TUGAS AKHIR – MO 141326

ANALISIS UMUR KELELAHAN KONTRUKSI *YOKE ARM* PADA *EKSTERNAL TURRET MOORING SYSTEM* FSO LADINDA

Sekar Rismarini

NRP. 4311 100 103

DOSEN PEMBIMBING :

Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D.
Ir. Mas Murtedjo, M.Eng.

JURUSAN TEKNIK KELAUTAN

Fakultas Teknologi Kelautan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya 2016

FINAL PROJECT – MO 141326

FATIGUE LIFE ANALYSIS OF YOKE ARM CONSTRUCTION OF EXTERNAL TURRET MOORING SYSTEM FSO LADINDA

Sekar Rismarini

NRP. 4311 100 103

SUPERVISORS :

Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D.
Ir. Mas Murtedjo, M.Eng.

DEPARTEMENT OF OCEAN ENGINEERING

Faculty of Marine Technology

Sepuluh Nopember Institute of Technology

Surabaya 2016

ANALISIS UMUR KELELAHAN KONSTRUKSI YOKE ARM PADA EKSTERNAL TURRET MOORING SYSTEM 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 Surabaya

Oleh

Sekar Rismarini NRP. 4311 100 103

Disetujui oleh:

1. Nur Syahroni., ST., MT.Ph.D (Pembimbing 1)

   .....

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

   .....

3. Ir. Joswan JS., M.Sc (Penguji 1)

   .....

4. Ir. Handayanu., M.Sc.Ph.D (Penguji 2)

   .....

5. Ir. Imam Rochani, M. Sc (Penguji 3)

   .....

6. Yoyok Setyo H. ST., MT.Ph.D (Penguji 4)

   .....

Analisis Umur Kelelahan Konstruksi *Yoke Arm* Pada *External Turret Mooring System* FSO Ladinda

Nama Mahasiswa : Sekar Rismarini
NRP : 4311100103
Jurusan : Teknik Kelautan – FTK ITS
Dosen Pembimbing : Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D.
Ir. Mas Murtedjo, M. Eng

ABSTRAK

Tujuan dari Tugas Akhir ini adalah untuk mengetahui umur kelelahan dari struktur *yoke arm* yang diakibatkan oleh beban gelombang yang berulang. Dengan struktur *yoke arm* tersebut merupakan bagian struktur yang berfungsi untuk menambatkan FSO (*Floating Storage Offloading*) Ladinda yang berlokasi di Selat Malaka pada Ladang Lalang. FSO Ladinda merupakan tanker yang dikonversi menjadi FSO dan telah dibangun sejak tahun 1984. Pada FSO Ladinda ditambat dengan menggunakan SPOLS (*Single Point Offloading System*), dimana SPOLS merupakan alat tambat dengan bangunan yang *fix* dan rigid namun bersifat *weatherveaning* atau dapat berputar mengikuti pergerakan kapal sebesar 360°. Sambungan antara FSO dengan SPOLS digunakan struktur bernama *yoke arm* atau *hook up beam*. Analisa pembebanan yang dilakukan pada *yoke arm* tersebut menggunakan analisa time respon pada kondisi operasi. Hasil *tension force* paling besar merupakan 64762,14 N yaitu pada kondisi FSO *Light Load* dengan arah pembebanan 180° dan *tension force* minimum bernilai -1413.895 N yaitu pada saat kondisi FSO *Light Load* dengan arah pembebanan 90° . Berdasarkan hasil pemodelan struktur global *Yoke arm* dengan pembebanan sesuai *tension force* didapatkan tegangan maksimum sebesar 184.65 MPa. Selanjutnya umur kelelahan dari *yoke arm* tersebut dilakukan dengan menggunakan *simplified methode*.. Dari hasil perhitungan umur kelelahan struktur, diperoleh hasil bahwa struktur *Yoke arm* memiliki harga D < 1 sehingga struktur tersebut dapat dikatakan aman untuk melakukan operasi dengan umur kelelahan struktur 152 tahun.

Kata Kunci : *yoke arm, maximum principal stress, hot-spot stress, simplified fatigue assessment*

Fatigue Life Analysis Of Yoke Arm Construction Of External Turret Mooring System FSO Ladinda

Name : **Sekar Rismarini**
NRP : **4311100103**
Department : **Ocean Engineering – FTK ITS**
Supervisors : **Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D.**
Ir. Mas Murtedjo, M. Eng

ABSTRACT

The purpose of this final project is to determine the fatigue life of the structure yoke arm caused by repeated wave loads. With yoke arm structure is part structure that serves to tether FSO (Floating Storage Offloading) Ladinda located in the waterway at Lalang Field. FSO Ladinda a tanker converted into FSO and has been built since 1984. At the FSO Ladinda tethered using SPOLS (Single Point Offloading System), which is a tool SPOLS mooring with building a fixed and rigid but it can be weatherveaning or can rotate to follow the movement of the ship 360°. The connection between the FSO with SPOLS use structures called yoke arm or hook up beam. Loading analysis performed on the yoke arm using response-time analysis on operating conditions. Results of the greatest tension force is 64762.14 N in the condition FSO Light Load the direction of loading and tension force 180° minimum worth -1413,895 N, namely when the conditions FSO Light Load the direction of loading 90°. Based on modeling results Yoke global structure loading arm with tension force obtained voltage corresponding to a maximum of 184.65 MPa. Furthermore, the fatigue life of the yoke arm is done by using the simplified method .. From the calculation of the fatigue life of the structure, the result of the cumulative damage the yoke arm has a price structure D <1 so that the structure can safely be said to perform operations with the fatigue life of the structure 152 years.

Kata Kunci : *yoke arm, maximum principal stress, hot-spot stress, simplified fatigue assessment*

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis ucapkan kepada Allah SWT yang telah memberikan segala rahmat dan hidayah sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul, "**Analisis Umur Kelelahan Konstruksi *Yoke Arm pada Eksternal Turret Mooring System* FSO Ladinda***"* ini dengan tepat waktu dan tanpa halangan yang berarti.

Tugas Akhir ini disusun sebagai syarat untuk mendapatkan gelar sarjana (S-1) di Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Tugas Akhir ini berisi tentang analisis gerakan pada *yoke arm* saat kondisi tertambat dengan FSO Ladinda, kemudian didapatkan *tension* pada sambungan engsel yang menghubungkan antara *yoke* dengan FSO untuk dipakai sebagai pembebanan pada pemodelan global struktur sehingga didapatkan hasil tegangan maksimum dan dilanjutkan dengan perhitungan umur kelelahan struktur untuk mengetahui apakah struktur masih aman untuk beroperasi.

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

Surabaya, January 2016

Penulis

DAFTAR ISI

COVER ..... **i**
LEMBAR PENGESAHAN ..... **ii**
ABSTRAK ..... **iii**
ABSTRACT ..... **iv**
KATA PENGANTAR ..... **v**
UCAPAN TERIMA KASIH ..... **vi**
DAFTAR ISI ..... **vii**
DAFTAR GAMBAR ..... **ix**
DAFTAR TABEL ..... **xiv**
DAFTAR LAMPIRAN ..... **xv**
BAB 1 PENDAHULUAN **1**
1.1 Latar Belakang Masalah 1
1.2 Rumusan Masalah 2
1.3 Tujuan 3
1.4 Manfaat 3
1.5 Batasan Masalah 3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI **5**
2.1 Tinjauan Pustaka 5
2.2 Dasar Teori 6
2.2.1 Moda Gerak Struktur Apung 6
2.2.2 Heading Kapal Terhadap Arah Pembebanan 7
2.2.3 Sistem Tambat 8
2.2.4 Response Amplitude Operator (RAO) 10
2.2.5 Spektrum Gelombang 12
2.2.6 Respon Spektra 13
2.2.7 Analisis Dinamis 14
2.2.8 Tegangan Utama Maksimum 15
2.2.9 Metode Perhitungan Kelelahan 16

2.2.10 Kurva S-N 17
2.2.11 Penaksiran Kelelahan Sederhana 19
BAB III METODOLOGI PENELITIAN 21
3.1 Diagram Alir Penelitian 21
3.2 Prosedur Penelitian 23
3.3 Pengumpulan Data 24
BAB IV PEMBAHASAN 27
4.1 Pemodelan Struktur 27
4.1.1 FSO Ladinda 27
4.2 Hidrostatik 30
4.3 Konfigurasi Arah Pembebanan Gelombang 33
4.4 Response Amplitude Operator 33
4.4.1 FSO Ladinda – *Free Floating* 34
4.4.1.1 Full Load – *Free Floating* 34
4.4.1.2 Light Load – Mooring 40
4.4.2 FSO Ladinda - *Moored* 46
4.4.2.1 *Full Load - Moored* 46
4.4.2.2 *Light Load - Moored* 52
4.5 Analisis RAO Menjadi Respon Gelombang 53
4.6 Analisis Tegangan Pada Sambungan Yoke Arm 60
4.7 Pemodelan Konstruksi Sambungan Konstruksi Sambungan Yoke Arm dengan FSO 62
4.8 *Meshing* dan *Sensitivity Analysis* 64
4.9 Pembebanan pada ANSYS Mechanical 67
4.10 Analisis Tegangan Pada Struktur Yoke Arm 69
4.11 Analisis Umur Kelelahan Struktur Yoke Arm 71
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN 77
5.1 Kesimpulan 77
DAFTAR PUSTAKA 79
LAMPIRAN
BIODATA PENULIS

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 FSO (Floating Storage and Offloading System) Ladinda 2

Gambar 2.1 Enam derajat kebebasan pada kapal.....7

Gambar 2.2 Definisi arah datang gelombang terhadap heading kapal 8

Gambar 2.3 *Internal Turret Mooring System*.....9

Gambar 2.4 *Tower Yoke Mooring System*.....10

Gambar 2.5 *Fatigue cracking* ketika arah principal stress dengan *weld toe*.....16

Gambar 2.6 Kurva SN.....18

Gambar 3.1 Flowchart penyelesaian Tugas Akhir.....21

Gambar 4.1 General Arrangement FSO Ladinda.....27

Gambar 4.2 Hasil pemodelan FSO Ladinda pada Maxsurf tampak samping (sheer plan) 28

Gambar 4.3 Hasil pemodelan FSO Ladinda pada Maxsurf tmpak depan (body plan) 29

Gambar 4.4 Hasil pemodelan FSO Ladinda pada Maxsurf tampak atas (half breadth plan) 29

Gambar 4.5 Hasil pemodelan FSO Ladinda pada Maxsurf tampak isometri 30

Gambar 4.6 Konfigurasi arah pembebanan gelombang 33

Gambar 4.7 Grafik RAO gerakan translasi pada FSO Ladinda kondisi *full load* saat *free floating* dengan *heading* pembebanan 0°.....34

Gambar 4.8 Grafik RAO gerakan rotasional pada FSO Ladinda kondisi *full load* saat *free floating* dengan *heading* pembebanan 0°.....35

Gambar 4.9 Grafik RAO gerakan translasi pada FSO Ladinda kondisi *full load* saat *free floating* dengan *heading* pembebanan 45° 36

Gambar 4.10 Grafik RAO gerakan rotasional pada FSO Ladinda kondisi *full load* saat *free floating* dengan *heading* pembebanan 45° 36

Gambar 4.11 Grafik RAO gerakan translasi pada FSO Ladinda kondisi *full load* saat *free floating* dengan *heading* pembebanan 90° 37

Gambar 4.12 Grafik RAO gerakan rotasional pada FSO Ladinda kondisi *full load* saat *free floating* dengan *heading* pembebanan 90° 38

Gambar 4.13 Grafik RAO gerakan translasi pada FSO Ladinda kondisi *full load* saat *free floating* dengan *heading* pembebanan 180° 38

Gambar 4.14 Grafik RAO gerakan rotasional pada FSO Ladinda kondisi *full load* saat *free floating* dengan *heading* pembebanan 180° 39

Gambar 4.15 Grafik RAO gerakan translasi pada FSO Ladinda kondisi *light load* saat *free floating* dengan *heading* pembebanan 0° 41

Gambar 4.16 Grafik RAO gerakan rotasional pada FSO Ladinda kondisi *light load* saat *free floating* dengan *heading* pembebanan 0° 41

Gambar 4.17 Grafik RAO gerakan translasi pada FSO Ladinda kondisi *light load* saat *free floating* dengan *heading* pembebanan 45° 42

Gambar 4.18 Grafik RAO gerakan rotasional pada FSO Ladinda kondisi *light load* saat *free floating* dengan *heading* pembebanan 45° 43

Gambar 4.19 Grafik RAO gerakan translasi pada FSO Ladinda kondisi *light load* saat *free floating* dengan *heading* pembebanan 90° 43

Gambar 4.20 Grafik RAO gerakan rotasional pada FSO Ladinda kondisi *light load* saat *free floating* dengan *heading* pembebanan 90° 44

Gambar 4.21 Grafik RAO gerakan translasi pada FSO Ladinda kondisi *light load* saat *free floating* dengan *heading* pembebanan 180° 44

Gambar 4.22 Grafik RAO gerakan rotasional pada FSO Ladinda kondisi *light load* saat *free floating* dengan *heading* pembebanan 0° 45

Gambar 4.23 Grafik RAO gerakan translasi pada FSO Ladinda kondisi *full load* saat tertambat dengan *heading* pembebanan 0° 47

Gambar 4.24 Grafik RAO gerakan rotasional pada FSO Ladinda kondisi *full load* saat tertambat dengan *heading* pembebanan 0° 47

Gambar 4.25 Grafik RAO gerakan translasi pada FSO Ladinda kondisi *full load* saat tertambat dengan *heading* pembebanan 45° 48

Gambar 4.26 Grafik RAO gerakan rotasional pada FSO Ladinda kondisi *full load* saat tertambat dengan *heading* pembebanan 45° 49

Gambar 4.27 Grafik RAO gerakan translasi pada FSO Ladinda kondisi *full load* saat tertambat dengan *heading* pembebanan 90° 49

Gambar 4.28 Grafik RAO gerakan rotasional pada FSO Ladinda kondisi *full load* saat tertambat dengan *heading* pembebanan 90° 50

Gambar 4.29 Grafik RAO gerakan translasi pada FSO Ladinda kondisi *full load* saat tertambat dengan *heading* pembebanan 180° 51

Gambar 4.30 Grafik RAO gerakan rotasional pada FSO Ladinda kondisi *full load* saat tertambat dengan *heading* pembebanan 180° 51

Gambar 4.31 Grafik RAO gerakan translasi pada FSO Ladinda kondisi *light load* saat tertambat dengan *heading* pembebanan 0° 53

Gambar 4.32 Grafik RAO gerakan rotasional pada FSO Ladinda kondisi *light load* saat tertambat dengan *heading* pembebanan 0° 53

Gambar 4.33 Grafik RAO gerakan translasi pada FSO Ladinda kondisi *light load* saat tertambat dengan *heading* pembebanan 45° 54

Gambar 4.34 Grafik RAO gerakan rotasional pada FSO Ladinda kondisi *light load* saat tertambat dengan *heading* pembebanan 45° 55

Gambar 4.35 Grafik RAO gerakan translasi pada FSO Ladinda kondisi *light load* saat tertambat dengan *heading* pembebanan 90° 55

Gambar 4.36 Grafik RAO gerakan rotasional pada FSO Ladinda kondisi *light load* saat tertambat dengan *heading* pembebanan 90° 56

Gambar 4.37 Grafik RAO gerakan translasi pada FSO Ladinda kondisi *light load* saat tertambat dengan *heading* pembebanan 180° 56

Gambar 4.38 Grafik RAO gerakan rotasional pada FSO Ladinda kondisi *light load* saat tertambat dengan *heading* pembebanan 180° 57

Gambar 4.39 Spektrum Jonswap Perairan Selat Malakan dengan Hs = 1,46 m ...59

Gambar 4.40 Pemodelan pada *software* ANSYS Aqwa tampak samping kondisi *full load* 61

Gambar 4.41 Pemodelan konstruksi *yoke arm* yang menempel pada FSO 63

Gambar 4.42 Pemodelan FSO bagian depan tampak belakang yang dilakukan *constraint* 64

Gambar 4.43 Meshing struktur constraint.....64

Gambar 4.44 Refinement daerah kritis 65

Gambar 4.45 Refinement daerah kritis 65

Gambar 4.46 Titik peninjauan meshing sensitivity 66

Gambar 4.47 Sensitivitas *meshing* model struktur *yoke arm*.....67

Gambar 4.48 Kondisi batas jepit pada potongan kapal bagian depan 69

Gambar 4.49 Pembebanan pada *yoke arm* 69

Gambar 4.50 *Maximum principal stress* pada struktur 70

Gambar 4.51 Deformasi pada struktur *yoke arm* 70

Gambar 4.52 Penomoran titik-titik kritis pada struktur 71

Gambar 4.53 Konstruksi kritis 71

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Principle dimension dan data hidrostatis FSO Ladinda 24

Tabel 3.2 Data Input Geometry FSO Ladinda pada ANSYS 25

Tabel 3.3 Data Lingkungan.....26

Tabel 4.1 Koreksi data hidrostatik kondisi *Full Load* dengan model Maxsurf 30

Tabel 4.2 Koreksi data hidrostatik kondisi *Light Load* dengan model Maxsurf....32

Tabel 4.3 Nilai maksimum RAO FSO Ladinda *full load free floating condition*..40

Tabel 4.4 Nilai maksimum RAO FSO Ladinda *light load free floating condition*45

Tabel 4.5 Nilai maksimum RAO FSO Ladinda *full load moored condition* 52

Tabel 4.6 Nilai maksimum RAO FSO Ladinda *light load moored condition* 58

Tabel 4.7 Analisis *tension* maksimum pada sambungan *yoke arm* FSO Ladinda .61

Tabel 4.8 Analisis *tension* minimum pada sambungan *yoke arm* FSO Ladinda ...62

Tabel 4.9 Tabulasi hasil *Maximum Principal Stress* untuk Variasi kerapatan meshing 67

Tabel 4.10 Konfigurasi pembebanan struktur berdasarkan *tension*.....68

Tabel 4.11 Perhitungan *Hot spot stress* 72

Tabel 4.12 Perhitungan *Hot spot stress range* 73

Tabel 4.13 Hasil perhitungan kelelahan struktur *yoke arm* saat tertambat dengan FSO Ladinda 75

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN A Perhitungan Umur Kelelahan Struktur *Yoke Arm*

LAMPIRAN B Respon Spektra

LAMPIRAN C Data Konstruksi *Yoke Arm* Dan FSO Ladinda

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Dalam perancangan suatu struktur, baik itu struktur yang berada di darat maupun struktur yang berada di lepas pantai, salah satu hal yang perlu dianalisa adalah melakukan analisa kelelahan. Analisa tersebut meliputi kemampuan suatu bangunan/struktur untuk memenuhi tujuan desain yang telah ditetapkan sejak awal, termasuk disini adalah analisa kelelahan struktur. Kegagalan akibat *fatigue* pada suatu struktur lepas pantai banyak diakibatkan karena struktur terkena beban lingkungan terutama beban akibat gelombang yang bersifat siklis dan juga dapat terjadi karena gerakan dari struktur itu sendiri yang berlangsung secara berulang-ulang. Oleh sebab itu, maka diperlukan adanya analisa kelelahan struktur akibat beban siklis pada struktur lepas pantai. Struktur lepas pantai terdapat banyak macamnya, satunya adalah *Floating Storage Offloading* (FSO). Pada FSO terdapat komponen-komponen struktur, salah satunya adalah *Yoke Arm*.

FSO sebagai salah satu bangunan apung yang memiliki ukuran besar, mendapatkan pengaruh yang sangat signifikan dari beban gelombang dan angin. Bangunan lepas pantai cenderung mengalami kelelahan karena beban lingkungan yang bekerja didominasi oleh gelombang yang bersifat siklis. Disamping itu, faktor-faktor operasi lain pada tingkatan tertentu juga dapat menambah beban siklis ini, sehingga keadaan struktur menjadi bertambah kritis (Djatmiko, 2003)

Yoke Arm merupakan salah satu struktur yang ada pada FSO yang memiliki probabilitas yang cukup besar untuk megalami kelelahan (*fatigue*). Beban yang mengenai *yoke arm* cukup signifikan. Ditambah lagi proses penyambungan antara FSO dengan *yoke arm* yang mempengaruhi kekuatan dan umur dari *yoke arm*. Secara umum, beban yang mengenai *yoke arm* ada dua, yaitu beban statis dan beban dinamis. Untuk beban statis yaitu beban yang berasal dari struktur *yoke arm* sendiri.

Sedangkan beban dinamis berasal dari beban operasional, serta beban siklis berupa gerakan FSO yang disebabkan oleh gelombang dan angin.

Berdasarkan latar belakang di atas, maka tugas akhir ini akan melakukan analisis kelelahan (*fatigue*) pada *yoke arm* pada *Floating Storage Offloading* (FSO) Ladinda yang berlokasi di Laut Jawa.

Gambar 1.1 FSO (*Floating Storage and Offloading System*) Ladinda

(Sumber *; www.bakrie-brothers.com)*

1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan yang akan dibahas dalam tugas akhir ini adalah :

1. Bagaimana perilaku gerakan FSO Ladinda pada saat *free floating* maupun tertambat pada *external turret mooring*?
2. Berapa umur kelelahan (*fatigue life*) yang terjadi pada konektor *yoke arm* dari *external turret mooring sytem* FSO Ladinda?

1.3 Tujuan

Tujuan dari tugas akhir ini adalah :

1. Menghitung perilaku gerakan FSO Ladinda pada saat *free floating* maupun tertambat pada *external turret mooring*.
2. Menghitung umur kelelahan (*fatigue life*) pada konektor *yoke arm* dari *external turret mooring* pada FSO Ladinda.

1.4 Manfaat

Dari hasil penelitian ini diharapkan dapat mengetahui informasi dari pengaruh beban siklis terhadap umur kelelahan (*fatigue life*) dan juga kekuatan dari struktur *yoke arm* pada FSO Ladinda. Hasil dari penelitian ini akan bermanfaat pada petunjuk mengenai keamanan (*safety*) pada struktur FSO tersebut.

1.5 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah yang digunakan dalam penyelesaian tugas akhir ini antara lain :

1. Struktur yang dianalisis merupakan konektor *yoke arm* pada FSO Ladinda.
2. *Heading* pembebanan pada *head sea, quartering sea, beam sea,* dan *following sea*.
3. Pemodelan hanya dilakukan pada sebatas *yoke arm* pada sisi haluan FSO saja, beserta kompartemen *hull structure* FSO bagian depan yang mendukung *yoke arm* tersebut.
4. Perhitungan RAO pada saat *free floating* maupun pada saat tertambat menggunakan software Ansys AQWA.
5. Analisa dilakukan pada saat FSO dalam keadaan *full load* dan *light load.*
6. Beban gelombang yang digunakan merupakan beban gelombang operasi.

7. Analisis *fatigue* pada struktur FSO menggunakan metode S-N Curve dengan mengestimasi kumulatif kegagalan *fatigue (cumulative fatigue damage)* menggunakan metode *simplified fatigue assessment.*
8. Beban lingkungan yang digunakan merupakan beban gelombang, arus dan angin.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

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

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

FSO yang dibahas pada penelitian ini merupakan FSO Ladinda yang terletak di Selat Lalang, Malaka Strait, Kepulauan Riau ditambat dengan menggunakan *tower yoke mooring system* berupa SPOLS (*Single Point Offshore Loading System*). Dimana *tower yoke mooring system* merupakan suatu *tower* yang terpancang pada sea bed dan difungsikan sebagai titik tambat permanent untuk tanker dan FSO. Desain atas dari suatu *tower yoke mooring system* dibuat dapat berotasi sedangkan bagian bawah dibuat terpancang. FSO yang ditambat dengan *tower yoke mooring system* ini digunakan pada perairan yang dangkal dengan arus yang tinggi. (Aminulloh, 2008).

Untuk aplikasi pada FSO, *tower yoke mooring system* digunakan untuk:

1. Mengamankan FSO, sehingga FSO dengan dapat berputar di sekitar *tower* sebagai respon struktur akibat beban lingkungan.

2. Menyediakan *support structure* yang meghubungkan FSO dengan *pipeline* yang akan mendistribusikan minyak.

Pada penelitian ini, *tower yoke mooring system* yang akan dirancang mengikuti aplikasi dari penelitian Yamaya, et.al. (2002) dimana batasan gerakan pada *mooring* tersebut adalah sebagai berikut:

Surge : *restrained* hamper sempurna
Sway : *restrained* pada tumpuan *roll yoke*
Heave : *free*
Roll : *restrained* kurang sempurna pada konektor
Pitch : *free*
Yaw : *restrained* tidak sempurna pada konektor

Beban yang paling mempengaruhi gerakan struktur apung adalah gelombang. Akibat gerakan gelombang ini, besar pengaruhnya terhadap gerakan FSO yang ditambat, sehingga dalam perancangan diperlukan suatu analisa kekuatan dan umur dan sambungan antara FSO dengan *tower yoke mooring system* tersebut. Dimana hal tersebut disambungkan dengan menggunakan *yoke arm.*

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Moda Gerak Struktur Apung

Pada umumnya struktur bangunan apung mempunyai gerak osilasi. Gerakan bangunan apung tersebut disefinisikan sebagai enam derajat kebebasan. Dimana terdapat tiga gerakan translasi dan tiga gerakan rotasi yang bisa dilihat pada gambar 2.1, diantaranya adalah :

Tanslasi

a. *Surging* : Gerak osilasi translasional pada sumbu-x

b. *Swaying* : Gerak osilasi translasional terhadap sumbu-y

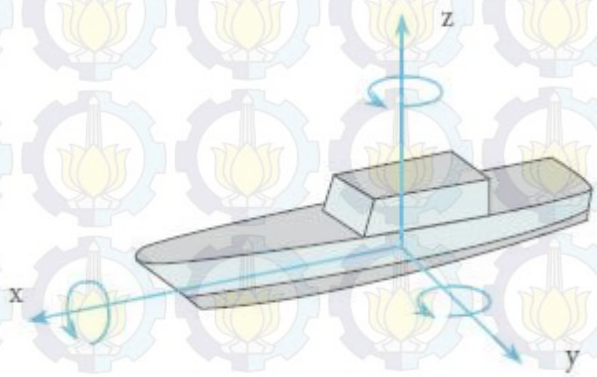
c. *Heaving* : Gerak osilasi translasional terhadap sumbu-z

Rotasi

d. *Rolling* : Gerak osilasi rotasional terhadap sumbu-x

e. *Pitching* : Gerak osilasi rotasional terhadap sumbu-y

f. *Yawing* : Gerak osilasi rotasional terhadap sumbu-z



Gambar 2.1 Enam derajat kebebasan pada kapal

(Sumber: http://surprise.or.kr)

2.2.2 Heading Kapal Terhadap Arah Pembebanan

Faktor yang diperhitungkan juga adalah gelombang papasan. Dimana gelombang papasan ini berhadapan dengan kapal. Dan gambaran ilustrasi periode papasan di perlihatkan sebagai berikut :

$$T_\theta = \frac{L_w}{V_w - V\ \cos\mu} \qquad 2.1$$

$$V_w = \omega_\theta (1 - \frac{V}{V_w} cos\mu) \qquad 2.2$$

dengan:

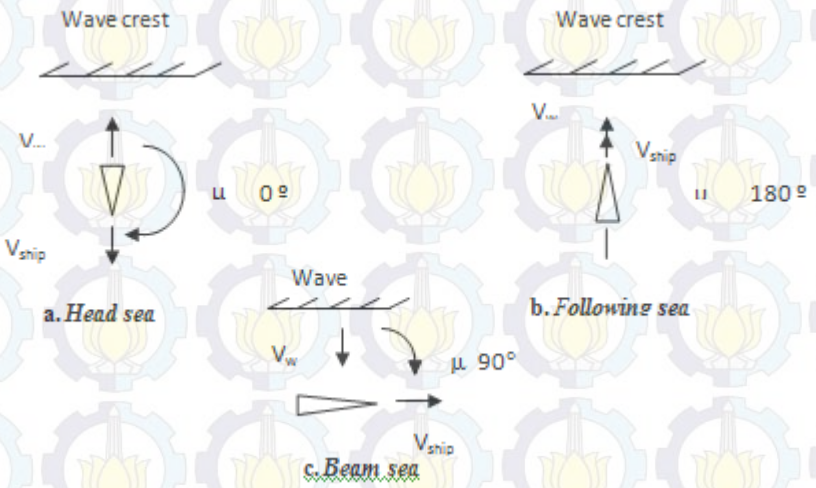
T_θ = Periode *Encountering* (s)

V_w = Kecepatan Gelombang($^m/_s$)

V = Kecepatan Kapal *(knot)*

μ = Sudut Datang Gelombang

Berikut ini merupakan gambaran arah datangnya gelombang dengan sudutnya masing-masing yaitu 90° (*beam sea)*, 0° (*head seas*), 180° (*following sea*):



Gambar 2.2 Definisi arah datang gelombang terhadap *heading* kapal (Sumber: Bhattacharyya 1972)

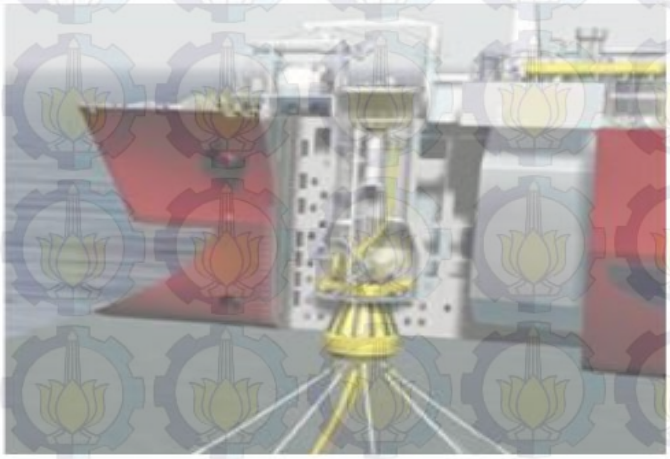
2.2.3 Sistem Tambat

Sistem penambatan pada FSO dapat dikategorikan menjadi dua jenis, yaitu: *weathervaning* dan *non-weathervaning*. *Weathervaning* merupakan respon bangunan apung yang bebas berputar sejauh 360°, contohnya adalah *internal* dan *eksternal turret mooring system* yang ada pada Gambar 2.3 dan Gambar 2.4 contoh dari *eksternal turret mooring system* adalah SPOLS (*Single Point Offshore Leg System*) dan *tower yoke mooring system.*

Sedangkan penambatan FSO pada katergori *non-weathervanning* merupakan jenis penambatan yang tidak dapat bebas berputar sejauh 360° contohnya *jetty mooring system* dan *spread mooring.*

1. *Internal Turret Mooring System*

Internal Turret mooring system, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.3, terdapat sembilan sampai 12 tali tambat yang fungsinya sebagai alat untuk menstabilkan bangungan apung dan juga sebagai penyalur gas atau minyak bumi. Pada umumnya *internal turret mooring system* ini digunakan pada perairan yang cukup dalam.



Gambar 2.3 *Internal Turret Mooring System*

(sumber **:** www.offshoremoorings.org)

2. *Tower Yoke Mooring System*

sistem tambat *Tower yoke* atau *eksternal turret mooring system*, seperti digambarkan pada Gambar 2.4, merupakan *tower* yang dipancangkan ke dasar laut dan dan

menggunakan penghubung atau *yoke* yang berfungsi sebagai penghubung antara *tower* dengan bangunan apung. Sebuah meja

putar diikat ke menara dengan bantalan rol untuk memungkinkan kapal untuk melakukan gerakan *weatherveaning* di sekitar menara. Sebuah meja putar diikat ke menara dengan bantalan rol untuk memungkinkan kapal melakukan gerakan *weatherveaning*. Sebuah *yoke* terhubung ke meja putar dengan lapangan dan roll sendi untuk memungkinkan kapal untuk melakukan gerakan pitch dan roll.

