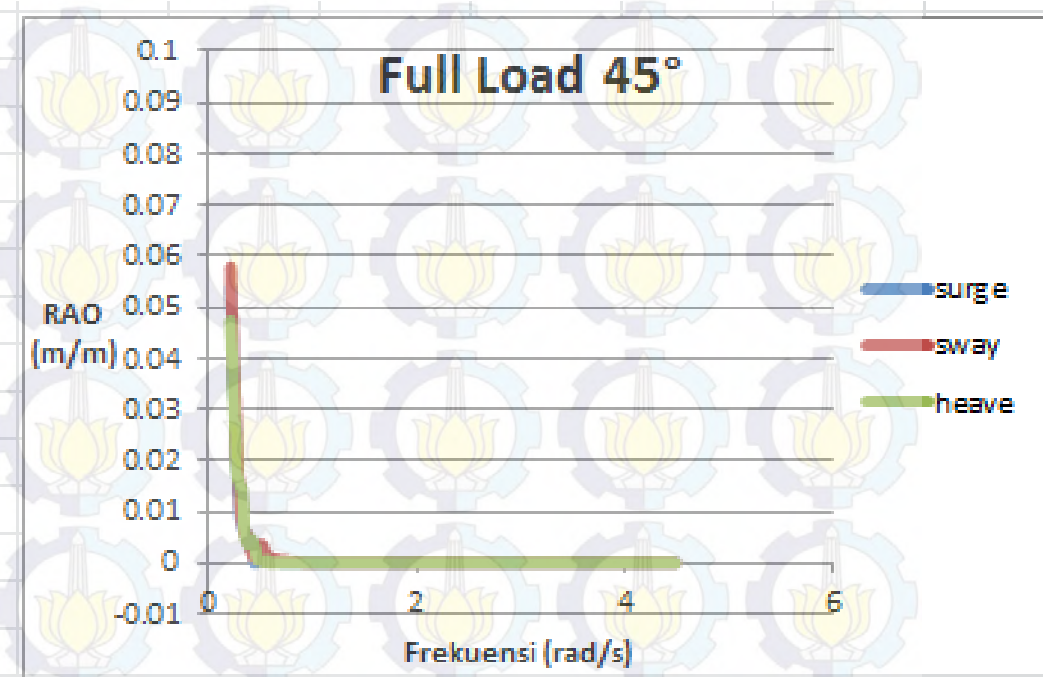
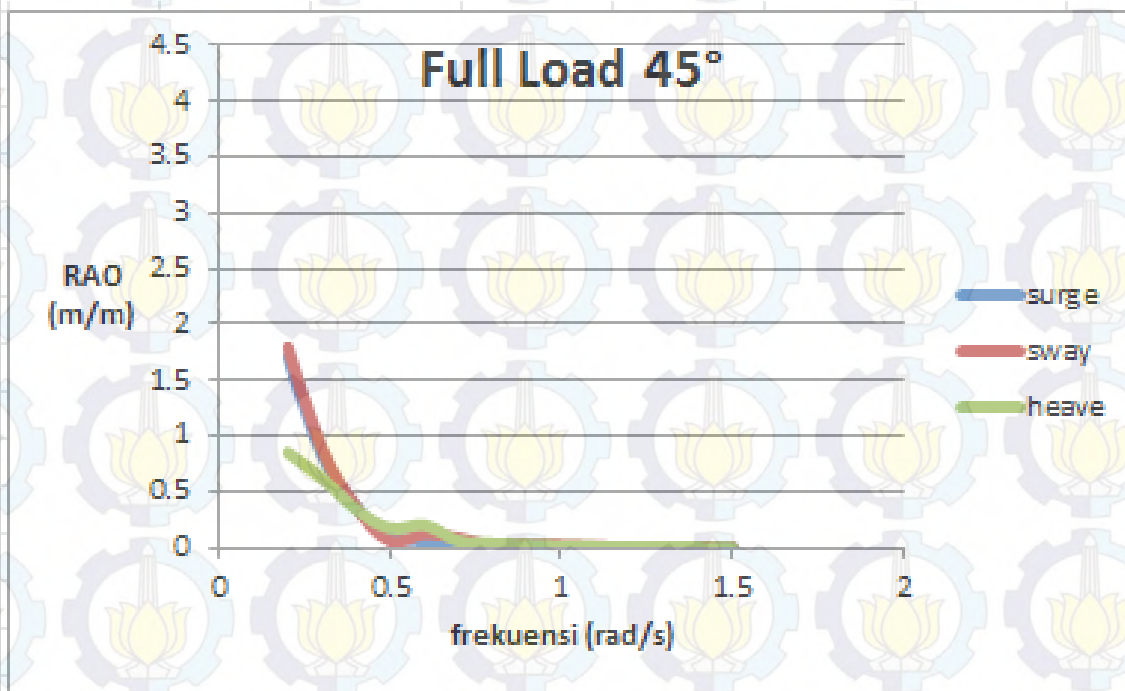
Moored



Gerak Translasi

Free Floating

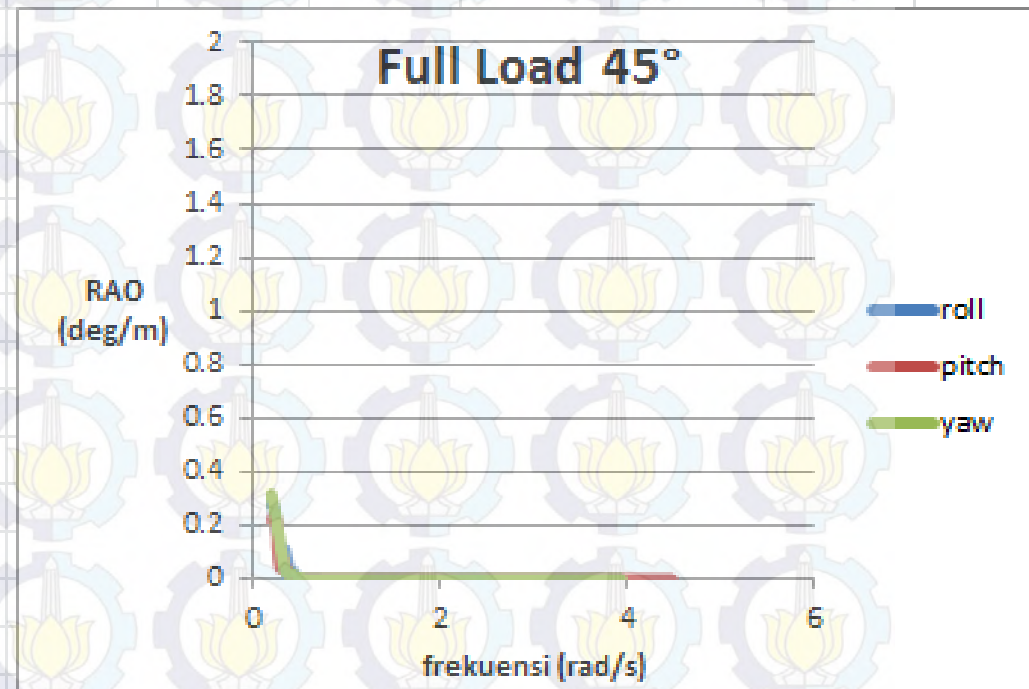
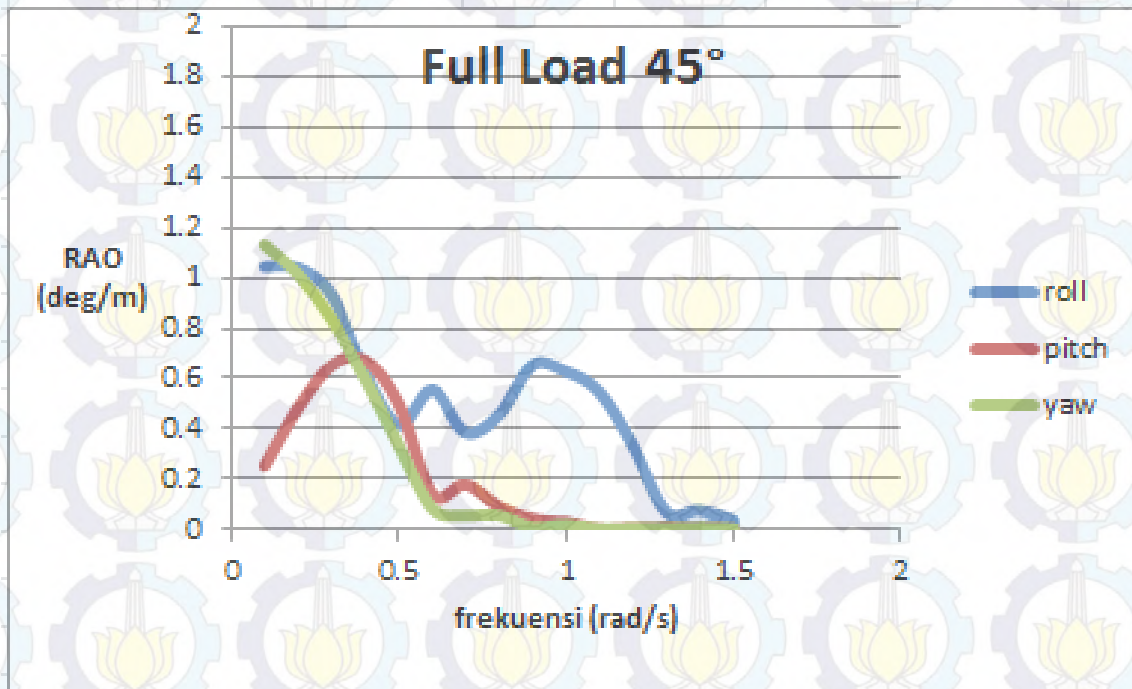
Moored



Gerak Rotasional

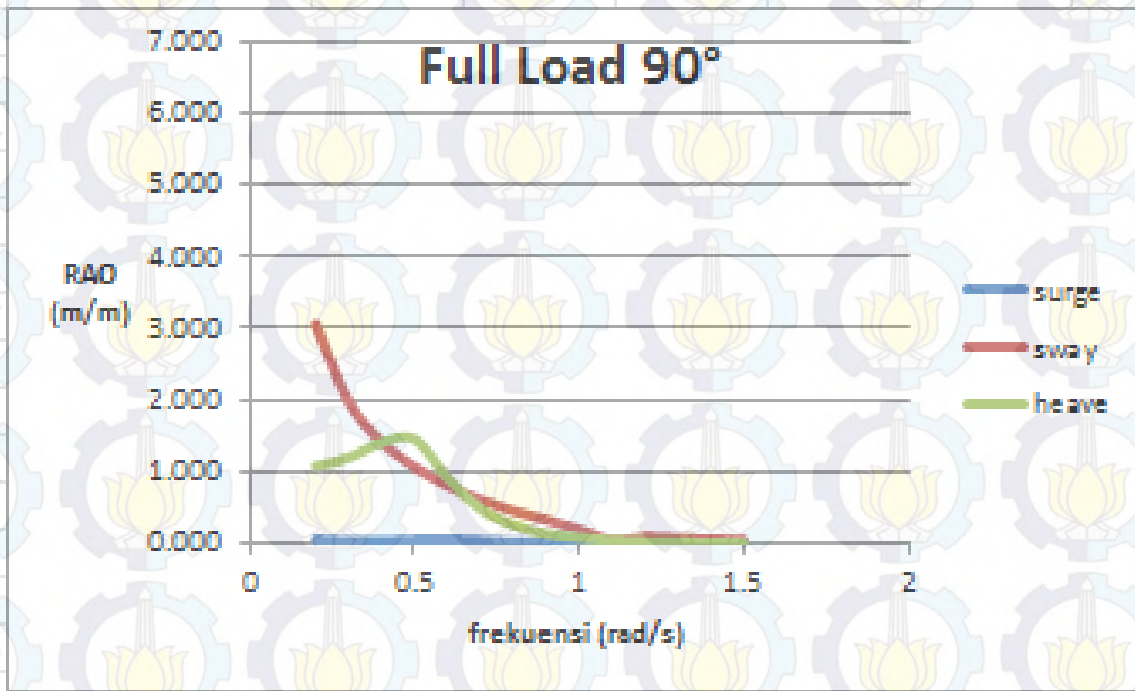
Free Floating

Moored

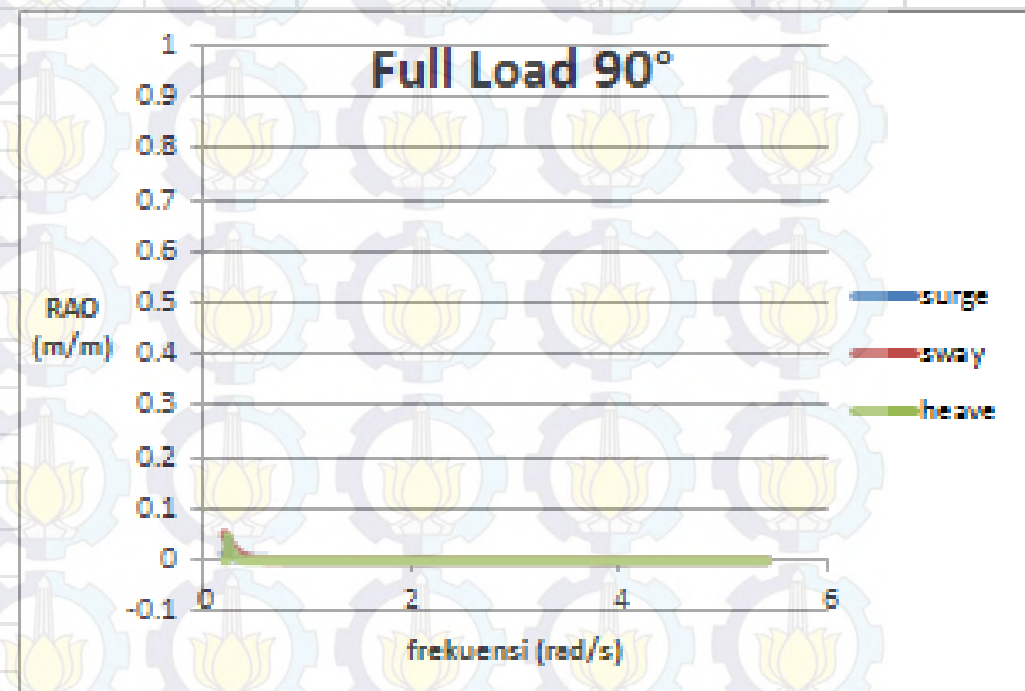


Gerak Translational

Free Floating

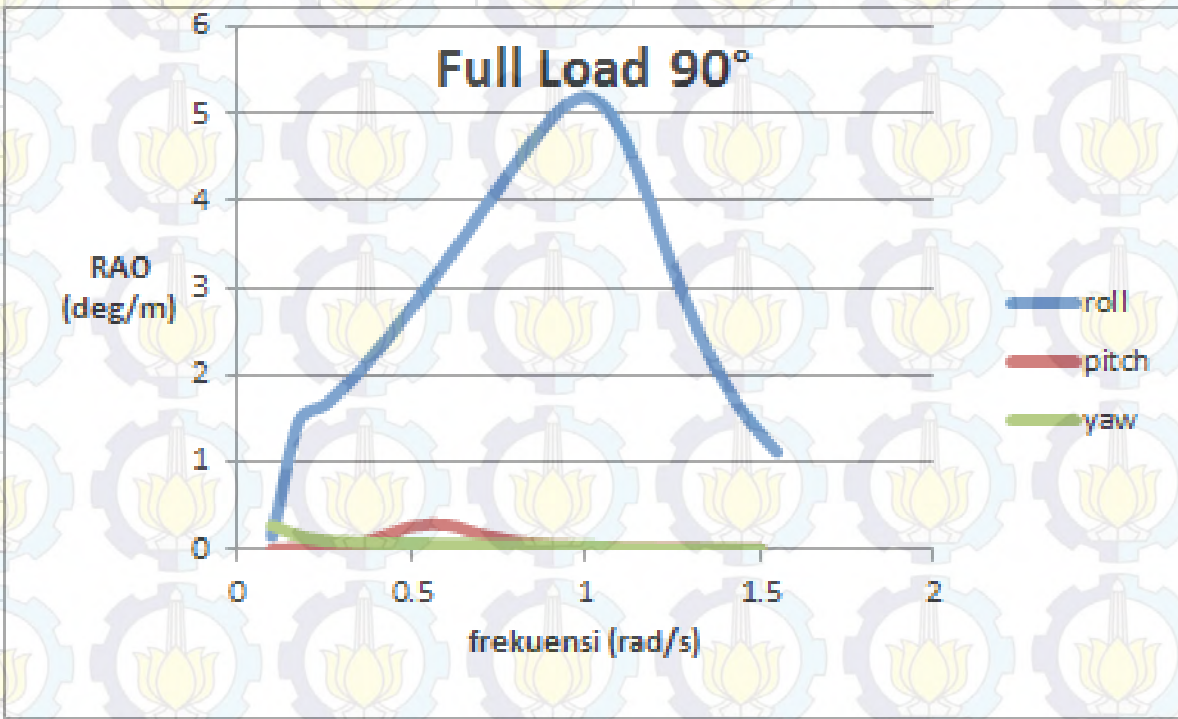


Moored

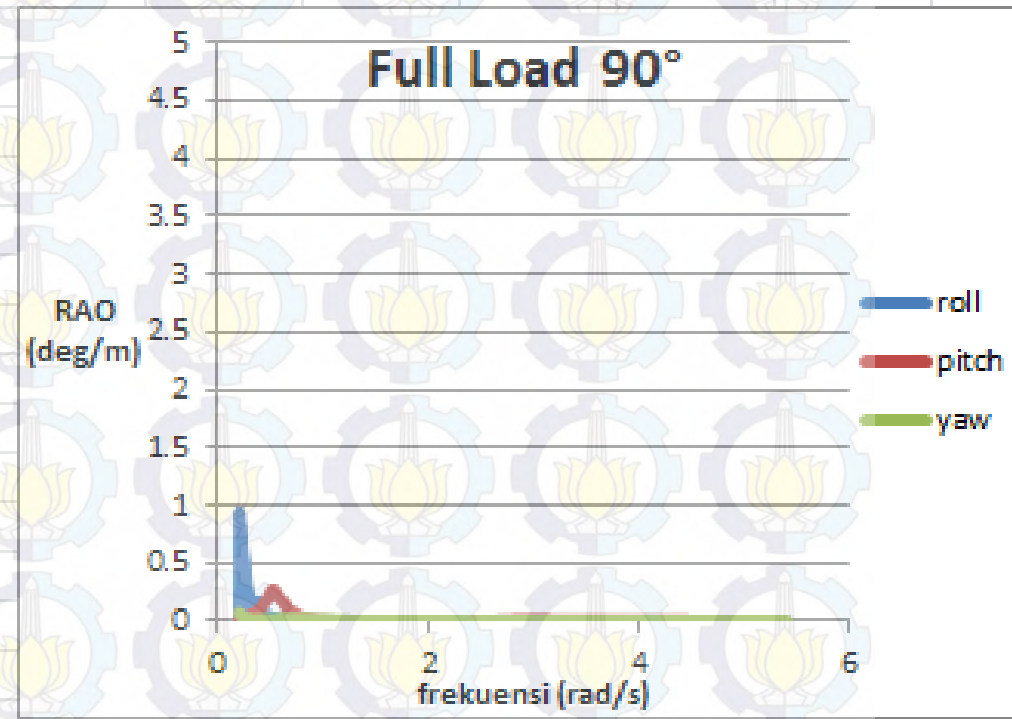


Gerak Rotasional

Free Floating



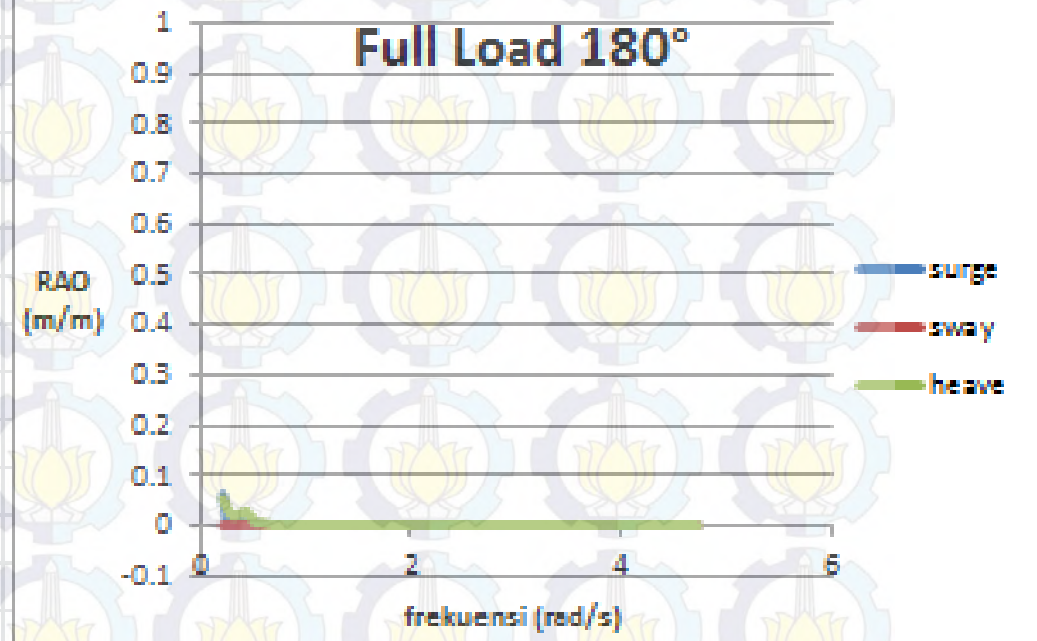
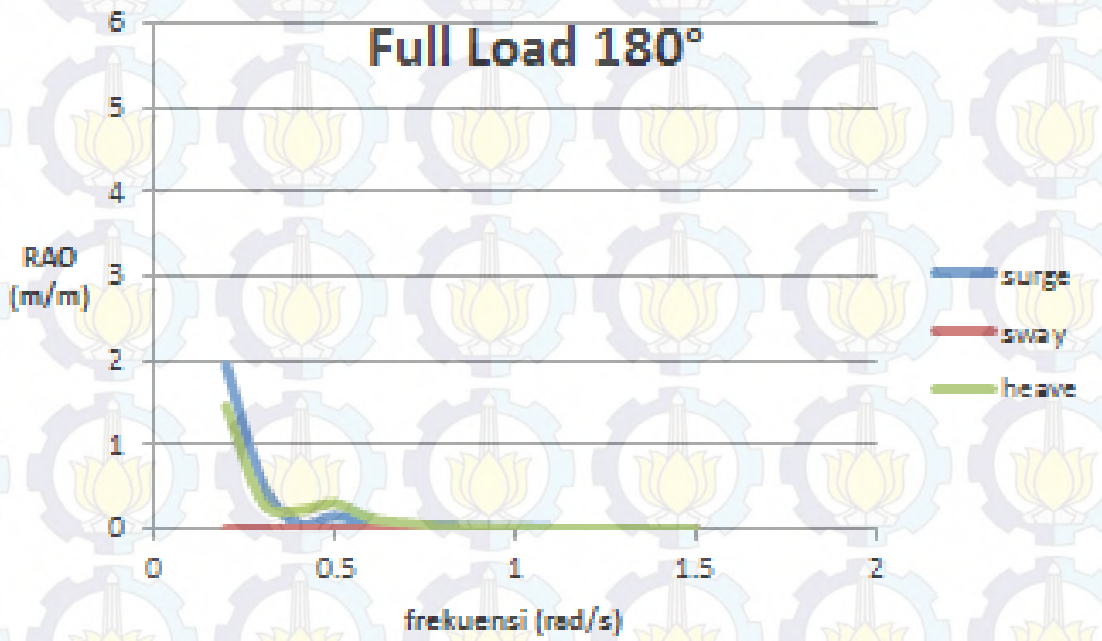
Moored