Gambar 2.4 *Tower Yoke Mooring System*

(Sumber : sofec.com)

2.2.4 Response Amplitude Operator (RAO)

Response Amplitude Operator (RAO) atau disebut juga dengan *transfer function.* Menurut Chakrabarti (1987), pada umumnya RAO didesfinisikan sebagai respon dari amplitudo per unit tinggi gelombang. Pada komputasi dari RAO, gelombang dipertimbangkan sebagai gelombang regular dan dalam jumlah yang memadai frekuensi yang dipilih untuk menutupi seluruh rentang frekuensi yang tercakup dalam spektrum gelombang. Frekuensi yang dipakai sebagai absis dapat berupa frekuensi

gelombang insiden, w, frekuensi gelombang papasan, w_e, atau frekuensi non dimensi disesuaikan dengan keperluan analisisnya. Frekuensi non-dimensi, baik yang terkait dengan gelombang insiden maupun gelombang papas an, adalah parameter yang diperoleh dar frekuensi gelomban dengan memperhitungkan ukuran panjang bangunan *L* dan percepatan gravitasi, *g*, sebagai berikut:

$$w' = \frac{w}{\sqrt{g/L}} \quad \text{atau} \quad w'_e = \frac{w}{\sqrt{g/L}} \qquad 2.4$$

Persamaan RAO untuk gerakan translasi dapat dicari dengan rumus sebagai ber adalah merupakan perbandingan langsung antara amplitudo gerakannya dibanding dengan amplitudo gelombang insiden :

$$RAO = \frac{\zeta_{k0}}{\zeta_0} \text{ m/m} = \frac{Amplitudo\ respon\ gerakan}{Amplitudo\ gelombang} \qquad 2.5$$

Sedangakan RAO untuk gerakan rotasi merupakan perbandingan antara amplitudo gerakan rotasi (dalam radian) dengan kemiringan gelombang, yakni merupakan perkalian antara angka gelombang, dengan amplitudo gelomang insiden:

$$RAO = \frac{\zeta_{k0}}{k_w \zeta_0} = \frac{\zeta_{k0}}{(w^2/g)\zeta_0}\ rad/rad = \frac{Amplitudo\ gerakan\ rotasi}{Amplitudo\ gelombang} \qquad 2.6$$

RAO merupakan alat untuk mentransfer gaya gelombang menjadi respon gerakan dinamis struktur.

2.2.5 Spektrum Gelombang

Menurut Djatmiko (2012), spektrum adalah energi spektrum dari elevasi permukaan laut. sebuah gelombang reguler memuat energi yang diidentifikasikan pada setiap unit atau satuan luas permukaannya ekuivalen dengan harga kuadrat amplitudonya. Jadi energy total persatuan luas permukaan gelombang, yang merupakan penjumlahan dari komponen energy potensial dan energy kinetik adalah:

$$\frac{dE_T}{dA} = \frac{dE_p + dE_k}{dA} = \frac{1}{4}\rho g {\zeta_0}^2 + \frac{1}{4}\rho g {\zeta_0}^2 = \frac{1}{2}\rho g {\zeta_0}^2 \qquad 2.7$$

Spektra gelombang dapat didapatkan dengan analisis rekaman dari *wave time histories.*

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

Pada penelitian kali ini, jenis spektrum gelombang yang digunakan merupakan spektrum JONSWAP. Karena FSO yang ditinjau berada di daerah perairan tertutup.

ersamaan spektrum JONSWAP dapat dituliskan dengan memodifikasi persamaan Spektrum JONSWAP didasarkan pada percobaan yang dilakukan di North Sea. Pspektrum Pierson-Moskowitz, yaitu :

$$S(\omega) = \alpha\, g^2 \omega^{-5} EXP\left[-1{,}25\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^{-4}\right] \gamma^{EXP\left[\frac{-(\omega-\omega_0)^2}{2\tau^2 {\omega_0}^2}\right]} \qquad 2.8$$

dengan,

γ = parameter puncak (*peakedness parameter*)

τ = parameter bentuk (*shape parameter*)untuk

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

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

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

$X_0 = \frac{g\,X}{U_\omega}$

Perhitungan nilai parameter puncak (γ) dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan Toursethaugen (1985) sebagai berikut,

$$\gamma = EXP\left[3{,}4843\left(1 - 0{,}1975\left(0{,}036 - 0{,}0056\frac{T_P}{\sqrt{H_S}}\right)\frac{T_P^{\,4}}{H_S^{\,2}}\right)\right] \qquad 2.9$$

dengan,

T_p = periode puncak spektra

H_s = tinggi gelombang signifikan

2.2.6 Respon Spektra

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

$$S_R(\omega) = [RAO(\omega)]^2 \; x \; S(\omega) \qquad 2.10$$

Dimana :

$S_R(\omega)$= spektrum respon (m^2 – sec) 2.11

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

RAO = *response amplitude operator*

ω = frekuensi gelombang (rad/sec)

2.2.7 Analisis Dinamis

Menurut *API RP 2T*, terdapat 2 metode analisis simulasi domain dalam analisis dinamis struktur lepas pantai, yaitu:

a. ***Frequency domain analysis*** adalah simulasi kejadian pada saat tertentu dengan interval frekuensi yang telah ditentukan sebelumnya. *Frequency domain* juga dapat digunakan untuk memperkirakan respon gelombang acak termasuk gerakan dan percepatan *platform*, gaya tendon dan sudut. Keuntungannya adalah lebih menghemat waktu perhitungan dan juga input atau output lebih sering digunakan oleh perancang. Namun juga terdapat kekurangan dalam metode ini, yaitu semua persamaan *non-linear* harus diubah dalam bentuk *linear*.

b. ***Time domain analysis*** adalah penyelesaian gerakan dinamis struktur berdasarkan fungsi waktu. Pendekatan yang dilakukan dalam metode ini menggunakan prosedur integrasi waktu dan akan menghasilkan *time history response* berdasarkan fungsi waktu *x(t)*.

Output dari analisis *time domain* adalah respons *time series* dimana :

a. Simulasi gelombang reguler dapat digunakan untuk memprediksikan *transfer function* dengan mengambil rasio *respons amplitude* dengan input amplitudo gelombang.

b. Spektrum respons dapat dihitung dari *time series*, memberikan informasi yang sama dengan analisis frekuensi domain.
c. Respon ektrim dapat diestimasi secara langsung dari puncak respons selama simulasi.

2.2.8 Tegangan Utama Maksimum (*Maximum Principal Stresses*)

Dari teori elastisitas, volume kecil dari material pada sembarang titik pada atau di dalam tubuh padat dapat diputar sehingga hanya tegangan normal tetap dan semua tegangan geser adalah nol.

Pada bidang-bidang di mana terjadi tegangan normal yang maksimum atau minimum, tidak akan didapati tegangan geser. Bidang ini disebut sebagai bidang utama tegangan, dan tegangan yang bekerja pada bidang ini, yaitu tegangan normal normal maksimum dan minimum, disebut tegangan utama. (Popov, 1984)

Ketika lokasi potensial terjadinya *fatigue crack* pada *weld toe*, *hot spot stress* lokal yang relevan merupakan jarak dari maximum principal stress berdekatan dengan lokasi *crack* yang potensial dengan konsentrasi tegangan yang diperhitungkan.

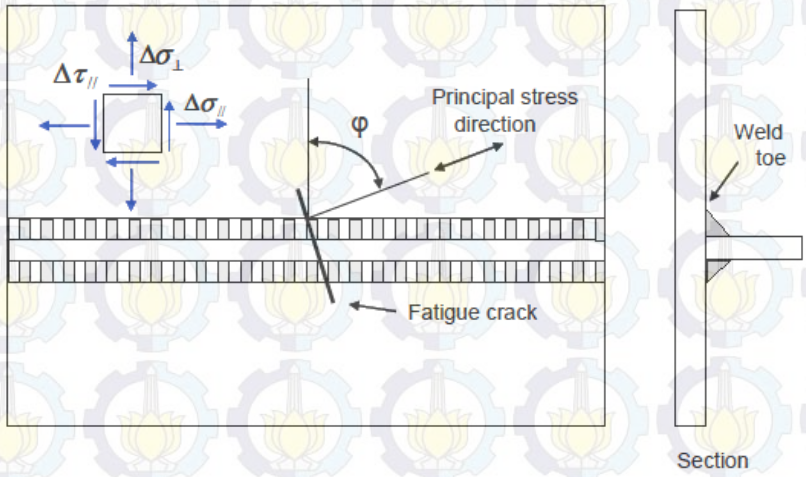
Maximum principal stress dipertimbangkan pada parameter yang signifikan untuk analisis pertumbuhan *fatigue crack*. Ketika arah principal stress berbeda dari normal ke *weld toe*¸hal ini menjadi konservativ untuk menggunakan *principal stress range* bersamaan dengan klasifikasi dari koneksi normal *stress range.*

Tiga tegangan normal yang tetap disebut tekanan utama:

σ_1 – Maximum

σ_2 – Middle

σ_3 – Minimum



Gambar 2.5 *Fatigue cracking* ketika arah principal stress parallel dengan *weld toe* (sumber: DNV Fatigue Assessment of Ship Structrures)

2.2.9 Metode Perhitungan Kelelahan

Secara umum, terdapat 2 (dua) metode yang dapat digunakan untuk analisis kelelahan, yaitu pendekatan kurva S-N (*S-N curve approach*) yang dibuat berdasarkan tes kelelahan, dan pendeketan mekanika kepecahan (*fracture mechanics appproach*). Untuk tujuan desain kelelahan, pendekatan kurva S-N lebih banyak digunakan dan dianggap sebagai metode yang paling cocok. Sedangkan metode mekanika kepecahan digunakan untuk menentukan ukuran cacat yang dapat diterima, menaksir perambatan retak kelelahan, merencanakan inspeksi dan strategi untuk memperbaikinya, dan lain-lain.

Metode pendekatan S-N curve mempunyai 4 metodologi dalam mengestimasi kumulatif kegagalan *fatigue (cumulative fatigue damage)* yaitu metode *deterministic*, metode *simplified fatigue assesssment*, metode *spectral* dan metode *time domain*

fatigue. Diantara keempat metode tersebut, metode yang paling banyak digunakan dalam berbagai rules klasifikasi terutama anggota IASC seperti ABS, GL, LR dan bahkan CSR adalah metode *simplified fatigue* dengan pendekatan empiris parameter distribusi weibull (Bai, 2003). Pada penelitian ini metode yang digunakan untuk analisa fatigue adalah menggunakan metode S-N Curve dengan *Simplified Fatigue Analysis*. Untuk analisis kelelahan dengan menggunakan metode *simplified fatigue assessment* akan didapatkan hasil yang lebih akurat, karena adanya faktor parameter bentuk dari distribusi *Weibull* dalam *Simplified fatigue assessment.* Blagojevic (2010) menyebutkan bahwa untuk menghitung umur kelelahan dari struktur kapal, dibutuhkan *long-term stress distribution* dari struktur. Penelitian tentang beban gelombang yang mengenai badan kapal menunjukkan bahwa *long-term distribution of stress range* dapat direpresentasikan dengan parameter distribusi Weibull dan disebutkan bahwa pengaruh dari parameter bentuk Weibull ini sangat signifikan. Hasil dari penelitian menyebutkan bahwa dengan perubahan kecil dari parameter bentuk Weibull tersebut berpengaruh besar terhadap nilai *fatigue damage* yang dihasilkan.

2.2.10 Kurva S-N

Kurva S-N menyediakan informasi tentang karakteristik *fatigue* pada material yang mengalami pembebanan yang berulang pada magnitude konstan (Ariduru, 2004).

Secara matematis, persamaan kurva dapat dituliskan sebagai berikut:

$NS^m = A$ atau $\log(N) = \log(A) - m\ log\ (S)$ 2.12

Dimana:

A = koefisien kekuatan kelelahan (*fatigue strength coefficient*)

m = kemiringan kurva S-N

S = rentang tegangan

Data pada kurva S-N diperoleh dari Department of Energy, “Guidance Notes” Revision Drafting Panel, August 1983, Issue N Offshore Installations: Guidance on Design and Construction. New Fatigue Design Guidance for Steel Welded Joints in Offshore Structures Det norske Veritas, ***Fatigue Strength Analysis for Mobile Offshore Unit***, Classification Notes No. 30.2, 1984. Dengan spesifikasi sebagai berikut :

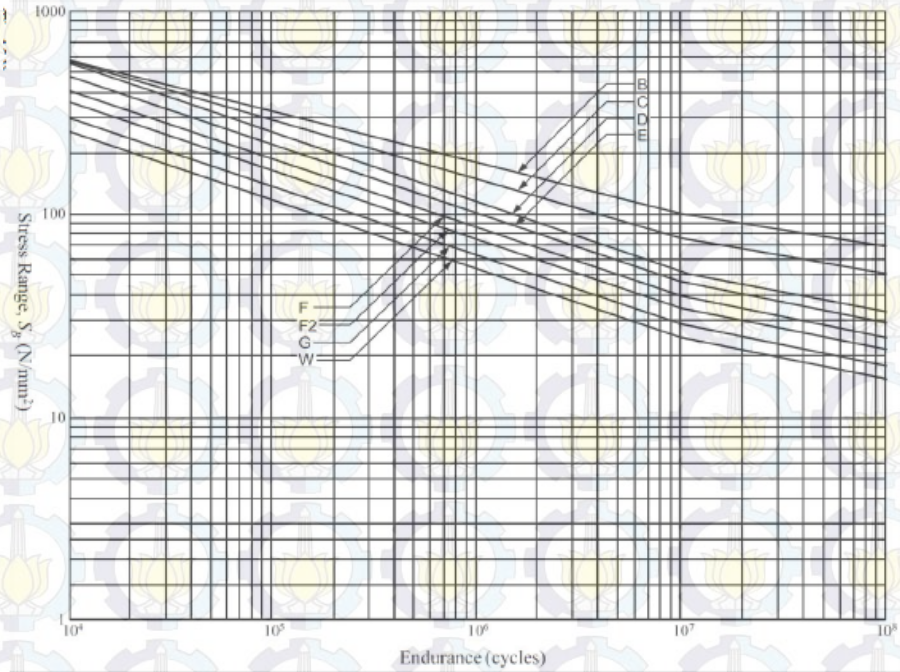
T : All tubular joints

B,C,D,E,F,F2,G,W : All other joints depending on

a) Geometrical arrangement of the detail

b) The direction of fluctuating stress relative to the detail

c) The method of fabrication and inspection of detail



Gambar 2.6 Kurva SN (ABS: Fatigue Assesment of Offshore Structures)

2.2.11 Penaksiran Kelelahan Sederhana (*Simplified Fatigue Assessment*)

Penaksiran pada penelitian ini menggunakan metode *simplified*, pada metode simplified, dua parameter distribusi *weibull*. Fungsi distribusi *cumulative* pada *stress range* dapat diekspresikan pada persamaan 2.13:

$$F_s S = 1 - \exp[-(\frac{S}{\delta})^{\gamma}, S > 0 \qquad 2.13$$

S = variabel acak menunjukkan *stress range*

γ = parameter bentuk Weibull

δ = Paramater skala Weibull

Cumulative *damage* dapat diekspresikan sebagai berikut pada persamaan 2.14 :

$$D = \frac{N_T \delta^m}{A} \Gamma(\frac{m}{\gamma} + 1) \qquad 2.14$$

Dimana N_T merupakan *design life* pada *cycles* fungsi gamma $\Gamma(x)$ didefinisikan sebagai:

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} t^{x-1} e^{-1} dt \qquad 2.15$$

Maka, *cumulative damage* dapat diekspresikan pada persamaan 2.16:

$$DM_i = \sum_{i=1}^{k} \frac{N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma(1 + \frac{m}{\xi}) \qquad 2.16$$

Dimana:

$$\mu_i = 1 - \frac{\{\gamma\left(1+\frac{m}{\xi}.v_i\right) - v_i^{-\Delta m/\xi}\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi}.v_i\right)\}}{\Gamma(1+\frac{m}{\xi})} \qquad 2.17$$

$$v_i = (\frac{S_q}{S_{Ri}})^{\xi} lnN_R \qquad 2.18$$

N_L = jumlah siklus untuk rencana umur desain

$$N_L = \frac{f_0 U}{4 \log L} \qquad 2.19$$

K_2 = konstanta sesuai kurva S-N

S_{Ri} =*stress range* (Mpa)

S_q = *stress range* pada perpotongan 2 segmen pada kurva S-N

m = *slope*

Δm =perubahan *slope* pada segmen atas-bawah pada kurva S-N

N_R =10000, jumlah siklus

ξ = parameter distribusi tegangan = $1{,}4 - 0{,}2.\alpha.L^{0.2}$

μ_i =kofisien tegangan

$\Gamma(x)$ =fungsi gamma

U = *design-life* (detik)

L =panjang struktur (m)

Selanjutnya, rasio *cumulative fatigue damage (D)* dapat diubah ke dalam perhitungan umur kelelahan menggunakan persamaan di bawah ini

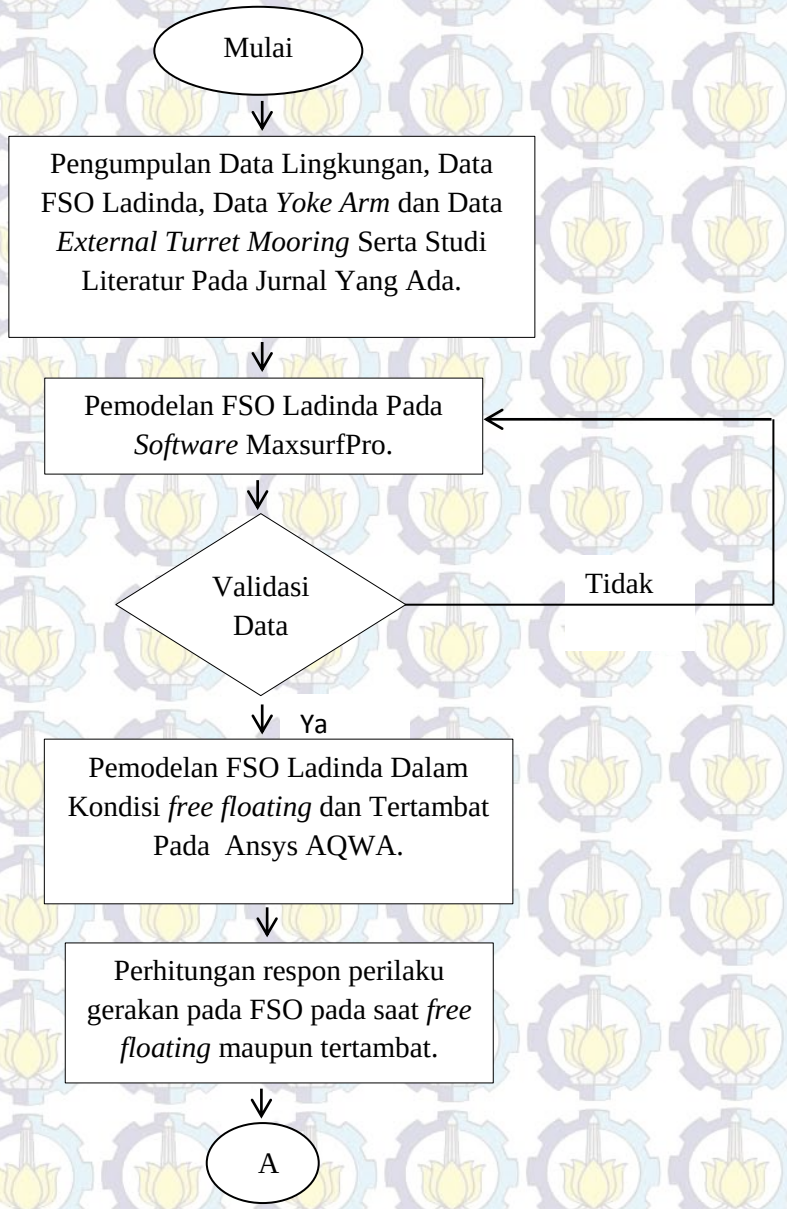
$$fatigue\ life = \frac{design\ life}{D} \qquad 2.20$$

BAB III

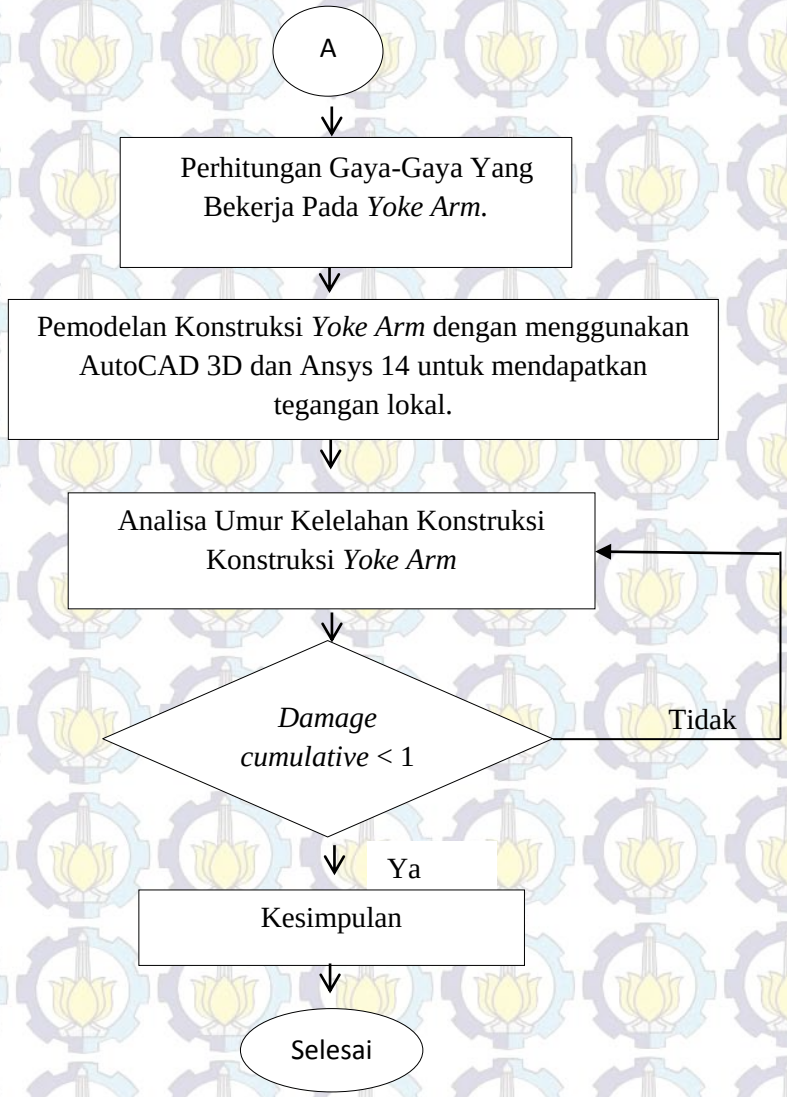
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.1 di bawah ini:



Gambar 3.1 *Flowchart* penyelesaian Tugas Akhir



Gambar 3.2 Lanjutan *Flowchart* penyelesaian Tugas Akhir

Pada Gambar 3.1 merupakan *flowchart* yang mana merupakan penggambaran secara grafik dari langkah-langkah atau ururtan-urutan prosedur dari tugas akhir ini. Tujuannya untuk memecahkan masalah ke dalam segmen-segmen yang lebih kecil atau detail. Serta menyederhanakan rangkaian proses atau prosedur untuk memudahkan pemahaman.

3.2 Prosedur Penelitian

1. Studi Literatur

Studi literatur pada tugas akhir dilakukan untuk mengkaji dasar teori berkaitan dengan analisa umur kelelahan konstruksi mooring *system equipment* pada FSO *Ladinda* dengan menggunakan metode *simplified* dari berbagai buku, materi perkuliahan, jurnal, penelitian sebelumnya termasuk laporan tugas akhir terdahulu yang memiliki keterkaitan topik serupa.

Pengumpulan Data:

- Data FSO *Ladinda*
- Data lingkungan
- Data system struktur *yoke arm*
- Data sistem *External Turret Mooring System*

2. Pemodelan dengan *software* Maxsurf

Pemodelan ini bertujuan untuk mendapatkan koordinat-koordinat bentuk *body* FSO dan juga untuk mendapatkan RAO FSO pada saat *free floating*. Selain itu juga didapatkan data hidrostatik.

3. Validasi model *software* Maxsurf

Setelah model FSO dibuat pada *software* Maxsurf, dilakukan validasi berdasarkan data hidrostatik. Jika validasi data dianggap salah, maka model akan di desain ulang sampai menyerupai *body* asli dengan batas *error* tidak melebihi 5%.

4. Pemodelan FSO Ladinda dengan *software* Ansys AQWA.

Hasil dari *software* Maxsurf berupa model FSO yang kemudian akan menjadi inputan dari *software* Ansys AQWA. Hasil yang dikeluarkann pada Ansys Aqwa merupakan respon amplitude pada FSO pada saat kondisi *free floating* maupun pada saat tertambat. Selain mendapatkan respon amplitudo, *output* dari Ansys Aqwa pada saat tertambat adalah tension yang kemudian dijadikan pembebanan pada analisi lokal pada Ansys Mechanical.

5. Analisa pemodelan secara lokal pada Konstruksi *Yoke arm*.

Untuk mendapatkan *principle stress* pada *yoke arm* tersebut, maka dilakukan pemodelan struktur secara lokal dengan menginputkan gaya-gaya yang telah dihitung akibat beban dinamis.

6. Analisa umur kelelahan konstruksi *yoke arm*

Dari hasil tegangan maksimum pada konstruksi *yoke arm* yang didapat, dilakukan analisa umur kelelahan konstruksi *yoke arm*. Dalam analisa umur kelelahan konstruksi *yoke arm*, digunakan metode *simplified*.

3.3 Pengumpulan Data

Data yang dibutuhkan pada penelitian ini meliputi data lingkungan pada lokasi FSO Ladinda beroperasi, serta data konstruksi dan struktur yang berkaitan dengan penelitian ini seperti *principle dimension* yang dapat dilihat pada Tabel 3.1, data lingkungan pada tabel 3.2 dan data bahan struktur yaitu baja ASTM A36 pada Tabel 3.3:

- FSO Ladinda

Tabel 3.1 *Principle dimension* dan data hidrostatis FSO Ladinda

Ukuran Kapal	**Unit**	**Kondisi Maksimum Operasi**	**Kondisi Minimum Operasi**
***Length*, LOA**	M	284	
***Length*, LBP**	M	272	
***Breadth*, B**	M	43.4	
***Depth*, D**	M	20.6	
***Draft*, T**	M	15.725	2.41
Displacement	Ton	161810	21614

Ukuran Kapal	Unit	Kondisi Maksimum Operasi	Kondisi Minimum Operasi
LCG	M	144.11 *from* AP	123.03 *from* AP
KG (VCG)	M	10.76	12.57
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	
Cargo Tank Capacity	Bbls	1.012.000	
Production Level	Bpd	25.000	
General Arrangement	FSO	*Ladinda*	terlampir

(Sumber: PT Energi Mega Persada)

Tabel 3.2 Data input geometry FSO Ladinda pada ANSYS

	Light Load	**Full Load**
Displacement	21614 ton	161810 ton
Water size x	1302	
Water size y	2808	
LCG	-8.11	12.97
TCG	0	0
VCG	10.76	12.57

(Sumber: PT Energi Mega Persada)

- Data Lingkungan Perairan Selat Malaka

Tabel 3.3 Data lingkungan

Parameter		Unit	1 – Tahunan
Gelombang	Tinggi (Hs)	m	1.46
	Periode (Ts)	s	4
Angin	Kecepatan (Vw)	Knots	22
	Waktu Durasi	Hrs	1
Arus	Kecepatan (Vc)	m/s	2.41

(Sumber: PT Energi Mega Persada)

BAB IV

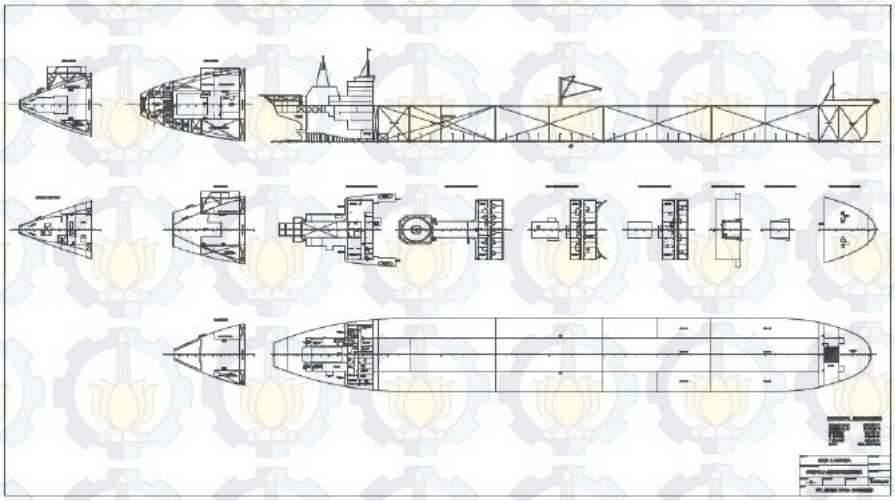
PEMBAHASAN

4.1 Pemodelan Struktur

4.1.1 FSO Ladinda

Pada penelelitian ini pemodelan dilakukan pada FSO Ladinda yang beroperasi di Selat Malaka. Pemodelan FSO Ladinda dilakukan dengan menggunakan *software Maxsurf Pro* yang mengacu pada *General Arrangement* pada Gambar 4.1 dan *principal dimension* sebagai berikut:

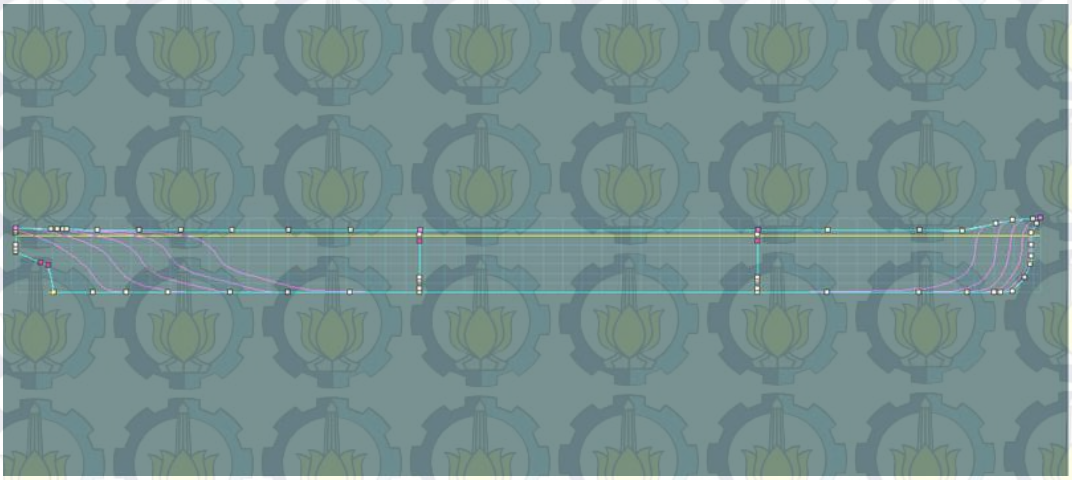
Length	(Loa)	: 284 m
Breadth	(B)	: 43,4 m
Depth	(H)	: 20,6 m
Draft Light Load	(T)	: 2,41 m
Draft Full Load		: 15,725 m
Displacement Full Load	(Δ)	: 161,81 Ton
Displacement Light Load	(Δ)	: 22,027 Ton



Gambar 4.1 *General Arrangement* FSO Ladinda

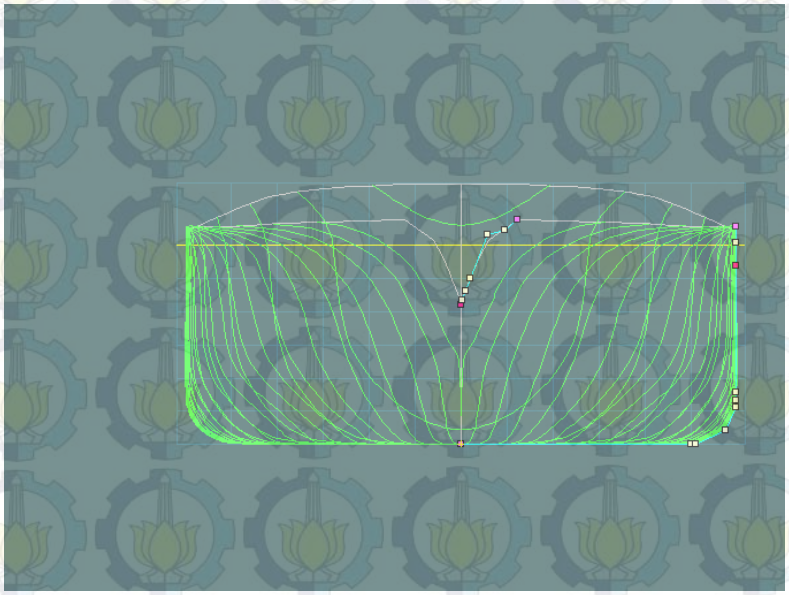
(Sumber:PT. Energi Mega Persada)

Pada Gambar 4.2 sampai Gambar 4.5 berikut merupakan hasil pemodelan FSO Ladinda dengan menggunakan *software* Maxsurf, pada penelitian ini dilakukan pemodelan dengan *software* Maxsurf dengan tujuan untuk memvalidasi data yang sesungguhnya dengan *software*. Hasil pada *software* Maxsurf tersebut akan dijadikan inputan pada *software* selanjutnya sebagai pemodelan FSO Ladinda dalam berbentuk *surface* atau hanya kulitnya saja yang akan ditinjau respon amplitudo pada FSO Ladinda.