Gerak Translasi

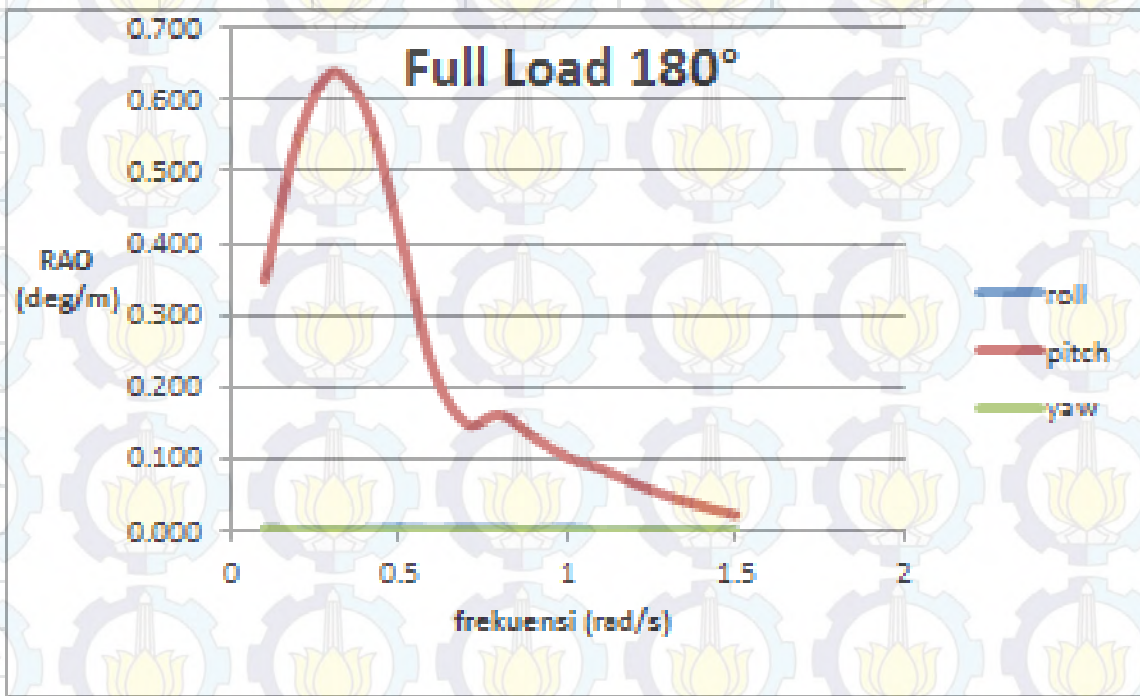
Free Floating

Moored

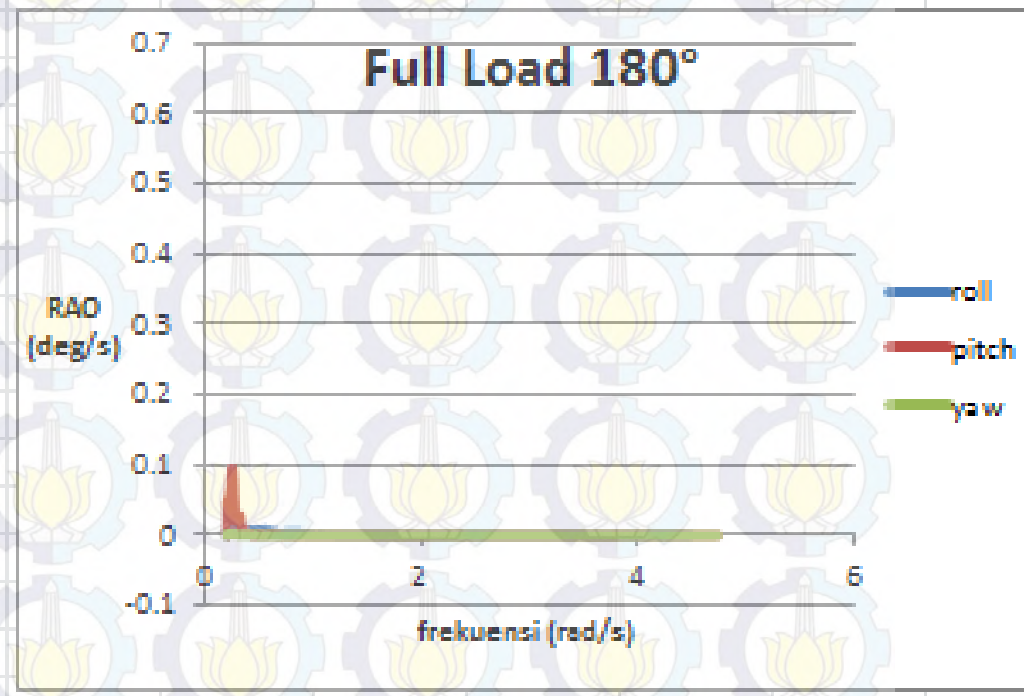


Gerak Rotasional

Free Floating



Moored



RAO free floating full load

RAO tertambat full load

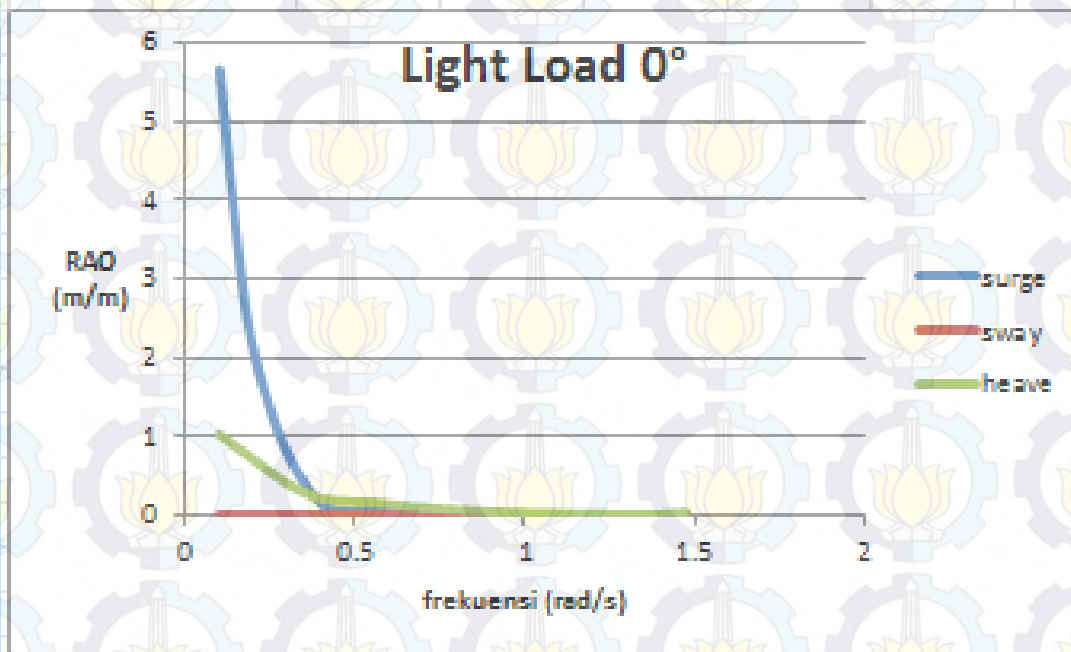
| Moda Gerakan | Unit | RAO Maksimum | | | | | Max | Moda Gerakan | Unit | RAO Maksimum | | | | | Max |
|--------------|-------|--------------|--------|--------|---------|-------|-------|--------------|-------|--------------|--------|--------|---------|--|-----|
| | | 0 deg | 45 deg | 90 deg | 180 deg | | | | | 0 deg | 45 deg | 90 deg | 180 deg | | |
| Surge | m/m | 1.945 | 1.715 | 0.055 | 1.939 | 1.945 | Surge | m/m | 0.051 | 0.054 | 0.013 | 0.061 | 0.061 | | |
| Sway | m/m | 0.000 | 1.794 | 3.057 | 0.000 | 3.057 | Sway | m/m | 0.000 | 0.053 | 0.058 | 0.000 | 0.058 | | |
| Heave | m/m | 1.459 | 0.851 | 1.453 | 1.457 | 1.459 | Heave | m/m | 0.022 | 0.047 | 0.046 | 0.052 | 0.052 | | |
| Roll | deg/m | 0.004 | 1.043 | 5.185 | 0.005 | 5.185 | Roll | deg/m | 0.002 | 0.030 | 0.093 | 0.001 | 0.093 | | |
| Pitch | deg/m | 0.596 | 0.637 | 0.280 | 0.673 | 0.673 | Pitch | deg/m | 0.046 | 0.024 | 0.027 | 0.095 | 0.095 | | |
| Yaw | deg/m | 0.003 | 1.133 | 0.270 | 0.003 | 1.133 | Yaw | deg/m | 0.000 | 0.031 | 0.007 | 0.003 | 0.031 | | |

The background features a repeating pattern of light blue gears with yellow lotus flowers inside them. On the left side, there is a vertical blue bar with a white circular graphic element.

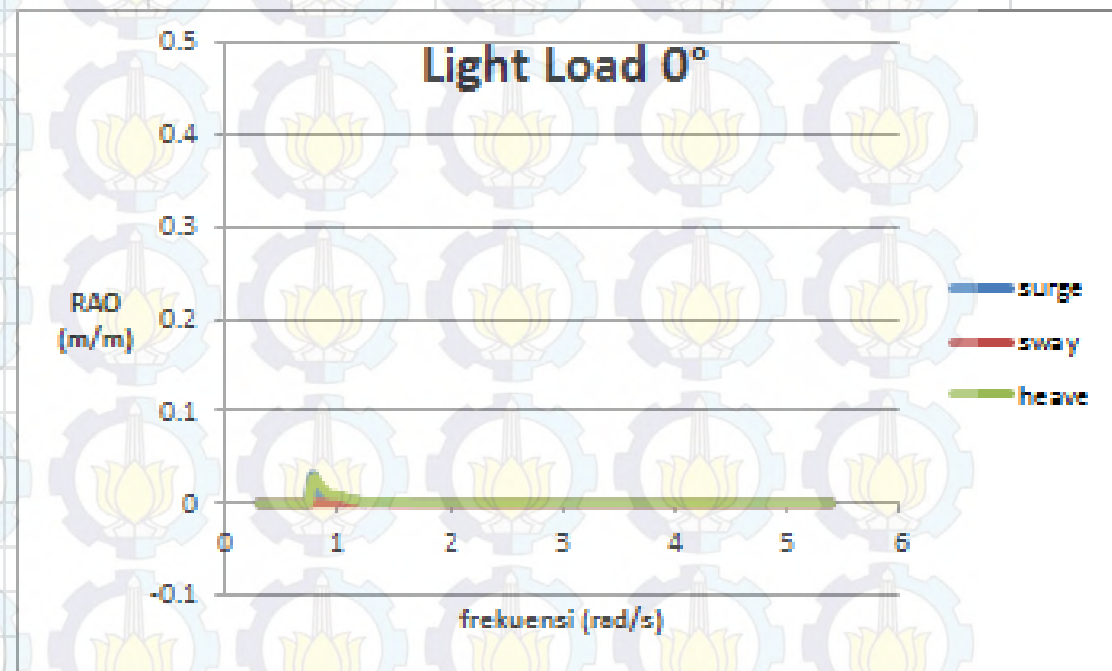
Hasil RAO light Load pada ANSYS

Gerak Translational

Free Floating

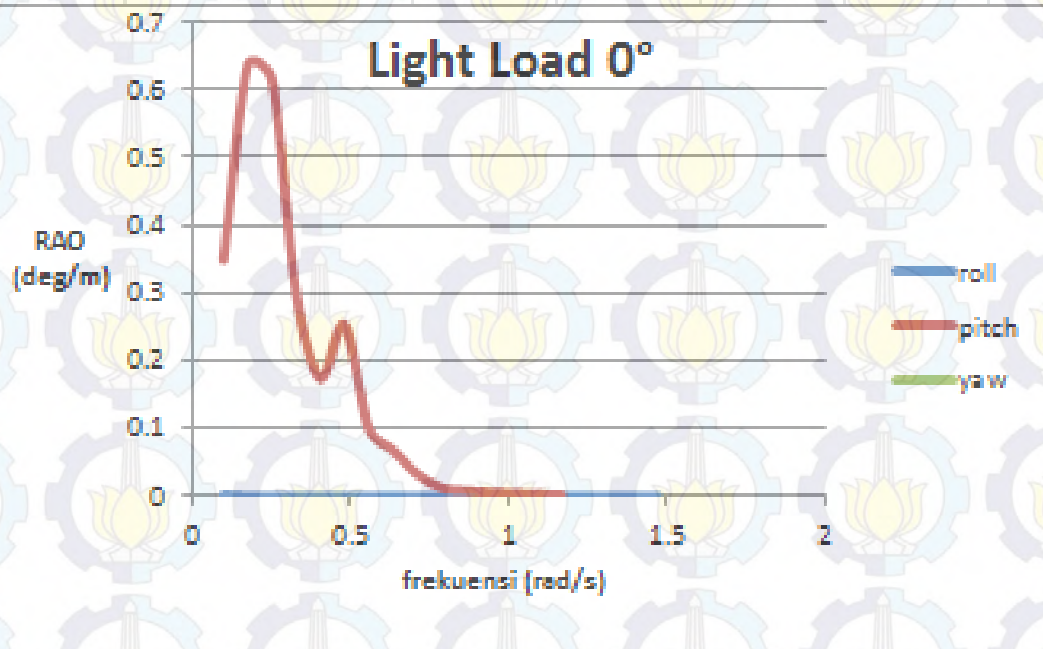


Moored

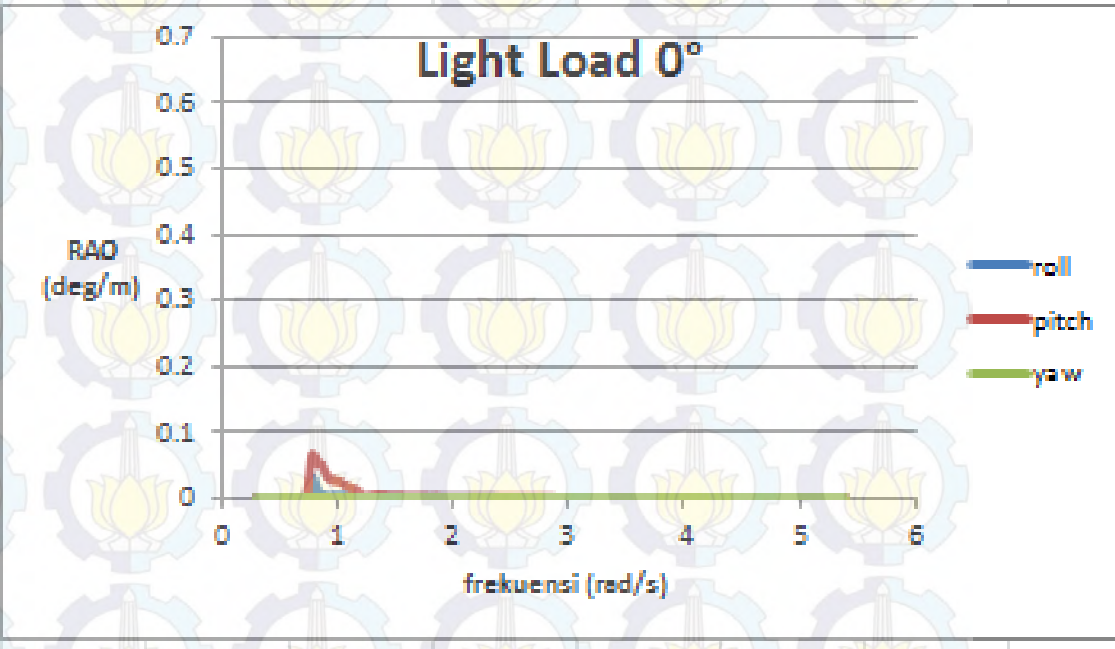


Gerak Rotasional

Free Floating

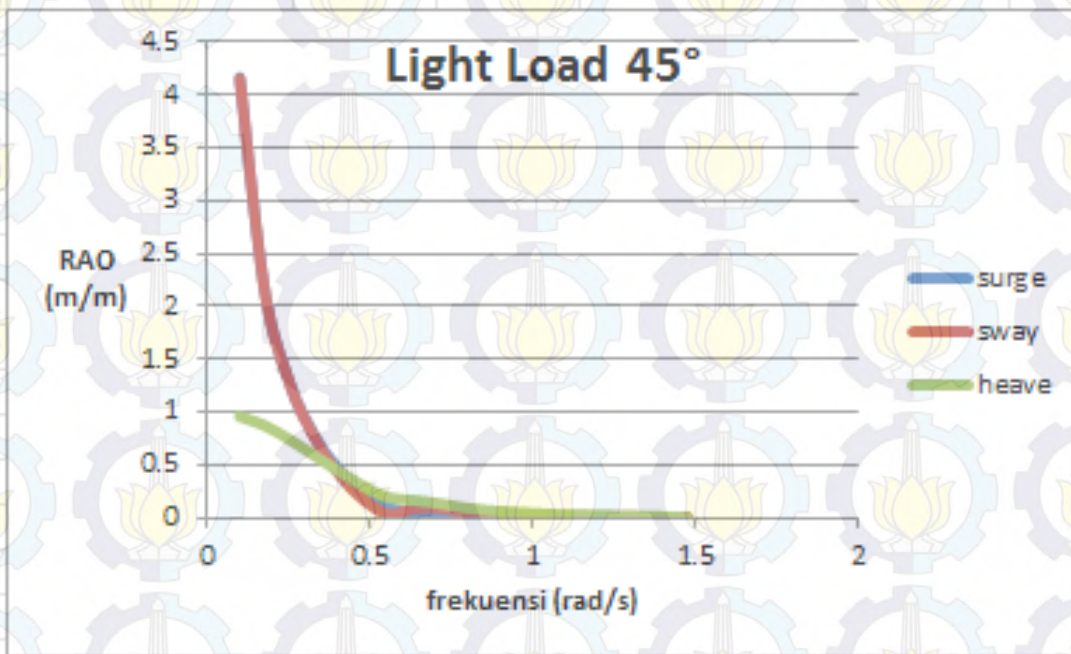


Moored

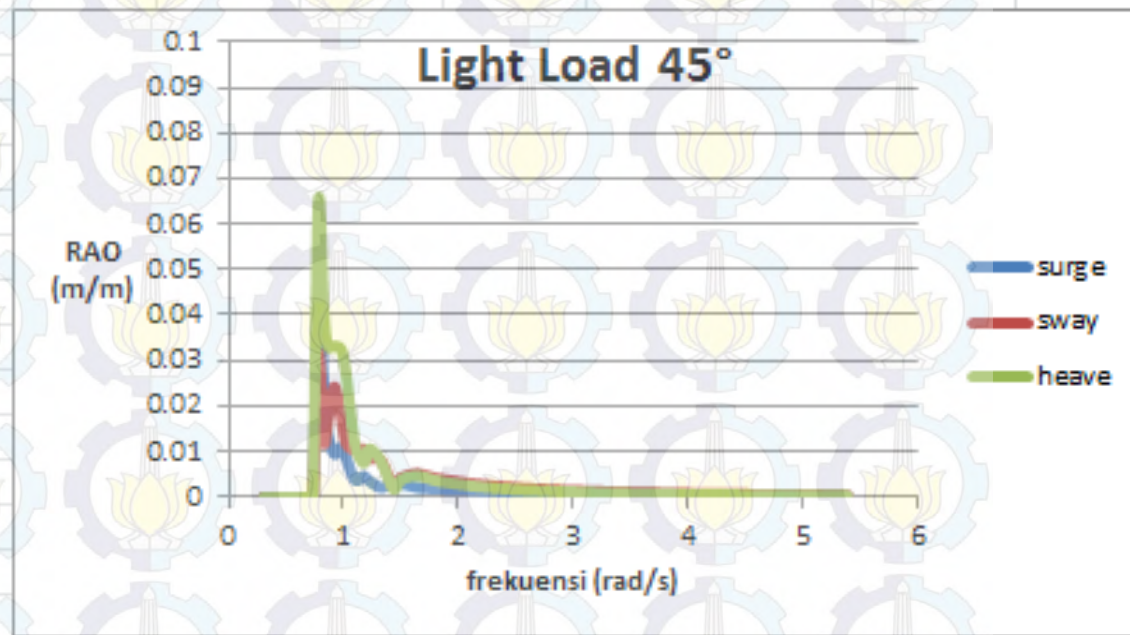


Gerak Translational

Free Floating

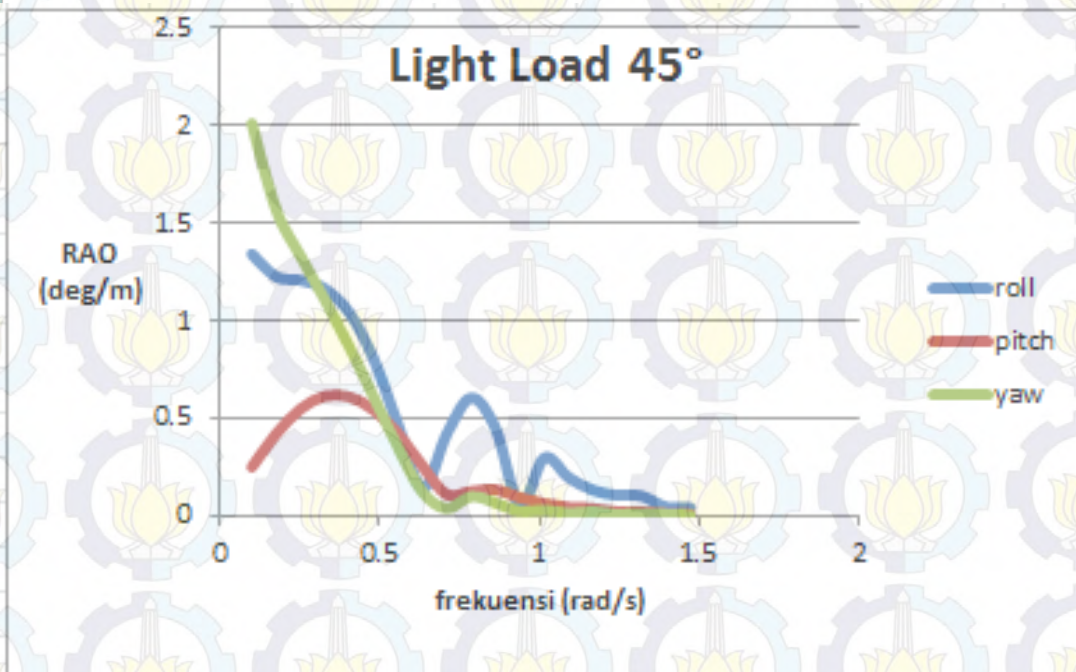


Moored

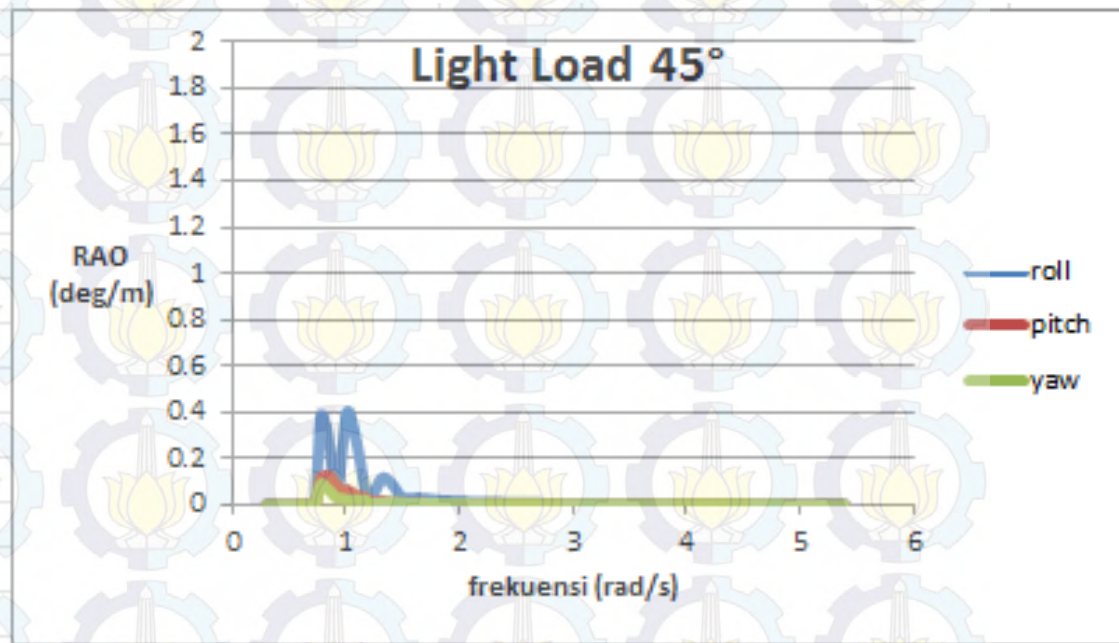


Gerak Rotasional

Free Floating

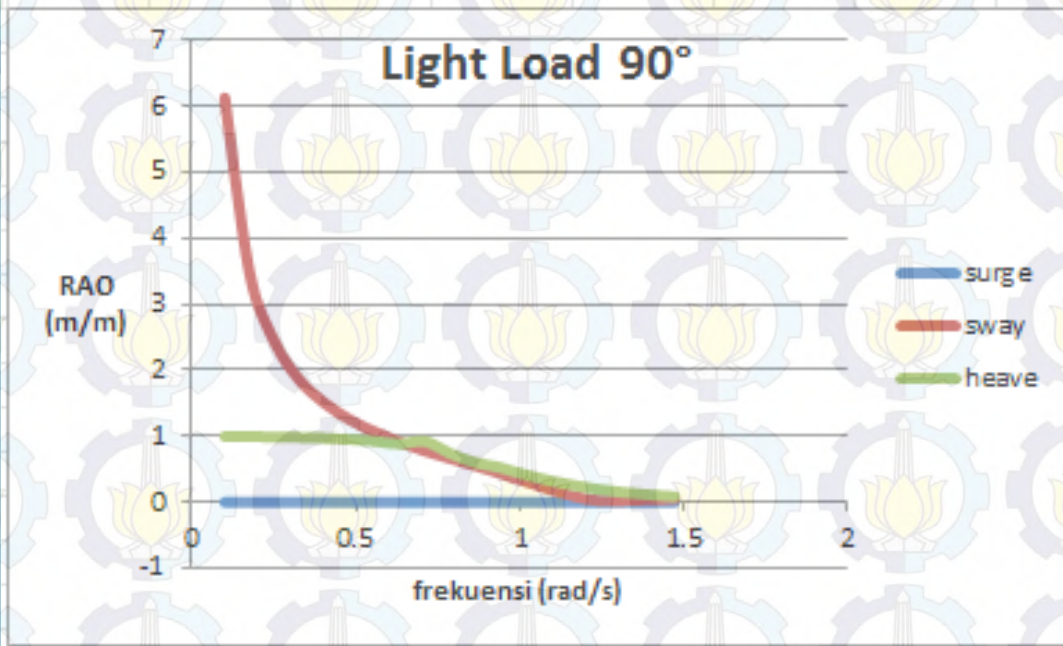


Moored

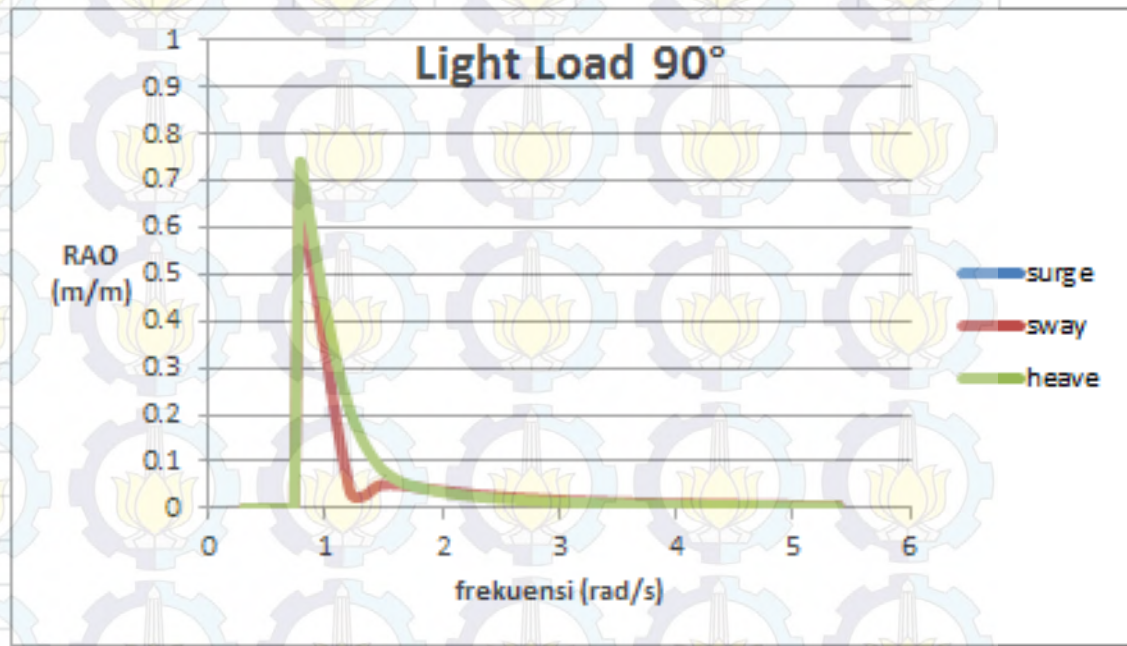


Gerak Translational

Free Floating

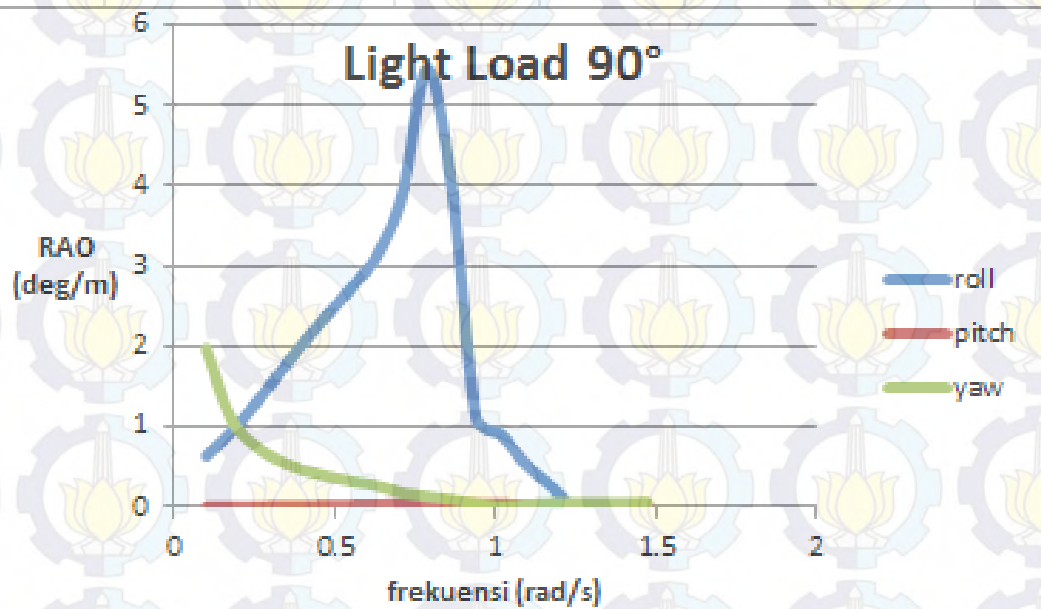


Moored

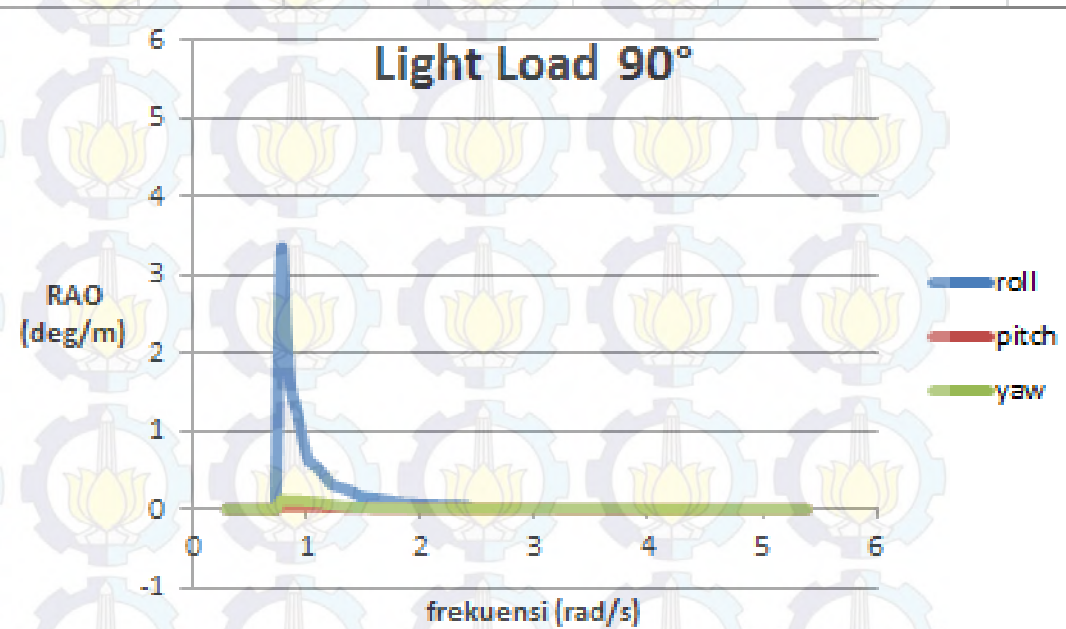


Gerak Rotasional

Free Floating

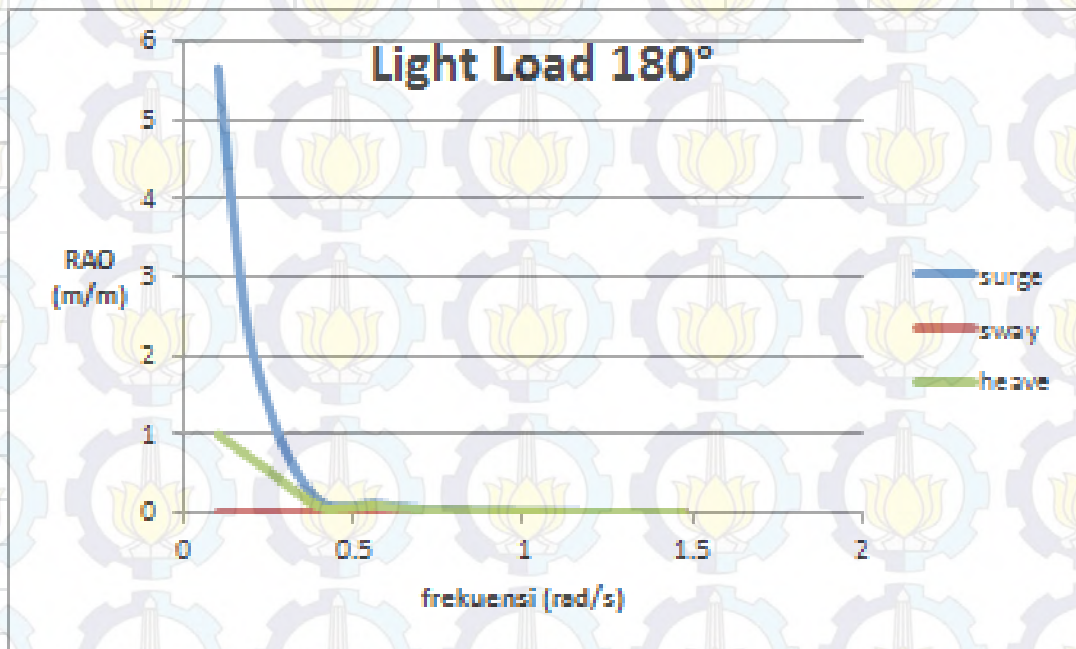


Moored

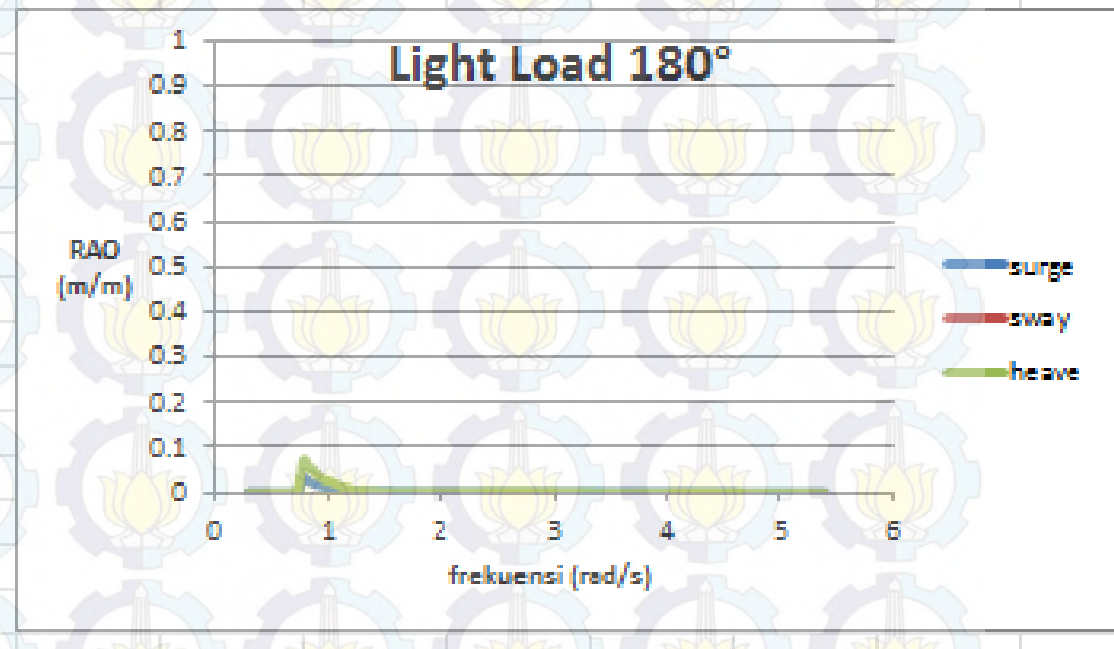


Gerak Translational

Free Floating



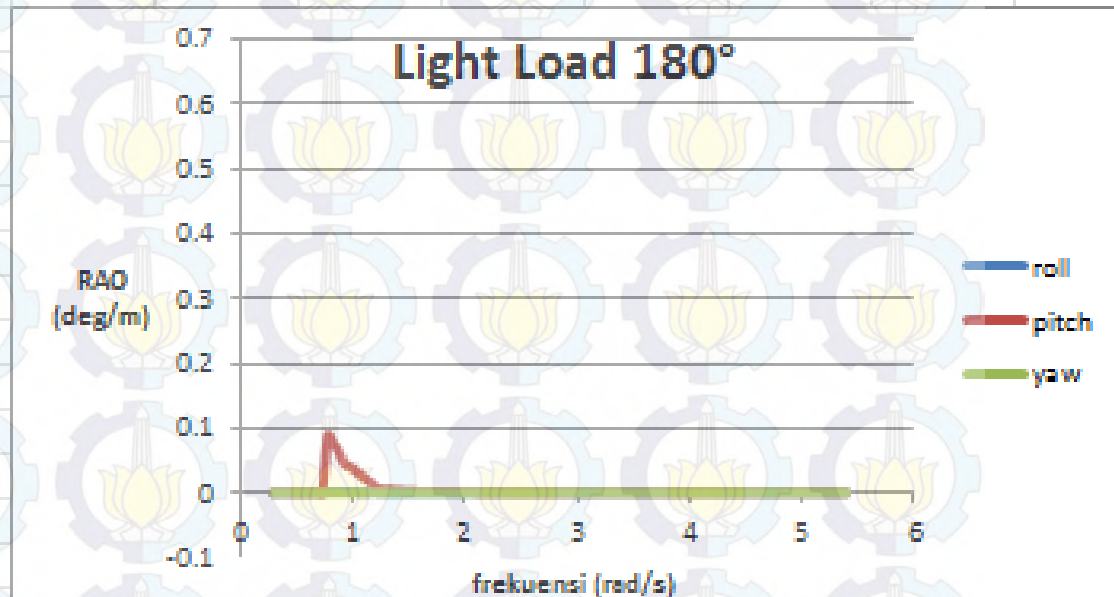
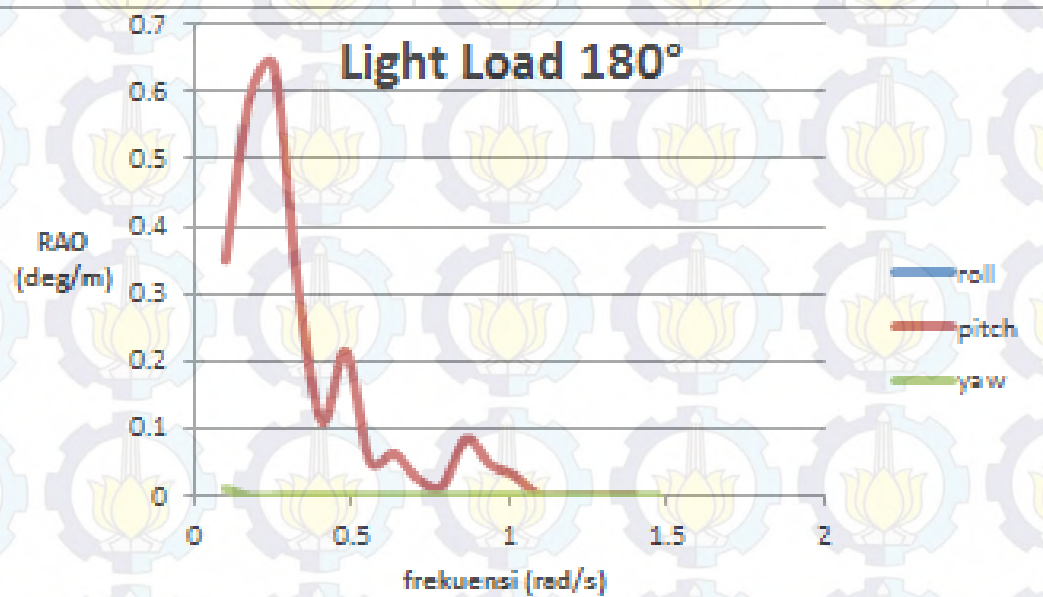
Moored



Gerak Rotasional

Free Floating

Moored



| Moda Gerakan | Unit | RAO Maksimum | | | | Max |
|--------------|-------|--------------|--------|--------|---------|-------|
| | | 0 deg | 45 deg | 90 deg | 180 deg | |
| Surge | m/m | 5.650 | 4.167 | 0.001 | 5.651 | 5.651 |
| Sway | m/m | 0.000 | 4.156 | 6.130 | 0.000 | 6.130 |
| Heave | m/m | 1.020 | 0.958 | 0.997 | 0.992 | 1.020 |
| Roll | deg/m | 0.002 | 1.342 | 5.452 | 0.000 | 5.452 |
| Pitch | deg/m | 0.637 | 0.616 | 0.043 | 0.638 | 0.638 |
| Yaw | deg/m | 0.001 | 2.011 | 1.971 | 0.011 | 2.011 |