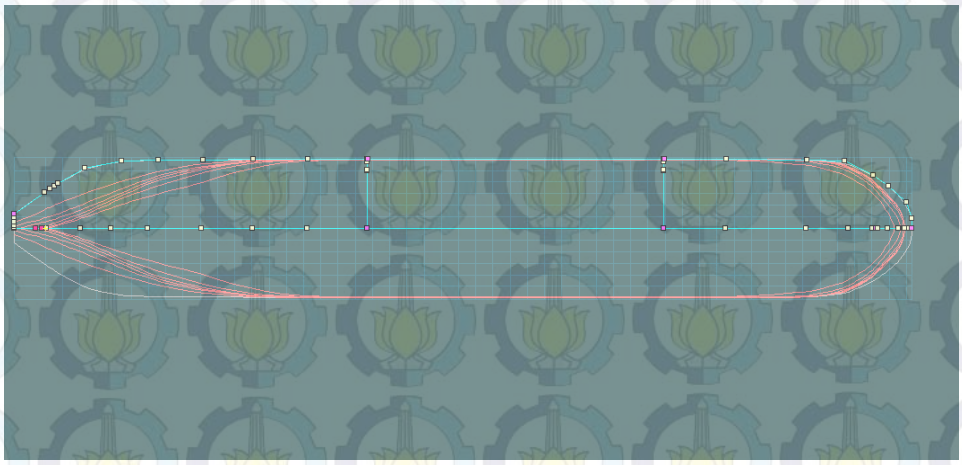
Gambar 4.2 Hasil pemodelan FSO Ladinda pada Maxsurf tampak samping (*sheer plan*)

Sheer plan merupakan pandangan samping, yang mana penampakan bentuk kapa jika kapal dipotong kearah tegak sepanjang badan kapal. Pada kurva ini diperlihatkan bentuk haluan dan buritan kapal, kenaikan deck dan pagar. Garis tegak yang memotong kapal dapat dikethui apakah garis air yang direncanakan sudah cukup baik atau tidak.



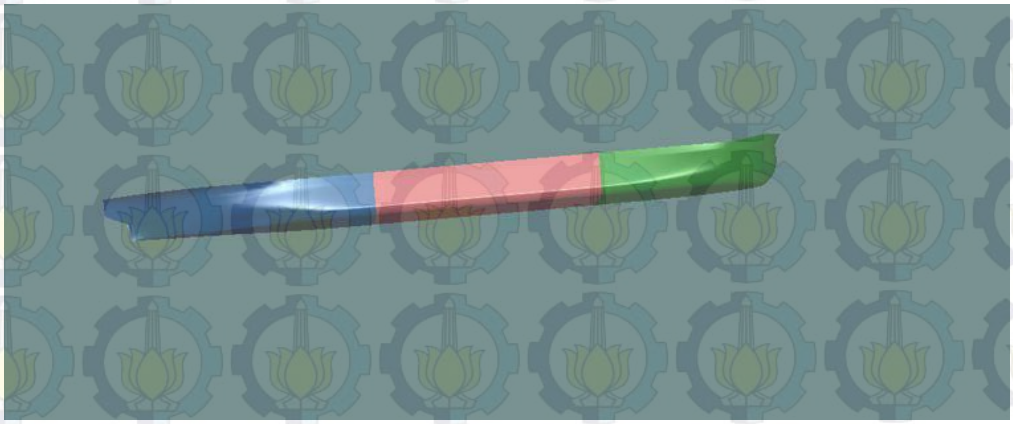
Gambar 4.3 Hasil pemodelan FSO Ladinda pada Maxsurf tmpak depan (*body plan*)

Body plan merupakan bagian dari rencana gars yang memperlihatkan bentuk kapal jika kapal dipotong tegak melintang. Dari Gambar 4.3 terlihat kelengkungan gading-gading (*station-station*). Kurva ini digambar satu sisi yang biasanya sisi kiri dari kapal tersebut. Bagian belakang dari midship digambar di sisi kiri dari *center line*, bagian depan disebelah kanan.



Gambar 4.4 Hasil pemodelan FSO Ladinda pada Maxsurf tampak atas (*half breadth plan*)

Half breadth plan atau rencana dari setengah lebar bagian yang ditinjau dari kapal, ini diperoleh jika kapal dipotong ke arah mendatar sepanjang badan kapal, dan Gambar 4.4 ini akan memperlihatkan bentuk garis air unruk setiap kenaikan dari dasar, terutama kenaikan setiap sarat.



Gambar 4.5 Hasil pemodelan FSO Ladinda pada Maxsurf tampak isometri

Pemodelan FSO Ladinda seperti pada Gambar 4.5 merupakan pemodelan dengan tampak isometri. Yang mana pada pedmodelan tersebut hanya dimodelkan lambung pada FSO Ladinda.

4.2 Hidrostatik

Tabel 4.1 Koreksi data hidrostatik kondisi *Full Load* dengan model Maxsurf

Density (Sea Water)	1.025	tonne/m^3			
Toleransi	5	%			
	Data	**Maxsurf**	**Koreksi (%)**	**Unit**	***Toleransi***
Displacement	161810.00	160988.915	-0.01	tonne	**Memenuhi**

Tabel 4.1 Koreksi data hidrostatik kondisi *Full Load* dengan model Maxsurf (Lanjutan)

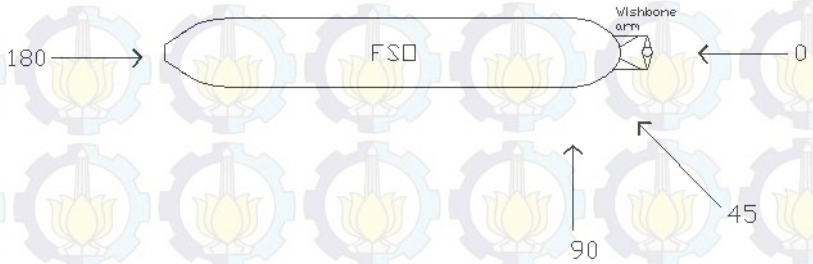
Density (Sea Water)	1.025	tonne/m^3			
Toleransi	5	%			
	Data	**Maxsurf**	**Koreksi (%)**	**Unit**	***Toleransi***
Volume	154630.19	157062.357	0.00	m^3	**Memenuhi**
Draft to Baseline	15.73	15.725	0	m	**Memenuhi**
Immersed depth	15.73	15.725	0	m	**Memenuhi**
Beam wl	43.40	43.40	0.00	m	**Memenuhi**
Prismatic Coeff	0.84	0.826	-0.02		**Memenuhi**
Block Coeff	0.83	0.818	-0.01		**Memenuhi**
Midship Area Coeff	1.00	0.99	-0.01		**Memenuhi**
Waterpl. Area Coeff	0.92	0.88	-0.05		**Memenuhi**
LCB *from zero* pt	143.83	144.066	0.00	m	**Memenuhi**
LCF *from zero* pt	138.18	138.839	0.00	m	**Memenuhi**
KB	7.75	8.109	0.05	m	**Memenuhi**
KMt	17.69	17.792	0.01	m	**Memenuhi**
Precision	50 *stations*	*Medium*	50 *stations*	50 *stations*	**Memenuhi**

Tabel 4.2 Koreksi data hidrostatik kondisi *Light Load* dengan model Maxsurf

Density (Sea Water)	1.025	tonne/m^3			
Toleransi	5	%			
	Maxsurf	**Data**	**Koreksi**	**Unit**	***Toleransi***
Displacement	22027.461	22087	0.02	tonne	**Memenuhi**
Volume	21490.206	21553.79	0.01	m^3	**Memenuhi**
Draft to Baseline	2.41	2.41	0.00	m	**Memenuhi**
Immersed depth	2.41	2.41	0.00	m	**Memenuhi**
Lwl	272.868	265.30	0.03	m	**Memenuhi**
Beam wl	43.40	43.40	0.00	m	**Memenuhi**
LCB from zero pt	152.844	147.76	0.05	m	**Memenuhi**
LCF from zero pt	152.915	146.589	0.05	m	**Memenuhi**
KB	1.243	1.24	0.05	m	**Memenuhi**
KMt	59.94	60.83	-0.03	m	**Memenuhi**
Precision	50*stations*	*Medium*	50 *stations*	50*stations*	**Memenuhi**

Pada Tabel 4.3 dan Tabel 4.4 merupakan hasil validasi data asli dengan data yang dihasilkan pada *software* Maxsurf pada kondisi *full load* dan *light load*. Pemodelan pada FSO Ladinda dianggap memenuhi kriteria karena pemodelan dengan hasil koreksi validasi kurang dari 5%.

4.3 Konfigurasi Arah Pembebanan



Gambar 4.6 Konfigurasi arah pembebanan gelombang

Gambar 4.6 merupakan konfigurasi arah pembebanan datangnya gelombang. Pada penelitian kali ini digunakan arah pembebanan dengan arah 0°, 45° , 90° , 180° untuk analisa respon gerakan struktur apung FSO. Pada penelitian ini arah pembebanan hanya sampai 180° karena dianggap sudah mewakili pembebanan kapal di arah sebaliknya. Hal ini dikarenakan bentuk kapal yang simetris.

4.4 Response Amplitude Operator

Setelah pemodelan dilakukan pada *software* MaxsurfPro, hal selanjutnya yang akan dilakukan adalah mencari RAO *motion*, sehingga dapat diketahui karakteristik gerakan pada sruktur pada saat terkena gelombang. RAO (*Response-Amplitude Operator*) atau sering disebut sebagai *Transfer Function* adalah fungsi *response* yang terjadi akibat gelombang dalam rentang frekuensi yang mengenai struktur *offshore*. RAO disebut sebagai *Transfer Function* karena RAO merupakan alat mentransfer beban gelombang dalam bentuk *response* pada suatu struktur. Arah pembeban RAO dilakukan terhadap empat arah, yaitu: *head seas* (0°), *quartering seas* (45^0), *beam seas* (90°) dan *following seas* (180°). Untuk mendapatkan RAO dari FSO Ladinda pada kondisi *free floating* maupun tertambat digunakan *software* ANSYS AQWA.

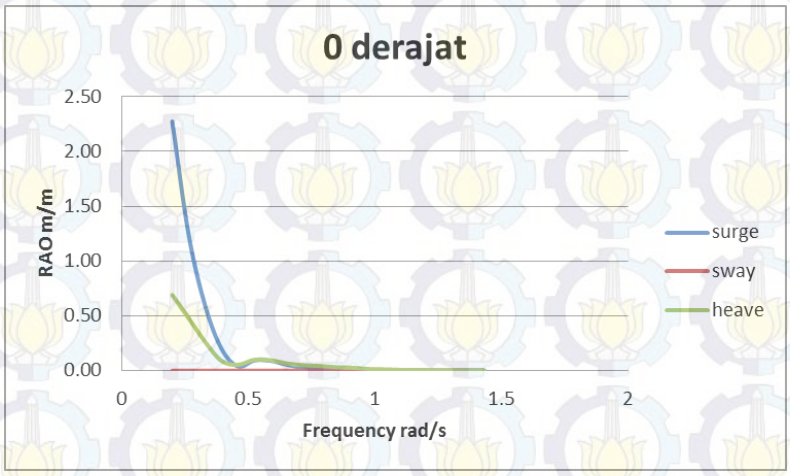
Pada *software* ANSYS AQWA, pemodelan yang terbaca berupa *surface* seperti yang dihasilkan oleh *software* Maxsurf.

4.4.1 FSO Ladinda - F*ree Floating*

Perhitungan karakteristik gerakan FSO Ladinda dilakukan pada saat kondisi *free floating* dan tertambat. Pada saat kondisi *free floating* respon amplitudo yang dihasilkan akan lebih besar dibandingkan yang tertambat. Karena FSO terapung dalam keadaan bebas di laut. Dan respon yang dialami FSO dalam kondisi *light load* akan lebih besar karena FSO dalam kondisi tidak bermuatan sehingga lebih mudah terhempas oleh gelombang. Pada Gambar 4.7 hinggaGambar 4.11 merupakan grafik dari respon amplitude pada FSO Ladinda kondisi *Full Load* terapung bebas.

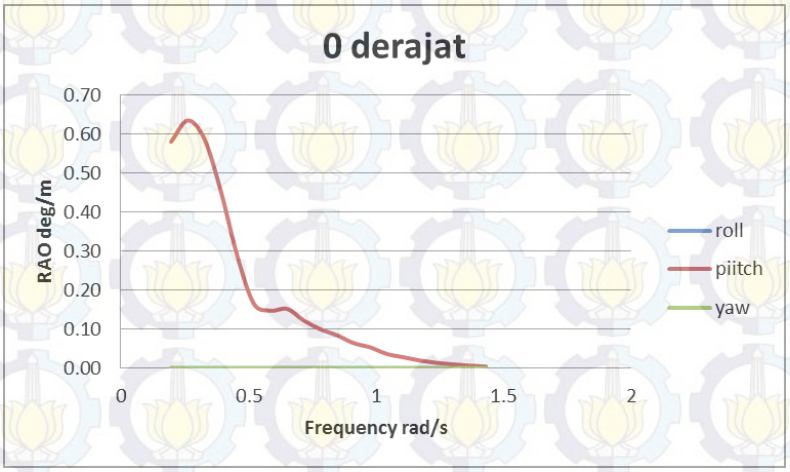
4.4.1.1 Full Load – *Free Floating*

Pada Gambar 4.7 sampai dengan Gambar 4.11 merupakan respon amplitudo FSO Ladinda pada kondisi *Full Load – free floating* dengan arah datang gelombang pada arah 0°, 45°, 90° dan 180°. Terdapat pembagian gerakan FSO yaitu pada saat tranlasi terhadap sumbu dan rotasional terhadap sumbu.



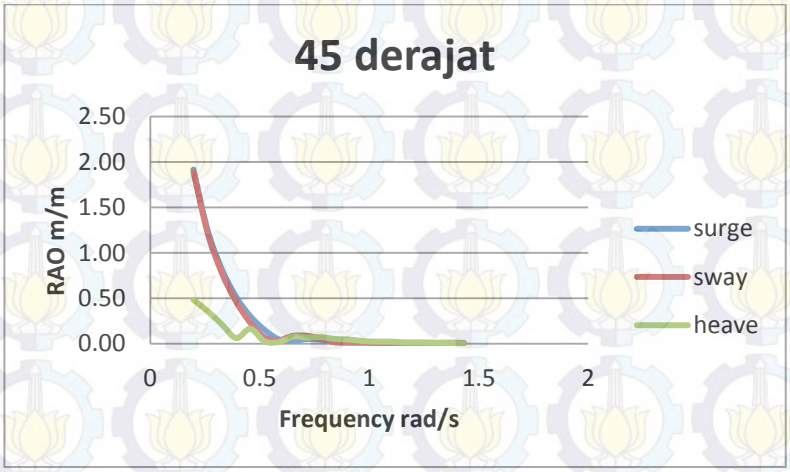
Gambar 4.7 Grafik RAO gerakan translasi pada FSO Ladinda kondisi *full load* saat *free floating* dengan *heading* pembebanan 0 derajat

Pada gerakan translasi terhadap sumbu terdapat gerakan *surge, sway* dan *heave.* Pada pembebanan 0° gerakan terbesar didominasi oleh gerakan *surge* karena arah gelombang datang yang sejajar dengan sumbu-x yang mana hal tersebut merupakan gerakan *surge.* Perilaku gerak FSO paling besar mencapai 2,4 m/m. Kondisi FSO yang tidak tertambat menyebabkan FSO mengalami perilaku gerak yang besar.



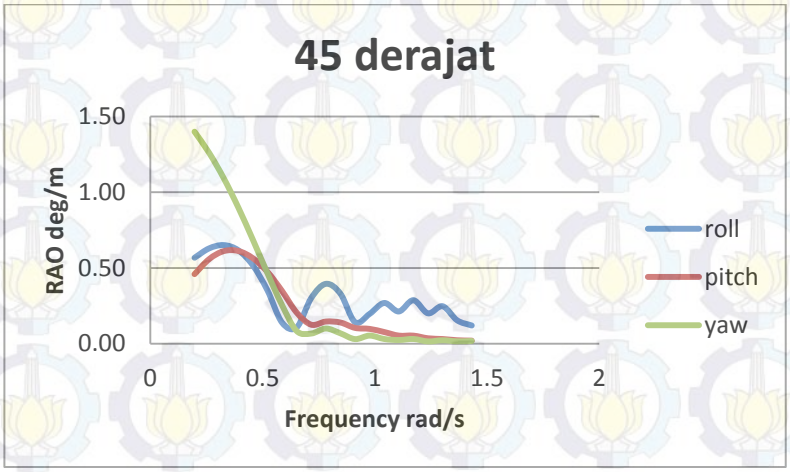
Gambar 4.8 Grafik RAO gerakan rotasi pada FSO Ladinda kondisi *full load* saat *free floating* dengan *heading* pembebanan 0 derajat

Perilaku gerakan FSO pada gerakan rotasional didominasi oleh pergerakan rotasi arah sumbu-y. Pembebanan arah 0° menyebabkan FSO berotasi maksimum sebesar 0.68 deg/m. Panjang gelombang yang mengenai kapal secara memanjang menyebabkan FSO lebih memungkin bergerak *pitching* yang terlihat pada Gambar 4.8.



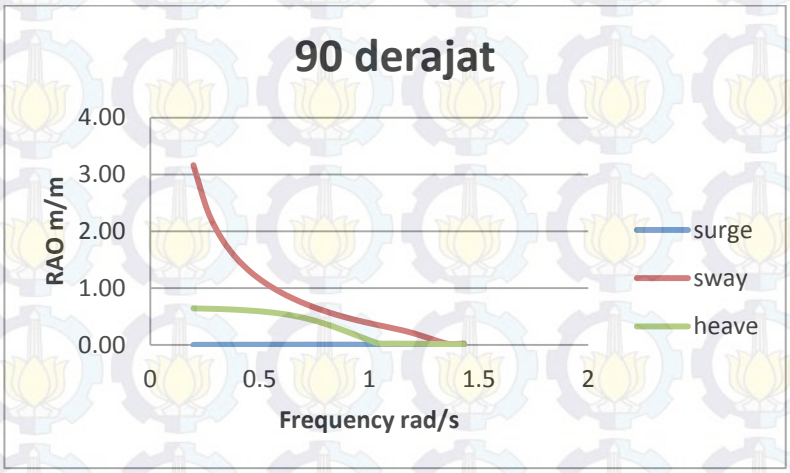
Gambar 4.9 Grafik RAO gerakan translasi pada FSO Ladinda kondisi *full load load* saat *free floating* dengan *heading* pembebanan 45 derajat

Arah pembeban 45° secara tranlasi menyebabkan perilaku gerakan berupa *surge* dan *sway* tidak terlalu berbeda karena pada arah tersebut berada sjajar antara sumbu x dengan sumbu y yang mana sumbu-x dan sumbu-y merupakan pergerakan translasional antara *surge* dan *sway*. Pada saat frekuensi yang hampir sama, gerakan *surge* dan *sway* tertinggi pada RAO hamper 2 m/m.



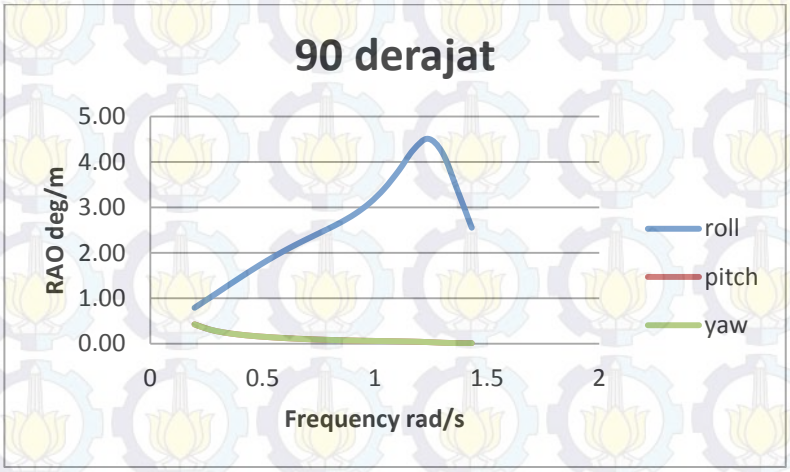
Gambar 4.10 Grafik RAO gerakan rotasi pada FSO Ladinda kondisi *full load load* saat *free floating* dengan *heading* pembebanan 45 derajat

Pada gerakan rotasional dengan arah 45° perilaku gerakan FSO tertinggi dimiliki oleh gerakan yaw. Pembebanan tersebut menyebabkan FSO lebih bergerak terhadap sumbu-z secara rotasional. Seperti yang dapat dilihat pada Gambar 4.10 bahwa RAO tertinggi dimiliki oleh gerakan *yaw* sebsar 1.4 ^{o}/m.



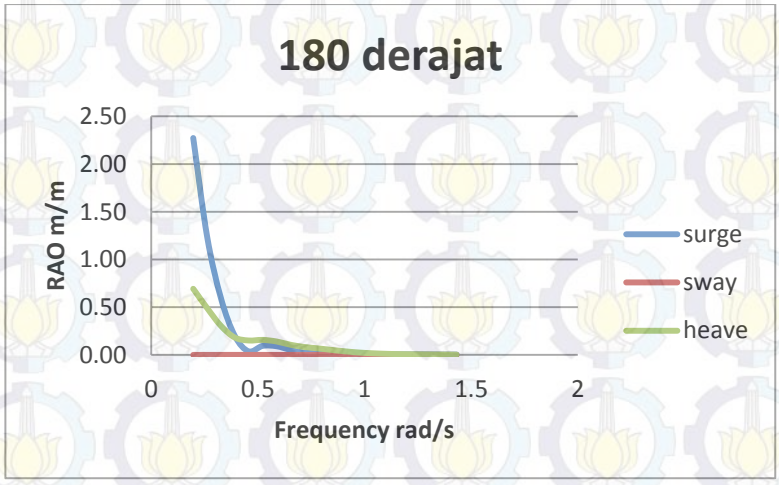
Gambar 4.11 Grafik RAO gerakan translasi pada FSO Ladinda kondisi *full load* saat *free floating* dengan *heading* pembebanan 90 derajat

Pada arah pembebanan 90° secara translasi merupakan pergerakan yang sejajar dengan arah sumbu-y sehingga menyebabkan tingginya RAO pada pergerakan *sway* yang mana pergerakan tersebut merupakan pergerakan secara translasi terhadap sumbu-y. Dapat dilihat pada Gambar 4.11 bahwa RAO tertinggi dimiliki oleh *sway* yaitu 3.02 m/m.



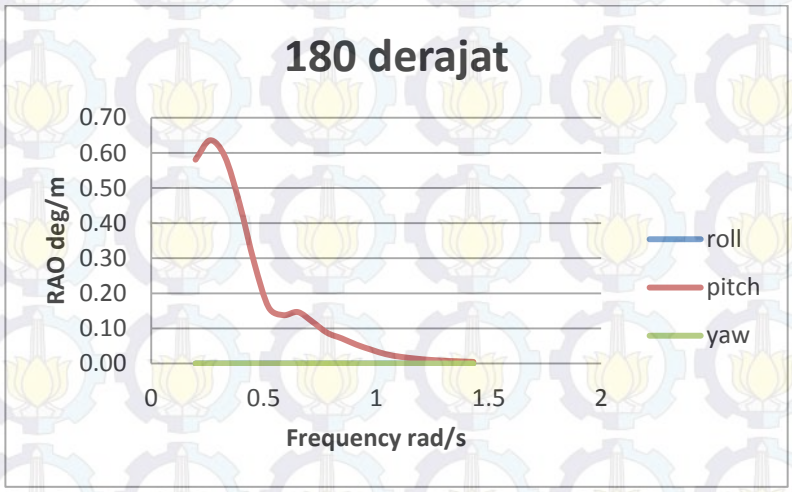
Gambar 4.12 Grafik RAO gerakan rotasi pada FSO Ladinda kondisi *full load* saat *free floating* dengan *heading* pembebanan 90 derajat

Pada gerakan rotasional pada arah 90° menyebabkan RAO tertinggi dimiliki oleh gerakan *roll*. Pembebanan arah 90° merupakan arah gelombang yang datang tegak lurus dengan sumbu-x. Pada Gambar 4.12 dapat dilihat bahwa RAO tertinggi merupakan 4.02 m/m pada gerakan *roll*, gerakan *roll* merupakan gerakan rotasional terhadap sumbu-x.



Gambar 4.13 Grafik RAO gerakan translasi pada FSO Ladinda kondisi *full load* saat *free floating* dengan *heading* pembebanan 180 derajat.

Arah pembebaban 180° merupakan arah yang berlawan dengan arah pembebanan 0°. Namun arah pembebanan sama-sama bergerak sejajar sumbu-x. Sehingga RAO tranlasi tertinggi terdapat pada gerakan *surge*, dimana gerakan *surge* merupakan gerakan translasi terhadap sumbu-x. Pada Gambar 4.13, RAO terbesar merupakan 2.4 m/m pada gerakan *surge*, RAO tertinggi setelah *surge* adalah *heave* dan yang terakhir merupakan gerakan *sway*.



Gambar 4.14 Grafik RAO gerakan translasi pada FSO Ladinda kondisi *full load* saat *free floating* dengan *heading* pembebanan 180 derajat

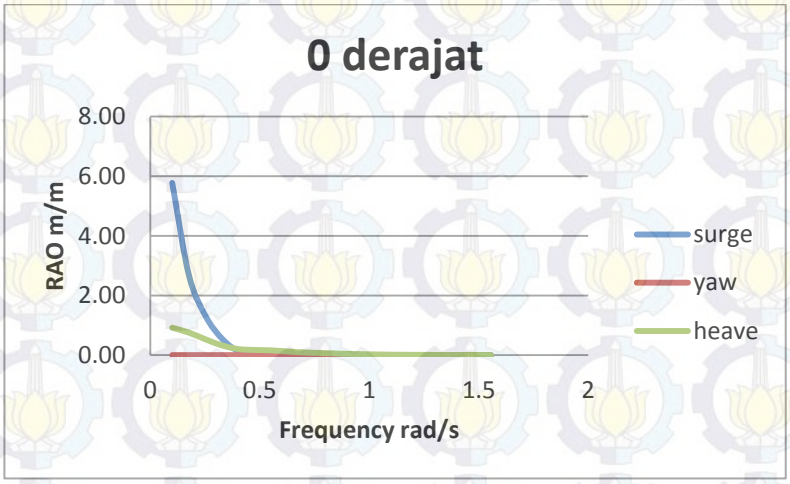
Berdasarkan Gambar 4.7 sampai Gambar 4.14 dan Tabel 4.3 dapat dilihat bahwa *surge* tertinggi ialah sebesar 2,27269 (m/m) yaitu pada *heading* 0°, *sway* tertinggi pada *heading* 90° sebesar 3,165 (m/m), dan *heave* tertinggi sebesar 0,6424 (m/m) pada *heading* 90°. Untuk gerak osilasi rotasional *roll* maksimum pada *heading* 90° sebesar 4,5106 (deg/m), *pitch* maksimum sebesar 0,635 (deg/m) pada *heading* 180^0, dan *yaw* maksimum sebesar 1,4 (deg/m) pada *heading* 45°.

Tabel 4.3 Nilai maksimum RAO FSO Ladinda *full load free floating condition*

Moda Gerakan	Unit	RAO Maksimum				Max
		0 deg	45 deg	90 deg	180 deg	
Surge	m/m	2.27252	1.9163	0.00394	2.2726941	2.27269
Sway	m/m	0.00004	1.89119	3.16509	0.00004	3.16509
Heave	m/m	0.69096	0.48334	0.64242	0.6928293	0.69283
Roll	deg/m	0.00029	0.65103	4.51062	0.00010014	4.51062
Pitch	deg/m	0.63517	0.61213	0.0294	0.635812	0.63581
Yaw	deg/m	0.00007	1.40014	0.4255	0.0001	1.40014

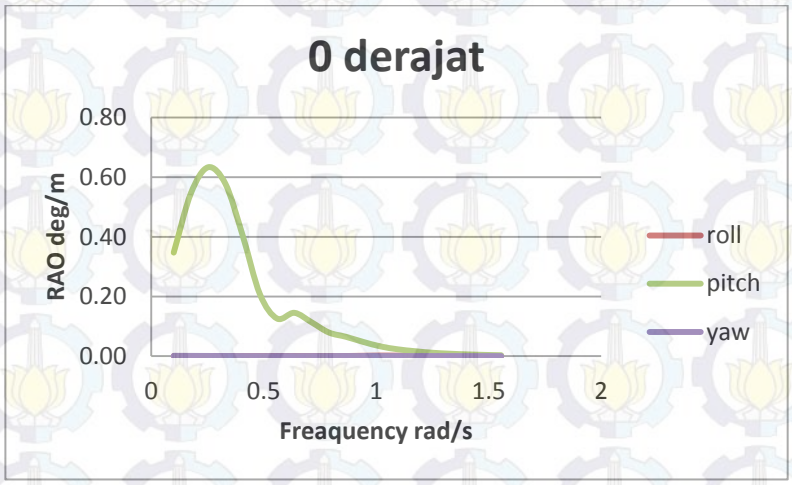
4.4.1.2 Light Load – Free Floating

Pada Gambar 4.15 hingga Gambar 4.22 merupakan grafik RAO FSO Ladinda pada kondisi *light load free floating* yaitu kondisi pada saat FSO Ladinda tidak bermuatan dan tidak tertambat. Respon yang dihasilkan akan lebih besar dibandingan pada saat FSO bermuatan penuh. Pada RAO *light load free floating* ditinjau pada empat arah pembebanan, yaitu: 0°, 45°, 90° dan 180°. Dan terdapat grafik di bedakan antara gerakan tanslasional dan rotasional terhadap sumbu. Secara garis besar, perilaku gerakan yang terjadi pada tiap arah pembebanan gelombang pada kondisi *light load* hampir sama dengan perilaku gerakan pada kondisi *full load*. Hanya pada kondisi *light load* RAO yang terjadi lebih besar dibandingkan pada saat kondisi *full load*.



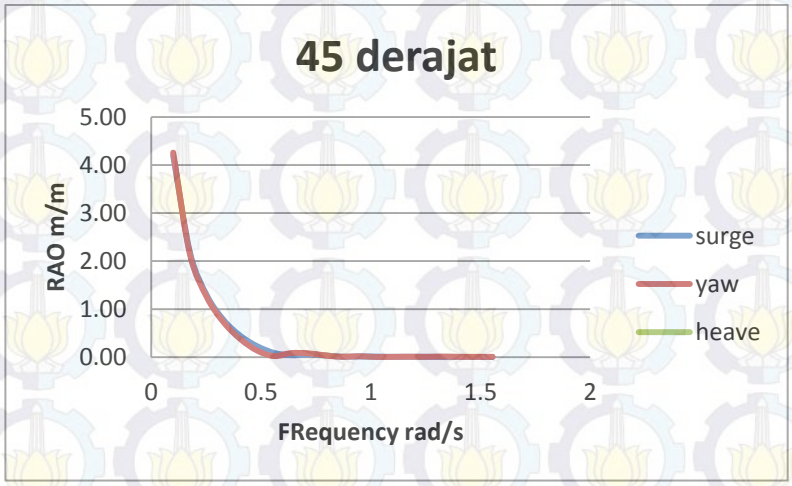
Gambar 4.15 Grafik RAO gerakan translasi pada FSO Ladinda kondisi *light load* saat *free floating* dengan *heading* pembebanan 0 derajat

Pada gerakan translasi terhadap sumbu terdapat gerakan *surge, sway* dan *heave.* Pada pembebanan 0° gerakan terbesar didominasi oleh gerakan *surge* karena arah gelombang datang yang sejajar dengan sumbu-x yang mana hal tersebut merupakan gerakan *surge.* Perilaku gerak FSO paling besar mencapai 5.78 m/m. Kondisi FSO yang tidak tertambat menyebabkan FSO mengalami perilaku gerak yang besar.



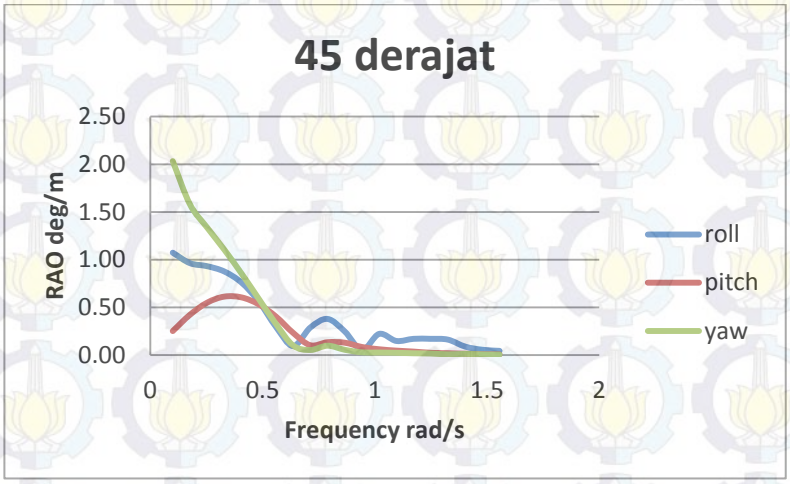
Gambar 4.16 Grafik RAO gerakan rotasi pada FSO Ladinda kondisi *light load* saat *free floating* dengan *heading* pembebanan derajat

Perilaku gerakan FSO pada gerakan rotasional didominasi oleh pergerakan rotasi arah sumbu-y. Pembebanan arah 0° menyebabkan FSO berotasi maksimum sebesar 0.63 deg/m. Panjang gelombang yang mengenai kapal secara memanjang menyebabkan FSO lebih memungkin bergerak *pitching* yang terlihat pada Gambar 4.16.



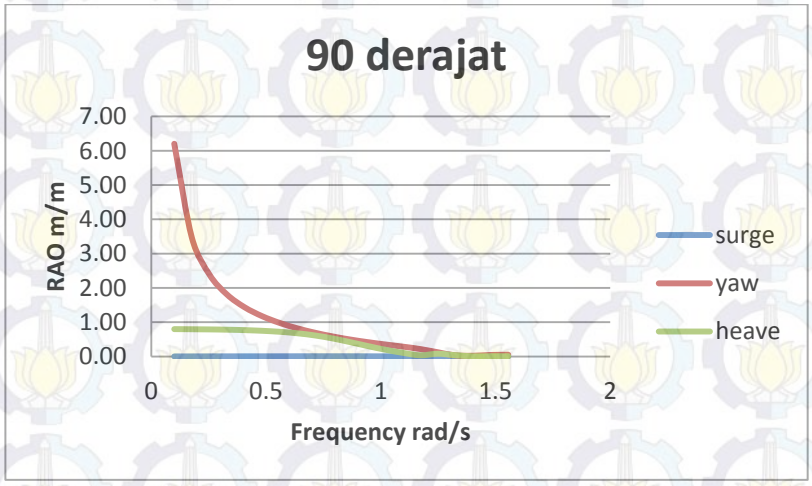
Gambar 4.17 Grafik RAO gerakan translasi pada FSO Ladinda kondisi *light load* saat *free floating* dengan *heading* pembebanan 45 derajat

Arah pembeban 45° secara tranlasi menyebabkan perilaku gerakan berupa *surge* dan *sway* tidak terlalu berbeda karena pada arah tersebut berada sjajar antara sumbu x dengan sumbu y yang mana sumbu-x dan sumbu-y merupakan pergerakan translasional antara *surge* dan *sway*. Pada saat frekuensi yang hampir sama, gerakan *surge* dan *sway* tertinggi pada RAO hampir 4.25 m/m.

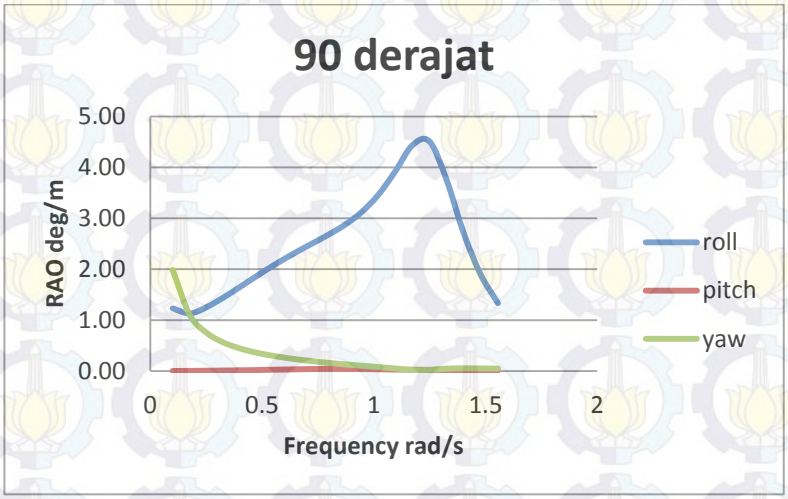


Gambar 4.18 Grafik RAO gerakan rotasi pada FSO Ladinda kondisi light *load* saat *free floating* dengan *heading* pembebanan 45 derajat

Pada gerakan rotasional dengan arah 45° perilaku gerakan FSO tertinggi dimiliki oleh gerakan yaw. Pembebanan tersebut menyebabkan FSO lebih bergerak terhadap sumbu-z secara rotasional. Seperti yang dapat dilihat pada Gambar 4.18 bahwa RAO tertinggi dimiliki oleh gerakan *yaw* sebsar 2.02 ^{o}/m.

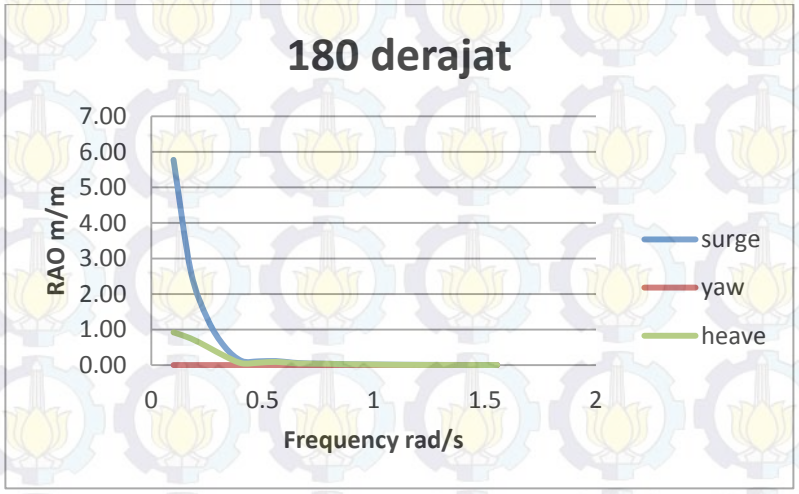


Gambar 4.19 Grafik RAO gerakan translasi pada FSO Ladinda kondisi *light load* saat *free floating* dengan *heading* pembebanan 90 derajat



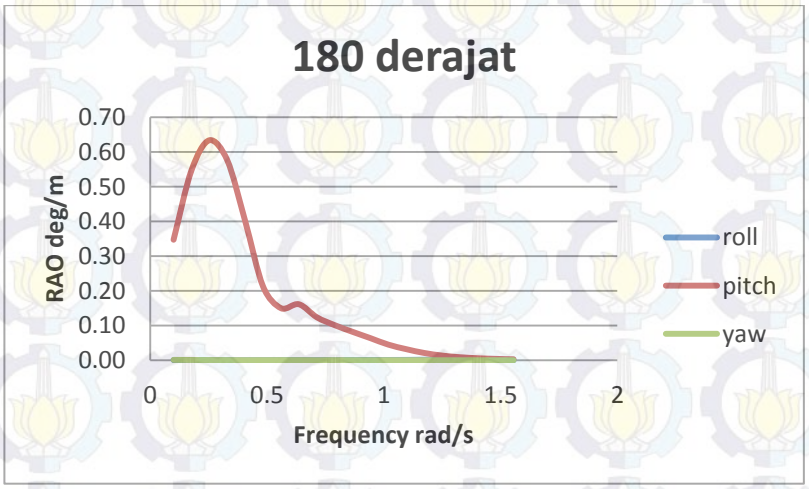
Gambar 4.20 Grafik RAO gerakan rotasi pada FSO Ladinda kondisi *light load* saat *free floating* dengan *heading* pembebanan 90 derajat

Pada gerakan rotasional pada arah 90° menyebabkan RAO tertinggi dimiliki oleh gerakan *roll*. Pembebanan arah 90° merupakan arah gelombang yang datang tegak lurus dengan sumbu-x. Pada Gambar 4.20 dapat dilihat bahwa RAO tertinggi merupakan 4.5 m/m pada gerakan *roll*, gerakan *roll* merupakan gerakan rotasional terhadap sumbu-x.



Gambar 4.21 Grafik RAO translasi pada FSO Ladinda kondisi *light load* saat *free floating* dengan *heading* pembebanan 180 derajat

Arah pembebaban 180° merupakan arah yang berlawan dengan arah pembebanan 0°. Namun arah pembebanan sama-sama bergerak sejajar sumbu-x. Sehingga RAO translasi tertinggi terdapat pada gerakan *surge*, dimana gerakan *surge* merupakan gerakan translasi terhadap sumbu-x. Pada Gambar 4.21, RAO terbesar merupakan 5.78 m/m pada gerakan *surge*, RAO tertinggi setelah *surge* adalah *heave* dan yang terakhir merupakan gerakan *sway*.



Gambar 4.22 Grafik RAO translasi pada FSO Ladinda kondisi *light load* saat *free floating* dengan *heading* pembebanan 180 derajat

Tabel 4.4 Nilai maksimum RAO FSO Ladinda *light load free floating condition*

Moda Gerakan	Unit	RAO Maksimum				Max
		0 deg	45 deg	90 deg	180 deg	
Surge	m/m	5.78	4.2	0.01	5.78	5.78
Sway	m/m	0.00041	4.259657	6.20357	0.00041	6.20357
Heave	m/m	0.920572	0.758677	0.797737	0.920399	0.920572
Roll	deg/m	0.004127	1.073741	4.512076	0.001682	4.512076
Pitch	deg/m	0.633443	0.613338	0.042264	0.633821	0.633821
Yaw	deg/m	0.00114	2.032932	1.985659	0.0011	2.032932

Berdasarkan Gambar 4.15 sampai Gambar 4.22 dan Tabel 4.4 di atas dapat dilihat bahwa *surge* tertinggi ialah sebesar 5.78 (m/m) yaitu pada *heading* 0°, *sway* tertinggi

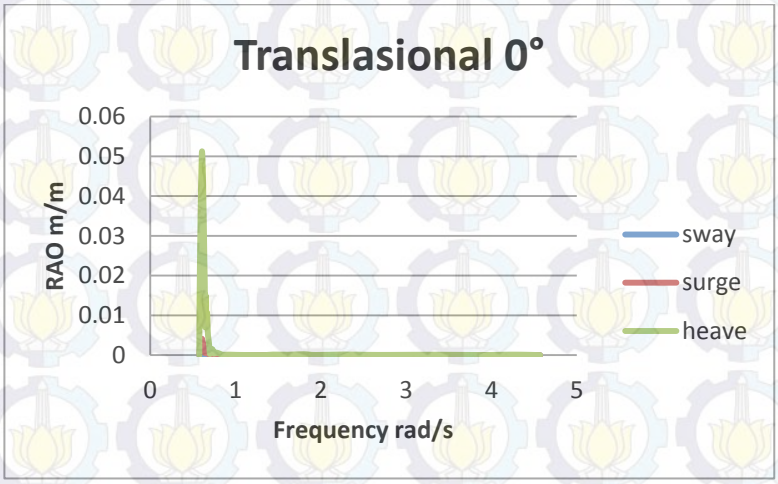
pada *heading* 90° sebesar 6.203 (m/m), dan *heave* tertinggi sebesar 0,92 (m/m) pada *heading* 0°. Untuk gerak osilasi rotasional *roll* maksimum pada *heading* 90° sebesar 4.512 (deg/m), *pitch* maksimum sebesar 0.633 (deg/m) pada *heading* 180^0, dan *yaw* maksimum sebesar 2.032 (deg/m) pada *heading* 45°.

4.4.2 FSO Ladinda - M*oored*

Pada kenyataannya, FSO Ladinda ditambat dengan menggunakan SPOLS (*Single Point Offshore Loading System*). FSO Ladinda ditambat dengan suatu struktur yaitu SPOLS yang merupakan *mooring tower* dan dihubungkan dengan menggunakan *yoke arm.* FSO ditambat dengan suatu struktur yang *rigid*,sehingga FSO hanya dapat bergerak bebas pada pergerakan translasi terhadap sumbu-z dan rotasi terhadap sumbu-y. Pada penelitian ini, ditinjau FSO pada keadaan penuh dengan muatan atau *full load* dan dengan muatan kosong atau *light load* dengan masing-masing arah pembebanan 0°, 45°, 90° dan 180°.

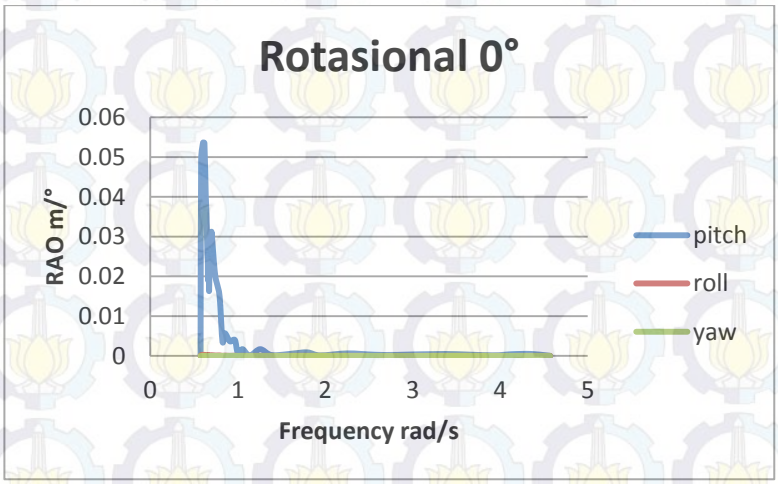
4.4.2.1 *Full Load – Moored*

Pada Gambar 4.23 hingga Gambar 4.30 merupakan RAO FSO Ladinda pada kondisi penuh dengan muatan dan tertambat. RAO yang dihasilkan pada kondisi tertambat akan lebih kecil dibandingkan dengan RAO yang dihasilkan pada saat terapung bebas atau *free floating*.



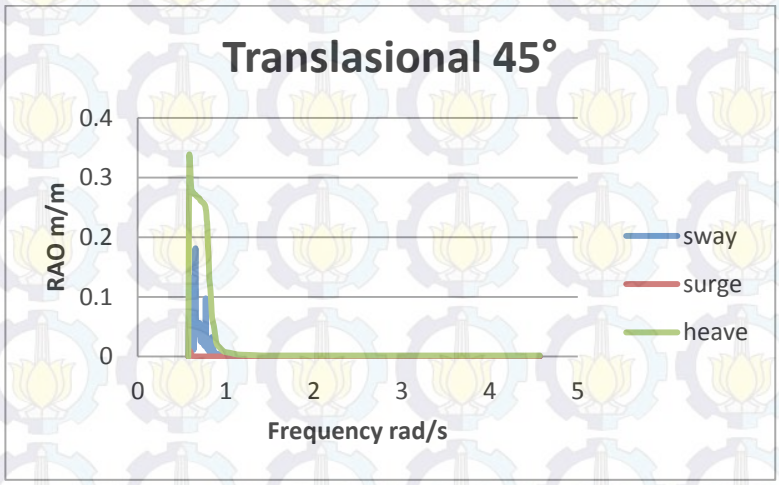
Gambar 4.23 Grafik RAO gerakan translasi pada pada FSO Ladinda kondisi *full load* saat tertambat degan *heading* pembebanan 0 derajat

Perilaku gerakan FSO pada saat tertambat berbeda dengan pada saat FSO *free floating*. Pada saat *free floating* FSO dapat bergerak bebas, pada saat tertambat FSO memiliki keterbatasan untuk bergerak. Pada pembebanan arah 0° seperti yang dilihat pada Gambar 4.23 memiliki RAO tertinggi pada gerakan *heave*. Walaupun arah pembebanan sejajar dengan sumbu-x, namun pergerakan terbesar dimiliki oleh gerakan translasi terhadap sumbu-z karena pada sistem ini pergerakan terhadap sumbu-x secara translasi dibatasi.



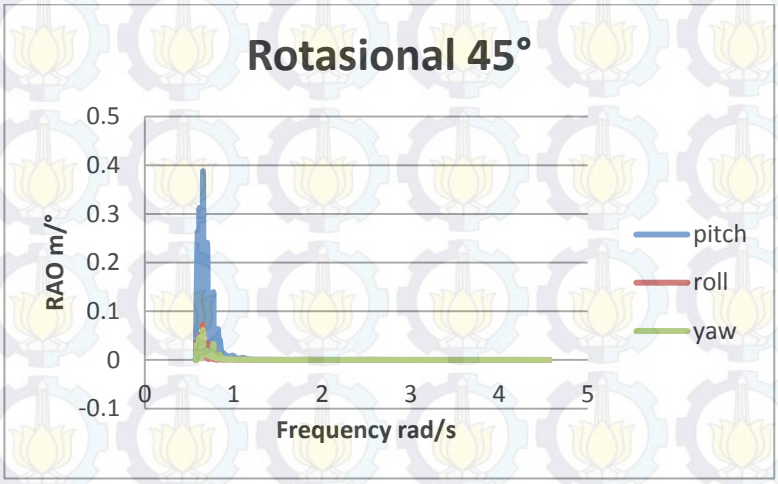
Gambar 4.24 Grafik RAO gerakan rotasi pada FSO Ladinda kondisi *full load* saat tertambat dengan *heading* pembebanan 0°

Pada pembebanan arah 0° dengan gerakan rotasi seperti yang terlihat pada Gambar 4.24. Perilaku gerakan FSO dimiliki oleh gerakan *pitch*. Hal ini mempunyai kesamaan dengan perilaku gerak FSO pada saat *free floating*, karena pada *tower yoke mooring* membebaskan FSO bergeraksecara rotasional terhadap sumbu-y karena terdapat engsel yang membebaskan pergerakan tersebut.



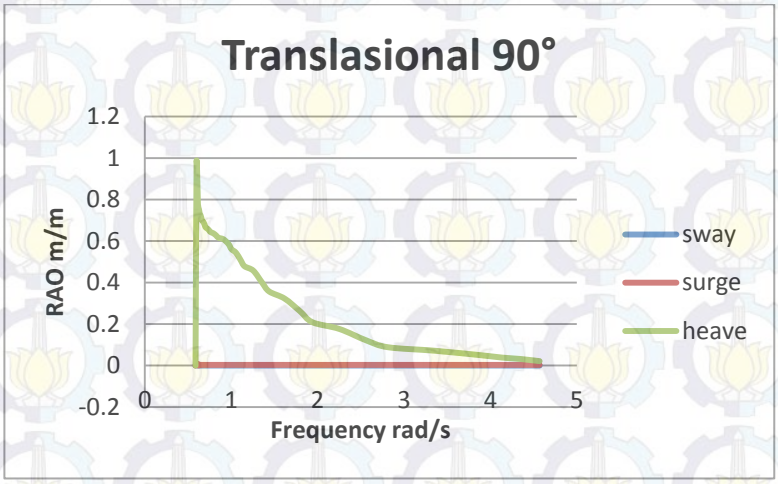
Gambar 4.25 Grafik RAO gerakan translasi pada FSO Ladinda kondisi *full load* saat tertambat dengan *heading* pembebanan 45 derajat

Pada Gambar 4.25 menunjukkan bahwa pembebanan gelombang pada arah 45° didominasi oleh gerakan *heave* yaitu sebesar 0.33 m/m. Pada semua arah pembebanan secara tranlasi akan mengalami pergerakan paling besar berupa *heave* karena pada sistem tersebut gerakan yang paling bebas merupakan gerakan translasi pada sumbu-z dan pada gerakan rotasi pada sumb-y.



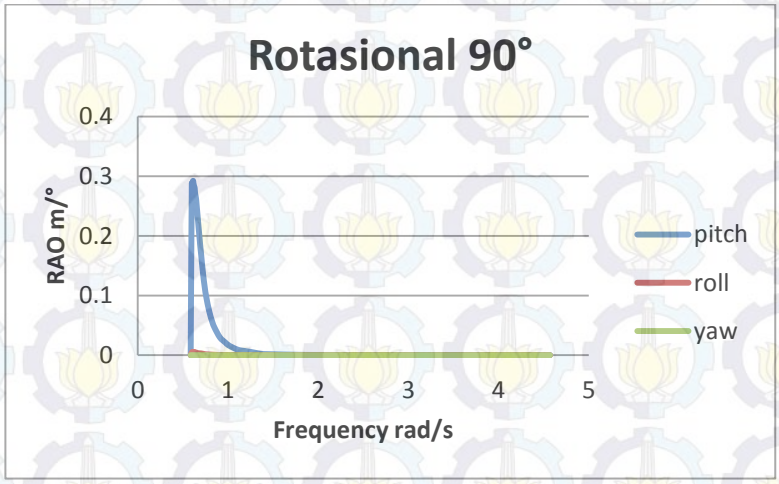
Gambar 4.26 Grafik RAO gerakan rotasi pada FSO Ladinda kondisi *full load* saat tertambat dengan *heading* pembebanan 45 derajat.

Pada Gambar 4.26 perilaku gerakan tertinggi secara rotasional pada arah 45° merupakan pada gerakan *pitch* atau rotasional terhadapa sumbu-y. Pada sistem tambat ini membebaskan pergerakan rotasi terhadap sumbu-x atau melakukan pergerakan *roll*, namun tidak sebebas pergerakan rotasi terhadap sumbu-y atau *pitch*. Pada arah datang gelombang 45° secara rotasional saat kondisi *full load*, RAO tertinggi merupakam 0.39 ^{o}/m.



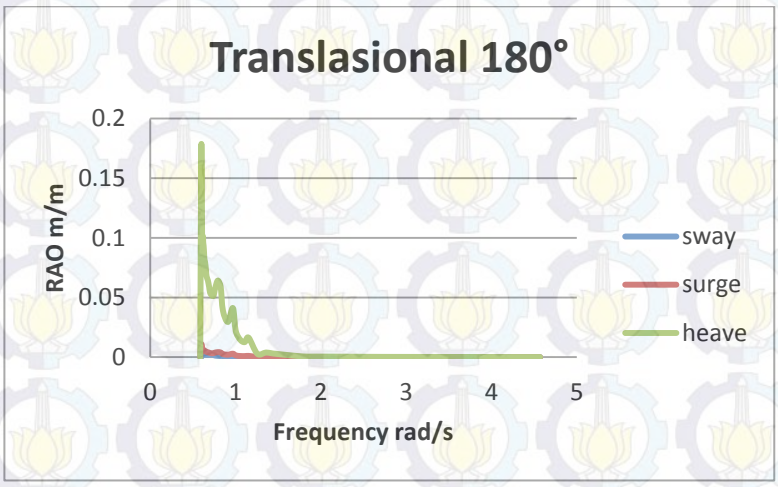
Gambar 4.27 Grafik RAO translasi pada FSO Ladinda kondisi *full load* saat tertambat dengan *heading* pembebanan 90 derajat

Pada arah pembebanan 90° secara tranlasional, RAO tertinggi meruapak 0.98 m/m oleh gerakan *heave* yang dapat dilihat pada Gambar 4.27 yang merupakan grafik RAO translasi pada kondisi *full load*.



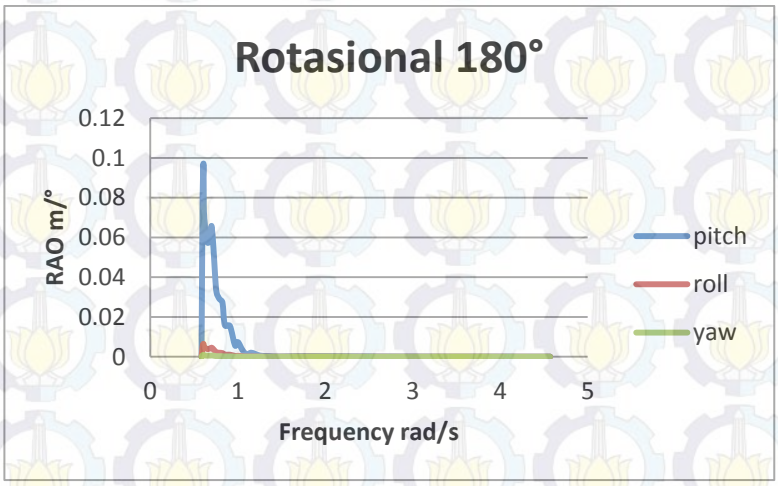
Gambar 4.28 Grafik RAO rotasi pada FSO Ladinda kondisi *full load* saat tertambat dengan *heading* pembebanan 90 derajat

Pada Gambar 4.28 menjelaskan bahwa arah pembebanan 90° pada frekuensi yang sama memiliki nilai tertinggi pada gerakan *pitch* yaitu dengan nilai RAO 0.29 ^{o}/m. Setelah gerakan *pitch,* perilaku gerak FSO yang tertinggi selanjutnya merupakan *roll* dan yang terakhir merupakan *yaw*.



Gambar 4.29 Grafik RAO gerakan translasi pada pada FSO Ladinda kondisi *full load* saat tertambat dengan *heading* pembebanan 180 derajat

Pada Gambar 4.29 merupakan grafik RAO pada pembebanan arah 180° dengan gerakan translasional pada saat kondisi *full load*, dengan gerakan maksimum terdapat pada gerakan *heave* sebesar 0.17 m/m dan disusul oleh gerakan *surge* dan selanjutnya adalah gerakan *sway*.



Gambar 4.30 Grafik RAO gerakan rotasi pada pada FSO Ladinda kondisi *full load* saat tertambat dengan *heading* pembebanan 180 derajat

Pada Gambar 4.30 merupakan grafik RAO pada pembebanan arah 180° dengan gerakan rotasional dan pada saat kondisi *full load*, dengan gerakan maksimum terdapat pada gerakan *pitch* sebesar 0.09 ^{o}/m dan disusul oleh gerakan *roll* dan selanjutnya adalah gerakan *yaw*.

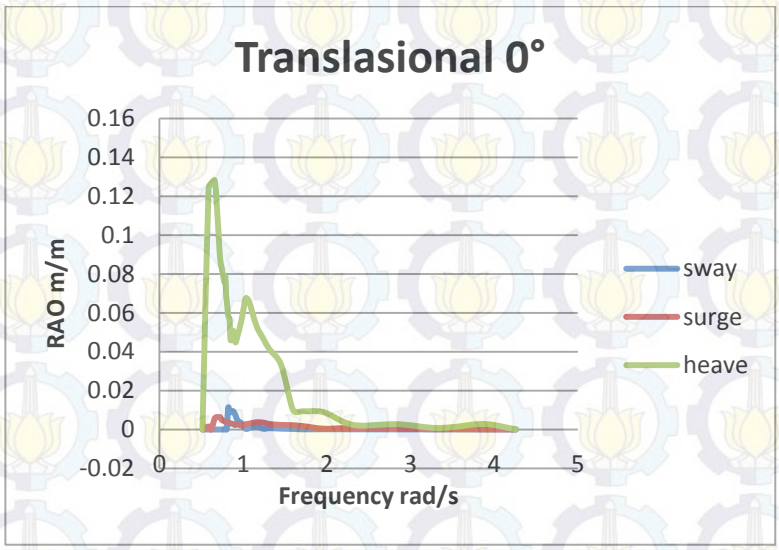
Tabel 4.5 Nilai maksimum RAO FSO Ladinda *full moored condition*

Moda Gerakan	Unit	RAO Maksimum				Max
		0 deg	45 deg	90 deg	180 deg	
Surge	m/m	0.004066	0.009982	0.007978	0.173389	0.173389
Sway	m/m	0.00003	0.181488	0.000385	0.00322	0.181488
Heave	m/m	0.050538	0.336809	0.988907	0.010709	0.988907
Roll	deg/m	0.000267	0.072593	0.005374	0.00647	0.072593
Pitch	deg/m	0.053651	0.387796	0.292393	0.097179	0.387796
Yaw	deg/m	0.00000	0.061503	0.00003	0.0009	0.061503

Berdasarkan Gambar 4.23 sampai Gambar 4.30 dan Tabel 4.5 di atas dapat dilihat bahwa *surge* tertinggi ialah sebesar 0.17 (m/m) yaitu pada *heading* 180°, *sway* tertinggi pada *heading* 45° sebesar 0.181 (m/m), dan *heave* tertinggi sebesar 0.98 (m/m) pada *heading* 90°. Untuk gerak osilasi rotasional *roll* maksimum pada *heading* 45° sebesar 0.072 (deg/m), *pitch* maksimum sebesar 0.3878 (deg/m) pada *heading* 45^0, dan *yaw* maksimum sebesar 0.0615 (deg/m) pada *heading* 45°.

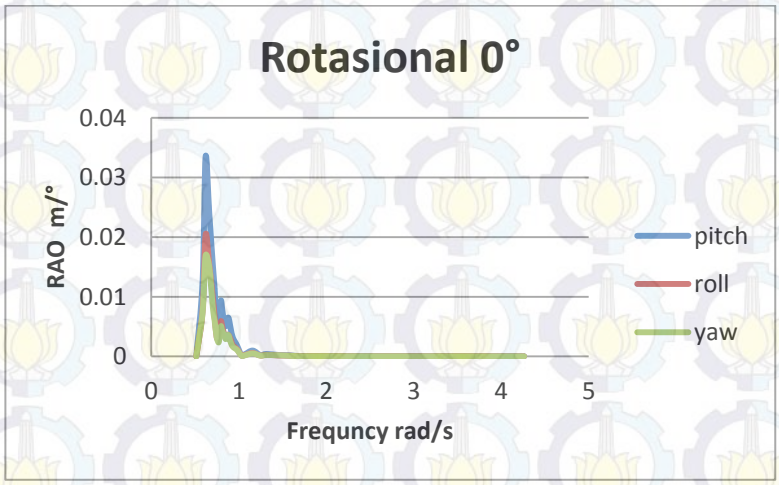
4.4.2.2 *Light Load – Moored*

Pada Gambar 4.31 hingga Gambar 4.38 merupakan RAO FSO Ladinda pada kondisi kosong dengan tidak adanya muatan dan tertambat. RAO yang dihasilkan pada kondisi tertambat akan lebih kecil dibandingkan dengan RAO yang dihasilkan pada saat terapung bebas atau *free floating*. Namun respon amplitudo yang terjadi akan lebih besar dibandingkan pada saat FSO dalam keadaan bermuatan penuh dan tertambat.