| Moda Gerakan | Unit | RAO Maksimum | | | | Max |
| | | 0 deg | 45 deg | 90 deg | 180 deg | |
| Surge | m/m | 0.032 | 0.033 | 0.001 | 0.040 | 0.040 |
| Sway | m/m | 0.000 | 0.071 | 0.077 | 0.000 | 0.077 |
| Heave | m/m | 0.028 | 0.065 | 0.024 | 0.072 | 0.072 |
| Roll | deg/m | 0.003 | 0.403 | 1.592 | 0.002 | 1.592 |
| Pitch | deg/m | 0.065 | 0.067 | 0.036 | 0.088 | 0.088 |
| Yaw | deg/m | 0.000 | 0.487 | 0.114 | 0.000 | 0.487 |

RAO free floating light load

RAO tertambat light load

Persamaan Spektra Jonswap

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

dimana :

$$\alpha = 0,076 (X_0)^{-0,22}$$

$$X_0 = gX / Uw^2$$

X = panjang fetch

Uw = kecepatan angin

$\alpha = 0.0081$ jika X tidak diketahui

γ = parameter puncak

T_p = periode puncak spektra

H_s = tinggi gelombang signifikan

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

$$\omega_0 = 2\pi \left(\frac{g}{U} \right) (X_0)^{-0,33}$$

$$\gamma = 5 \quad \text{for } T_p/\sqrt{H_s} \leq 3.6; \quad \text{and}$$
$$\gamma = \exp\left(5.75 - 1.15 \frac{T_p}{\sqrt{H_s}}\right) \quad \text{for } T_p/\sqrt{H_s} > 3.6$$

Chakrabarti vol. 1 hal.106

$$T_p = 5 \text{ s}$$

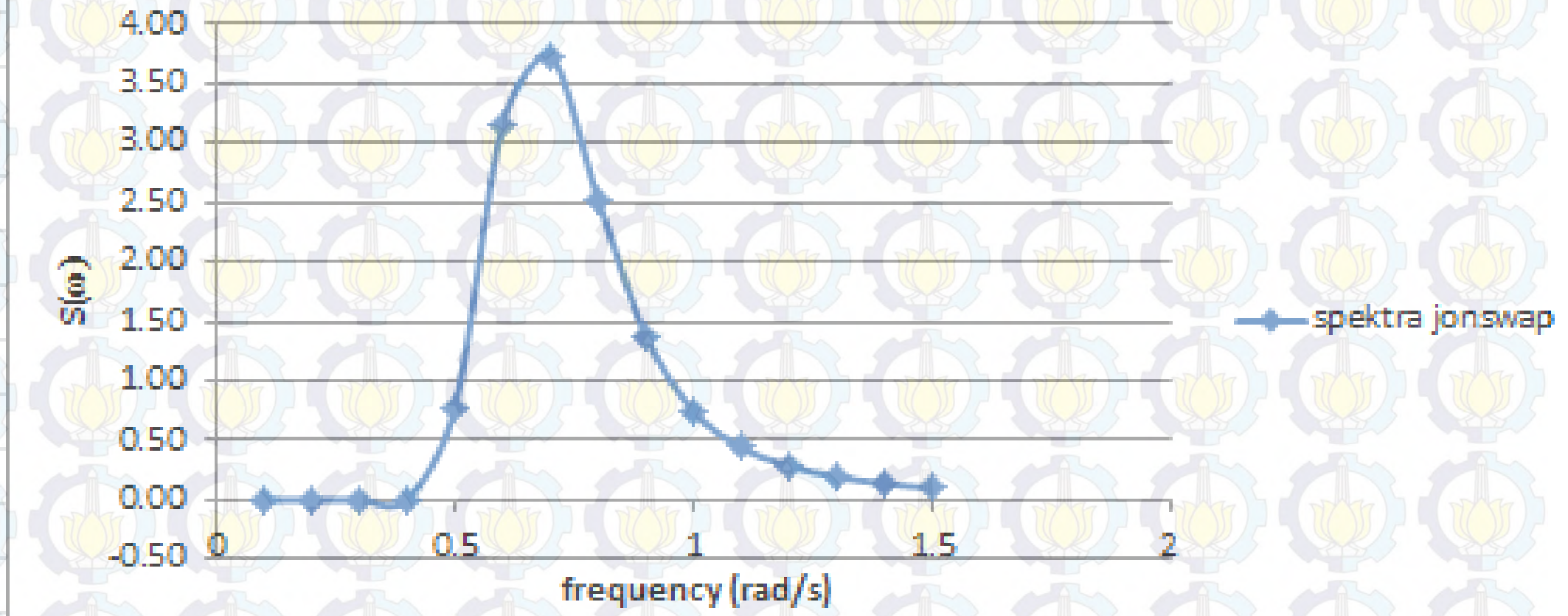
$$H_s = 1,98 \text{ m}$$

$\frac{T_p}{\sqrt{H_s}} = 3,627$ sehingga mengikuti persamaan :

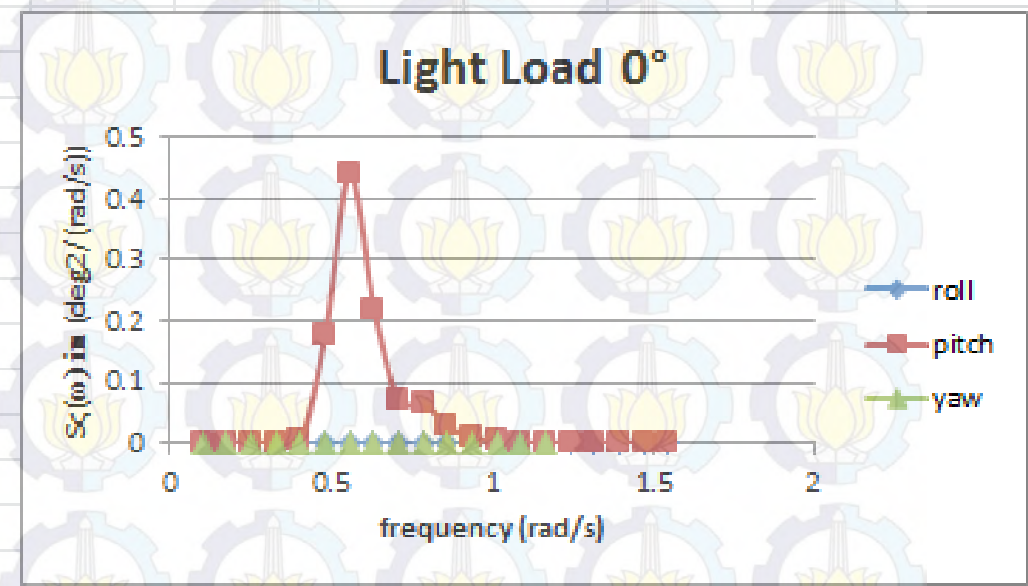
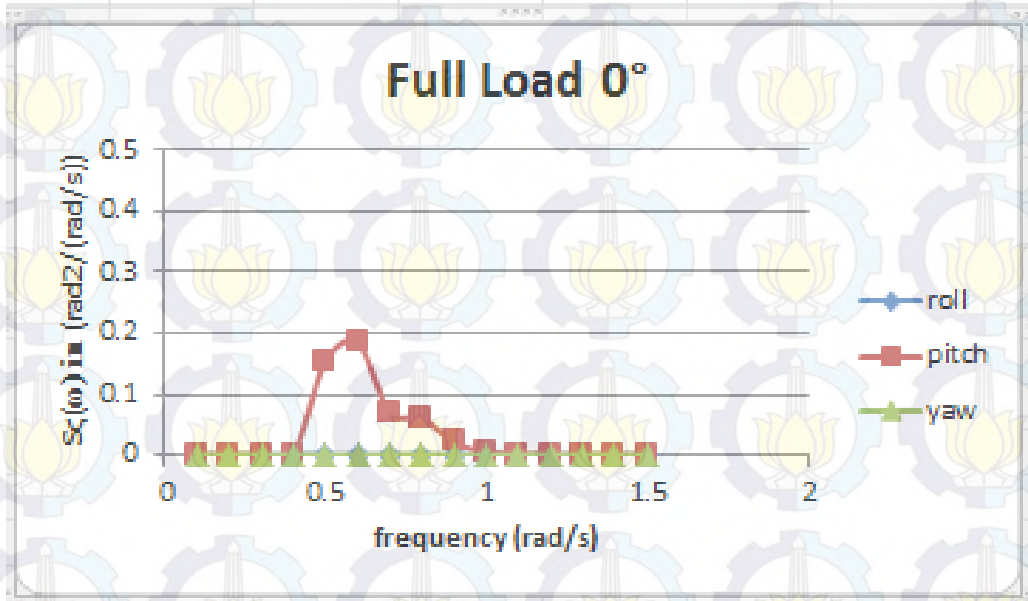
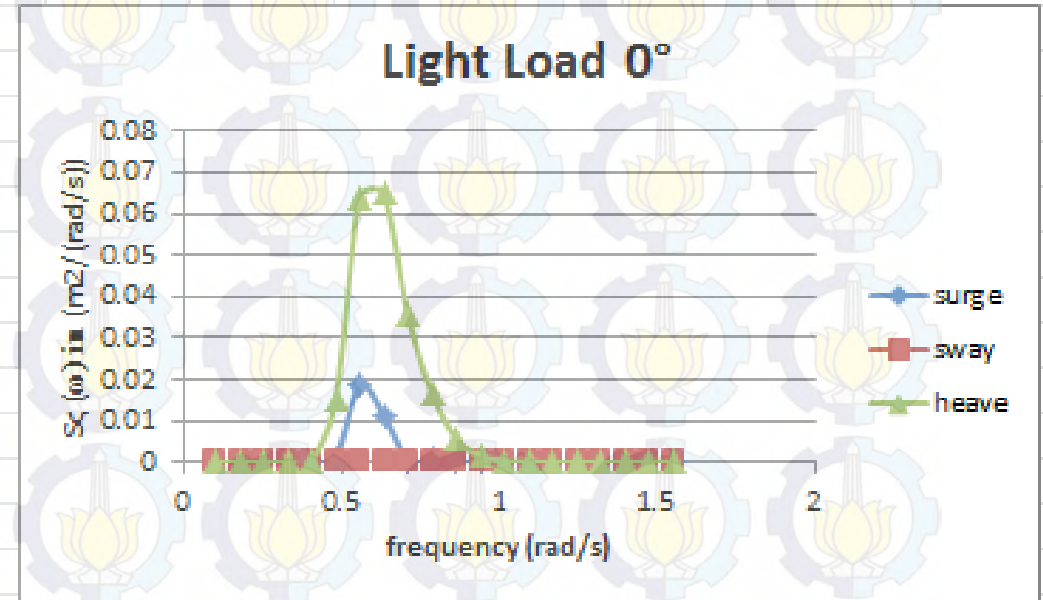
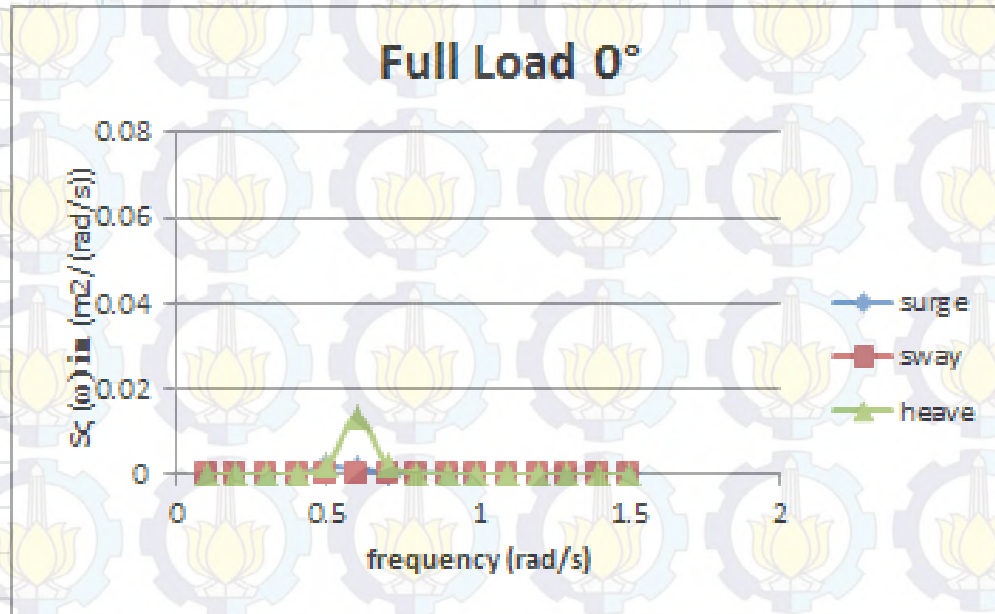
$$\gamma = \exp\left(5.75 - 1.15 \frac{T_p}{\sqrt{H_s}}\right)$$