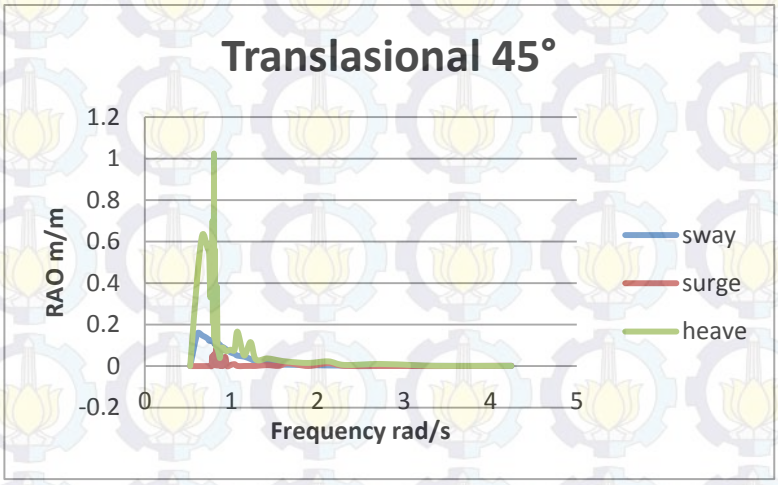
Gambar 4.31 Grafik RAO gerakan translasi pada FSO Ladinda kondisi *light load* saat tertambat dengan *heading* pembebanan 0 derajat

Perilaku gerakan FSO pada saat tertambat berbeda dengan pada saat FSO *free floating*. Pada saat *free floating* FSO dapat bergerak bebas, pada saat tertambat FSO memiliki keterbatasan untuk bergerak. Pada pembebanan arah 0° seperti yang dilihat pada Gambar 4.31 memiliki RAO tertinggi pada gerakan *heave*. Walaupun arah pembebanan sejajar dengan sumbu-x, namun pergerakan terbesar dimiliki oleh gerakan translasi terhadap sumbu-z karena pada sistem ini pergerakan terhadap sumbu-x secara translasi dibatasi.



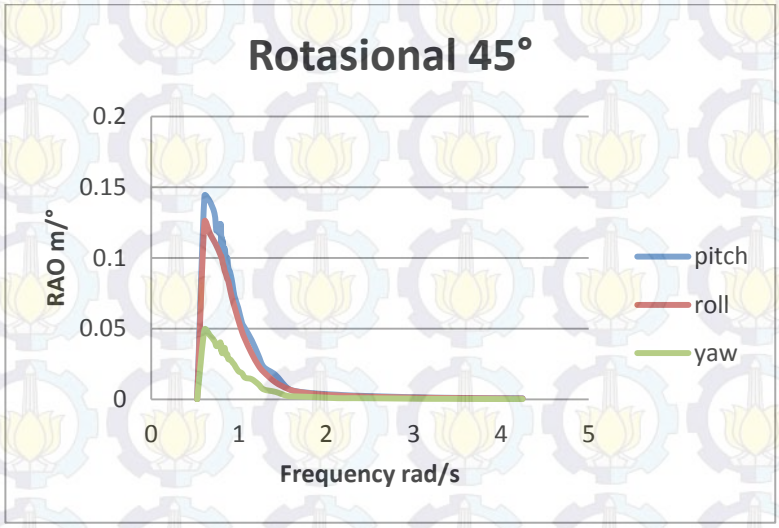
Gambar 4.32 Grafik RAO gerakan rotasi pada FSO Ladinda kondisi *light load* saat tertambat dengan *heading* pembebanan 0 derajat

Pada pembebanan arah 0° dengan gerakan rotasi seperti yang terlihat pada Gambar 4.32. Perilaku gerakan FSO dimiliki oleh gerakan *pitch*. Hal ini mempunyai kesamaan dengan perilaku gerak FSO pada saat *free floating*, karena pada *tower yoke mooring* membebaskan FSO bergeraksecara rotasional terhadap sumbu-y karena terdapat engsel yang membebaskan pergerakan tersebut.



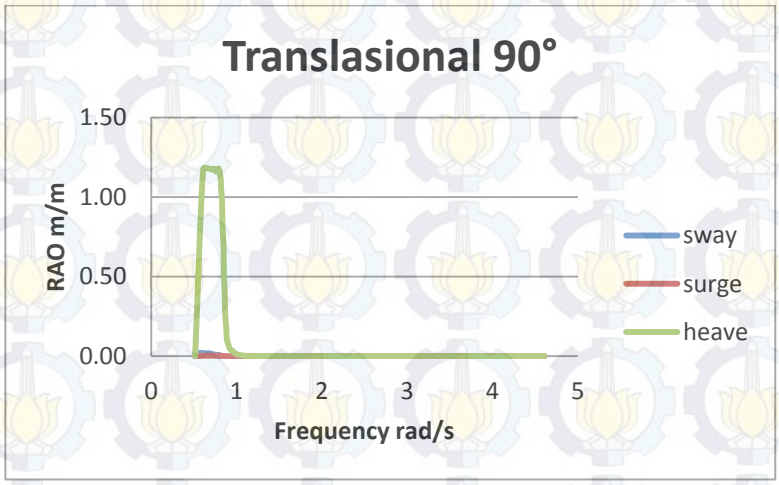
Gambar 4.33 Grafik RAO gerakan translasi pada FSO Ladinda kondisi *light load* saat tertambat dengan *heading* pembebanan 45 derajat

Pada Gambar 4.33 menunjukkan bahwa pembebanan gelombang pada arah 45° didominasi oleh gerakan *heave* yaitu sebesar 1.1 m/m. Pada semua arah pembebanan secara tranlasi akan mengalami pergerakan paling besar berupa *heave* karena pada sistem tersebut gerakan yang paling bebas merupakan gerakan translasi pada sumbu-z dan pada gerakan rotasi pada sumbu-y.



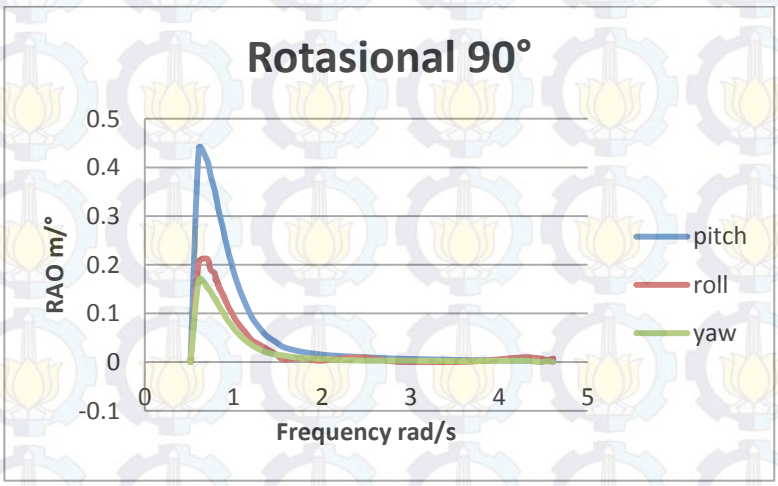
Gambar 4.34 Grafik RAO gerakan rotasi pada FSO Ladinda kondisi *light load* saat tertambat dengan *heading* pembebanan 45 derajat.

Pada Gambar 4.34 perilaku gerakan tertinggi secara rotasional pada arah 45° merupakan pada gerakan *pitch* atau rotasional terhadapa sumbu-y. Pada sistem tambat ini membebaskan pergerakan rotasi terhadap sumbu-x atau melakukan pergerakan *roll*, namun tidak sebebas pergerakan rotasi terhadap sumbu-y atau *pitch*. Pada arah datang gelombang 45° secara rotasional saat kondisi *light load*, RAO tertinggi merupakam 0.14 ^{o}/m.



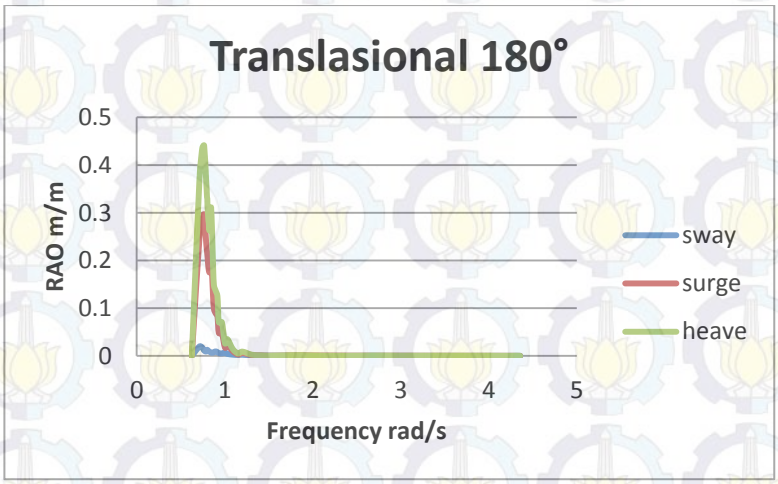
Gambar 4.35 Grafik RAO translasi pada FSO Ladinda kondisi *light load* saat tertambat dengan *heading* pembebanan 90 derajat.

Pada arah pembebanan 90° secara tranlasional, RAO tertinggi merupakan 1.18 m/m oleh gerakan *heave* yang dapat dilihat pada Gambar 4.35 yang merupakan grafik RAO translasi pada kondisi *light load*.



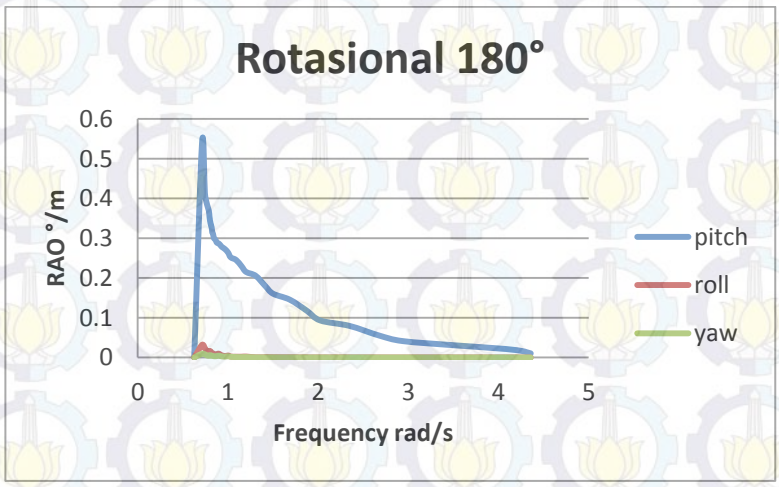
Gambar 4.36 Grafik RAO rotasi pada FSO Ladinda kondisi *light load* saat tertambat dengan *heading* pembebanan 90 derajat

Pada Gambar 4.36 menjelaskan bahwa arah pembebanan 90° pada frekuensi yang sama memiliki nilai tertinggi pada gerakan *pitch* yaitu dengan nilai RAO 0.43 ^{o}/m. Setelah gerakan *pitch*, perilaku gerak FSO yang tertinggi selanjutnya merupakan *roll* dan yang terakhir merupakan *yaw*.



Gambar 4.37 Grafik RAO gerakan translasi pada FSO Ladinda kondisi *light load* saat tertambat dengan *heading* pembebanan 180 derajat.

Pada Gambar 4.37 merupakan grafik RAO pada pembebanan arah 180° dengan gerakan translasional pada saat kondisi *full load*, dengan gerakan maksimum terdapat pada gerakan *heave* sebesar 0.43 m/m dan disusul oleh gerakan *surge* dan selanjutnya adalah gerakan *sway*.



Gambar 4.38 Grafik RAO gerakan rotasi pada FSO Ladinda kondisi *light load* saat tertambat dengan *heading* pembebanan 180 derajat.

Pada Gambar 4.38 merupakan grafik RAO pada pembebanan arah 180° dengan gerakan rotasional dan pada saat kondisi *full load*, dengan gerakan maksimum terdapat pada gerakan *pitch* sebesar 0.53 ^{o}/m dan disusul oleh gerakan *roll* dan selanjutnya adalah gerakan *yaw*.

Tabel 4.6 Nilai maksimum RAO FSO Ladinda *light load condition moored*

Moda Gerakan	Unit	RAO Maksimum				Max
		0 deg	45 deg	90 deg	180 deg	
Surge	m/m	0.0063748	0.085186	0.002851	0.295563	0.295563
Sway	m/m	0.01125	0.157315	0.467197	0.01992	0.467197
Heave	m/m	0.13	1.024751	1.18	0.440674	1.180047
Roll	deg/m	0.0203915	0.125504	0.212332	0.031685	0.212332
Pitch	deg/m	0.0334093	0.143995	0.44	0.539306	0.539306
Yaw	deg/m	0.01687	0.049284	0.168896	0.0097	0.168896

Berdasarkan Gambar 4.31 sampai Gambar 4.38 dan Tabel 4.6 di atas dapat dilihat bahwa *surge* tertinggi ialah sebesar 0,295 (m/m) yaitu pada *heading* 0°, *sway* tertinggi pada *heading* 90° sebesar 0.467 (m/m), dan *heave* tertinggi sebesar 1,18 (m/m) pada *heading* 90°. Untuk gerak osilasi rotasional *roll* maksimum pada *heading* 90° sebesar 0.212 (deg/m), *pitch* maksimum sebesar 0.539 (deg/m) pada *heading* 180^0, dan *yaw* maksimum sebesar 0.1689 (deg/m) pada *heading* 90°.

4.5 Analisis RAO Menjadi Respon Gelombang

Gerakan kapal di atas gelombang acak dapat dilakukan dengan mentransformasikan spektrum gelombang menjadi spektrum gerakan kapal. Hal ini dapat dilakukan dengan memperkalikan harga pangkat dua dari *response amplitude operator* (RAO) dan mode gerakan tertentu dengan ordinat spektrum gelombang, pada frekuensi yang sama. Respons di gelombang acak merupakan hasil perkalian antara RAO dengan spektrum gelombang. Respon di gelombang acak ($S_{\zeta r}(w)$) terlampir pada Lampiran B.

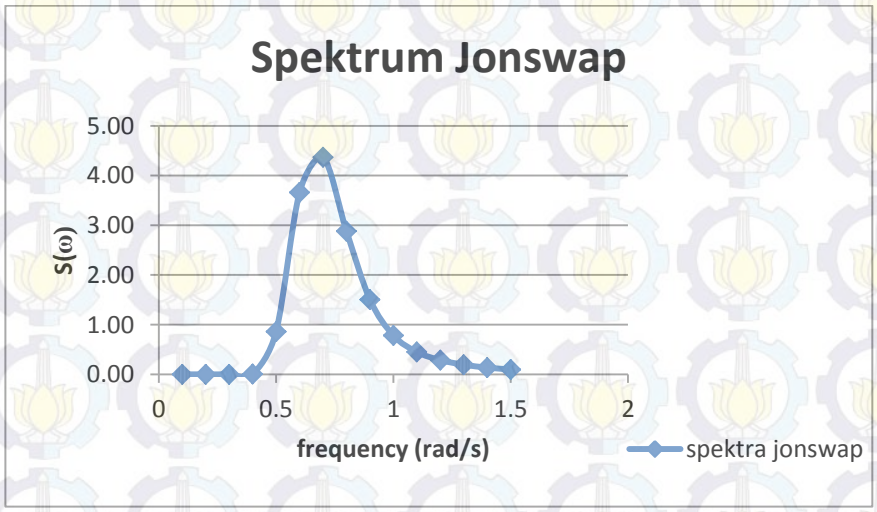
$$S_{\zeta r}(w) = RAO^2 x\, S_r(w) \qquad 4.1$$

Spektrum Gelombang yang digunakan pada analisis karakteristik gerakan FSO Ladinda adalah Spektrum Jonswap. Gambar 4.39 di bawah ini menunjukkan grafik

spektrum JONSWAP. Dimana FSO Ladinda berada di Selat Malaka yang merupakan perairan tertutup, perairan tertutup merupakan karakteristik dari spektra JONSWAP. Pada DNV RP C205 juga dijelaskan bahwa spektrum JONSWAP diaplikasikan pada perairan dengan : $Tp / (Hs)^{1/2} \leq 3.6$, $\gamma = 5$

Untuk perairan Selat Malaka, nilai $Tp/ (Hs)^{1/2} = 5/(1.46)^{½} = 2.34$

Dengan persamaan tersebut maka dapat diketahui nilai gamma yang digunakan pada analisis ini. Perhitungan respon spektra pada FSO Ladinda dilakukan pada kondsi *Light Load* maupun *Full Load* dengan kedalaman laut 25 m. Grafik respon spektra pada FSO dilakukan untuk gerakan *surge*, *sway*, *heave*, *roll* dan *pitch*. Pada Gambar 4.39 adalah grafik respon spektra pada FSO Ladinda dengan *heading* pembebanan 0°, 45°, 90° dan 180° terlampir pada Lampiran B.



. **Gambar 4.39** Spektrum Jonswap Perairan Selat Malaka dengan Hs = 1,46 m

Energi yang dimuat dalam sebuah gelombang acak adalah merupakan penjumlahan energi yang dikonstribusikan oleh semua komponen gelombang regular. Penjumlahan energi dari seluruh komponen gelombang regular per satuan luas permukaan ($1.0m^2$) dapat diekspresikan sebagai kepadatan spektrum energi gelombang, atau singkatnya diistilahkan sebagai spektrum gelombang. (Djatmiko, 2012)

Energi gelombang adalah merupakan harga kuadrat dari amplitudonya pada tiap kenaikan frekuensi Dengan begitu respons di gelombang acak secara sederhana bisa didapat dengan mengalikan anatara nilai spektrum energi gelombang dengan RAO^2.

Proses ini pada dasarnya adalah mengubah spektra gelombang menjadi spektra.

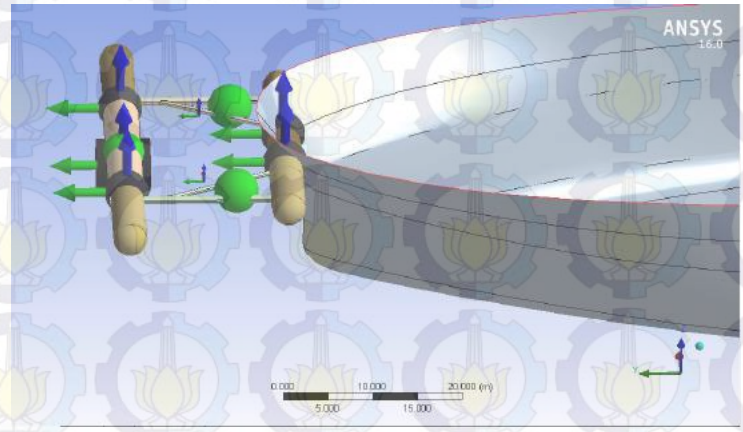
4.6 Analisis Tegangan Pada Sambungan Yoke Arm

Analisis tegangan pada *yoke arm* pada saat tertambat dengan FSO Ladinda ditinjau dengan kondisi *light load* dan *full load*. Hal tersebut dilakukan untuk mendapatkan gaya-gaya terbesar dan yang selanjutnya akan diinput sebagai pembebanan pada pemodelan selanjutnya pada struktur lokal yang ditinjau.

Skenario pembeban yang dilakukan untuk mendapatkan *tension-force* untuk beban lingkungan, adalah:

a. Beban angin, arus dan gelombang arah 0° (*Head sea*)
b. Beban angin, arus dan gelombang arah 45° (*Beam sea*)
c. Beban angin, arus dan gelombang arah 90° (*Beam sea*)
d. Beban angin, arus dan gelombang arah 180° (*Following sea*)

Pemodelan yang dilakukan untuk mendapatkan *tension-force* dilakukan pada saat FSO tertambat pada kondisi *Full Load* seperti pada Gambar 4.40. Pemodelan dilakukan pada ANSYS Aqwa dengan menggunakan struktur yang diasumsikan pada *yoke* dan di beri *joint* agar menyerupai bentuk asli pada *yoke* tersebut yaitu dapat bergerak lebih bebas pada pergerakan *pitch* dan *heave*.



. **Gambar 4.40** Pemodelan pada *software* ANSYS Aqwa tampak samping kondisi *full load*.

Analisis tegangan lokal *yoke arm* pada FSO Ladinda dilakukan dengan menggunakan ANSYS Mechanical dengan simulasi *time domain*. Pada analisis tegangan lokal tersebut dilakukan pada saat kondisi FSO *full load* dan *light load*. Pada penelitian ini tidak hanya menggunakan *tension-force* yang terbesar saja, namun juga menggunakan *tension-force* yang terkecil yang digunakan untuk menghitung umur kelelahan dari *yoke arm* tersebut.

Tabel 4.7 Analisis *tension* maksimum pada sambungan *yoke arm* FSO Ladinda

	HEADING 0 degree		HEADING 45 degree	
	TENSION (N)		TENSION (N)	
	FSO FULL LOAD (LC-3)	FSO LIGHT LOAD (LC-1)	FSO FULL LOAD (LC-7)	FSO LIGHT LOAD (LC-5)
RIGHT	27305.8	36224.61	3766.865	474516.9
LEFT	27313.14	36273.75	3767.179	474525.3
	HEADING 90 degree		HEADING 180 degree	
	TENSION (N)		TENSION (N)	
	FSO FULL LOAD (LC-11)	FSO LIGHT LOAD (LC-9)	FSO FULL LOAD (LC-15)	FSO LIGHT LOAD (LC-13)
RIGHT	3648.417	19037.91	4464.8	12225.76
LEFT	3652.524	19340.599	4459.629	12233.5125

Tabel 4.8 Analisis *tension* minimum pada sambungan *yoke arm* FSO Ladinda

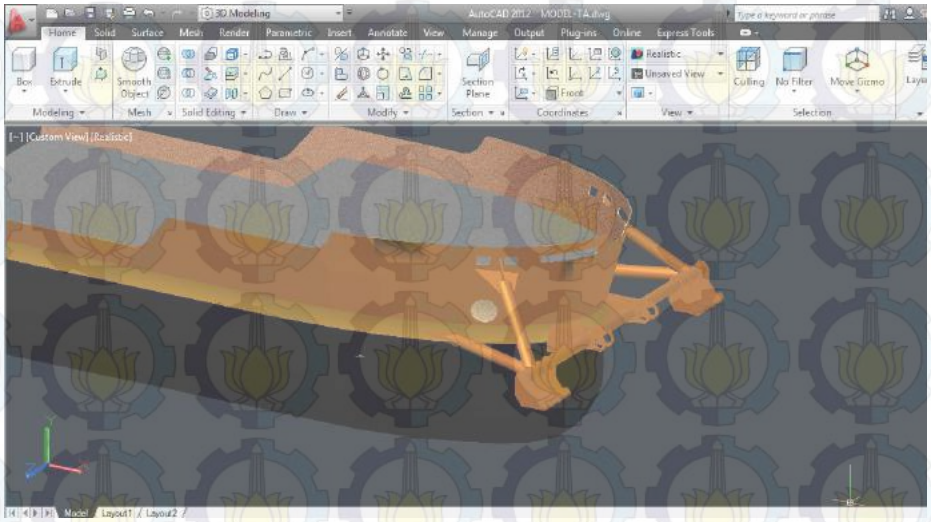
	HEADING 0 degree		HEADING 45 degree	
	TENSION (N)		TENSION (N)	
	FSO FULL LOAD (LC-4)	FSO LIGHT LOAD (LC-2)	FSO FULL LOAD (LC-8)	FSO LIGHT LOAD (LC-6)
RIGHT	3394.879	-795.281	0.3775	-104.295
LEFT	3356.879	-770.73	0.395	-101.12
	HEADING 90 degree		HEADING 180 degree	
	TENSION (N)		TENSION (N)	
	FSO FULL LOAD (LC-12)	FSO LIGHT LOAD (LC-10)	FSO FULL LOAD (LC-16)	FSO LIGHT LOAD (LC-14)
RIGHT	179.7265	-308.45	14.49	64762.14
LEFT	172.935	-1413.895	13.9085	64194.87

Berdasarkan pada Tabel 4.7 dan 4.9 di atas, *tension force* paling besar merupakan 64762,14 N yaitu pada kondisi FSO *Light Load* dengan arah pembebanan 180° dan *tension force* minimum bernilai -1413.895 N yaitu pada saat kondisi FSO *Light Load* dengan arah pembebanan 90°. *Tension force* minimum didapat pada *tension force* terendah pada waktu yang bersamaan dengan *tension force* terbesar. *Tension force* tertinggi didapat pada saat FSO dalam kondisi *light load*. Karena pada kondisi tersebut, FSO memiliki perilaku gerakan yang besar, sehingga respon struktur yang dihasilkan pun menjadi besar pula.

4.7 Pemodelan Konstruksi Sambungan Konstruksi Sambungan Yoke Arm dengan FSO

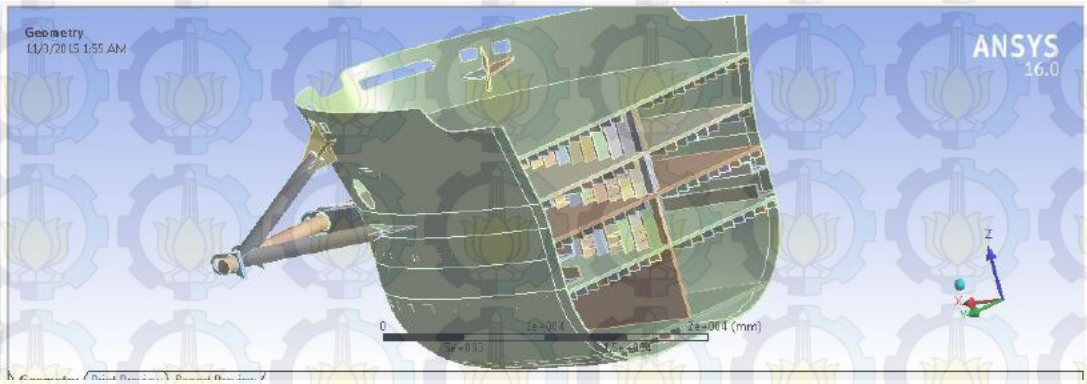
Pada penelitian ini, konstruksi yang ditinjau merupakan sambungan antara *Yoke Arm* dengan FSO Ladinda. Pada analisa lokal digunakan ANSYS mechanical. Namun, sebelum analisa dilakukan pada ANSYS mechanical, konstruksi dibuat pada Autocad 3D yang kemudian diimport pada ANSYS mechanical. Konstruksi yang dibuat

mengacu pada *General Arrangement* FSO Ladinda dan *drawing* dari *yoke arm* tersebut seperti pada Gambar 4.41



Gambar 4.41 Pemodelan konstruksi *yoke arm* yang menempel pada FSO

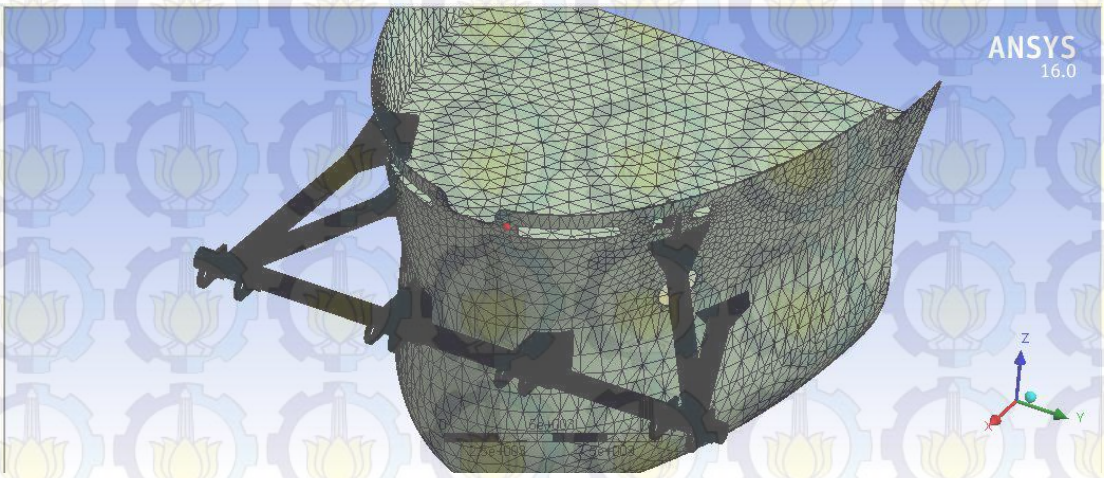
Setelah pemodelan pada Autocad 3D selesai dilakukan. Selanjutnya, pemodelan diimport pada format .sat agar dapat dibaca oleh ANSYS Mechanical. Pada penelitian ini, pemodelan lokal hanya dilakukan pada *yoke arm* dan bagian depan FSO Ladinda. Untuk mewakilkan pemodelan, maka dilakukan pendekatan dengan membuat *constraint* pada bagian belakang pemodelan agar diasumsikan bahwa pemodelan dilakukan pada satu kapal seperti pada Gambar 4.42.



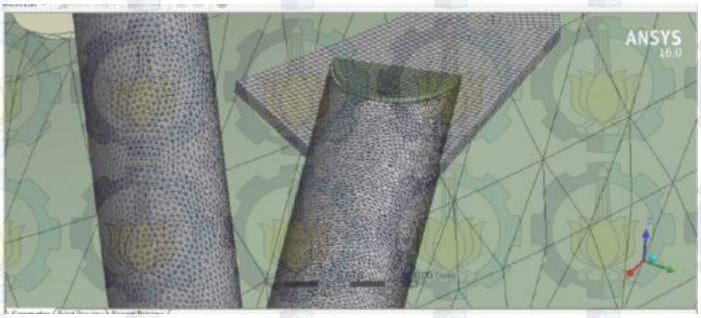
Gambar 4.42 Pemodelan FSO bagian depan tampak belakang yang dilakukan *constraint.*

4.8 *Meshing* dan *Sensitivity Analysis*

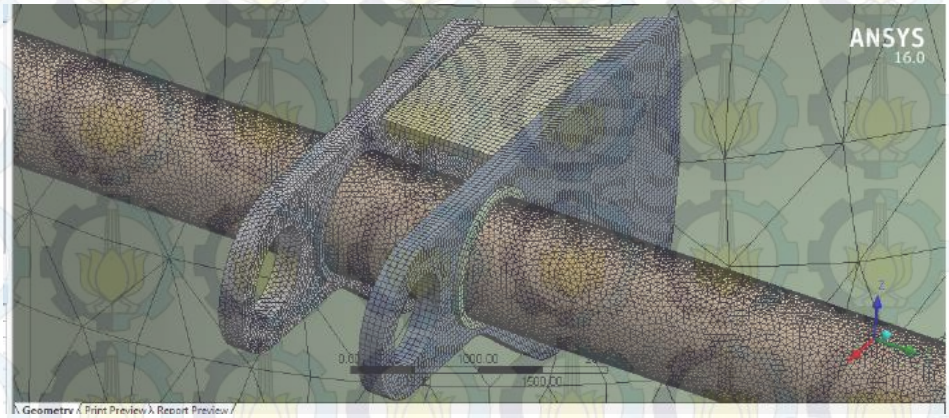
Uji *sensitivity* dilakukan dengan variasi kerapatan meshing. Berdasarkan variasi kerapatan *meshing* tersebut akan didapatkan hasil *maximum principal* stress. Analisis ini dilakukan untuk mengecek output yang dihasilkan dari running pada ANSYS mechanical apakah sudah mendekati nilai kebenaran. Pada tugas akhir ini dilakukan *running* dengan kondisi kerapatan *meshing* seperti pada Gambar 4.43 sampai Gambar 4.45.