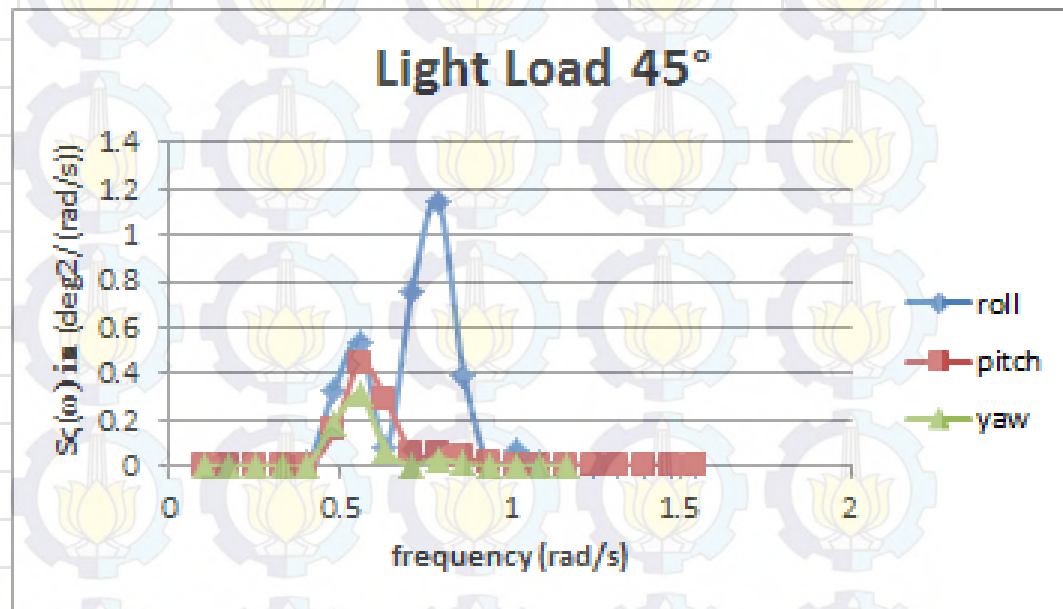
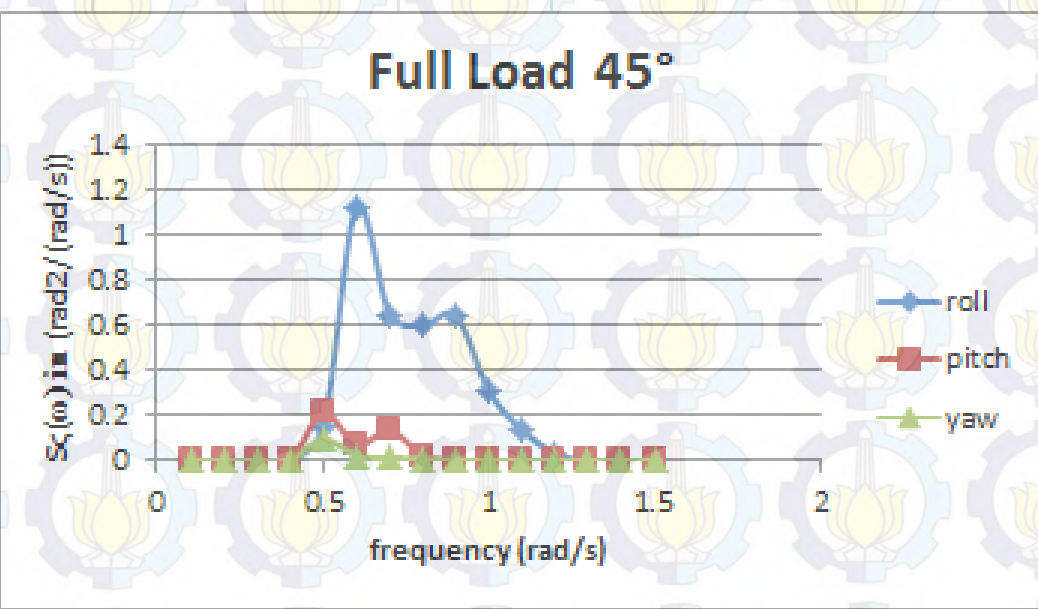
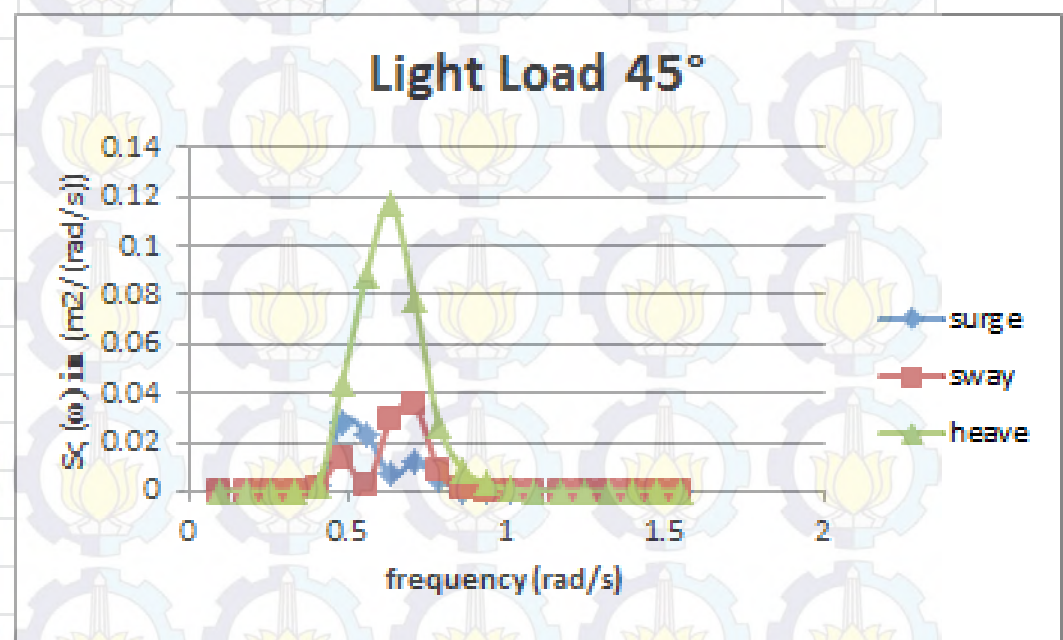
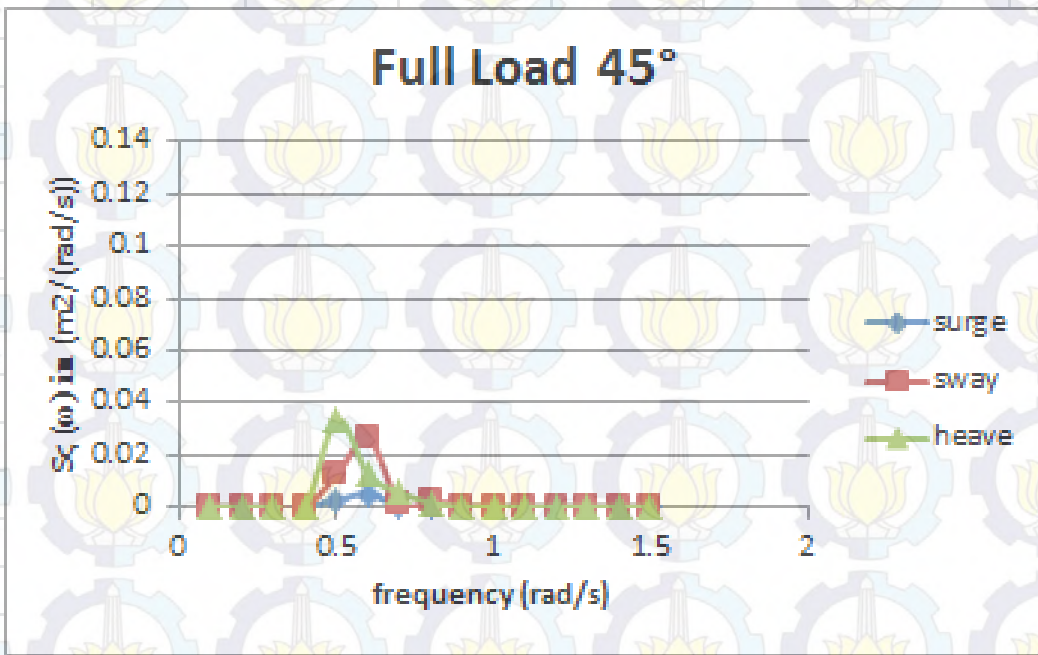
$$\gamma = 2,289$$

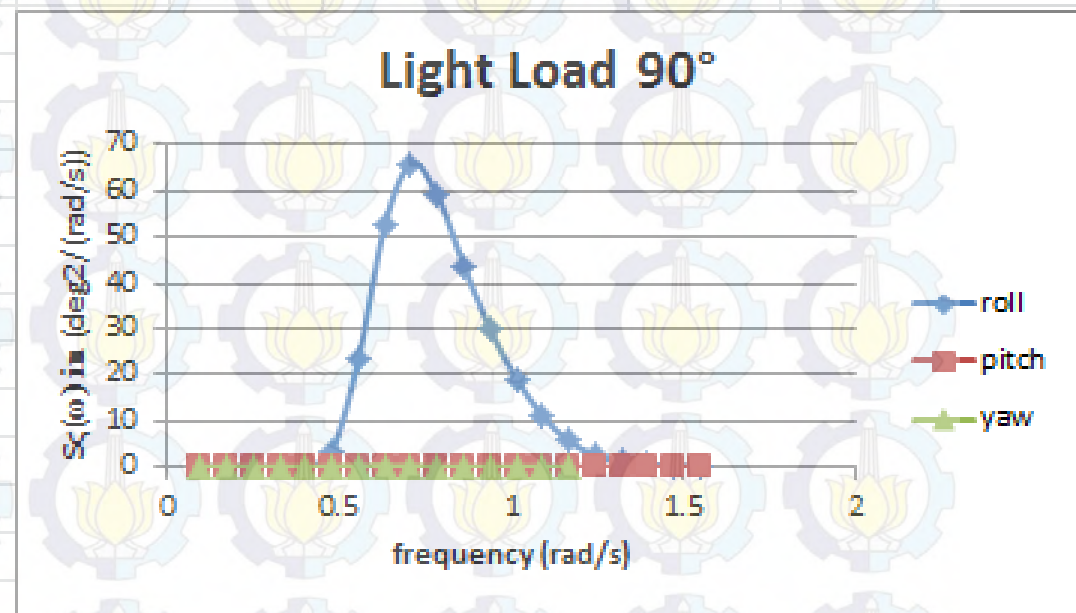
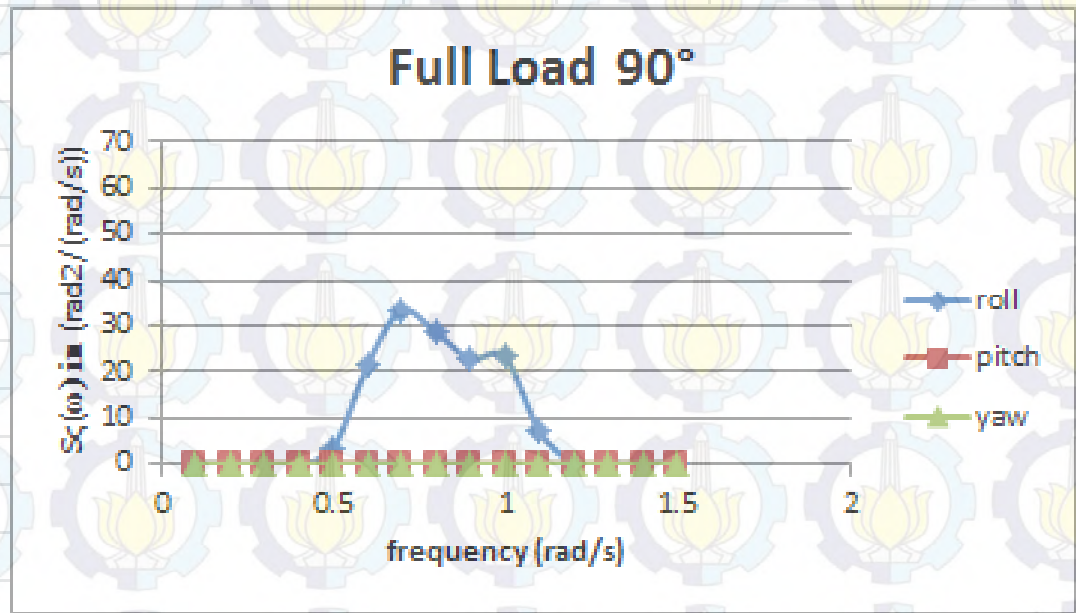
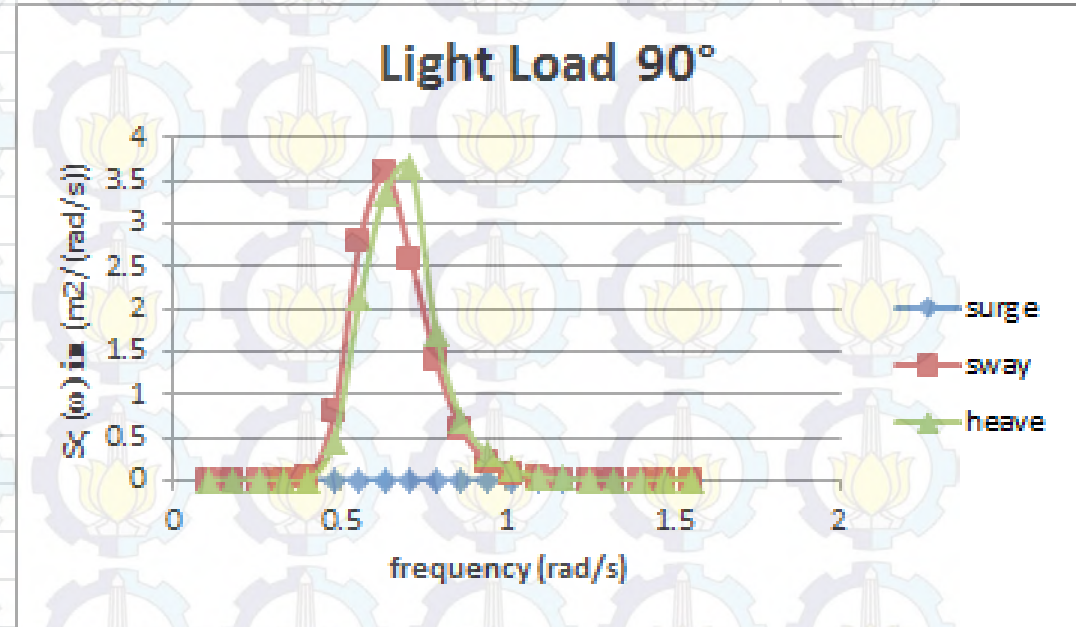
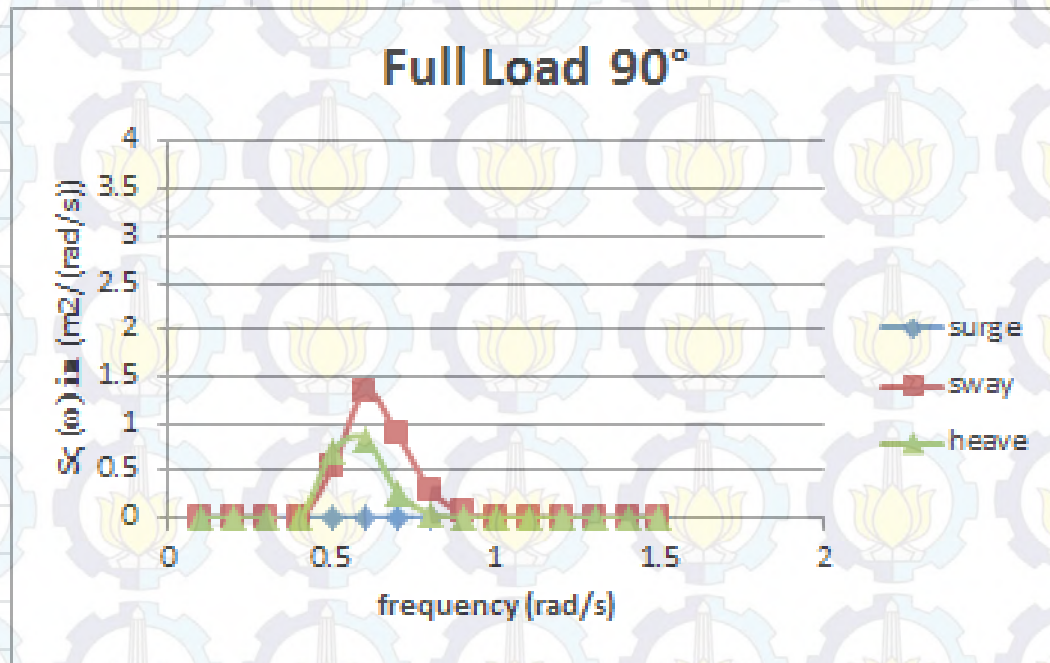
Spektra Jonswap

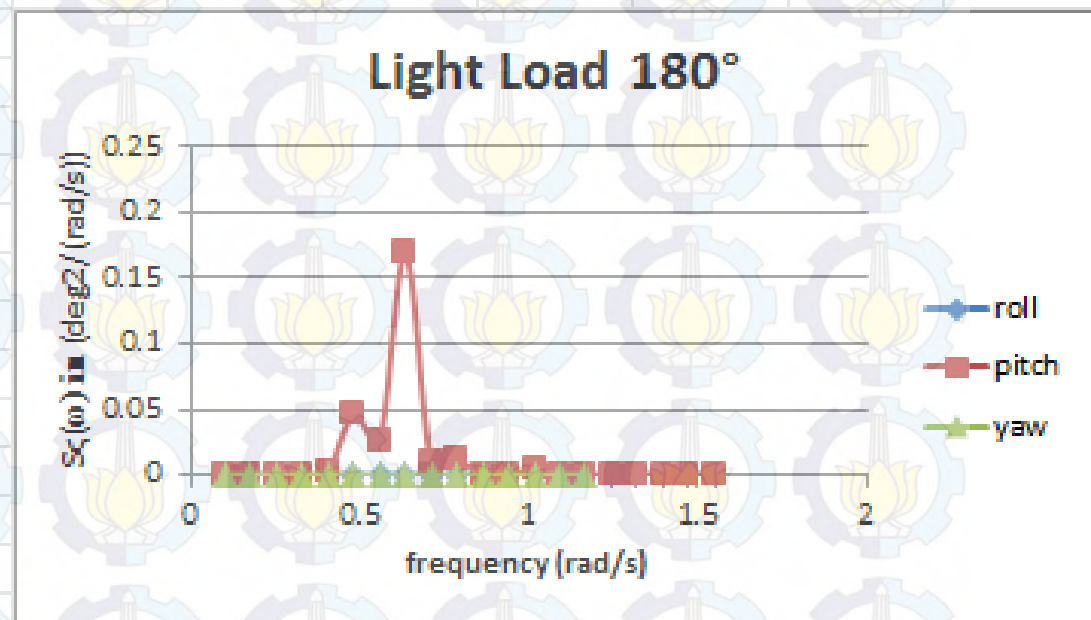
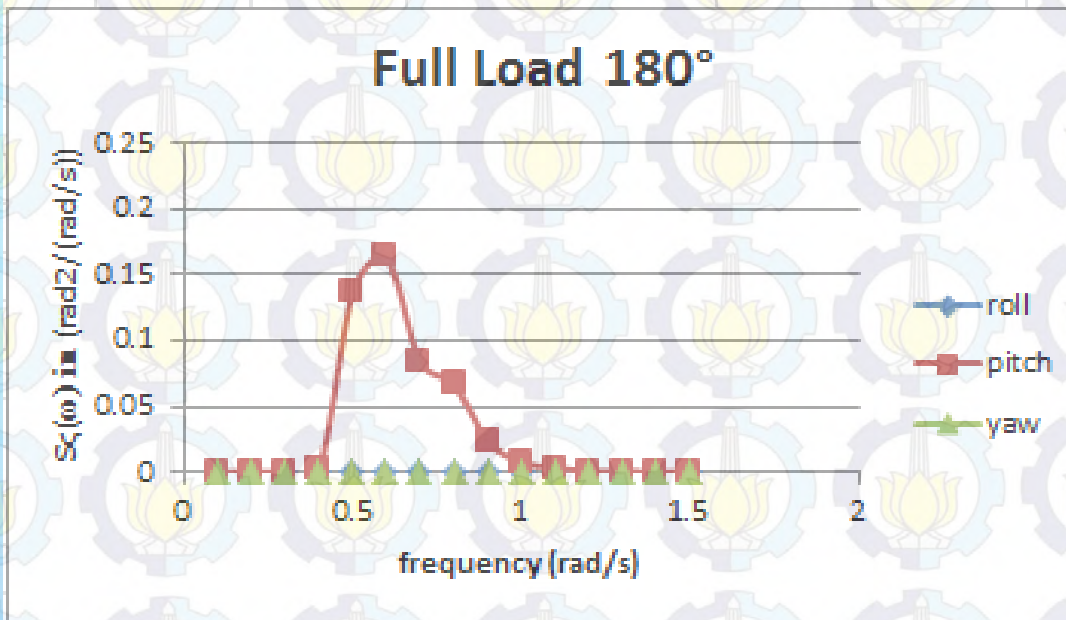
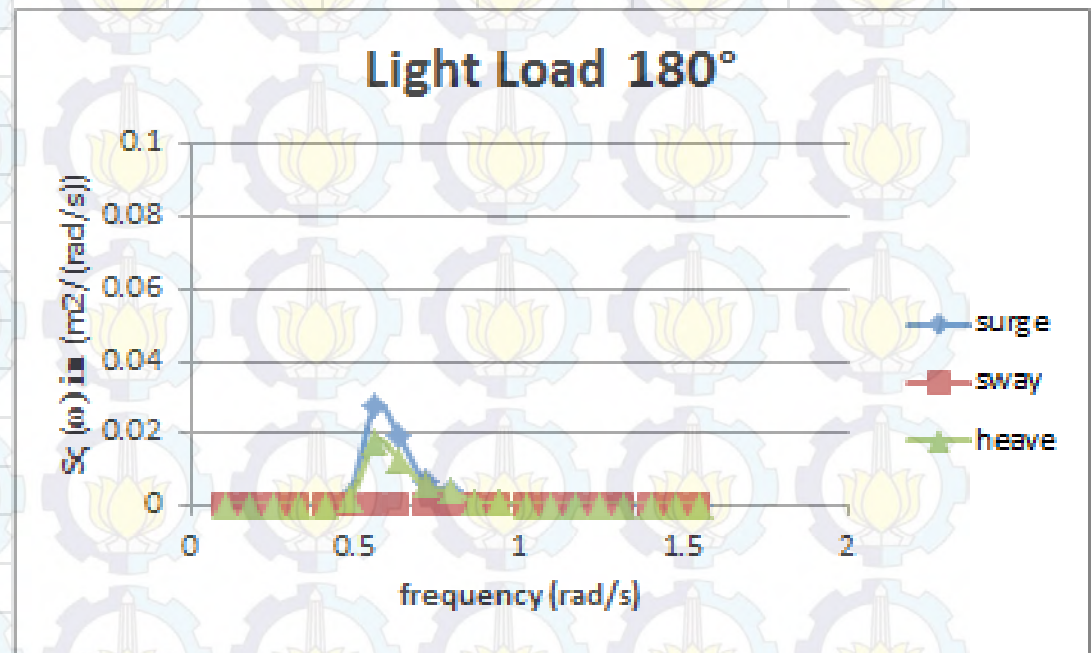
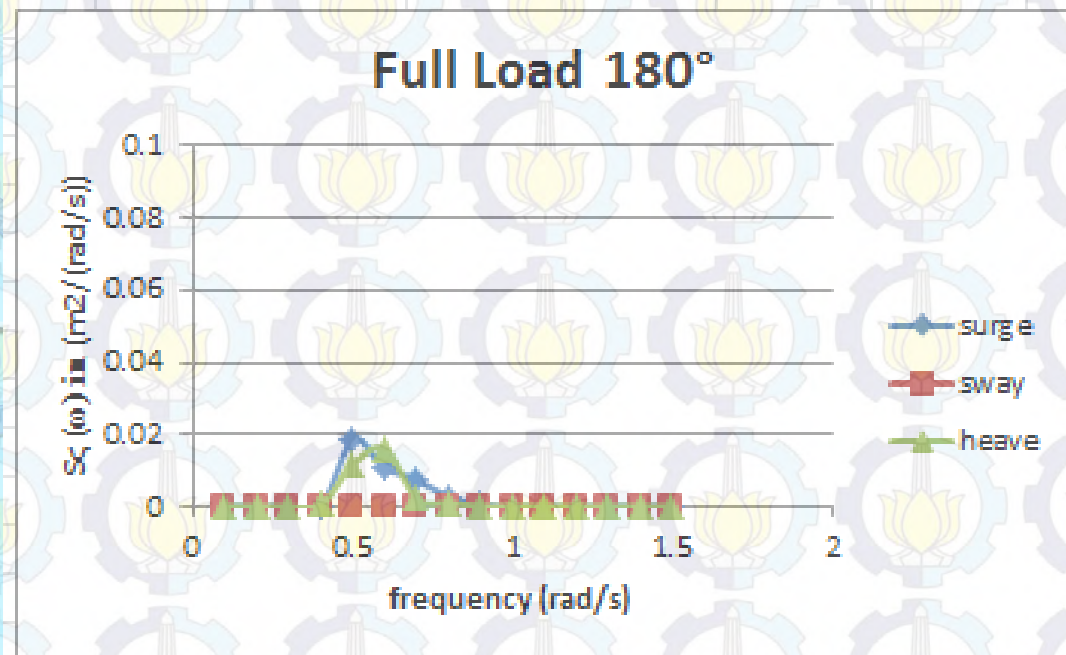