Gambar 4.43 *Meshing* struktur *constraint.*

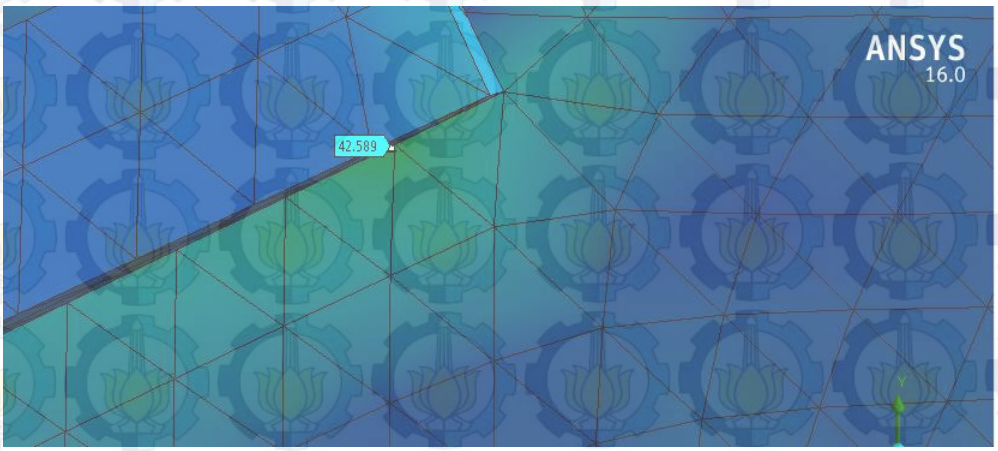


Gambar 4.44 *Refinement* di daerah kritis



Gambar 4.45 *Refinement* di daerah kritis

Pada Gambar 4.44 dan pada Gambar 4.45 merupakan struktur yang kritis mengalami *stress* yang besar. Sehingga pada bagian tersebut dilakukan *meshing* yang lebih rapat agar distribusi pembeban yang terjadi lebih teliti dan *stress* yang didapatkan sesuai pada kondisi yang nyata. Bagian struktur yang kritis terkena *stress maximum* pada umumnya pada daerah sambungan las-lasan. Gambar 4.44 merupakan sambungan antar *yoke arm* dengan lambung kapal. Sedangkan Gambar 4.45 merupakan pemodelan engsel pada *yoke arm*.



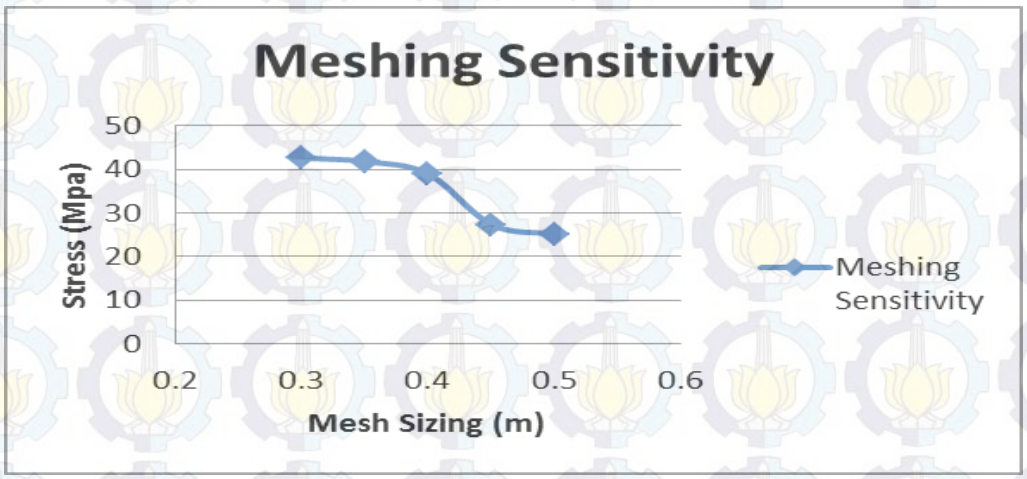
Gambar 4.46 Titik peninjauan *meshing sensitivity*

Meshing merupakan pembagian model struktur menjadi elemn-elemen kecil sesuai dengan ukuran pembagi yang diinginkan. Fungsinya mendistribusikan tegangan pada elemen-elemen kecil tersebut. Analisis *meshing sensitivity* diperlukan untuk mementukan ukuran *meshing* yang tepat agar didapatkan *maximum principal stress* maksimal. Analisis dilakukan sampai perubahan *meshing* tidak berpengaruh pada besar tegangan. Analisis *meshing sensitivity* dilakukan dengan meninjau suatu itu. Sutu titik tersebut ditandai dengan menggunakan *tool* pada Ansys Mechanical yang bernama *probe* seperti pada Gambar 4.46.

Berdasarkan variasi *meshing* yang dilakukan, didapatkan tabulasi *meshing* dan *maximum principal stress* yang dihasilkan pada Tabel 4.9 dan Gambar 4.47 sebagai berikut:

Tabel 4.9 Tabulasi hasil *Maximum Principal Stress* untuk variasi kerapatan *meshing*

Condition	Mesh Sizing (m)	Stress (Mpa)
1	0.3	42.59
2	0.35	41.78
3	0.4	38.96
4	0.45	27.32
5	0.5	25.12



Gambar 4.47 Sensitivitas *meshing* model struktur *Yoke Arm*

Berdasarkan Tabel 4.9 dan grafik pada Gambar 4.47 dapat disimpulkan bahwa struktur *Yoke Arm* dapat dengan baik dimodelkan pada ukuran *mesh* 0.3 meter karena hasil perhitungan *error* untuk *mesh* ini kurang dari 5%.

4.9 Pembebanan pada ANSYS Mechanical

Dalam analisis kelelahan pada struktur *Yoke Arm*, diperlukan beberapa konfigurasi pembebanan *tension force* yang telah didapat dari analisa sebelumnya. Beberapa

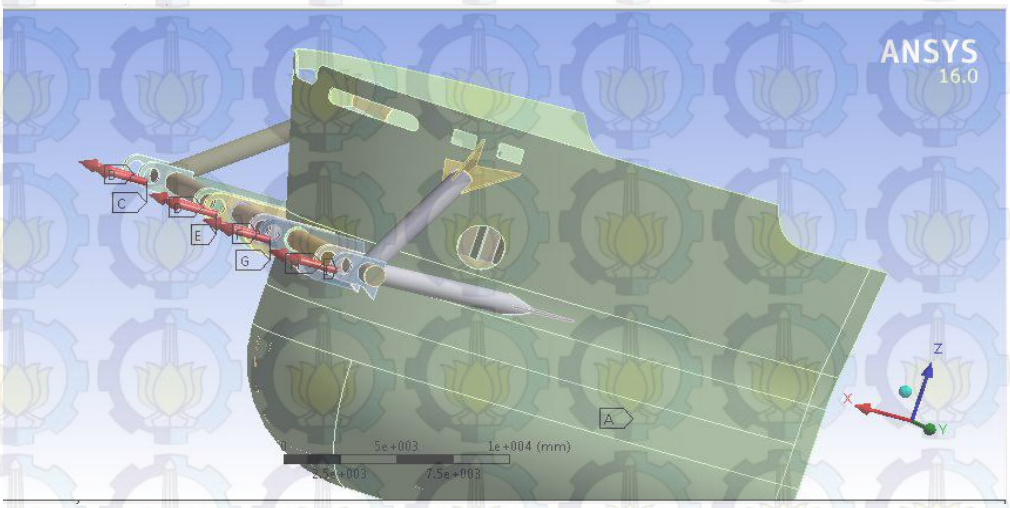
konfigurasi pembebanan struktur pada ANSYS Mechanical berdasarkan *tension*, kondisi FSO Ladinda dan *heading* pembebanan antara lain:

Tabel 4.10 Konfigurasi pembebanan struktur berdasarkan *tension*

Load Condition Code	*Tension*	*FSO Condition*	*Heading*
LC-1	*Maximum Tension*	FSO *light load*	*heading* 0°
LC-2	*Minimum Tension*	FSO *light load*	*heading* 0°
LC-3	*Maximum Tension*	FSO *full load*	*heading* 0°
LC-4	*Minimum Tension*	FSO *full load*	*heading* 0°
LC-5	*Maximum Tension*	FSO *light load*	*heading* 45°
LC-6	*Minimum Tension*	FSO *light load*	*heading* 45°
LC-7	*Maximum Tension*	FSO *full load*	*heading* 45°
LC-8	*Minimum Tension*	FSO *full load*	*heading* 45°
LC-9	*Maximum Tension*	FSO *light load*	*heading* 90°
LC-10	*Minimum Tension*	FSO *light load*	*heading* 90°
LC-11	*Maximum Tension*	FSO *full load*	*heading* 90°
LC-12	*Minimum Tension*	FSO *full load*	*heading* 90°
LC-13	*Maximum Tension*	FSO *light load*	*heading* 180°
LC-14	*Minimum Tension*	FSO *light load*	*heading* 180°
LC-15	*Maximum Tension*	FSO *full load*	*heading* 180°
LC-16	*Minimum Tension*	FSO *full load*	*heading* 180°

Pada Gambar 4.48 merupakan bagian-bagian kapal yang diberi *boundary condition* berupa *fixed support*. Beban tension force yang bersifat tarikan di bebankan pada sambungan *yoke arm* seperti tertera pada Gambar 4.49:

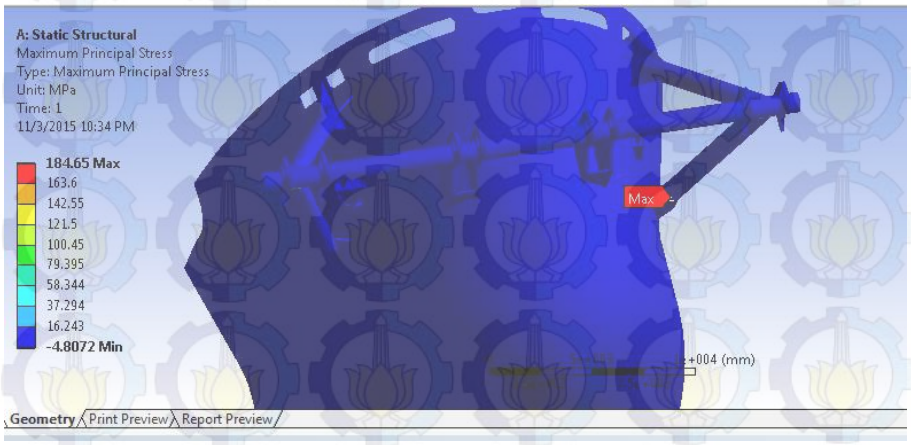
Gambar 4.48 Kondisi batas jepit pada potongan kapal bagian depan



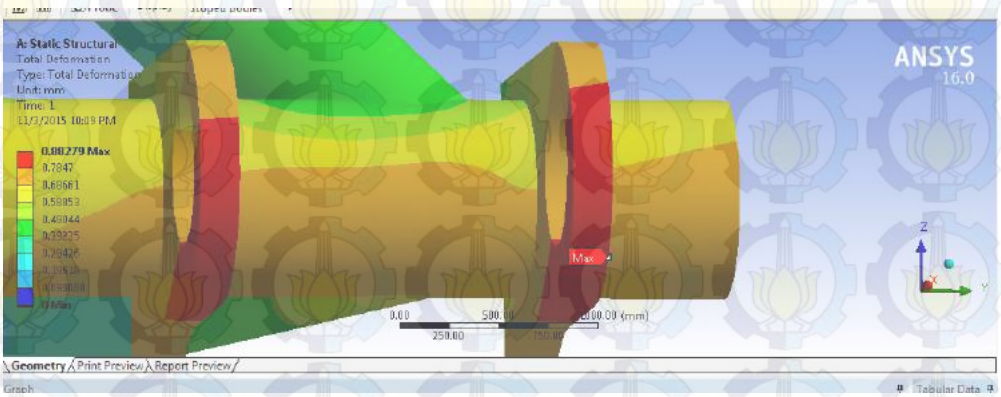
Gambar 4.49 Pembebanan pada *yoke arm*

4.10 Analisis Tegangan Pada Struktur *Yoke Arm*

Gambar 4.50 dan Gambar 4.51 berikut ini adalah hasil *maximum stress* dan deformasi pada struktur *yoke arm.*



Gambar 4.50 *Maximum principal stress* pada struktur

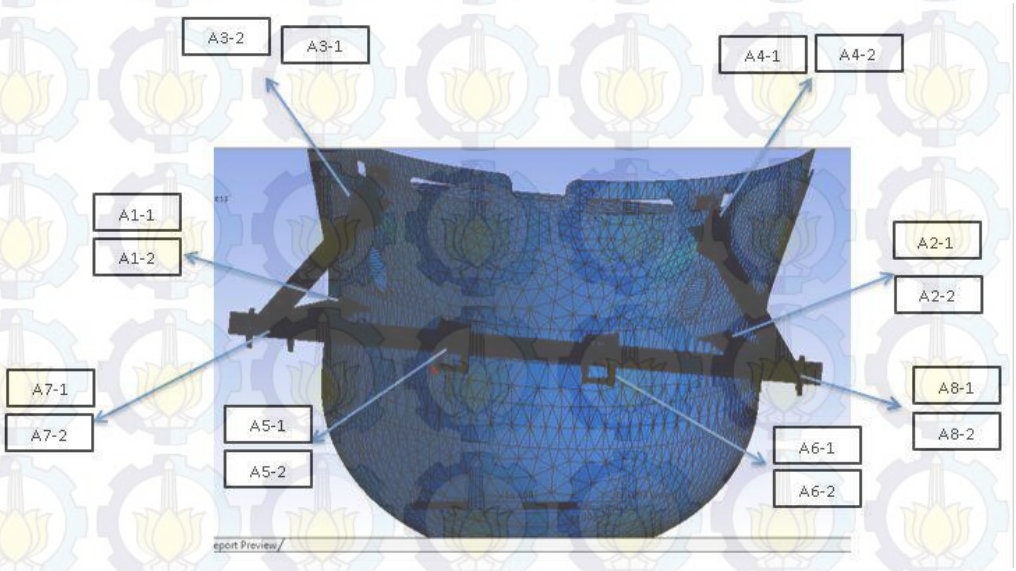


Gambar 4.51 Deformasi pada struktur *Yoke Arm*

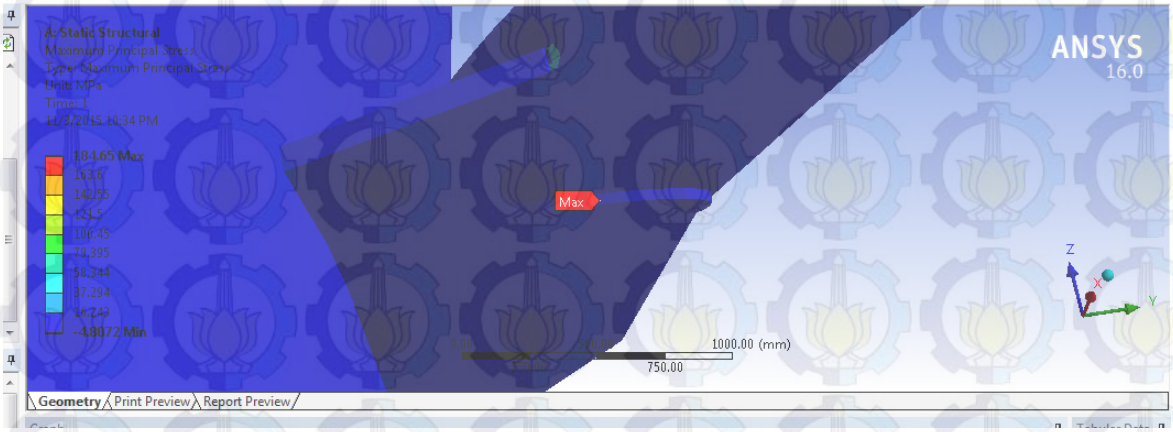
Tegangan yang dihasilkan oleh pembebanan-pembebanan tersebut menghasilkan tegangan maksimum sebesar 184.65 Mpa.

4.11 Analisis Umur Kelelahan Struktur *Yoke Arm*

Perhitungan umur kelelahan dalam tugas akhir ini menggunakan metode S-N Curve berdasarkan hukum kegagalan *palmgren miner (miner's rule)* dengan mengestimasi kumulatif kegagalan *fatigue (cumulative fatigue damage)* menggunakan metode *simplified fatigue analysis*. Berikut adalah tabulasi *maximum principal stress* yang terjadi pada lokasi-lokasi kritis di struktur *yoke arm* yang nantinya digunakan dalam perhitungan umur kelelahan. Penomoran titik-titik kritis pada struktur *yoke arm* dapat dilihat pada Gambar 4.52 dan Gambar 4.53



Gambar 4.52 Penomoran titik-titik kritis pada struktur



Gambar 4.53 Konstruksi kritis

Tabel 4.11 di bawah ini menjelaskan salah satu perhitungan *hot-spot stress* pada kondisi pembebanan-1 dan kondisi pmbebanan-2 dengan meninjau titik-titik kritis pada setiap kondisi beban yang telah akan ditinjau. Terdapat perhitungan 16 kondisi pembebanan yang terlampir pada Lampiran A. *Hot spot stress* merupakan nilai dari tegangan structural yang terjadi pada permukaan pada sebuah titik dimana rentan terjadinya *fatigue crack*. Perhitungan *hot spot stress* dilakukan dengan mengkalikan *maximum principal stress* yang terjadi dengan faktor desain 1.12 yang merupakan ketetapan dari DNV RP-C203 "*Fatigue Design of Offshore*".

Tabel 4.11 Perhitungan *Hot-Spot Stress*

LC-1				LC-2			
Joint Code	Maximum Principal Stress [Mpa]	Factor	Hot-spot Stress [Mpa]	Joint Code	Maximum Principal Stress [Mpa]	Factor	Hot-spot Stress [Mpa]
A1-1	61.49	1.12	68.87328	A1-1	7.398	1.12	8.29
A1-2	54.08	1.12	60.57296	A1-2	5.748	1.12	6.44
A2-1	64.12	1.12	71.80992	A2-1	6.12	1.12	6.86
A2-2	56.242	1.12	62.99104	A2-2	4.89	1.12	5.48
A3-1	40.95	1.12	45.85952	A3-1	2.29	1.12	2.56
A3-2	35.86	1.12	40.16544	A3-2	3.10	1.12	3.48
A4-1	40.91	1.12	45.82032	A4-1	4.5827	1.12	5.13
A4-2	35.83	1.12	40.12848	A4-2	2.86	1.12	3.20
A5-1	40.63	1.12	45.51008	A5-1	0.00	1.12	0.01
A5-2	35.59	1.12	39.8552	A5-2	0.00	1.12	0.000750
A6-1	6.1382	1.12	6.874784	A6-1	0.00012	1.12	0.000134
A6-2	5.2838	1.12	5.917856	A6-2	0.00001543	1.12	0.000017
A7-1	4.34	1.12	4.8608	A7-1	0.0000564	1.12	0.000063
A7-2	3.83	1.12	4.2896	A7-2	0.0000253	1.12	0.000028
A8-1	3.15	1.12	3.530688	A8-1	0.0000765	1.12	0.000086
A8-2	2.79	1.12	3.1192	A8-2	0.0000465	1.12	0.000052

Setelah diketahui *hot spot stress* pada setiap titik kritis yang ditinjau. Selanjutnya adalah mencari *stress range* yang terjadi seperti yang terlihat pada Tabel 4.12. *Stress range* merupakan perbedaan antara *stress maximum* dan *minimum* pada *stress cycle*. *Stress range* dihitung dengan menggunakan absolut dari pengurangan maksimum dan minimum kombinasi pembebanan yang sama. Untuk perhitungan *stress range* pada beban kombinasi seacara lengkap terdapat pada lampiran A.

Tabel 4.12 Perhitungan *Hot-Spot Stress range*

LC-1 / LC-2			
Joint Code	Hot-spot Stress Maximum Tension [Mpa]	Hot-spot Stress Minimum Tension [Mpa]	Hot-spot Stress Range [Mpa]
A1-1	68.87	8.29	60.59
A1-2	60.57	6.44	54.14
A2-1	71.81	6.86	64.95
A2-2	62.99	5.48	57.51
A3-1	45.86	2.56	43.30
A3-2	40.17	3.48	36.69
A4-1	45.82	5.13	40.69
A4-2	40.13	3.20	36.93
A5-1	45.51	0.01	45.51
A5-2	39.86	0.00	39.85
A6-1	6.87	0.00	6.87
A6-2	5.92	0.00	5.92
A7-1	4.86	0.00	4.86
A7-2	4.29	0.00	4.29
A8-1	3.53	0.00	3.53
A8-2	3.12	0.00	3.12

Hot spot stress range digunakan untuk mengetahui *damage cumulative* yang terjadi pada setiap titik kritis yang ditinjau. Dengan menggunakan kuva SN kelas D. Perhitungan *damage cumulative* untuk metode *simplified* dilakukan dengan persamaan 4.6. Pada persamaan 4.6 berikut merupakan perhitungan salah satu *damage cumulative* pada satu titik kritis yang telah disebutkan pada Gambar 4.52 yaitu dengan kode A1-1, untuk perhitungan *damage cumulative* secara lengkap dapat dilihat pada lampiran A. Berikut perhitungan *damage cumulative* pada titik kritis struktur dengan kode A1-1:

$\sigma_{hot} = 37.51$

$Hot\ stress\ range$

$$S_{ri} = 37.51 \frac{N}{mm^2} \qquad 4.2$$

$N_R = 1.00E + 04\ cycles$

$\alpha_i = 1$

$f_0 = 1\ operation\ factor$

$U = 30\ year = 9.46E + 08\ second$

$$L = \frac{f_0 U}{4 \log L} \qquad 4.3$$

$N_L = 1.95E + 08$

$Hot\ spot\ SN - cirve\ parameters\ (Class\ D)$:

$m = 3$

$\Delta m = 2$

$K_2 = 1.52E + 12$

$S_q = 53.4 \frac{N}{mm^2}$

$Weibull\ parameter$:

$\alpha = 0.93$

$\xi = 1.00455$

$$v_i = (\frac{S_q}{S_{Ri}})^{\xi} lnN_R = 13.32 \qquad 4.4$$

$$\mu_i = 1 - \frac{\left\{\gamma\left(1+\frac{m}{\xi}, v_i\right) - v_i^{-\Delta m/\xi} \gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi}, v_i\right)\right\}}{\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)} = 0.11481 \qquad 4.5$$

Fatigue Damage:

$$DM_i = \sum_{i=1}^{k} \frac{\alpha_i N_L}{K_2} \frac{S_{Rt}^m}{(lnN_R)^{\frac{m}{\xi}}} \mu_i \Gamma(1 + \frac{m}{\xi}) \qquad 4.6$$

DM = 0.007

Langkah selanjutnya memastikan bahwa setiap *damage cumulative* dari tiap titik kritis dihitung, hasilnya memiliki harga D<1 yang meruapakan syarat aman dari *damage cumulative*. Setelah diketahui bahwa harga semua D<1 maka, semua *damage cumulative* dikalikan dengan faktor operasi yang merupakan nilai dari probabilitas kondisi pembebanan.. Hasil perhitungan kelelahan struktur, pada Tabel 4.13

Tabel 4.13 Hasil perhitungan kelelahan struktur *yoke arm* saat tertambat dengan FSO Ladinda

Load Condition	Operation factor	Part															
		A1-1	A1-2	A2-1	A2-2	A3-1	A3-2	A4-1	A4-2	A5-1	A5-2	A6-1	A6-2	A7-1	A7-2	A8-1	A8-2
LC 1-2	0.13	5.88E-03	3.78E-03	4.14E-03	2.88E-03	6.56E-03	7.87E-03	1.08E-04	1.13E-03	1.58E-04	4.62E-05	5.14E-07	1.90E-07	1.07E-07	1.48E-08	9.93E-08	3.90E-09
LC 3-4	0.13	5.18E-11	4.12E-10	6.29E-01	3.68E-01	3.24E-01	1.98E-01	1.93E-01	1.04E-01	1.24E-05	7.08E-06	4.28E-05	1.90E-05	5.26E-08	1.48E-08	4.43E-07	6.30E-07
LC 5-6	0.13	5.18E-11	4.12E-10	6.29E-01	3.68E-01	3.24E-01	1.98E-01	1.93E-01	1.04E-01	1.24E-05	7.08E-06	4.28E-05	1.90E-05	5.26E-08	1.35E-07	4.43E-07	6.30E-07
LC 7-8	0.13	1.86E-06	2.25E-06	4.84E-07	6.95E-07	1.75E-06	9.53E-07	1.34E-06	1.34E-06	9.70E-11	4.18E-11	1.83E-11	8.48E-15	2.08E-14	4.39E-16	1.25E-13	4.17E-18
LC 9-10	0.13	3.45E-03	1.07E-03	5.42E-03	1.48E-03	7.69E-06	1.00E-06	5.50E-06	6.86E-08	1.52E-05	9.15E-06	1.08E-09	2.73E-11	1.37E-09	1.59E-10	4.42E-10	2.68E-11
LC 11-12	0.13	4.89E-03	3.22E-04	1.60E-04	3.96E-05	4.46E-04	5.28E-03	2.58E-10	5.40E-07	1.60E-09	1.06E-13	3.02E-17	1.64E-23	1.11E-20	7.40E-22	1.70E-16	9.65E-17
LC 13-14	0.13	7.09E-05	3.45E-05	7.38E-05	1.82E-05	6.43E-05	2.14E-05	5.11E-05	8.12E-05	5.18E-09	3.79E-09	4.50E-13	2.27E-18	0.000	6.61E-24	4.78E-14	1.03E-15
LC 15-16	0.13	2.04E-06	4.84E-06	2.52E-06	3.81E-06	1.99E-06	4.01E-06	2.06E-06	2.21E-10	9.87E-11	6.09E-10	5.22E-10	2.20E-10	5.14E-11	2.52E-10	2.42E-11	4.76E-36
Total Damage Ratio		1.79E-03	6.52E-04	1.58E-01	9.25E-02	8.19E-02	5.12E-02	4.82E-02	2.61E-02	2.47E-05	8.69E-06	1.08E-05	4.77E-06	2.67E-08	2.06E-08	1.23E-07	1.58E-07
Fatigue Life (years)		16797.77	46003.51	152.598	324.3443	366.4077	586.492	622.9561	1150.517	1213395	3453743	2783742	6286526	1.12E+09	1.46E+09	2.44E+08	1.9E+08

Dari Tabel 4.13 diperoleh hasil bahwa umur kelelahan struktur terendah merupakan 152 tahun. Umur kelelahan dihitung dengan menggunakan persamaan $fatigue\ life = \frac{design\ life}{D}$,menurut BKI "Volume 3 *Guidelines For Floating Production Installations 2013 Edition*". *Design life* yang terkecil menurut DNV RP C-203 merupakan 20 tahun. Pada penelitian kali ini, *design life* yang sudah ditetapkan merupakan 30 tahun. Dan D dari rumus *fatigue life* tersebut merupakan *total damage ratio* atau total dari setiap perhitungan *damage cumulative* dari tiap titik kritis yang ditinjau dikalikan dengan *operation factor*.

[Halaman Ini Sengaja Dikosongkan]

BAB V

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat dibuat berdasarkan pengerjaan Tugas Akhir ini adalah :

1. Respon struktur FSO Ladinda dan *Yoke arm* akibat beban gelombang adalah sebagai berikut :
   - RAO FSO Ladinda pada saat *free floating*, nilai terbesar terjadi pada kondisi *light* dengan *surge* tertinggi ialah sebesar 5.78 (m/m) yaitu pada *heading* 0°, *sway* tertinggi pada *heading* 90° sebesar 6.203 (m/m), dan *heave* tertinggi sebesar 0,92 (m/m) pada *heading* 0°. Untuk gerak osilasi rotasional *roll* maksimum pada *heading* 90° sebesar 4.512 (deg/m), *pitch* maksimum sebesar 0.633 (deg/m) pada *heading* 180^0, dan *yaw* maksimum sebesar 2.032 (deg/m) pada *heading* 45°.
   - RAO *Yoke arm*, nilai terbesar pada saat tertambat dengan FSO Ladinda kondisi *light load* dengan nilai *surge* tertinggi ialah sebesar 0.17 (m/m) yaitu pada *heading* 180°, *sway* tertinggi pada *heading* 45° sebesar 0.181 (m/m), dan *heave* tertinggi sebesar 0.98 (m/m) pada *heading* 90°. Untuk gerak osilasi rotasional *roll* maksimum pada *heading* 45° sebesar 0.072 (deg/m), *pitch* maksimum sebesar 0.3878 (deg/m) pada *heading* 45^0, dan *yaw* maksimum sebesar 0.0615 (deg/m) pada *heading* 45°.

2. Dari hasil perhitungan umur kelelahan struktur, diperoleh hasil bahwa struktur *Yoke arm* memiliki harga D < 1 sehingga struktur tersebut dapat dikatakan aman untuk melakukan operasi dengan umur kelelahan struktur 152 tahun.

[Halaman Ini Sengaja Dikosongkan]

DAFTAR PUSTAKA

ABS. 1999. *The Application of Synthetic Ropes For Offshore Mooring*. USA: American Bureau Shipping.

ABS. 2014. *Fatigue Assessment of Offshore Structures*. USA: American Bureau Shipping.

ABS. 2014. *Single Point Moorings*. USA: American Bureau Shipping

American Petroleum Institute. (2001). " API RP 2P" . Washington. DC.

American Petrolium Institute. (2005). "API RP2SK 3_{rd} edition". Washington. DC.

Aminnulloh, M Nasyih. 2009. Desain Mooring Tower Untuk Terminal Floating storage Offloading (FSO) di Laut Jawa. Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan. ITS Surabaya

API RP 2SK. (1996). *Recommended Practice for Design and Analysis of Station Keeping Systems for Floating Structures*. Washington. DC

Bai, Jushan. 2003. *Inferential Theory for Factor Models of Large Dimensions*. Journal of the Econometric Society. Volume 71, Issue 1, pages 135-171.

BKI. 2013. *Volume 3 Guidelines For Floating Production Installations*, Jakarta. Indonesia.

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

Djatmiko, E. B. and Murdijanto.2003. *Seakeeping: Perilaku Bangunan Apung di atas Gelombang*, Surabaya: Jurusan Teknik Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

DNV-OS-E301. 2004. *Positioning Mooring*, Norway: Det Norske Veritas.

DNV-CN30-7. 2014. Fatigue Assesment of Ship Structures, Norway: Dt Norske Veritas. Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan. ITS Surabaya.

Nugraha, Adithya Wahyu. 2009. Studi Optimasi Desain Mooring Tower untuk Terminal FSO di Laut Jawa.

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

Ramadhan, Afrizal. 2010. *Analisa Kekuatan Memanjang Doble Hull CPO Barge Pengaruh Heaving Pitching couple dan Distribusi Beban.* Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan. ITS Surabaya

White, G.J., Ayyub, B.M., Mansour,A.E., dan P.H. Wirsching. 1996. *Probability Based Design Requirements for Longitudinally Stiffened Panels in Ship Structures*. 7th ASCE Speciality Conference on Probabilistic Mechanics and Structural Realibility, Worcester, MA.

.