Kurva Respon Spektra









Resume Respon Struktur Maksimum

| Moda Gerakan | Unit | Respon Struktur Maksimum Kondisi | | | | Max |
|--------------|---------------------------|----------------------------------|--------|--------|---------|--------|
| | | <i>Full load</i> | | | | |
| | | 0 deg | 45 deg | 90 deg | 180 deg | |
| <i>Surge</i> | m ² /(rad/s) | 0.002 | 0.005 | 0.003 | 0.018 | 0.018 |
| <i>Sway</i> | m ² /(rad/s) | 0.000 | 0.023 | 1.163 | 0.000 | 1.163 |
| <i>Heave</i> | m ² /(rad/s) | 0.012 | 0.030 | 0.727 | 0.016 | 0.727 |
| <i>Roll</i> | deg ² /(rad/s) | 0.000 | 0.972 | 28.370 | 0.000 | 28.370 |
| <i>Pitch</i> | deg ² /(rad/s) | 0.160 | 0.193 | 0.247 | 0.164 | 0.247 |
| <i>Yaw</i> | deg ² /(rad/s) | 0.000 | 0.087 | 0.011 | 0.000 | 0.087 |
| Moda Gerakan | Unit | Respon Struktur RAO Maksimum | | | | Max |
| | | <i>Kondisi Light load</i> | | | | |
| | | 0 deg | 45 deg | 90 deg | 180 deg | |
| <i>Surge</i> | m ² /(rad/s) | 0.016 | 0.026 | 0.000 | 0.028 | 0.028 |
| <i>Sway</i> | m ² /(rad/s) | 0.000 | 0.030 | 3.060 | 0.000 | 3.060 |
| <i>Heave</i> | m ² /(rad/s) | 0.056 | 0.100 | 3.121 | 0.018 | 3.121 |
| <i>Roll</i> | deg ² /(rad/s) | 0.000 | 0.999 | 56.338 | 0.000 | 56.338 |
| <i>Pitch</i> | deg ² /(rad/s) | 0.386 | 0.390 | 0.005 | 0.164 | 0.390 |
| <i>Yaw</i> | deg ² /(rad/s) | 0.000 | 0.272 | 0.250 | 0.000 | 0.272 |

Tabel Data Rantai Jangkar

| Properties | |
|-----------------------|---|
| Diameter | 111 mm |
| Chain Type | Studlink Chain Cables (steel grade 2 ABS) |
| Length | 742,5 m |
| Maximum Breaking Load | 5942,8 kN |
| Stiffness | 1063000kN |

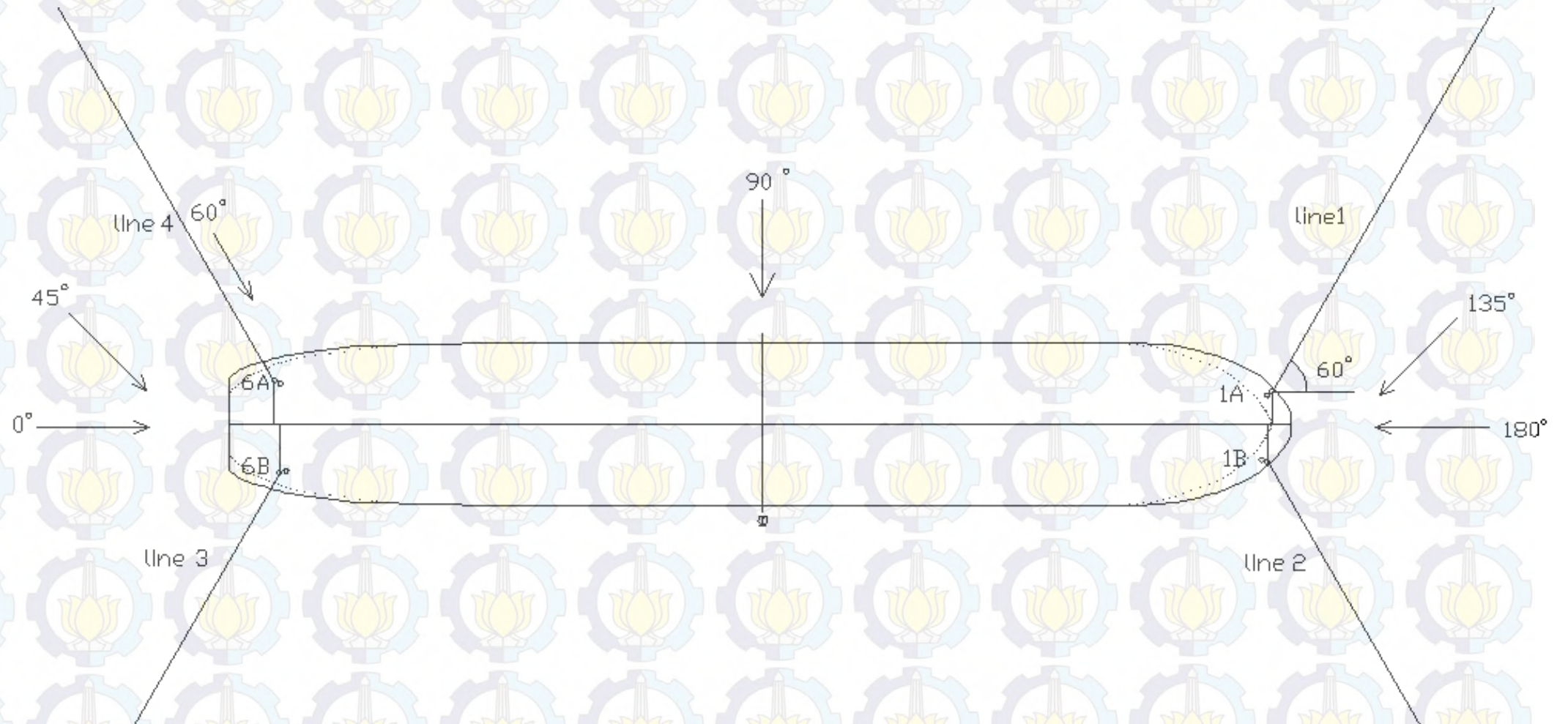
Sumber:

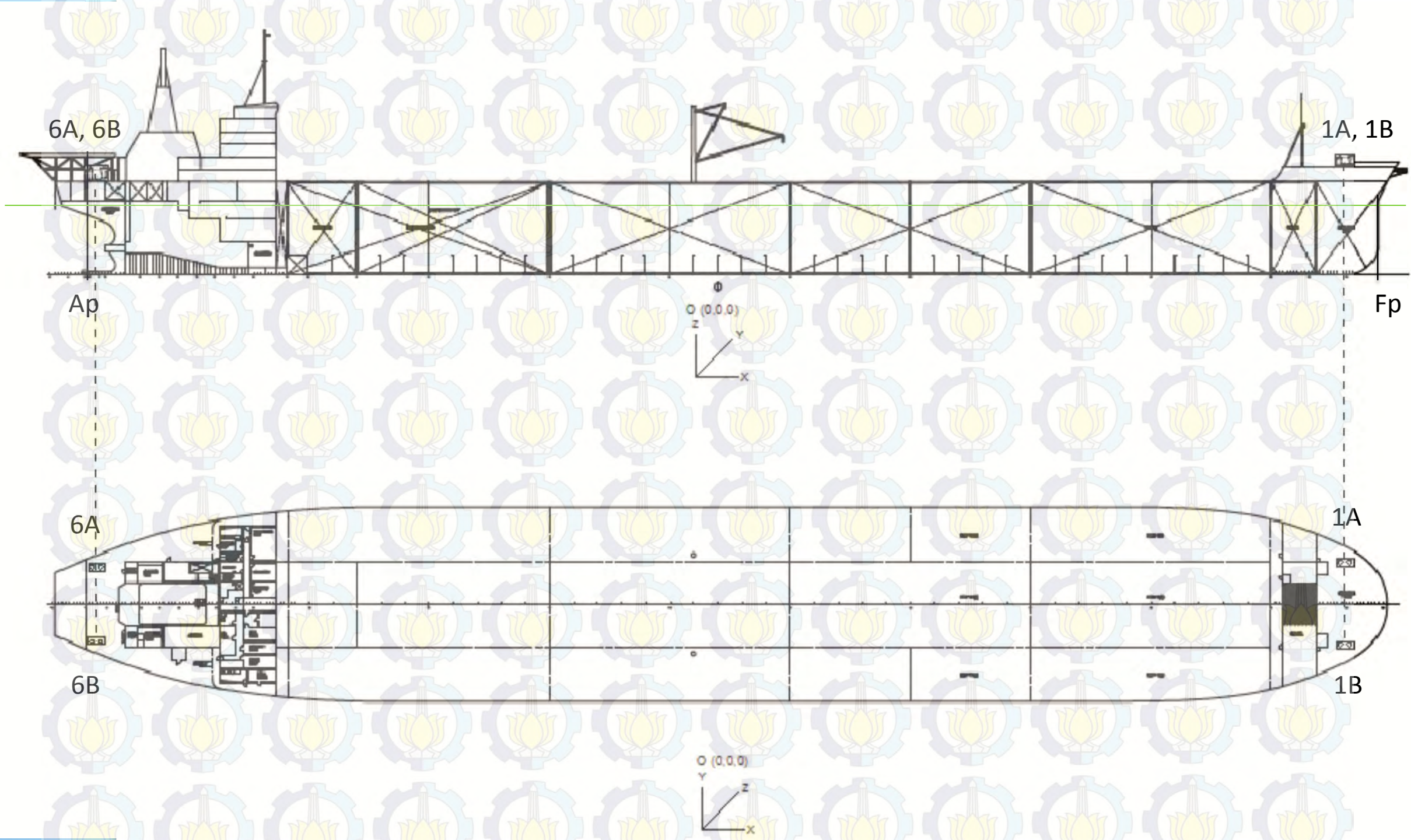
ABS Anchoring, Mooring, and Towing Equipment

ABS Rules for Testing and Certification of Materials

Konfigurasi Rantai Jangkar FSO Ladinda

[Wireframe]





Tabel Koordinat letak *bollard* pada FSO Ladinda

| Koordinat | X | Y | Z |
|------------------|----------|----------|----------|
| Bolder IA | 134 m | 8.68 m | 22.6 m |
| Bolder IB | 134 m | 8.68 m | 22.6 m |
| Bolder 6A | -132,4 m | 13,02 m | 20.6 m |
| Bolder 6B | -132,4 m | 13.02 m | 20.6 m |

(sumber : PT. Energi Mega Persada, 2014)

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

| | | |
|-----|------------------------------|------------|
| l : | panjang keseluruhan | 742,5 m |
| h : | kedalaman ditambah freeboard | 29,875 m |
| a : | T/w | 31,9997 |
| T : | MBL | 8482,8 kN |
| W : | berat chain | 265,090 kg |

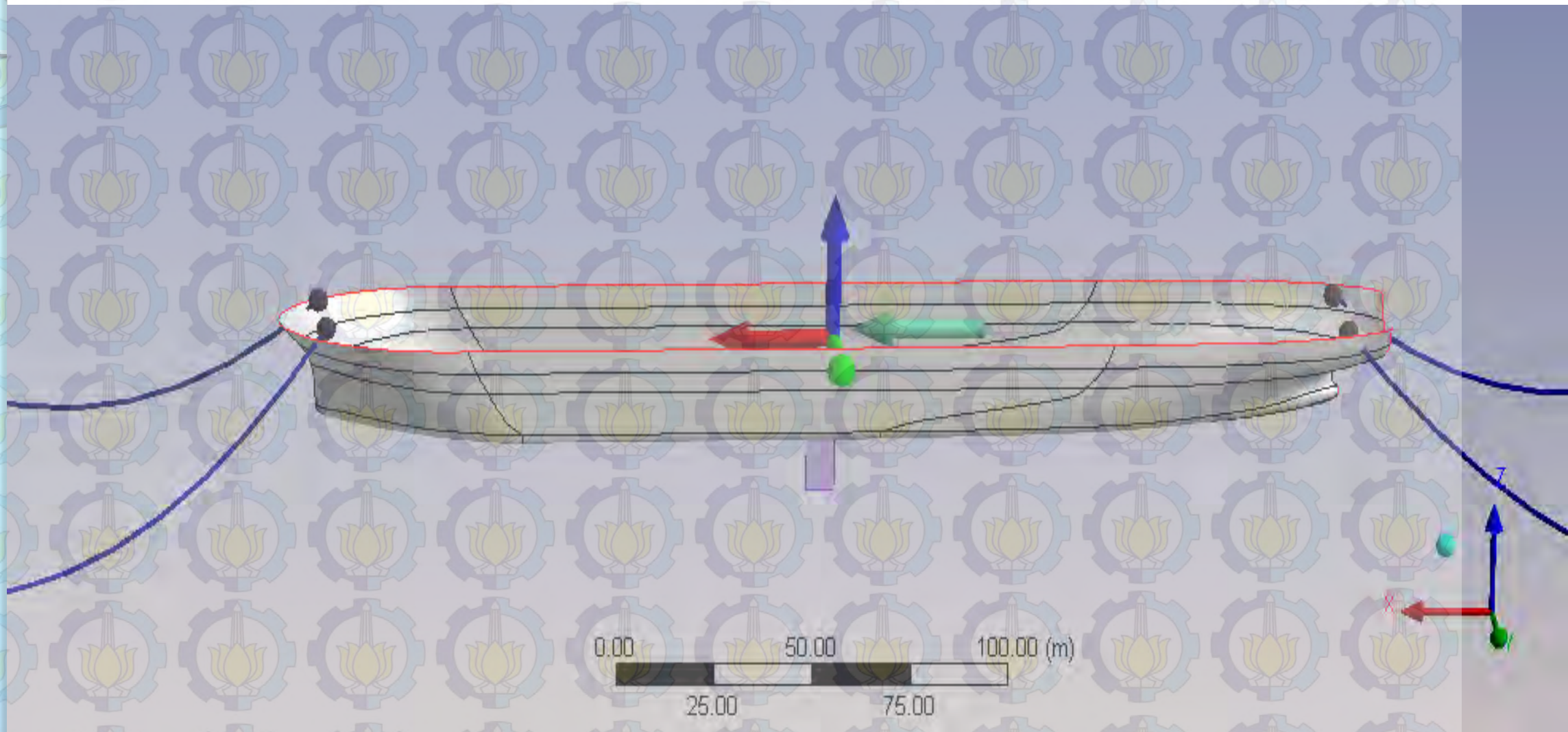
$l = 742,5 \text{ m}$

$X = 651,31 \text{ m}$

$X \text{ awal} = 741,89 \text{ m}$

Sumber : Sea Loads on Ships and Offshore Structures
(O.M. Faltinsen)

Pemodelan Rantai Jangkar pada ANSYS



Hasil *Tension Force* Terbesar pada Rantai Jangkar

Hasil simulasi pada arah pembebanan gelombang 0°

| Rantai Jangkar | Kondisi Full load | | | Kondisi Light load | | |
|----------------|-------------------|------|----------|--------------------|------|----------|
| | Tension (N) | t(s) | SF | Tension (N) | t(s) | SF |
| Line 1 | 217483 | 337 | 27.32535 | 558055.3 | 2039 | 10.64912 |
| Line 2 | 219810 | 337 | 27.03608 | 576465.7 | 2039 | 10.30903 |
| Line 3 | 347877 | 165 | 17.08305 | 692461.9 | 3133 | 8.582133 |
| Line 4 | 341809 | 165 | 17.38632 | 696668.5 | 3133 | 8.530312 |

Hasil simulasi pada arah pembebanan gelombang 45°

| Rantai Jangkar | Kondisi Full load | | | Kondisi Light load | | |
|----------------|-------------------|------|----------|--------------------|------|----------|
| | Tension (N) | t(s) | SF | Tension (N) | t(s) | SF |
| Line 1 | 1531369 | 232 | 3.880711 | 1944925 | 2157 | 3.055542 |
| Line 2 | 265708.5 | 503 | 22.36586 | 853990.3 | 367 | 6.958862 |
| Line 3 | 311504.4 | 379 | 19.07774 | 678059.8 | 2193 | 8.764419 |
| Line 4 | 1618687 | 272 | 3.671371 | 1878444 | 434 | 3.163683 |

Hasil simulasi pada arah pembebanan gelombang 60°

| Rantai Jangkar | Kondisi Full load | | | Kondisi Light load | | |
|----------------|-------------------|------|----------|--------------------|------|----------|
| | Tension (N) | t(s) | SF | Tension (N) | t(s) | SF |
| Line 1 | 1943703 | 216 | 3.057463 | 2204319 | 2154 | 2.695981 |
| Line 2 | 344545.4 | 376 | 17.24823 | 1036040 | 4512 | 5.736071 |
| Line 3 | 231641.2 | 474 | 25.65519 | 775069 | 348 | 7.667446 |
| Line 4 | 2057584 | 249 | 2.888242 | 2306166 | 302 | 2.576918 |

Hasil simulasi pada arah pembebanan gelombang 90°

| Rantai Jangkar | Kondisi Full load | | | Kondisi Light load | | |
|----------------|-------------------|------|----------|--------------------|------|----------|
| | Tension (N) | t(s) | SF | Tension (N) | t(s) | SF |
| Line 1 | 1866303 | 246 | 3.184263 | 1995035 | 5386 | 2.978795 |
| Line 2 | 313627.7 | 505 | 18.94858 | 601929.3 | 3085 | 9.872921 |
| Line 3 | 279740.7 | 505 | 21.24396 | 608668.3 | 3085 | 9.76361 |
| Line 4 | 1906571 | 304 | 3.117009 | 1932856 | 5386 | 3.074622 |

Hasil simulasi pada arah pembebanan gelombang 120⁰

| Rantai Jangkar | Kondisi Full load | | | Kondisi Light load | | |
|----------------|-------------------|------|----------|--------------------|------|----------|
| | Tension (N) | t(s) | SF | Tension (N) | t(s) | SF |
| Line 1 | 2022190 | 268 | 2.938795 | 2300635 | 304 | 2.583113 |
| Line 2 | 345473.5 | 368 | 17.2019 | 721713.8 | 356 | 8.234289 |
| Line 3 | 138269.6 | 418 | 42.9798 | 642156.8 | 2204 | 9.254438 |
| Line 4 | 1943191 | 233 | 3.058268 | 2065427 | 300 | 2.877274 |