LAMPIRAN A

PERHITUNGAN UMUR KELELAHAN STRUKTUR *YOKE ARM*

LC-1			
Joint Code	Maximum Principal Stress [Mpa]	Factor	Hot-spot Stress [Mpa]
A1-1	61.49	1.12	68.87328
A1-2	54.08	1.12	60.57296
A2-1	64.12	1.12	71.80992
A2-2	56.242	1.12	62.99104
A3-1	40.95	1.12	45.85952
A3-2	35.86	1.12	40.16544
A4-1	40.91	1.12	45.82032
A4-2	35.83	1.12	40.12848
A5-1	40.63	1.12	45.51008
A5-2	35.59	1.12	39.8552
A6-1	6.1382	1.12	6.874784
A6-2	5.2838	1.12	5.917856
A7-1	4.34	1.12	4.8608
A7-2	3.83	1.12	4.2896
A8-1	3.15	1.12	3.530688
A8-2	2.79	1.12	3.1192

LC-2			
Joint Code	Maximum Principal Stress [Mpa]	Factor	Hot-spot Stress [Mpa]
A1-1	7.398	1.12	8.29
A1-2	5.748	1.12	6.44
A2-1	6.12	1.12	6.86
A2-2	4.89	1.12	5.48
A3-1	2.29	1.12	2.56
A3-2	3.10	1.12	3.48
A4-1	4.5827	1.12	5.13
A4-2	2.86	1.12	3.20
A5-1	0.00	1.12	0.01
A5-2	0.00	1.12	0.000750
A6-1	0.00012	1.12	0.000134
A6-2	0.00001543	1.12	0.000017
A7-1	0.0000564	1.12	0.000063
A7-2	0.0000253	1.12	0.000028
A8-1	0.0000765	1.12	0.000086
A8-2	0.0000465	1.12	0.000052

LC-3			
Joint Code	Maximum Principal Stress [Mpa]	Factor	Hot-spot Stress [Mpa]
A1-1	40.08	1.12	44.89
A1-2	36.7338	1.12	41.14
A2-1	35.49	1.12	39.75
A2-2	33.73	1.12	37.78
A3-1	39.87	1.12	44.65
A3-2	40.37	1.12	45.21
A4-1	20.83	1.12	23.33
A4-2	27.65	1.12	30.97
A5-1	19.08	1.12	21.37
A5-2	14.54	1.12	16.28
A6-1	5.69	1.12	6.37

LC-4			
Joint Code	Maximum Principal Stress [Mpa]	Factor	Hot-spot Stress [Mpa]
A1-1	6.59	1.12	7.38
A1-2	6.83	1.12	7.65
A2-1	5.046	1.12	5.65
A2-2	5.41	1.12	6.06
A3-1	6.48	1.12	7.26
A3-2	5.74	1.12	6.43
A4-1	6.145	1.12	6.88
A4-2	4.159	1.12	4.66
A5-1	3.24	1.12	3.63
A5-2	2.15	1.12	2.41
A6-1	0.65	1.12	0.73

A6-2	4.27	1.12	4.78
A7-1	3.867	1.12	4.33
A7-2	2.576	1.12	2.89
A8-1	3.687	1.12	4.13
A8-2	1.968	1.12	2.20

A6-2	0.14	1.12	0.16
A7-1	0.19	1.12	0.21
A7-2	0.10	1.12	0.11
A8-1	0.06	1.12	0.07
A8-2	0.07	1.12	0.08

LC-5			
Joint Code	Maximum Principal Stress [Mpa]	Factor	Hot-spot Stress [Mpa]
A1-1	110.53	1.12	123.79
A1-2	97.71	1.12	109.44
A2-1	26.07	1.12	29.19
A2-2	22.636	1.12	25.35
A3-1	184.65	1.12	206.81
A3-2	163.60	1.12	183.23
A4-1	43.13	1.12	48.31
A4-2	37.83	1.12	42.37
A5-1	25.125	1.12	28.14
A5-2	21.8	1.12	24.42
A6-1	6.687	1.12	7.49
A6-2	5.92	1.12	6.63
A7-1	4.55	1.12	5.09
A7-2	2.98	1.12	3.34
A8-1	3.69	1.12	4.13
A8-2	2.30	1.12	2.57

LC-6			
Joint Code	Maximum Principal Stress [Mpa]	Factor	Hot-spot Stress [Mpa]
A1-1	109.73	1.12	122.90
A1-2	96.50	1.12	108.08
A2-1	114.47	1.12	128.21
A2-2	100.41	1.12	112.46
A3-1	109.13	1.12	122.23
A3-2	96.04	1.12	107.57
A4-1	110.27	1.12	123.50
A4-2	96.52	1.12	108.10
A5-1	15.597	1.12	17.47
A5-2	13.285	1.12	14.88
A6-1	18.893	1.12	21.16016
A6-2	16.293	1.12	18.24816
A7-1	7.74	1.12	8.67306
A7-2	6.83	1.12	7.65218
A8-1	8.58	1.12	9.60803
A8-2	7.55	1.12	8.45141

LC-7			
Joint Code	Maximum Principal Stress [Mpa]	Factor	Hot-spot Stress [Mpa]
A1-1	6.59	1.12	7.38
A1-2	6.83	1.12	7.65
A2-1	5.046	1.12	5.65
A2-2	5.41	1.12	6.06
A3-1	6.48	1.12	7.26
A3-2	5.74	1.12	6.43
A4-1	6.145	1.12	6.88

LC-8			
Joint Code	Maximum Principal Stress [Mpa]	Factor	Hot-spot Stress [Mpa]
A1-1	0.06943	1.12	0.08
A1-2	0.05608	1.12	0.06
A2-1	0.06599	1.12	0.07
A2-2	0.05822	1.12	0.07
A3-1	0.04195	1.12	0.05
A3-2	0.03786	1.12	0.04
A4-1	0.04216	1.12	0.05

A4-2	6.145	1.12	6.88
A5-1	0.9073	1.12	1.02
A5-2	0.7729	1.12	0.87
A6-1	0.65	1.12	0.73
A6-2	0.14	1.12	0.16
A7-1	0.45045	1.12	0.50
A7-2	0.39743	1.12	0.45
A8-1	0.49901	1.12	0.56
A8-2	0.43894	1.12	0.49

A4-2	0.03783	1.12	0.04
A5-1	0.00045	1.12	0.00
A5-2	0.0067	1.12	0.01
A6-1	0.000056	1.12	0.00
A6-2	0.000076	1.12	0.00009
A7-1	0.000059	1.12	0.00007
A7-2	0.000025	1.12	0.00003
A8-1	0.000080	1.12	0.00009
A8-2	0.000047	1.12	0.00005

LC-9			
Joint Code	Maximum Principal Stress [Mpa]	Factor	Hot-spot Stress [Mpa]
A1-1	31.44	1.12	35.21
A1-2	24.97	1.12	27.96
A2-1	34.13	1.12	38.23
A2-2	26.534	1.12	29.72
A3-1	10.95	1.12	12.26
A3-2	7.86	1.12	8.81
A4-1	10.91	1.12	12.22
A4-2	5.83	1.12	6.53
A5-1	10.63	1.12	11.91
A5-2	9.59	1.12	10.74
A6-1	2.1382	1.12	2.39
A6-2	1.2838	1.12	1.44
A7-1	1.97	1.12	2.20
A7-2	1.30	1.12	1.45
A8-1	1.70	1.12	1.90
A8-2	0.99	1.12	1.11

LC-10			
Joint Code	Maximum Principal Stress [Mpa]	Factor	Hot-spot Stress [Mpa]
A1-1	2.08	1.12	2.33
A1-2	1.7338	1.12	1.94
A2-1	1.99	1.12	2.23
A2-2	1.73	1.12	1.94
A3-1	2.29	1.12	2.56
A3-2	2.10	1.12	2.36
A4-1	2.8138	1.12	3.15
A4-2	2.46	1.12	2.76
A5-1	0.708	1.12	0.79
A5-2	0.622	1.12	0.70
A6-1	0.67	1.12	0.75
A6-2	0.58	1.12	0.65
A7-1	0.43	1.12	0.48
A7-2	0.30	1.12	0.33
A8-1	0.47	1.12	0.52
A8-2	0.29	1.12	0.32

LC-11			
Joint Code	Maximum Principal Stress [Mpa]	Factor	Hot-spot Stress [Mpa]
A1-1	32.56	1.12	36.47
A1-2	18.6538	1.12	20.89
A2-1	16.86	1.12	18.88

LC-12			
Joint Code	Maximum Principal Stress [Mpa]	Factor	Hot-spot Stress [Mpa]
A1-1	1.08	1.12	1.21
A1-2	0.38	1.12	0.43
A2-1	0.98	1.12	1.10

A2-2	12.743	1.12	14.27
A3-1	20.79	1.12	23.29
A3-2	33.95	1.12	38.02
A4-1	2.483	1.12	2.78
A4-2	5.65	1.12	6.33
A5-1	1.65	1.12	1.85
A5-2	0.254	1.12	0.28
A6-1	0.00169	1.12	0.00
A6-2	0.0043	1.12	0.005
A7-1	0.004876	1.12	0.005
A7-2	0.00325	1.12	0.004
A8-1	0.00468	1.12	0.005
A8-2	0.00254	1.12	0.003

A2-2	0.73	1.12	0.82
A3-1	1.29	1.12	1.44
A3-2	1.98	1.12	2.22
A4-1	1.38	1.12	1.55
A4-2	0.56	1.12	0.63
A5-1	0.0608	1.12	0.07
A5-2	0.022	1.12	0.02
A6-1	0.047	1.12	0.05
A6-2	0.01	1.12	0.01
A7-1	0.01	1.12	0.02
A7-2	0.01	1.12	0.01
A8-1	0.07	1.12	0.08
A8-2	0.06	1.12	0.07

LC-13			
Joint Code	Maximum Principal Stress [Mpa]	Factor	Hot-spot Stress [Mpa]
A1-1	14.48	1.12	16.22
A1-2	12.42	1.12	13.91
A2-1	14.90	1.12	16.69
A2-2	12.27	1.12	13.74
A3-1	14.53	1.12	16.27
A3-2	12.60	1.12	14.11
A4-1	14.02	1.12	15.71
A4-2	14.43	1.12	16.16
A5-1	2.07	1.12	2.32
A5-2	1.91	1.12	2.14
A6-1	0.31	1.12	0.35
A6-2	0.03	1.12	0.03
A7-1	0.03	1.12	0.03
A7-2	0.01	1.12	0.01
A8-1	0.20	1.12	0.22
A8-2	0.10	1.12	0.11

LC-14			
Joint Code	Maximum Principal Stress [Mpa]	Factor	Hot-spot Stress [Mpa]
A1-1	1.08	1.12	1.10
A1-2	0.38	1.12	0.82
A2-1	0.98	1.12	1.44
A2-2	0.73	1.12	2.22
A3-1	1.29	1.12	1.44
A3-2	1.98	1.12	2.22
A4-1	1.38	1.12	1.55
A4-2	0.56	1.12	0.63
A5-1	0.0608	1.12	0.07
A5-2	0.022	1.12	0.02
A6-1	0.047	1.12	0.00
A6-2	0.01	1.12	0.00
A7-1	0.020	1.12	0.00
A7-2	0.008	1.12	0.01
A8-1	0.010	1.12	0.00
A8-2	0.006	1.12	0.01

LC-15			
Joint Code	Maximum Principal Stress [Mpa]	Factor	Hot-spot Stress [Mpa]
A1-1	7.5648	1.12	8.47
A1-2	6.6424	1.12	7.44
A2-1	7.89	1.12	8.84
A2-2	6.93	1.12	7.76
A3-1	7.52	1.12	8.43
A3-2	6.61	1.12	7.40
A4-1	7.60	1.12	8.51
A4-2	6.65	1.12	7.45
A5-1	1.07	1.12	1.20
A5-2	0.91	1.12	1.02
A6-1	1.31	1.12	1.47
A6-2	1.27	1.12	1.42
A7-1	1.0687	1.12	1.20
A7-2	0.7986	1.12	0.89
A8-1	1.0978	1.12	1.23
A8-2	0.687	1.12	0.77

LC-16			
Joint Code	Maximum Principal Stress [Mpa]	Factor	Hot-spot Stress [Mpa]
A1-1	0.000568	1.12	0.00064
A1-2	0.000498	1.12	0.00056
A2-1	0.000596	1.12	0.00067
A2-2	0.000523	1.12	0.00059
A3-1	0.000566	1.12	0.00063
A3-2	0.000496	1.12	0.00056
A4-1	0.000572	1.12	0.00064
A4-2	0.000500	1.12	0.00056
A5-1	0.000024	1.12	0.00003
A5-2	0.000087	1.12	0.00010
A6-1	0.000032	1.12	0.00004
A6-2	0.000012	1.12	0.00001
A7-1	0.00001197	1.12	0.00001
A7-2	0.000007968	1.12	0.00001
A8-1	0.000009687	1.12	0.00001
A8-2	0.00000785	1.12	0.00001

LC-1 / LC-2			
Joint Code	Hot-spot Stress Maximum Tension [Mpa]	Hot-spot Stress Minimum Tension [Mpa]	Hot-spot Stress Range [Mpa]
A1-1	68.87	8.29	60.59
A1-2	60.57	6.44	54.14
A2-1	71.81	6.86	64.95
A2-2	62.99	5.48	57.51
A3-1	45.86	2.56	43.30
A3-2	40.17	3.48	36.69
A4-1	45.82	5.13	40.69
A4-2	40.13	3.20	36.93
A5-1	45.51	0.01	45.51
A5-2	39.86	0.00	39.85
A6-1	6.87	0.00	6.87
A6-2	5.92	0.00	5.92
A7-1	4.86	0.00	4.86
A7-2	4.29	0.00	4.29
A8-1	3.53	0.00	3.53
A8-2	3.12	0.00	3.12

LC-3 / LC-4			
Joint Code	Hot-spot Stress Maximum Tension [Mpa]	Hot-spot Stress Minimum Tension [Mpa]	Hot-spot Stress Range [Mpa]
A1-1	44.89	7.38	37.51
A1-2	41.14	7.65	33.49
A2-1	39.75	5.65	34.10
A2-2	37.78	6.06	31.72
A3-1	44.65	7.26	37.39
A3-2	45.21	6.43	38.79
A4-1	23.33	6.88	16.45
A4-2	30.97	4.66	26.31
A5-1	21.37	3.63	17.74
A5-2	16.2848	2.41	13.88

A6-1	6.3728	0.73	5.64
A6-2	4.7824	0.16	4.63
A7-1	4.3310	0.21	4.12
A7-2	2.8851	0.11	2.78
A8-1	4.1294	0.07	4.06
A8-2	2.2042	0.08	2.13

LC-5 / LC-6			
Joint Code	Hot-spot Stress Maximum Tension [Mpa]	Hot-spot Stress Minimum Tension [Mpa]	Hot-spot Stress Range [Mpa]
A1-1	123.79	122.90	0.90
A1-2	109.44	108.08	1.36
A2-1	29.19	128.21	99.01
A2-2	25.35	112.46	87.11
A3-1	206.81	122.23	84.58
A3-2	183.23	107.57	75.67
A4-1	48.31	123.50	75.20
A4-2	42.37	108.10	65.73
A5-1	28.14	17.47	10.67
A5-2	24.42	14.88	9.54
A6-1	7.49	21.16	13.67
A6-2	6.63	18.25	11.62
A7-1	5.09	8.67	3.58
A7-2	3.34	7.65	4.32
A8-1	4.13	9.61	5.48
A8-2	2.57	8.45	5.88

LC-7 / LC-8			
Joint Code	Hot-spot Stress Maximum Tension [Mpa]	Hot-spot Stress Minimum Tension [Mpa]	Hot-spot Stress Range [Mpa]
A1-1	7.38	0.08	7.30
A1-2	7.65	0.06	7.58
A2-1	5.65	0.07	5.58
A2-2	6.06	0.07	6.00

A3-1	7.26	0.05	7.21
A3-2	6.43	0.04	6.39
A4-1	6.88	0.05	6.84
A4-2	6.88	0.04	6.84
A5-1	1.02	0.00	1.02
A5-2	0.87	0.01	0.86
A6-1	0.73	0.00	0.73
A6-2	0.16	0.00009	0.16
A7-1	0.19	0.00007	0.19
A7-2	0.09	0.00003	0.09
A8-1	0.27	0.00009	0.27
A8-2	0.0342	0.00005	0.03

LC-9 / LC-10			
Joint Code	**Hot-spot Stress Maximum Tension [Mpa]**	**Hot-spot Stress Minimum Tension [Mpa]**	**Hot-spot Stress Range [Mpa]**
A1-1	35.21	2.33	32.88
A1-2	27.96	1.94	26.02
A2-1	38.23	2.23	36.00
A2-2	29.72	1.94	27.78
A3-1	12.26	2.56	9.69
A3-2	8.81	2.36	6.45
A4-1	12.22	3.15	9.07
A4-2	6.53	2.76	3.77
A5-1	11.91	0.79	11.12
A5-2	10.74	0.70	10.04
A6-1	2.39	0.75	1.64
A6-2	1.44	0.65	0.79
A7-1	2.20	0.48	1.73
A7-2	1.45	0.33	1.12
A8-1	1.90	0.52	1.38
A8-2	1.11	0.32	0.79

LC-11 / LC-12			
Joint Code	Hot-spot Stress Maximum Tension [Mpa]	Hot-spot Stress Minimum Tension [Mpa]	Hot-spot Stress Range [Mpa]
A1-1	36.47	1.21	35.26
A1-2	20.89	0.43	20.47
A2-1	18.88	1.10	17.79
A2-2	14.27	0.82	13.45
A3-1	23.29	1.44	21.84
A3-2	38.02	2.22	35.80
A4-1	2.78	1.55	1.24
A4-2	6.33	0.63	5.70
A5-1	1.85	0.07	1.78
A5-2	0.28	0.02	0.26
A6-1	0.00	0.05	0.05
A6-2	0.00	0.01	0.00
A7-1	0.01	0.02	0.01
A7-2	0.00	0.01	0.01
A8-1	0.01	0.08	0.07
A8-2	0.00	0.07	0.06

LC-13 / LC-14			
Joint Code	Hot-spot Stress Maximum Tension [Mpa]	Hot-spot Stress Minimum Tension [Mpa]	Hot-spot Stress Range [Mpa]
A1-1	16.22	1.10	15.12
A1-2	13.91	0.82	13.09
A2-1	16.69	1.44	15.24
A2-2	13.74	2.22	11.52
A3-1	16.27	1.44	14.83
A3-2	14.11	2.22	11.90
A4-1	15.71	1.55	14.16
A4-2	16.16	0.63	15.53

A5-1	2.32	0.07	2.25
A5-2	2.14	0.02	2.11
A6-1	0.35	0.00	0.35
A6-2	0.03	0.00	0.03
A7-1	0.03	0.00	0.03
A7-2	0.01	0.01	0.00
A8-1	0.22	0.00	0.22
A8-2	0.11	0.01	0.10

LC-15 / LC-16			
Joint Code	Hot-spot Stress Maximum Tension [Mpa]	Hot-spot Stress Minimum Tension [Mpa]	Hot-spot Stress Range [Mpa]
A1-1	7.44	0.000636	7.44
A1-2	8.84	0.000557	8.84
A2-1	7.76	0.000668	7.76
A2-2	8.43	0.000585	8.43
A3-1	7.40	0.000634	7.40
A3-2	8.51	0.000555	8.51
A4-1	7.45	0.000640	7.45
A4-2	1.20	0.000560	1.20
A5-1	1.02	0.000027	1.02
A5-2	1.47	0.000097	1.47
A6-1	1.42	0.000036	1.42
A6-2	1.20	0.000013	1.20
A7-1	0.89	0.000013	0.89
A7-2	1.23	0.000009	1.23
A8-1	0.77	0.000011	0.77
A8-2	0.00	0.000009	0.00

LC 1-2

A1-1

σ_{hot}	=	37.51	
Hot stress range			
S_{Ri}	=	37.51	N/mm^2
N_R	=	1.00E+04	cycles
α_i	=	1	
f_0	=	1	operation factor
U	=	30	year
	=	9.46E+08	second
L	=	25.15	m
	=	$\frac{f_0 U}{4 \log L}$	
N_L	=	1.69E+08	
Hot-spot SN-curve parameters (Class D):			
m	=	3	
Δm	=	2	
K_2	=	1.52E+12	
S_q	=	53.4	N/mm^2
Weibull parameter			
α	=	0.93	
ξ	=	1.045496	
ν_i	=	$\left(\frac{S_q}{S_{Ri}}\right)^{\xi} lnN_R$	= 13.32
$1+\frac{m}{\xi}$			= 3.87
$1+\frac{m+\Delta m}{\xi}$			= 5.78
$\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)$			= 5.11
$\gamma\left(1+\frac{m}{\xi}, \nu_i\right)$			= 5.101569
$\gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi}, \nu_i\right)$			= 82.56739

$v_i^{-\Delta m/\xi}$

= 0.00706

$$\mu_i = \frac{1 - \left\{\gamma\left(1+\frac{m}{\xi}, v_i\right) - v_i^{-\Delta m/\xi}\,\gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi}, v_i\right)\right\}}{\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)}$$

= 0.114809

Fatigue damage

$$DM_i = \sum_{i=1}^{k} \frac{\alpha_i N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)$$

DM = 0.006

A1-2

σ_{hot} = 33.49

Hot stress range

S_{Ri} = 33.49 N/mm^2

N_R = 1.00E+04 cycles

α_i = 1

f_0 = 1 operation factor

U = 30 year

= 9.46E+08 second

L = 25.15 m

$$= \frac{f_0 U}{4 \log L}$$

N_L = 1.69E+08

Hot-spot SN-curve parameters (Class D):

m = 3

Δm = 2

K_2 = 1.52E+12

S_q = 53.4 N/mm^2

Weibull parameter

α = 0.8

ξ = 1.095051

ν_i = $\left(\frac{S_{ri}}{S_{Ri}}\right)^{\xi} lnN_R$ = 15.35

$1+\frac{m}{\xi}$ = 3.74

$1+\frac{m+\Delta m}{\xi}$ = 5.57

$\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)$ = 4.37

$\gamma\left(1+\frac{m}{\xi},\ \nu_i\right)$ = 4.368534

$\gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi},\ \nu_i\right)$ = 58.16273

$\nu_i^{-\Delta m/\xi}$ = 0.00682

μ_i = $1-\frac{\left\{\gamma\left(1+\frac{m}{\xi},\ \nu_i\right)-\ \nu_i^{-\Delta m/\xi}\,\gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi},\ \nu_i\right)\right\}}{\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)}$

= 0.090882

Fatigue damage

$$DM_i=\sum_{i=1}^{k}\frac{\alpha_i N_L}{K_2}\frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}}\mu_i\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)$$

DM = 3.78E-03

A2-1

σ_{hot} = 34.10

Hot stress range

S_{Ri} = 34.10 N/mm^2

N_R = 1.00E+04 cycles

α_i = 1

f_0 = 1 operation factor

U = 30 year

	=	9.46E+08	second
L	=	25.15	m
	=	$\frac{f_0 U}{4 \log L}$	
N_L	=	1.69E+08	

Hot-spot SN-curve parameters (Class D):

m	=	3	
Δm	=	2	
K_2	=	1.52E+12	
S_q	=	53.4	N/mm^2

Weibull parameter

α	=	0.8		
ξ	=	1.095051		
ν_i	=	$\left(\frac{S_q}{S_{Ri}}\right)^{\xi} lnN_R$	=	15.05
$1+\frac{m}{\xi}$			=	3.74
$1+\frac{m+\Delta m}{\xi}$			=	5.57
$\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)$			=	4.37
$\gamma\left(1+\frac{m}{\xi}, \nu_i\right)$			=	4.368405
$\gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi}, \nu_i\right)$			=	58.1442
$\nu_i^{-\Delta m/\xi}$	=	0.00707		
μ_i	=	$1-\frac{\left\{\gamma\left(1+\frac{m}{\xi}, \nu_i\right) - \nu_i^{-\Delta m/\xi}\gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi}, \nu_i\right)\right\}}{\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)}$		
	=	0.094178		

Fatigue damage

$$DM_i = \sum_{i=1}^{k} \frac{\alpha_i N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)$$

DM = 4.14E-03

A4-1

σ_{hot} = 16.45

Hot stress range

S_{Ri} = 16.45 N/mm^2

N_R = 1.00E+04 cycles

α_i = 1

f_0 = 1 operation factor

U = 30 year

= 9.46E+08 second

L = 25.15 m

$$= \frac{f_0 U}{4 \log L}$$

N_L = 1.69E+08

Hot-spot SN-curve parameters (Class D):

m = 3

Δm = 2

K_2 = 1.52E+12

S_q = 53.4 N/mm^2

Weibull parameter

α = 0.8

ξ = 1.095051

ν_i = $\left(\frac{S_q}{S_{Ri}}\right)^{\xi} lnN_R$ = 33.45

$1 + \frac{m}{\xi}$ = 3.74

$1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}$ = 5.57

$\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$ = 4.37

$\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, \nu_i\right)$ = 4.368993

$$\gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi},\ \nu_i\right) = 58.2402$$

$$\nu_i^{-\Delta m/\xi} = 0.00164$$

$$\mu_i = \frac{1-\left\{\gamma\left(1+\frac{m}{\xi},\ \nu_i\right) - \nu_i^{-\Delta m/\xi}\,\gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi},\ \nu_i\right)\right\}}{\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)}$$

$$= 0.021917$$

Fatigue damage

$$DM_i = \sum_{i=1}^{k} \frac{\alpha_i N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)$$

DM = 1.08E-04

A2-2

σ_{hot} = 31.72

Hot stress range

S_{Ri}	=	31.72	N/mm^2
N_R	=	1.00E+04	cycles
α_i	=	1	
f_0	=	1	operation factor
U	=	30	year
	=	9.46E+08	second
L	=	25.15	m

$$= \frac{f_0 U}{4 \log L}$$

N_L = 1.69E+08

Hot-spot SN-curve parameters (Class D):

m	=	3	
Δm	=	2	
K_2	=	1.52E+12	
S_q	=	53.4	N/mm^2

Weibull parameter

α = 0.8

ξ = 1.095051

ν_i = $\left(\frac{S_q}{S_{Ri}}\right)^{\xi} lnN_R$ = 16.29

$1+\frac{m}{\xi}$ = 3.74

$1+\frac{m+\Delta m}{\xi}$ = 5.57

$\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)$ = 4.37

$\gamma\left(1+\frac{m}{\xi},\ \nu_i\right)$ = 4.368785

$\gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi},\ \nu_i\right)$ = 58.20141

$\nu_i^{-\Delta m/\xi}$ = 0.00611

μ_i = $1-\frac{\left\{\gamma\left(1+\frac{m}{\xi},\ \nu_i\right)-\ \nu_i^{-\Delta m/\xi}\,\gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi},\ \nu_i\right)\right\}}{\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)}$

= 0.081501

Fatigue damage

$$DM_i=\sum_{i=1}^{k}\frac{\alpha_i N_L}{K_2}\frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}}\mu_i\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)$$

DM = 2.88E-03

A3-1

σ_{hot} = 37.39

Hot stress range

S_{Ri} = 37.39 N/mm^2

N_R = 1.00E+04 cycles

α_i	=	1	
f_0	=	1	operation factor
U	=	30	year
	=	9.46E+08	second
L	=	25.15	m
	=	$\frac{f_0 U}{4 \log L}$	
N_L	=	1.69E+08	

Hot-spot SN-curve parameters (Class D):

m	=	3	
Δm	=	2	
K_2	=	1.52E+12	
S_q	=	53.4	N/mm^2

Weibull parameter

α	=	0.8		
ξ	=	1.095051		
ν_i	=	$\left(\frac{S_q}{S_{Ri}}\right)^{\xi} lnN_R$	=	13.61
$1+\frac{m}{\xi}$			=	3.74
$1+\frac{m+\Delta m}{\xi}$			=	5.57
$\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)$			=	4.37
$\gamma\left(1+\frac{m}{\xi}, \nu_i\right)$			=	4.36706
$\gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi}, \nu_i\right)$			=	57.97315
$\nu_i^{-\Delta m/\xi}$	=	0.00850		
μ_i	=	$1-\frac{\left\{\gamma\left(1+\frac{m}{\xi}, \nu_i\right) - \nu_i^{-\Delta m/\xi}\gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi}, \nu_i\right)\right\}}{\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)}$		

= 0.113215

Fatigue damage

$$DM_i = \sum_{i=1}^{k} \frac{\alpha_i N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$$

DM = 6.56E-03

A3-2

σ_{hot} = 38.79

Hot stress range

S_{Ri} = 38.78672 N/mm^2

N_R = 1.00E+04 cycles

α_i = 1

f_0 = 1 operation factor

U = 30 year

= 9.46E+08 second

L = 25.15 m

$$= \frac{f_0 U}{4 \log L}$$

N_L = 1.69E+08

Hot-spot SN-curve parameters (Class D):

m = 3

Δm = 2

K_2 = 1.52E+12

S_q = 53.4 N/mm^2

Weibull parameter

α = 0.8

ξ = 1.095051

ν_i = $\left(\frac{S_q}{S_{Ri}}\right)^{\xi} lnN_R$ = 13.07

$1 + \frac{m}{\xi}$ = 3.74

$1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}$ = 5.57

$\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$ = 4.37

$$\gamma\left(1+\frac{m}{\xi},\ v_i\right) = 4.366012$$

$$\gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi},\ v_i\right) = 57.85452$$

$$v_i^{-\Delta m/\xi} = 0.00914$$

$$\mu_i = \frac{1-\left\{\gamma\left(1+\frac{m}{\xi},\ v_i\right) - v_i^{-\Delta m/\xi}\,\gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi},\ v_i\right)\right\}}{\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)}$$

$$= 0.121766$$

Fatigue damage

$$DM_i = \sum_{i=1}^{k} \frac{\alpha_i N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)$$

DM = 7.87E-03

A4-1

σ_{hot} = 16.45

Hot stress range

S_{Ri}	=	16.45	N/mm^2
N_R	=	1.00E+04	cycles
α_i	=	1	
f_0	=	1	operation factor
U	=	30	year
	=	9.46E+08	second
L	=	25.15	m

$$= \frac{f_0 U}{4 \log L}$$

N_L = 1.69E+08

Hot-spot SN-curve parameters (Class D):

m = 3

Δm = 2

K_2 = 1.52E+12

S_q = 53.4 N/mm^2

Weibull parameter

α = 0.8

ξ = 1.095051

ν_i = $\left(\frac{S_q}{S_{Ri}}\right)^{\xi} lnN_R$ = 33.45

$1+\frac{m}{\xi}$ = 3.74

$1+\frac{m+\Delta m}{\xi}$ = 5.57

$\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)$ = 4.37

$\gamma\left(1+\frac{m}{\xi}, \nu_i\right)$ = 4.368993

$\gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi}, \nu_i\right)$ = 58.2402

$\nu_i^{-\Delta m/\xi}$ = 0.00164

μ_i = $1-\frac{\left\{\gamma\left(1+\frac{m}{\xi}, \nu_i\right) - \nu_i^{-\Delta m/\xi}\gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi}, \nu_i\right)\right\}}{\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)}$

= 0.021917

Fatigue damage

$$DM_i = \sum_{i=1}^{k} \frac{\alpha_i N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)$$

DM = 1.08E-04

A4-2

σ_{hot}	=	26.31	

Hot stress range

S_{Ri}	=	26.31	N/mm^2
N_R	=	1.00E+04	cycles
α_i	=	1	
f_0	=	1	operation factor
U	=	30	year
	=	9.46E+08	second
L	=	25.15	m
	=	$\frac{f_0 U}{4 \log L}$	
N_L	=	1.69E+08	

Hot-spot SN-curve parameters (Class D):

m	=	3	
Δm	=	2	
K_2	=	1.52E+12	
S_q	=	53.4	N/mm^2

Weibull parameter

α	=	0.8		
ξ	=	1.095051		
ν_i	=	$\left(\frac{S_q}{S_{Ri}}\right)^{\xi} lnN_R$	=	19.99
$1+\frac{m}{\xi}$			=	3.74
$1+\frac{m+\Delta m}{\xi}$			=	5.57
$\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)$			=	4.37
$\gamma\left(1+\frac{m}{\xi}, \nu_i\right)$			=	4.368985
$\gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi}, \nu_i\right)$			=	58.2379

$\nu_i^{-\Delta m/\xi}$ = 0.00421

$$\mu_i = 1 - \frac{\left\{\gamma\left(1+\frac{m}{\xi}, \nu_i\right) - \nu_i^{-\Delta m/\xi}\,\gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi}, \nu_i\right)\right\}}{\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)}$$

= 0.056085

Fatigue damage

$$DM_i = \sum_{i=1}^{k} \frac{\alpha_i N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)$$