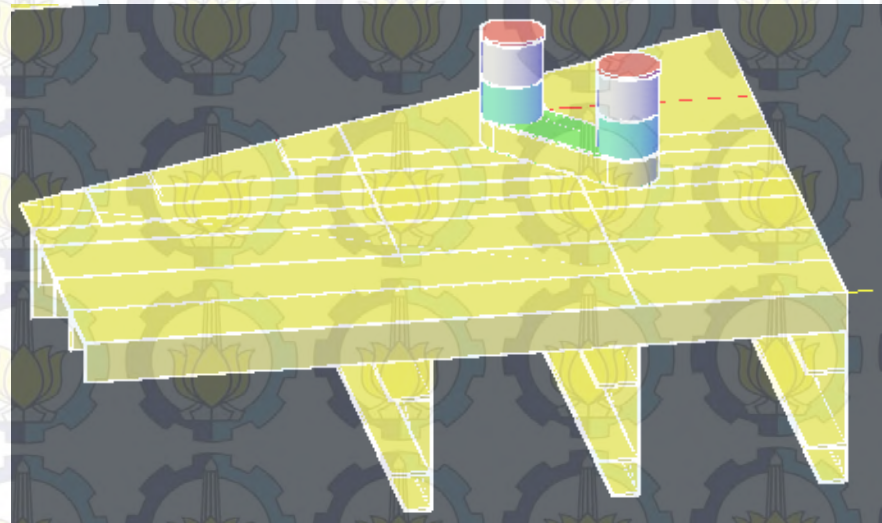
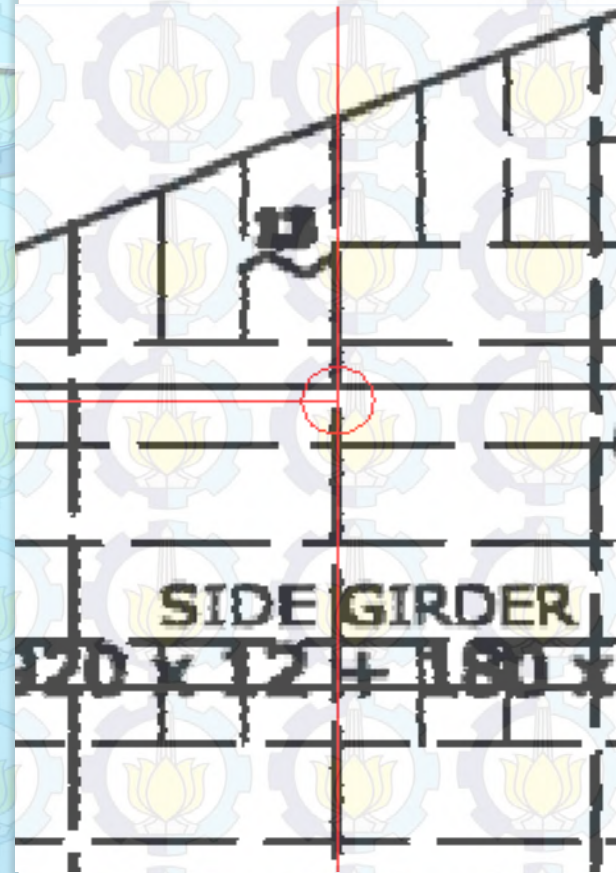
Hasil simulasi pada arah pembebanan gelombang 135⁰

| Rantai Jangkar | Kondisi Full load | | | Kondisi Light load | | |
|----------------|-------------------|------|----------|--------------------|------|----------|
| | Tension (N) | t(s) | SF | Tension (N) | t(s) | SF |
| Line 1 | 1591914 | 267 | 3.733117 | 1742010 | 302 | 3.411461 |
| Line 2 | 448123.4 | 475 | 13.26153 | 663218.4 | 385 | 8.960548 |
| Line 3 | 338096.3 | 391 | 13.26153 | 616869.3 | 349 | 9.633807 |
| Line 4 | 494537.3 | 244 | 12.01689 | 1813192 | 2155 | 3.277535 |

Hasil simulasi pada arah pembebanan gelombang 180⁰

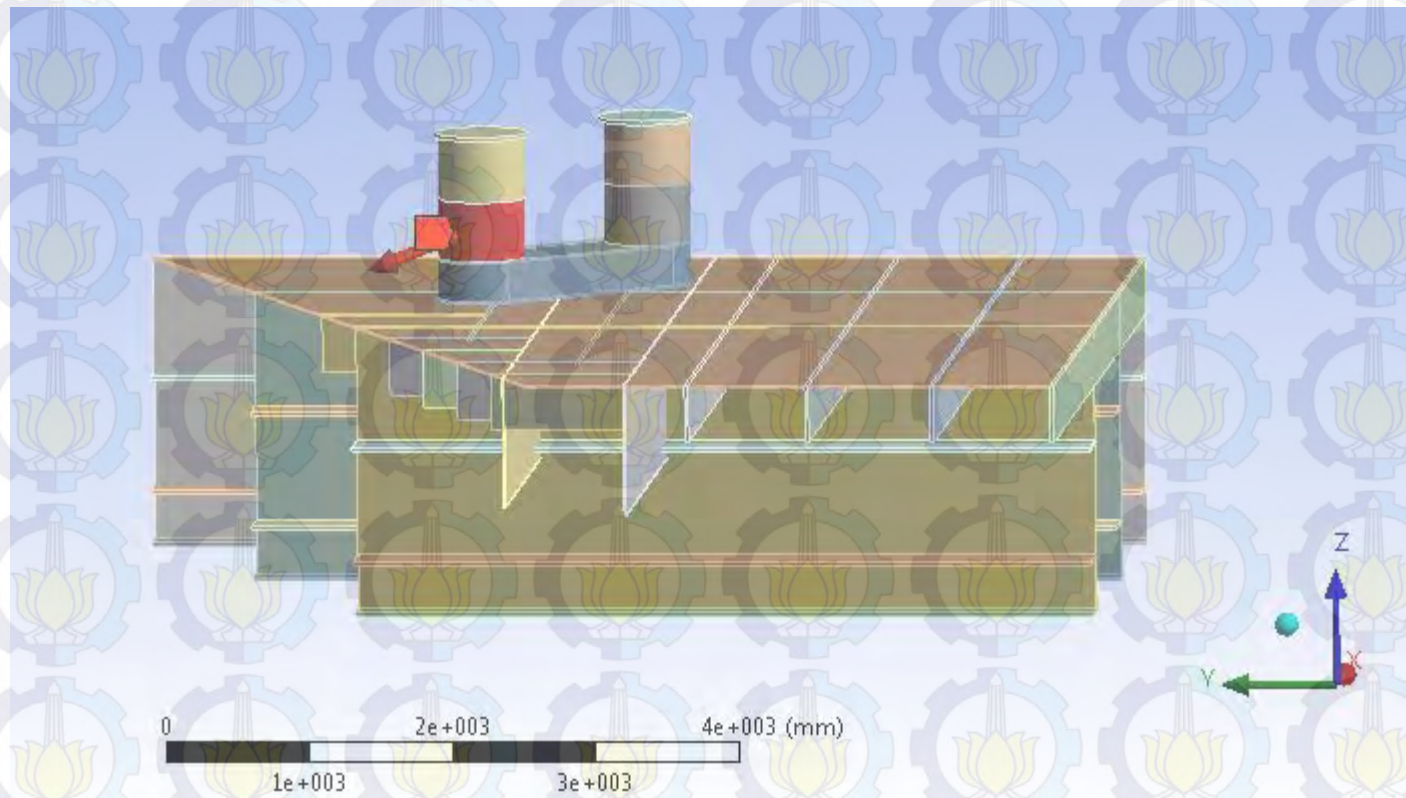
| Rantai Jangkar | Kondisi Full load | | | Kondisi Light load | | |
|----------------|-------------------|------|----------|--------------------|------|----------|
| | Tension (N) | t(s) | SF | Tension (N) | t(s) | SF |
| Line 1 | 401157.9 | 7120 | 14.81412 | 740331.6 | 3117 | 8.027214 |
| Line 2 | 393452 | 7120 | 15.10426 | 749128.8 | 3117 | 7.932948 |
| Line 3 | 225647.5 | 7296 | 26.33665 | 572298.6 | 3154 | 10.38409 |
| Line 4 | 222835.4 | 7296 | 26.66901 | 583724.2 | 3154 | 10.18084 |

Detail Bollard Bagian Belakang

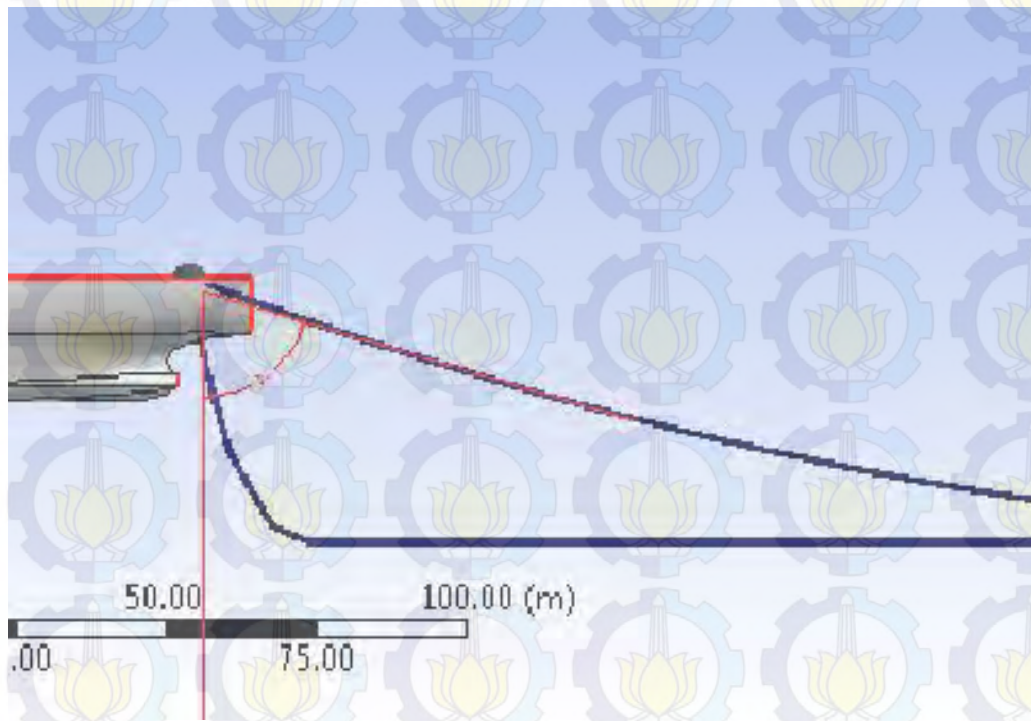


Konstruksi *Bollard* terletak pada *main deck* bagian belakang dengan ketebalan 15 mm, pelat di *main deck* 13 mm, girder HP 220 x 12 (EMP, 2014)

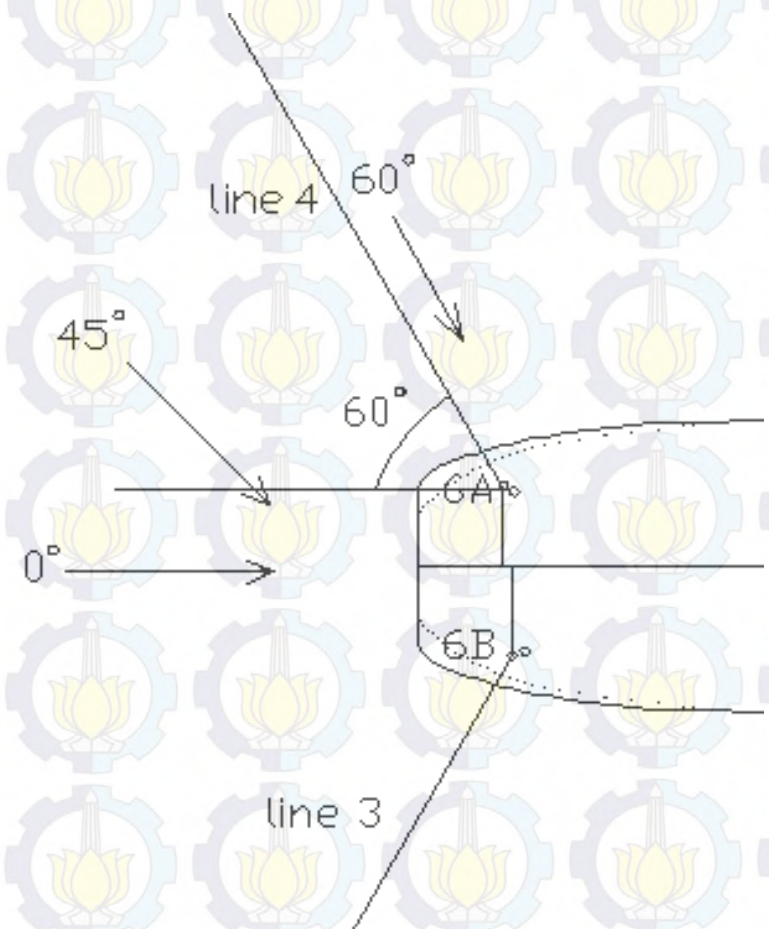
Kondisi Pembebanan *Bollard* Belakang



$F_x = -1102347 \text{ N}$
 $F_y = 1909321 \text{ N}$
 $F_z = -668788.1 \text{ N}$



(a)

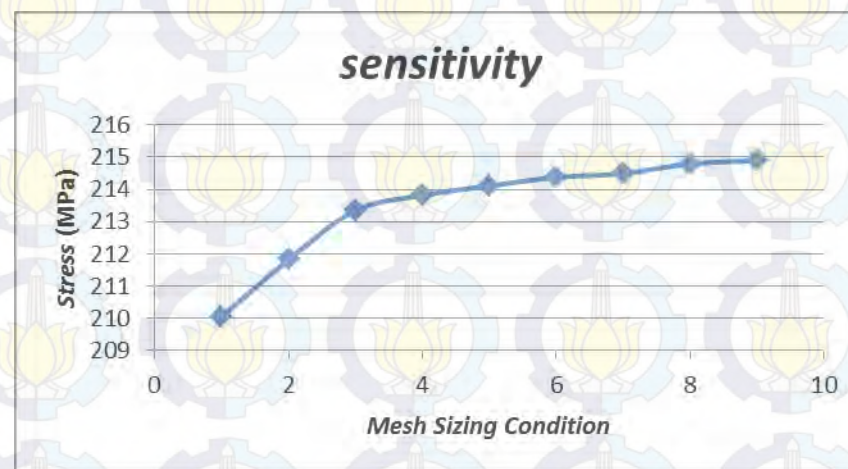


(b)

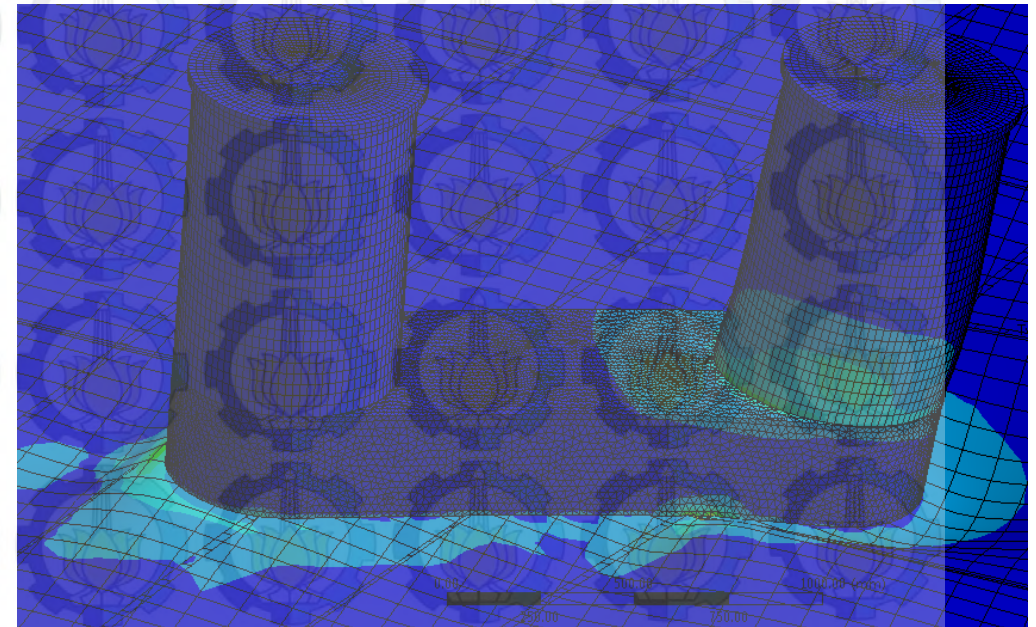
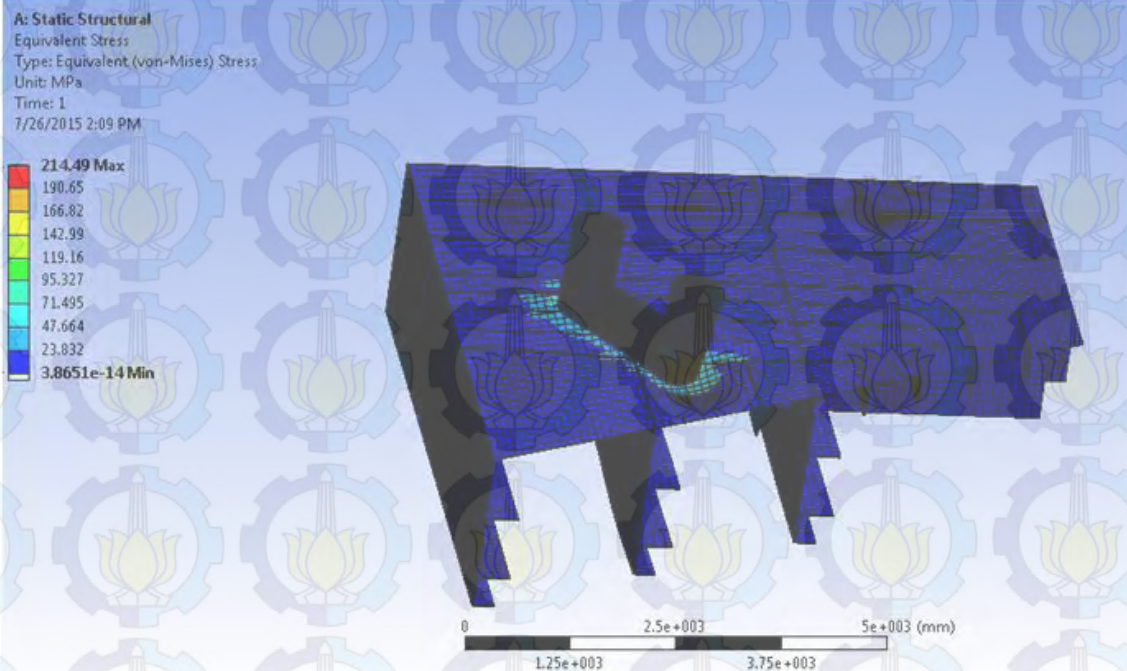
Gambar Konfigurasi sudut rantai jangkar bagian belakang (a) tampak samping (b) tampak atas

Mesh Sensitivity Struktur Bollard Belakang

| Kondisi | Ukuran (mm) | Nodes | Elemen | Tegangan (MPa) | Koreksi (%) |
|---------|-------------|--------|--------|----------------|-------------|
| 1 | 40 | 136208 | 26099 | 210.05 | |
| 2 | 35 | 145246 | 30011 | 211.82 | 0.835615 |
| 3 | 30 | 157765 | 35945 | 213.35 | 0.717131 |
| 4 | 25 | 186593 | 47313 | 213.81 | 0.215144 |
| 5 | 24 | 191008 | 48623 | 214.11 | 0.140115 |
| 6 | 23 | 207364 | 54938 | 214.37 | 0.121286 |
| 7 | 22 | 216096 | 57641 | 214.49 | 0.055947 |
| 8 | 21 | 222756 | 60553 | 214.79 | 0.139671 |
| 9 | 20 | 237720 | 66842 | 214.89 | 0.046535 |

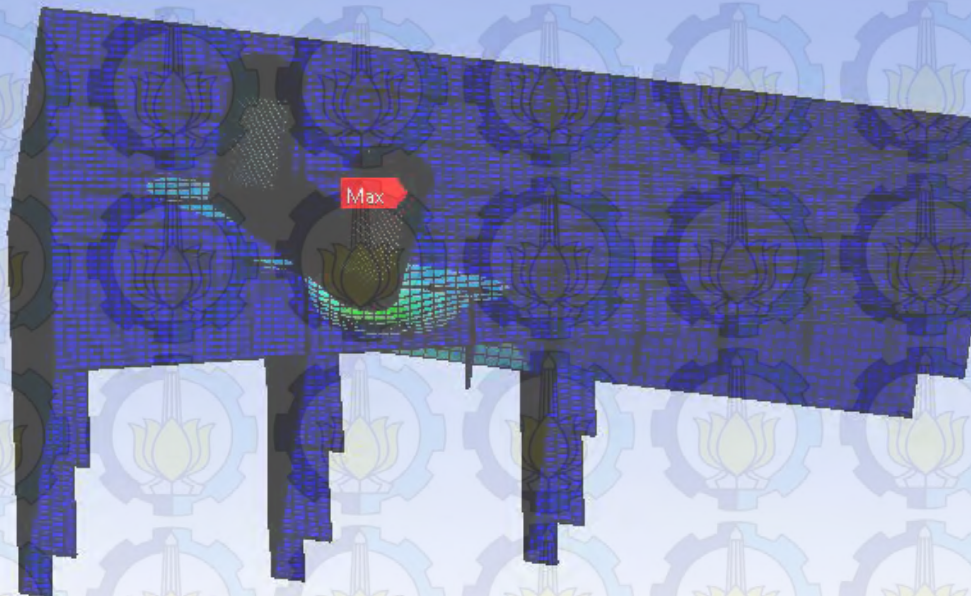
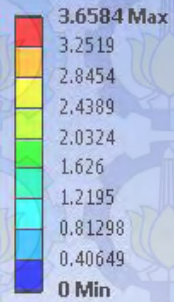


Hasil tegangan maksimum *bollard* belakang

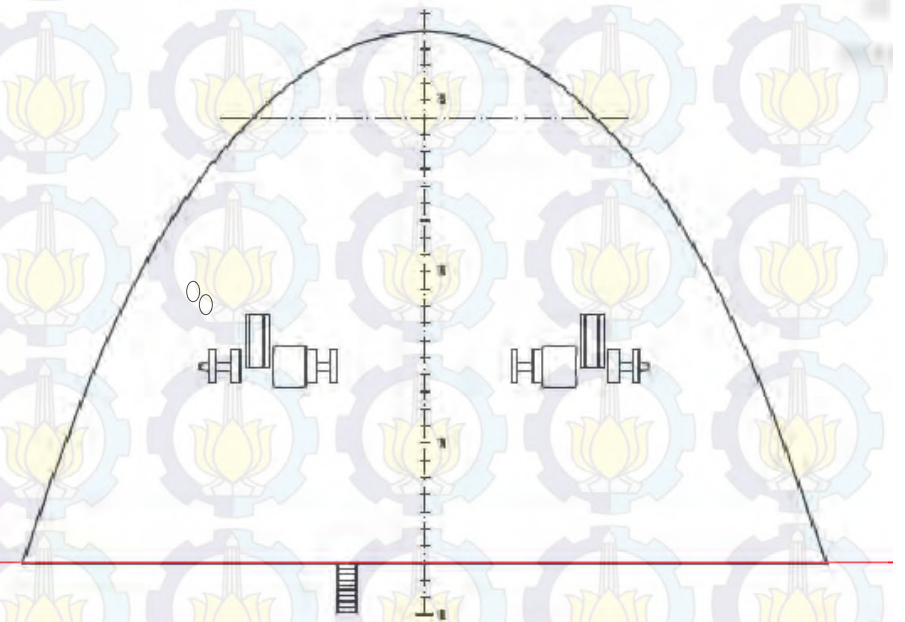
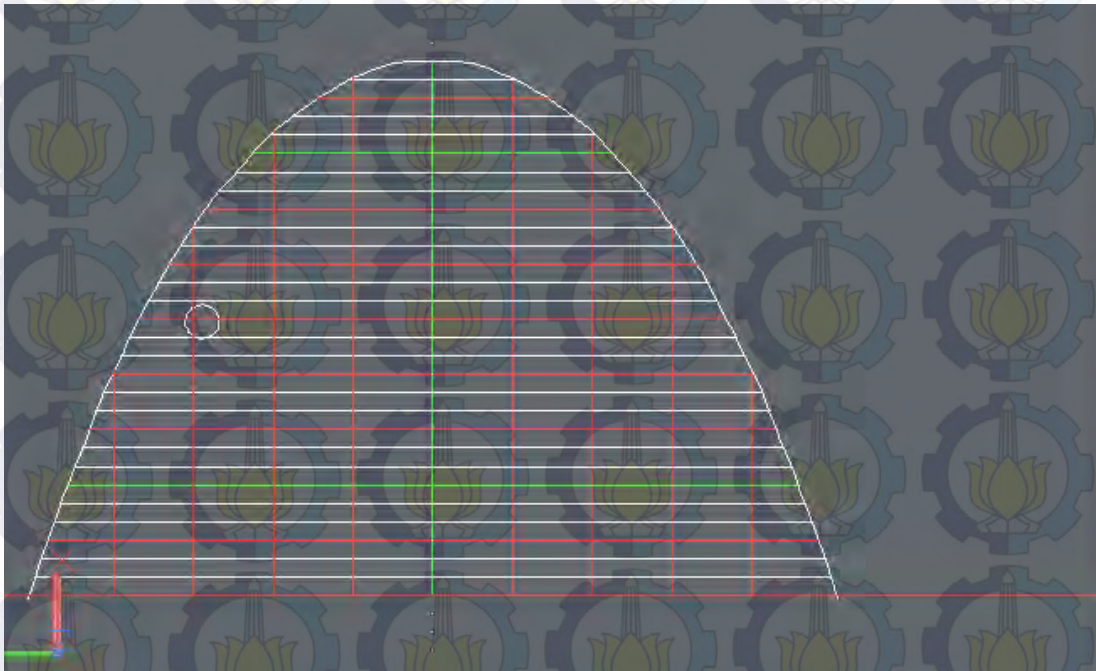


Hasil Deformasi Maksimum *Bollard* Belakang

A: Static Structural
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1
7/26/2015 2:03 PM



Detail Bollard Bagian depan



Pemodelan 3D *Bollard* Bagian depan

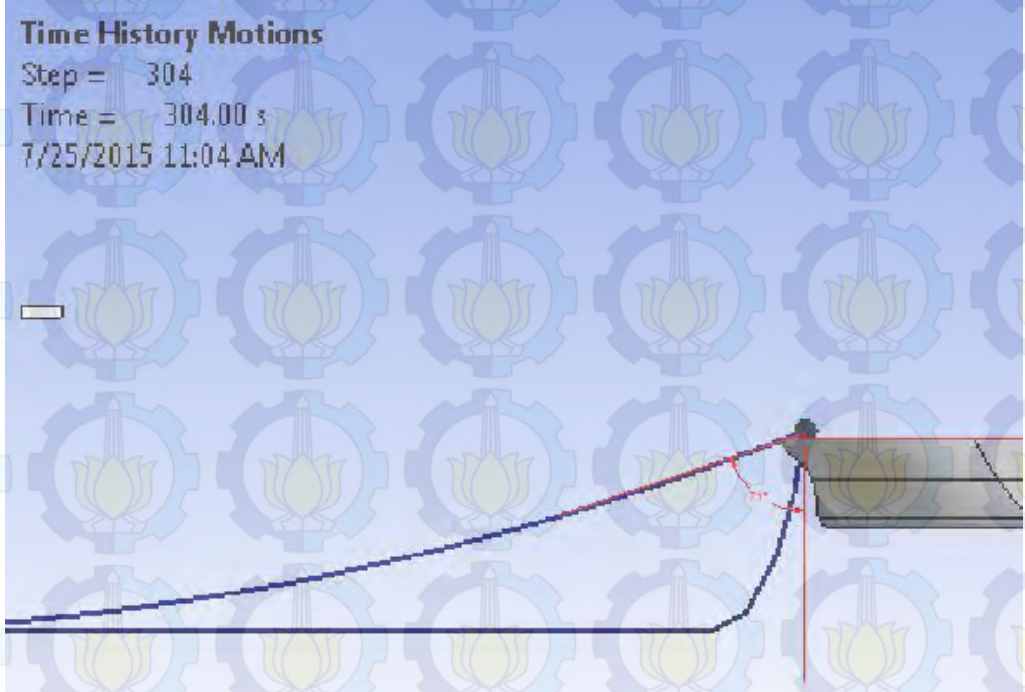


pelat *forecastle deck* mempunyai ketebalan 12 mm,
girder T 200 x 90x 12, *spacing* 0.7 m.

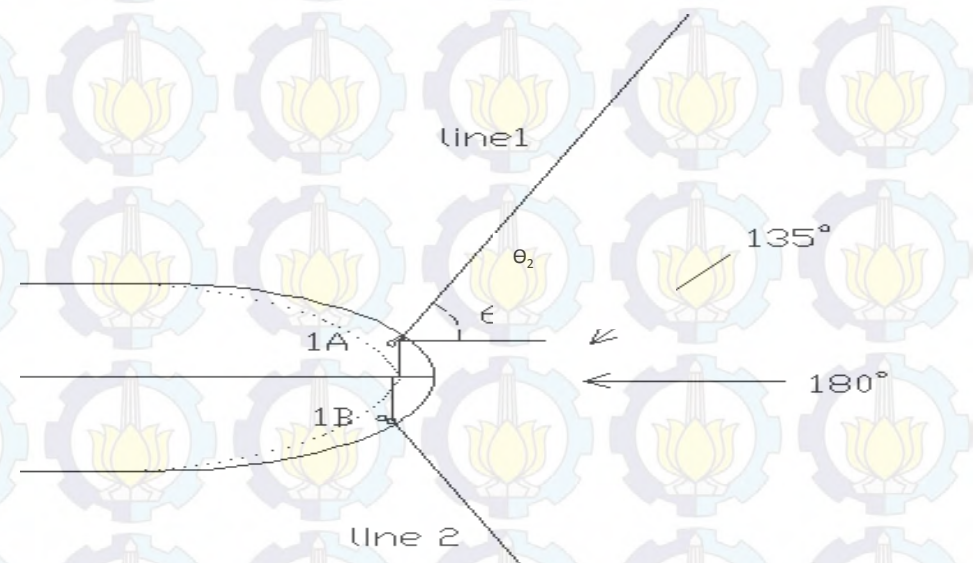
Kondisi Pembebanan *Bollard* Depan



$F_x = 1081298 \text{ N}$
 $F_y = 1872863 \text{ N}$
 $F_z = -736203.2 \text{ N}$



(a)

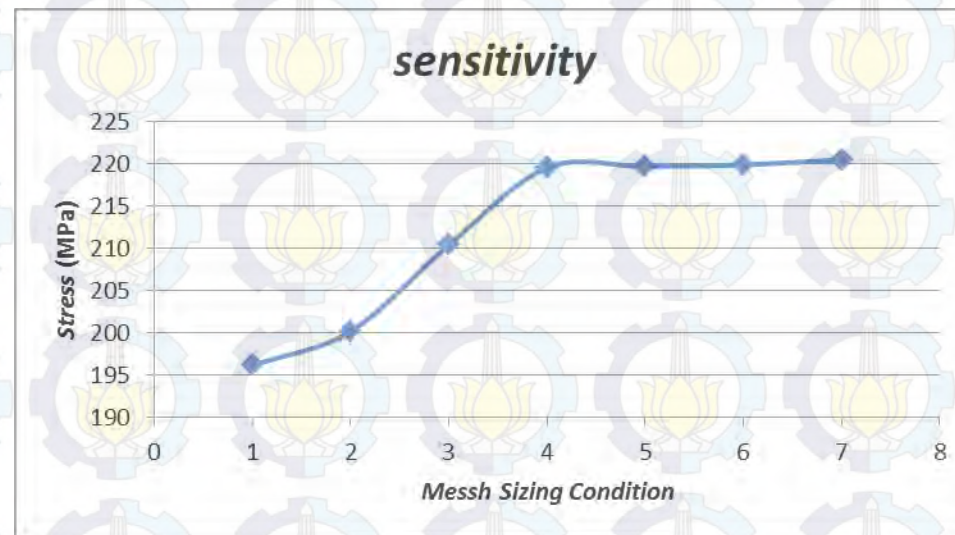


(b)

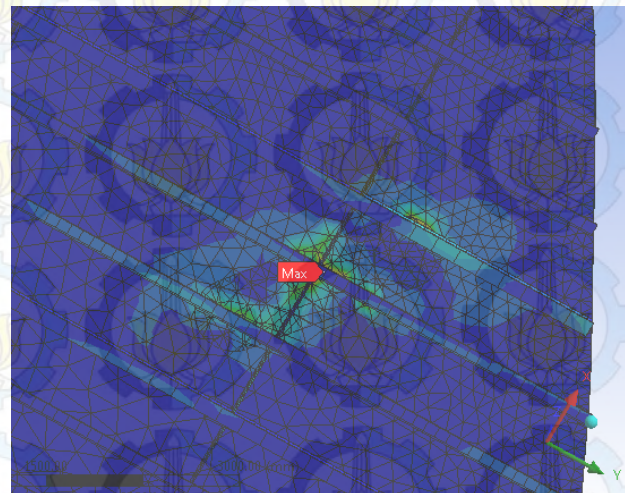
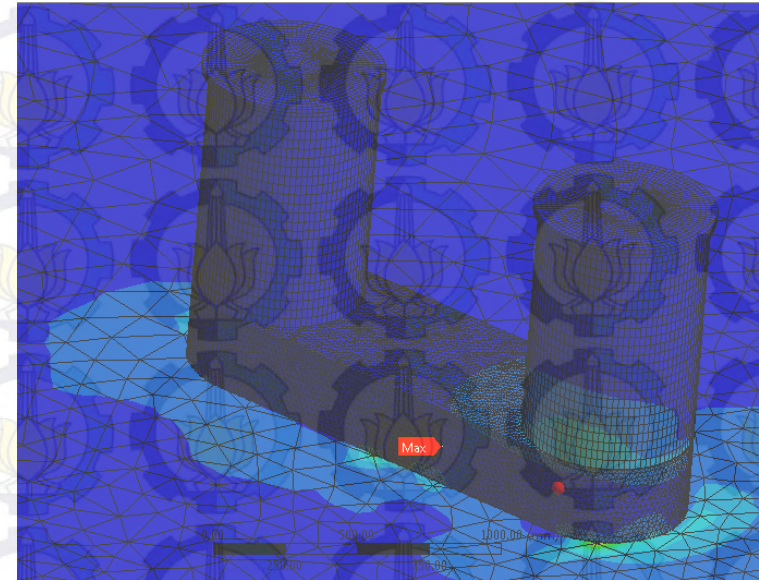
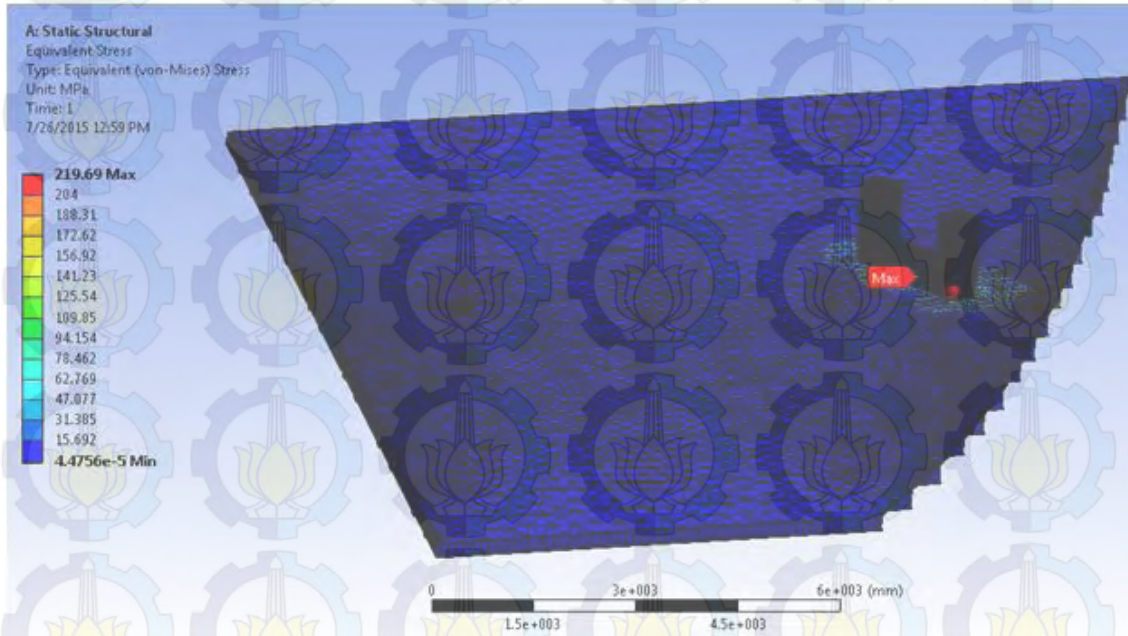
Gambar 4.58 Konfigurasi sudut rantai jangkar bagian depan (a) tampak samping (b) tampak atas

Mesh Sensitivity Struktur Bollard Depan

| Kondisi | Ukuran (mm) | Nodes | Elemen | Tegangan (Mpa) | Koreksi (%) |
|---------|-------------|--------|--------|----------------|-------------|
| 1 | 40 | 141935 | 48787 | 196.15 | |
| 2 | 35 | 156766 | 53051 | 200.18 | 2.013188131 |
| 3 | 30 | 169038 | 58910 | 210.42 | 4.866457561 |
| 4 | 25 | 195714 | 69014 | 219.56 | 4.162871197 |
| 5 | 24 | 200211 | 70497 | 219.69 | 0.059174291 |
| 6 | 23 | 214814 | 75696 | 219.88 | 0.08641077 |
| 7 | 20 | 242108 | 86146 | 220.51 | 0.285701329 |

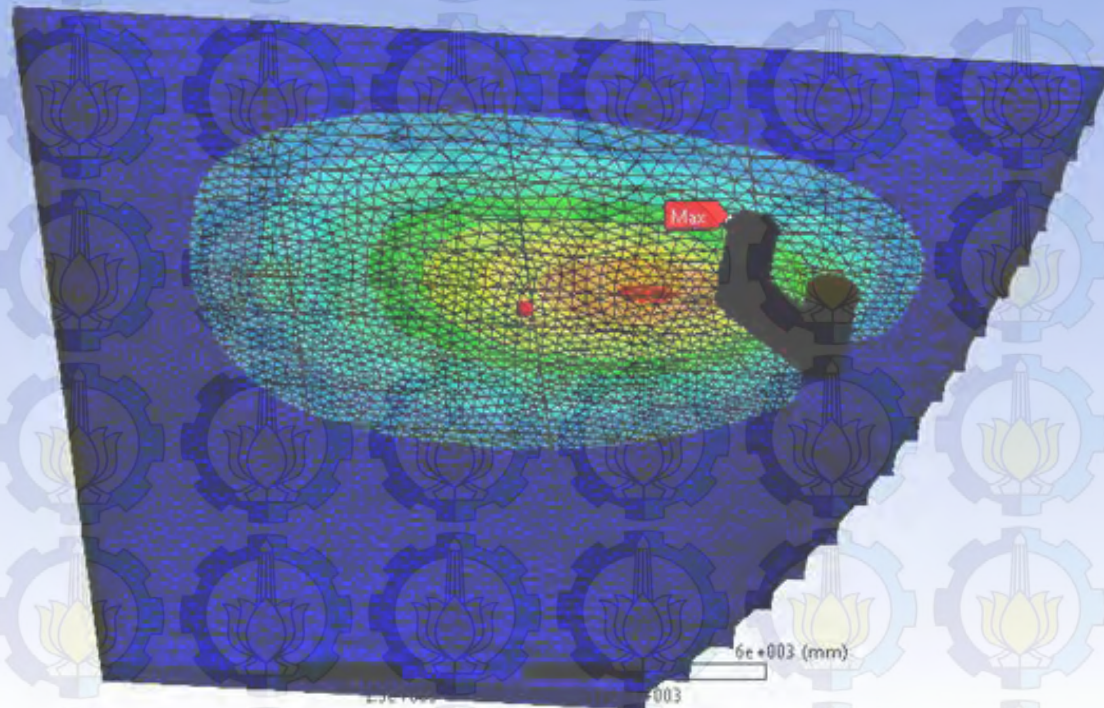
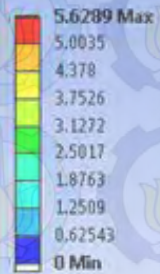


Hasil Tegangan Maksimum *Bollard* Depan



Hasil Deformasi Maksimum *Bollard* Depan

A: Static Structural
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1
7/26/2015 1:29 PM



Kesimpulan

1. Perilaku gerak FSO Ladinda saat kondisi *free floating* dapat dilihat dari nilai terbesar terjadi pada kondisi *light* dengan *surge* terbesar 5.651 m/m, *sway* terbesar 6.130 m/m, *heave* terbesar 1.020 m/m, *roll* terbesar 5.452 deg/m, *pitch* terbesar 0.638 deg/m, *yaw* terbesar 2.011 deg/m.
2. Perilaku gerak FSO Ladinda saat tertambat dapat dilihat dari nilai terbesar terjadi pada kondisi *light* dengan *surge* terbesar 0.040 m/m, *sway* terbesar 0.077 m/m, *heave* terbesar 0.072 m/m, *roll* terbesar 1.592 deg/m, *pitch* terbesar 0.088 deg/m, *yaw* terbesar 0.487 deg/m.

3. Hasil tegangan terbesar pada rantai jangkar terdapat pada *line* 4 untuk bagian belakang dengan nilai 2.31 MN dan *line* 1 untuk bagian depan dengan nilai 2.30 MN. Hasil diperoleh dari simulasi *time domain* dalam durasi 10800 detik (3 jam) pada kondisi *light load*.

4. Tegangan lokal yang dihasilkan untuk *bollard* bagian depan sebesar 219.69 Mpa dengan deformasi maksimum sebesar 5.62 mm. Untuk *bollard* bagian belakang, tegangan maksimum yang terjadi sebesar 214.49 Mpa dengan deformasi sebesar 3.65 mm. Struktur dengan sistem ini masih dikatakan aman sesuai standart keamanan yang ditetapkan oleh ABS “*Safehull-Dynamic Loading Approach for FPSO Systems*” (2001) dan ABS “*Shipbuilding and Repair Quality Standard for Hull Structures during Construction*” (2001) bahwa struktur masih aman beroperasi jika tegangan maksimumnya tidak melebihi 90% dari tegangan *yield* (225 MPa) dan defleksi maksimumnya tidak melebihi 6 mm.

The background features a repeating pattern of light blue gears, each containing a stylized green lotus flower. The text "Terima Kasih...😊" is centered in a dark grey font.

Terima Kasih...😊