DM = 1.13E-03

A5-1

σ_{hot} = 17.7408

Hot stress range

S_{Ri}	=	17.7408	N/mm^2
N_R	=	1.00E+04	cycles
α_i	=	1	
f_0	=	1	operation factor
U	=	30	year
	=	9.46E+08	second
L	=	25.15	m

$$= \frac{f_0 U}{4 \log L}$$

N_L = 1.69E+08

Hot-spot SN-curve parameters (Class D):

m	=	3	
Δm	=	2	
K_2	=	1.52E+12	
S_q	=	53.4	N/mm^2

Weibull parameter

α	=	0.8	
ξ	=	1.095051	

ν_i = $\left(\frac{S_q}{S_{Ri}}\right)^{\xi} lnN_R$ = 30.78

$1+\frac{m}{\xi}$ = 3.74

$1+\frac{m+\Delta m}{\xi}$ $1.1-0.35\frac{L-100}{300}$ = 5.57

$\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)$ = 4.37

$\gamma\left(1+\frac{m}{\xi},\ \nu_i\right)$ = 4.368993

$\gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi},\ \nu_i\right)$ = 58.2402

$\nu_i^{-\Delta m/\xi}$ = 0.00191

μ_i = $\frac{1-\left\{\gamma\left(1+\frac{m}{\xi},\ \nu_i\right)-\nu_i^{-\Delta m/\xi}\gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi},\ \nu_i\right)\right\}}{\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)}$

= 0.025501

Fatigue damage

$$DM_i=\sum_{i=1}^{k}\frac{\alpha_i N_L}{K_2}\frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}}\mu_i\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)$$

DM = 1.58E-04

A5-2

σ_{hot} = 13.8768

Hot stress range

S_{Ri} = 13.8768 N/mm^2

N_R = 1.00E+04 cycles

α_i = 1

f_0 = 1 operation factor

U = 30 year

= 9.46E+08 second

L = 25.15 m

$$= \frac{f_0 U}{4 \log L}$$

N_L = 1.69E+08

Hot-spot SN-curve parameters (Class D):

m = 3

Δm = 2

K_2 = 1.52E+12

S_q = 53.4 N/mm^2

Weibull parameter

α = 0.8

ξ = 1.095051

ν_i = $\left(\frac{S_q}{S_{Ri}}\right)^{\xi} lnN_R$ = 40.29

$1+\frac{m}{\xi}$ = 3.74

$1+\frac{m+\Delta m}{\xi}$ $1.1-0.35\frac{L-100}{300}$ = 5.57

$\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)$ = 4.37

$\gamma\left(1+\frac{m}{\xi}, \nu_i\right)$ = 4.368993

$\gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi}, \nu_i\right)$ = 58.2402

$\nu_i^{-\Delta m/\xi}$ = 0.00117

μ_i = $1-\frac{\left\{\gamma\left(1+\frac{m}{\xi}, \nu_i\right) - \nu_i^{-\Delta m/\xi}\gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi}, \nu_i\right)\right\}}{\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)}$

= 0.015602

Fatigue damage

$$DM_i = \sum_{i=1}^{k} \frac{\alpha_i N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)$$

DM	=	4.62E-05	

A6-1

σ_{hot}	=	5.6448	

Hot stress range

S_{Ri}	=	5.6448	N/mm^2
N_R	=	1.00E+04	cycles
α_i	=	1	
f_0	=	1	operation factor
U	=	30	year
	=	9.46E+08	second
L	=	25.15	m
	=	$\frac{f_0 U}{4 \log L}$	
N_L	=	1.69E+08	

Hot-spot SN-curve parameters (Class D):

m	=	3	
Δm	=	2	
K_2	=	1.52E+12	
S_q	=	53.4	N/mm^2

Weibull parameter

α	=	0.8		
ξ	=	1.095051		
ν_i	=	$\left(\frac{S_q}{S_{Ri}}\right)^{\xi} lnN_R$	=	107.88
$1+\frac{m}{\xi}$			=	3.74
$1+\frac{m+\Delta m}{\xi}$		$1.1-0.35\frac{L-100}{300}$	=	5.57
$\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)$			=	4.37
$\gamma\left(1+\frac{m}{\xi}, \nu_i\right)$			=	4.368993
$\gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi}, \nu_i\right)$			=	58.2402

$\nu_i^{-\Delta m/\xi}$

= 0.00019

$$\mu_i = 1 - \frac{\left\{\gamma\left(1+\frac{m}{\xi}, \nu_i\right) - \nu_i^{-\Delta m/\xi}\,\gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi}, \nu_i\right)\right\}}{\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)}$$

= 0.002582

Fatigue damage

$$DM_i = \sum_{i=1}^{k} \frac{\alpha_i N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)$$

DM = 5.14E-07

A6-2

σ_{hot}	=	4.6256	
Hot stress range			
S_{Ri}	=	4.6256	N/mm^2
N_R	=	1.00E+04	cycles
α_i	=	1	
f_0	=	1	operation factor
U	=	30	year
	=	9.46E+08	second
L	=	25.15	m
	=	$\frac{f_0 U}{4 \log L}$	
N_L	=	1.69E+08	
Hot-spot SN-curve parameters (Class D):			
m	=	3	
Δm	=	2	
K_2	=	1.52E+12	
S_q	=	53.4	N/mm^2

Weibull parameter

α = 0.8

ξ = 1.095051

ν_i = $\left(\frac{S_{ij}}{S_{Ri}}\right)^{\xi} lnN_R$ = 134.16

$1+\frac{m}{\xi}$ = 3.74

$1+\frac{m+\Delta m}{\xi}$ $1.1-0.35\frac{L-100}{300}$ 5.57

$\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)$ = 4.37

$\gamma\left(1+\frac{m}{\xi},\ \nu_i\right)$ = 4.368993

$\gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi},\ \nu_i\right)$ = 58.2402

$\nu_i^{-\Delta m/\xi}$ = 0.00013

μ_i = $1-\frac{\left\{\gamma\left(1+\frac{m}{\xi},\ \nu_i\right)-\ \nu_i^{-\Delta m/\xi}\,\gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi},\ \nu_i\right)\right\}}{\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)}$

= 0.001734

Fatigue damage

$$DM_i=\sum_{i=1}^{k}\frac{\alpha_i N_L}{K_2}\frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}}\mu_i\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)$$

DM = 1.90E-07

A7-1

shot = 4.1216

Hot stress range

S_{Ri} = 4.1216 N/mm^2

N_R = 1.00E+04 cycles

α_i = 1

f_0	=	1	operation factor
U	=	30	year
	=	9.46E+08	second
L	=	25.15	m
	=	$\frac{f_0 U}{4 \log L}$	
N_L	=	1.69E+08	

Hot-spot SN-curve parameters (Class D):

m	=	3	
Δm	=	2	
K_2	=	1.52E+12	
S_q	=	53.4	N/mm^2

Weibull parameter

	=	$1.1 - 0.35\frac{L-100}{300}$		
α	=	0.8		
ξ	=	1.095051		
ν_i	=	$\left(\frac{S_q}{S_{Ri}}\right)^{\xi} lnN_R$	=	152.23
$1+\frac{m}{\xi}$			=	3.74
$1+\frac{m+\Delta m}{\xi}$			=	5.57
$\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)$			=	4.37
$\gamma\left(1+\frac{m}{\xi}, \nu_i\right)$			=	4.368993
$\gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi}, \nu_i\right)$			=	58.2402
$\nu_i^{-\Delta m/\xi}$	=	0.00010		

$$1-\frac{\left\{\gamma\left(1+\frac{m}{\xi}, \nu_i\right) - \nu_i^{-\Delta m/\xi}\gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi}, \nu_i\right)\right\}}{\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)}$$

μ_i =

= 0.001376

Fatigue damage

$$DM_i = \sum_{i=1}^{k} \frac{\alpha_i N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$$

DM = 1.07E-07

A7-2

σ_{hot} = 2.777869

Hot stress range

S_{Ri}	=	2.777869	N/mm^2
N_R	=	1.00E+04	cycles
α_i	=	1	
f_0	=	1	operation factor
U	=	30	year
	=	9.46E+08	second
L	=	25.15	m
	=	$\frac{f_0 U}{4 \log L}$	
N_L	=	1.69E+08	

Hot-spot SN-curve parameters (Class D):

m	=	3	
Δm	=	2	
K_2	=	1.52E+12	
S_q	=	53.4	N/mm^2

Weibull parameter

$$= 1.1 - 0.35 \frac{L - 100}{300}$$

α = 0.8

ξ = 1.095051

ν_i = $\left(\frac{S_q}{S_{Ri}}\right)^{\xi} lnN_R$ = 234.50

$1+\frac{m}{\xi}$ = 3.74

$1+\frac{m+\Delta m}{\xi}$ = 5.57

$\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)$ = 4.37

$\gamma\left(1+\frac{m}{\xi},\ v_i\right)$ = 4.368993

$\gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi},\ v_i\right)$ = 58.2402

$v_i^{-\Delta m/\xi}$ = 0.00005

μ_i = $1-\frac{\left\{\gamma\left(1+\frac{m}{\xi},\ v_i\right)-v_i^{-\Delta m/\xi}\gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi},\ v_i\right)\right\}}{\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)}$

= 0.000625

Fatigue damage

$$DM_i=\sum_{i=1}^{k}\frac{\alpha_i N_L}{K_2}\frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}}\mu_i\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)$$

DM = 1.48E-08

A8-1

σ_{hot} = 4.062386

Hot stress range

S_{Ri}	=	4.062386	N/mm^2
N_R	=	1.00E+04	cycles
α_i	=	1	
f_0	=	1	operation factor
U	=	30	year
	=	9.46E+08	second

L = 25.15 m

$$= \frac{f_0 U}{4 \log L}$$

N_L = 1.69E+08

Hot-spot SN-curve parameters (Class D):

m = 3

Δm = 2

K_2 = 1.52E+12

S_q = 53.4 N/mm^2

Weibull parameter

$$= 1.1 - 0.35 \frac{L - 100}{300}$$

α = 0.8

ξ = 1.095051

ν_i = $\left(\frac{S_q}{S_{Ri}}\right)^{\xi} lnN_R$ = 154.66

$1 + \frac{m}{\xi}$ = 3.74

$1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}$ = 5.57

$\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$ = 4.37

$\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, \nu_i\right)$ = 4.368993

$\gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, \nu_i\right)$ = 58.2402

$\nu_i^{-\Delta m/\xi}$ = 0.00010

$$\mu_i = 1 - \frac{\left\{\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, \nu_i\right) - \nu_i^{-\Delta m/\xi}\, \gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, \nu_i\right)\right\}}{\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)}$$

= 0.001337

Fatigue damage

$$DM_i = \sum_{i=1}^{k} \frac{\alpha_i N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$$

DM	=	9.93E-08	

A8-2

σ_{hot}	=	2.125906	

Hot stress range

S_{Ri}	=	2.125906	N/mm^2
N_R	=	1.00E+04	cycles
α_i	=	1	
f_0	=	1	operation factor
U	=	30	year
	=	9.46E+08	second
L	=	25.15	m
	=	$\frac{f_0 U}{4 \log L}$	
N_L	=	1.69E+08	

Hot-spot SN-curve parameters (Class D):

m	=	3	
Δm	=	2	
K_2	=	1.52E+12	
S_q	=	53.4	N/mm^2

Weibull parameter

	=	$1.1 - 0.35 \frac{L - 100}{300}$		
α	=	0.8		
ξ	=	1.095051		
ν_i	=	$\left(\frac{S_q}{S_{Ri}}\right)^{\xi} lnN_R$	=	314.30
$1 + \frac{m}{\xi}$			=	3.74
$1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}$			=	5.57

$\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)$ = 4.37

$\gamma\left(1+\frac{m}{\xi}, v_i\right)$ = 4.368993

$\gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi}, v_i\right)$ = 58.2402

$v_i^{-\Delta m/\xi}$ = 0.00003

$$\mu_i = 1-\frac{\left\{\gamma\left(1+\frac{m}{\xi}, v_i\right) - v_i^{-\Delta m/\xi}\gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi}, v_i\right)\right\}}{\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)}$$

= 0.000366

Fatigue damage

$$DM_i = \sum_{i=1}^{k} \frac{\alpha_i N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)$$

DM = 3.90E-09

LC 3-4

A1-1

σ_{hot}	=	0.896	
Hot stress range			
S_{Ri}	=	0.896	N/mm^2
N_R	=	1.00E+04	cycles
α_i	=	1	
f_0	=	1	operation factor
U	=	30	year
	=	9.46E+08	second
L	=	25.15	m
	=	$\frac{f_0 U}{4 \log L}$	
N_L	=	1.69E+08	
Hot-spot SN-curve parameters (Class D):			
m	=	3	
Δm	=	2	
K_2	=	1.52E+12	
S_q	=	53.4	N/mm^2

Weibull parameter

	=	$1.1 - 0.35 \frac{L-100}{300}$		
α	=	0.8		
ξ	=	1.095051		
ν_i	=	$\left(\frac{S_q}{S_{Ri}}\right)^{\xi} lnN_R$	=	809.55
$1+\frac{m}{\xi}$			=	3.74
$1+\frac{m+\Delta m}{\xi}$			=	5.57
$\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)$			=	4.37

$$\gamma\left(1+\frac{m}{\xi},\ \nu_i\right) = 4.368993$$

$$\gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi},\ \nu_i\right) = 58.2402$$

$$\nu_i^{-\Delta m/\xi} = 0.00000$$

$$\mu_i = \frac{1-\left\{\gamma\left(1+\frac{m}{\xi},\ \nu_i\right) - \nu_i^{-\Delta m/\xi}\,\gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi},\ \nu_i\right)\right\}}{\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)}$$

μ_i = 6.5E-05

Fatigue damage

$$DM_i = \sum_{i=1}^{k} \frac{\alpha_i N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)$$

DM = 5.18E-11

A1-2

σ_{hot} = 1.35632

Hot stress range

S_{Ri}	=	1.35632	N/mm^2
N_R	=	1.00E+04	cycles
α_i	=	1	
f_0	=	1	operation factor
U	=	30	year
	=	9.46E+08	second
L	=	25.15	m
	=	$\frac{f_0 U}{4 \log L}$	
N_L	=	1.69E+08	

Hot-spot SN-curve parameters (Class D):

m	=	3	
Δm	=	2	
K_2	=	1.52E+12	
S_q	=	53.4	N/mm^2

Weibull parameter

$$= 1.1 - 0.35\frac{L-100}{300}$$

α = 0.8

ξ = 1.095051

ν_i = $\left(\frac{S_q}{S_{Ri}}\right)^{\xi} lnN_R$ = 514.14

$1+\frac{m}{\xi}$ = 3.74

$1+\frac{m+\Delta m}{\xi}$ = 5.57

$\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)$ = 4.37

$\gamma\left(1+\frac{m}{\xi}, \nu_i\right)$ = 4.368993

$\gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi}, \nu_i\right)$ = 58.2402

$\nu_i^{-\Delta m/\xi}$ = 0.00001

μ_i = $1-\frac{\left\{\gamma\left(1+\frac{m}{\xi}, \nu_i\right) - \nu_i^{-\Delta m/\xi}\gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi}, \nu_i\right)\right\}}{\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)}$

= 0.000149

Fatigue damage

$$DM_i = \sum_{i=1}^{k}\frac{\alpha_i N_L}{K_2}\frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}}\mu_i\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)$$

DM = 4.12E-10

A2-1

σ_{hot} = 99.01248

Hot stress range

S_{Ri}	=	99.01248	N/mm^2
N_R	=	1.00E+04	cycles
α_i	=	1	
f_0	=	1	operation factor
U	=	30	year
	=	9.46E+08	second
L	=	25.15	m
	=	$\frac{f_0 U}{4 \log L}$	
N_L	=	1.69E+08	

Hot-spot SN-curve parameters (Class D):

m	=	3	
Δm	=	2	
K_2	=	1.52E+12	
S_q	=	53.4	N/mm^2

Weibull parameter

	=	$1.1 - 0.35 \frac{L-100}{300}$		
α	=	0.8		
ξ	=	1.095051		
ν_i	=	$\left(\frac{S_q}{S_{Ri}}\right)^{\xi} lnN_R$	=	4.68
$1+\frac{m}{\xi}$			=	3.74
$1+\frac{m+\Delta m}{\xi}$			=	5.57
$\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)$			=	4.37
$\gamma\left(1+\frac{m}{\xi}, \nu_i\right)$			=	3.203442
$\gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi}, \nu_i\right)$			=	23.33157
$\nu_i^{-\Delta m/\xi}$	=	0.05959		

μ_i = $$1-\frac{\left\{\gamma\left(1+\frac{m}{\xi},\ \nu_i\right)-\ \nu_i^{-\Delta m/\xi}\,\gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi},\ \nu_i\right)\right\}}{\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)}$$

= 0.584983

Fatigue damage

$$DM_i=\sum_{i=1}^{k}\frac{\alpha_i N_L}{K_2}\frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}}\mu_i\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)$$

DM = 6.29E-01

A2-2

σ_{hot} = 87.10688

Hot stress range

S_{Ri} = 87.10688 N/mm^2

N_R = 1.00E+04 cycles

α_i = 1

f_0 = 1 operation factor

U = 30 year

= 9.46E+08 second

L = 25.15 m

= $$\frac{f_0 U}{4\log L}$$

N_L = 1.69E+08

Hot-spot SN-curve parameters (Class D):

m = 3

Δm = 2

K_2 = 1.52E+12

S_q = 53.4 N/mm^2

Weibull parameter

= $$1.1-0.35\frac{L-100}{300}$$

α = 0.8

ξ = 1.095051

ν_i = $\left(\frac{S_q}{S_{Ri}}\right)^{\xi} lnN_R$ = 5.39

$1+\frac{m}{\xi}$ = 3.74

$1+\frac{m+\Delta m}{\xi}$ = 5.57

$\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)$ = 4.37

$\gamma\left(1+\frac{m}{\xi},\ \nu_i\right)$ = 3.588477

$\gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi},\ \nu_i\right)$ = 30.66838

$\nu_i^{-\Delta m/\xi}$ = 0.04612

μ_i = $1-\frac{\left\{\gamma\left(1+\frac{m}{\xi},\nu_i\right)-\nu_i^{-\Delta m/\xi}\gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi},\nu_i\right)\right\}}{\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)}$

= 0.502376

Fatigue damage

$$DM_i=\sum_{i=1}^{k}\frac{\alpha_i N_L}{K_2}\frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}}\mu_i\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)$$

DM = 3.68E-01

A3-1

σ_{hot} = 84.5824

Hot stress range

S_{Ri} = 84.5824 N/mm^2

N_R = 1.00E+04 cycles

α_i = 1

f_0 = 1 operation factor

U	=	30	year
	=	9.46E+08	second
L	=	25.15	m
	=	$\frac{f_0 U}{4 \log L}$	
N_L	=	1.69E+08	

Hot-spot SN-curve parameters (Class D):

m	=	3	
Δm	=	2	
K_2	=	1.52E+12	
S_q	=	53.4	N/mm^2

Weibull parameter

	=	$1.1 - 0.35\frac{L-100}{300}$		
α	=	0.8		
ξ	=	1.095051		
ν_i	=	$\left(\frac{S_q}{S_{Ri}}\right)^{\xi} lnN_R$	=	5.57
$1+\frac{m}{\xi}$			=	3.74
$1+\frac{m+\Delta m}{\xi}$			=	5.57
$\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)$			=	4.37
$\gamma\left(1+\frac{m}{\xi}, \nu_i\right)$			=	3.666294
$\gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi}, \nu_i\right)$			=	32.40587
$\nu_i^{-\Delta m/\xi}$	=	0.04348		
μ_i	=	$1-\frac{\left\{\gamma\left(1+\frac{m}{\xi}, \nu_i\right) - \nu_i^{-\Delta m/\xi}\gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi}, \nu_i\right)\right\}}{\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)}$		

	=	0.483366	

Fatigue damage

$$DM_i = \sum_{i=1}^{k} \frac{\alpha_i N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$$

DM	=	3.24E-01	

A3-2

σ_{hot}	=	75.66608	

Hot stress range

S_{Ri}	=	75.66608	N/mm^2
N_R	=	1.00E+04	cycles
α_i	=	1	
f_0	=	1	operation factor
U	=	30	year
	=	9.46E+08	second
L	=	25.15	m
	=	$\frac{f_0 U}{4 \log L}$	
N_L	=	1.69E+08	

Hot-spot SN-curve parameters (Class D):

m	=	3	
Δm	=	2	
K_2	=	1.52E+12	
S_q	=	53.4	N/mm^2

Weibull parameter

	=	$1.1 - 0.35 \frac{L - 100}{300}$		
α	=	0.8		
ξ	=	1.095051		
ν_i	=	$\left(\frac{S_q}{S_{Ri}}\right)^{\xi} lnN_R$	=	6.29
$1 + \frac{m}{\xi}$			=	3.74

$1+\frac{m+\Delta m}{\xi}$ = 5.57

$\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)$ = 4.37

$\gamma\left(1+\frac{m}{\xi},\ \nu_i\right)$ = 3.919661

$\gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi},\ \nu_i\right)$ = 38.90064

$\nu_i^{-\Delta m/\xi}$ = 0.03480

μ_i = $1-\frac{\left\{\gamma\left(1+\frac{m}{\xi},\ \nu_i\right)-\ \nu_i^{-\Delta m/\xi}\,\gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi},\ \nu_i\right)\right\}}{\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)}$

= 0.412689

Fatigue damage

$$DM_i=\sum_{i=1}^{k}\frac{\alpha_i N_L}{K_2}\frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}}\mu_i\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)$$

DM = 1.98E-01

A4-1

σ_{hot} = 75.1968

Hot stress range

S_{Ri}	=	75.1968	N/mm^2
N_R	=	1.00E+04	cycles
α_i	=	1	
f_0	=	1	operation factor
U	=	30	year
	=	9.46E+08	second
L	=	25.15	m

$= \frac{f_0 U}{4\log L}$

N_L = 1.69E+08

Hot-spot SN-curve parameters (Class D):

m = 3

Δm = 2

K_2 = 1.52E+12

S_q = 53.4 N/mm^2

Weibull parameter

$$= 1.1 - 0.35\frac{L-100}{300}$$

α = 0.8

ξ = 1.095051

$$\nu_i = \left(\frac{S_q}{S_{Ri}}\right)^{\xi} lnN_R = 6.33$$

$$1+\frac{m}{\xi} = 3.74$$

$$1+\frac{m+\Delta m}{\xi} = 5.57$$

$$\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right) = 4.37$$

$$\gamma\left(1+\frac{m}{\xi},\ \nu_i\right) = 3.931817$$

$$\gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi},\ \nu_i\right) = 39.25211$$

$$\nu_i^{-\Delta m/\xi} = 0.03437$$

$$\mu_i = 1-\frac{\left\{\gamma\left(1+\frac{m}{\xi},\ \nu_i\right) - \nu_i^{-\Delta m/\xi}\gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi},\ \nu_i\right)\right\}}{\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)}$$

$$= 0.408841$$

Fatigue damage

$$DM_i = \sum_{i=1}^{k}\frac{\alpha_i N_L}{K_2}\frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}}\mu_i\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)$$

DM	=	1.93E-01	

A4-2

σ_{hot}	=	65.73392	

Hot stress range

S_{Ri}	=	65.73392	N/mm^2
N_R	=	1.00E+04	cycles
α_i	=	1	
f_0	=	1	operation factor
U	=	30	year
	=	9.46E+08	second
L	=	25.15	m

$$= \frac{f_0 U}{4 \log L}$$

N_L	=	1.69E+08	

Hot-spot SN-curve parameters (Class D):

m	=	3	
Δm	=	2	
K_2	=	1.52E+12	
S_q	=	53.4	N/mm^2

Weibull parameter

$$= 1.1 - 0.35 \frac{L - 100}{300}$$

α	=	0.8		
ξ	=	1.095051		
ν_i	=	$\left(\frac{S_q}{S_{Ri}}\right)^{\xi} lnN_R$	=	7.34
$1 + \frac{m}{\xi}$			=	3.74
$1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}$			=	5.57
$\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$			=	4.37

$$\gamma\left(1+\frac{m}{\xi},\ v_i\right) = 4.143783$$

$$\gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi},\ v_i\right) = 46.25745$$

$$v_i^{-\Delta m/\xi} = 0.02626$$

$$\mu_i = \frac{1-\left\{\gamma\left(1+\frac{m}{\xi},\ v_i\right) - v_i^{-\Delta m/\xi}\,\gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi},\ v_i\right)\right\}}{\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)}$$

$$= 0.329611$$

Fatigue damage

$$DM_i = \sum_{i=1}^{k} \frac{\alpha_i N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)$$

DM = 1.04E-01

A5-1

σ_{hot} = 10.67136

Hot stress range

S_{Ri}	=	10.67136	N/mm^2
N_R	=	1.00E+04	cycles
α_i	=	1	
f_0	=	1	operation factor
U	=	30	year
	=	9.46E+08	second
L	=	25.15	m
	=	$\frac{f_0 U}{4 \log L}$	
N_L	=	1.69E+08	

Hot-spot SN-curve parameters (Class D):

m	=	3	
Δm	=	2	
K_2	=	1.52E+12	
S_q	=	53.4	N/mm^2

Weibull parameter

$$= \quad 1.1 - 0.35\frac{L-100}{300}$$

α = 0.8

ξ = 1.095051

ν_i = $\left(\frac{S_q}{S_{Ri}}\right)^{\xi} lnN_R$ = 53.71

$1+\frac{m}{\xi}$ = 3.74

$1+\frac{m+\Delta m}{\xi}$ = 5.57

$\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)$ = 4.37

$\gamma\left(1+\frac{m}{\xi}, \nu_i\right)$ = 4.368993

$\gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi}, \nu_i\right)$ = 58.2402

$\nu_i^{-\Delta m/\xi}$ = 0.00069

μ_i = $1-\frac{\left\{\gamma\left(1+\frac{m}{\xi}, \nu_i\right) - \nu_i^{-\Delta m/\xi}\gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi}, \nu_i\right)\right\}}{\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)}$

= 0.009227

Fatigue damage

$$DM_i = \sum_{i=1}^{k} \frac{\alpha_i N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)$$

DM = 1.24E-05

A5-2

σ_{hot}	=	9.5368	

Hot stress range

S_{Ri}	=	9.5368	N/mm^2
N_R	=	1.00E+04	cycles
α_i	=	1	
f_0	=	1	operation factor
U	=	30	year
	=	9.46E+08	second
L	=	25.15	m
	=	$\frac{f_0 U}{4 \log L}$	
N_L	=	1.69E+08	

Hot-spot SN-curve parameters (Class D):

m	=	3	
Δm	=	2	
K_2	=	1.52E+12	
S_q	=	53.4	N/mm^2

Weibull parameter

	=	$1.1 - 0.35\frac{L-100}{300}$		
α	=	0.8		
ξ	=	1.095051		
ν_i	=	$\left(\frac{S_q}{S_{Ri}}\right)^{\xi} lnN_R$	=	60.75
$1+\frac{m}{\xi}$			=	3.74
$1+\frac{m+\Delta m}{\xi}$			=	5.57
$\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)$			=	4.37
$\gamma\left(1+\frac{m}{\xi}, \nu_i\right)$			=	4.368993

$$\gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi},\ \nu_i\right) = 58.2402$$

$$\nu_i^{-\Delta m/\xi} = 0.00055$$

$$\mu_i = \frac{1-\left\{\gamma\left(1+\frac{m}{\xi},\ \nu_i\right) - \nu_i^{-\Delta m/\xi}\,\gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi},\ \nu_i\right)\right\}}{\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)}$$

$$= 0.007369$$

Fatigue damage

$$DM_i = \sum_{i=1}^{k} \frac{\alpha_i N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)$$

DM = 7.08E-06

A6-1

σ_{hot} = 13.67072

Hot stress range

S_{Ri} = 13.67072 N/mm^2

N_R = 1.00E+04 cycles

α_i = 1

f_0 = 1 operation factor

U = 30 year

= 9.46E+08 second

L = 25.15 m

$$= \frac{f_0 U}{4 \log L}$$

N_L = 1.69E+08

Hot-spot SN-curve parameters (Class D):

m = 3

Δm = 2

K_2 = 1.52E+12

S_q = 53.4 N/mm^2

Weibull parameter

$$1.1 - 0.35\frac{L-100}{300}$$

=

α = 0.8

ξ = 1.095051

ν_i = $\left(\frac{S_q}{S_{Ri}}\right)^{\xi} lnN_R$ = 40.95

$1+\frac{m}{\xi}$ = 3.74

$1+\frac{m+\Delta m}{\xi}$ = 5.57

$\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)$ = 4.37

$\gamma\left(1+\frac{m}{\xi},\ \nu_i\right)$ = 4.368993

$\gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi},\ \nu_i\right)$ = 58.2402

$\nu_i^{-\Delta m/\xi}$ = 0.00114

μ_i = $1-\frac{\left\{\gamma\left(1+\frac{m}{\xi},\ \nu_i\right)-\ \nu_i^{-\Delta m/\xi}\gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi},\ \nu_i\right)\right\}}{\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)}$

= 0.015142

Fatigue damage

$$DM_i=\sum_{i=1}^{k}\frac{\alpha_i N_L}{K_2}\frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}}\mu_i\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)$$

DM = 4.28E-05

A6-2

σ_{hot} = 11.61776

Hot stress range

S_{Ri} = 11.61776 N/mm^2

N_R = 1.00E+04 cycles

α_i	=	1	
f_0	=	1	operation factor
U	=	30	year
	=	9.46E+08	second
L	=	25.15	m
	=	$\frac{f_0 U}{4 \log L}$	
N_L	=	1.69E+08	

Hot-spot SN-curve parameters (Class D):

m	=	3	
Δm	=	2	
K_2	=	1.52E+12	
S_q	=	53.4	N/mm^2

Weibull parameter

$$= 1.1 - 0.35\frac{L-100}{300}$$

α	=	0.8		
ξ	=	1.095051		
ν_i	=	$\left(\frac{S_q}{S_{Ri}}\right)^{\xi} lnN_R$	=	48.94
$1+\frac{m}{\xi}$			=	3.74
$1+\frac{m+\Delta m}{\xi}$			=	5.57
$\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)$			=	4.37
$\gamma\left(1+\frac{m}{\xi}, \nu_i\right)$			=	4.368993
$\gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi}, \nu_i\right)$			=	58.2402
$\nu_i^{-\Delta m/\xi}$	=	0.00082		

$$1-\frac{\left\{\gamma\left(1+\frac{m}{\xi}, \nu_i\right) - \nu_i^{-\Delta m/\xi}\gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi}, \nu_i\right)\right\}}{\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)}$$

μ_i =

= 0.010936

Fatigue damage

$$DM_i = \sum_{i=1}^{k} \frac{\alpha_i N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$$

DM = 1.90E-05

A7-1

σ_{hot} = 3.578176

Hot stress range

S_{Ri}	=	3.578176	N/mm^2
N_R	=	1.00E+04	cycles
α_i	=	1	
f_0	=	1	operation factor
U	=	30	year
	=	9.46E+08	second
L	=	25.15	m
	=	$\frac{f_0 U}{4 \log L}$	
N_L	=	1.69E+08	

Hot-spot SN-curve parameters (Class D):

m	=	3	
Δm	=	2	
K_2	=	1.52E+12	
S_q	=	53.4	N/mm^2

Weibull parameter

$$= 1.1 - 0.35 \frac{L - 100}{300}$$

α = 0.8

ξ = 1.095051

ν_i = $\left(\frac{S_q}{S_{Ri}}\right)^{\xi} lnN_R$ = 177.72

$1+\frac{m}{\xi}$ = 3.74

$1+\frac{m+\Delta m}{\xi}$ = 5.57

$\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)$ = 4.37

$\gamma\left(1+\frac{m}{\xi},\ v_i\right)$ = 4.368993

$\gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi},\ v_i\right)$ = 58.2402

$v_i^{-\Delta m/\xi}$ = 0.00008

$$\mu_i = \frac{1-\left\{\gamma\left(1+\frac{m}{\xi},\ v_i\right) - v_i^{-\Delta m/\xi}\,\gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi},\ v_i\right)\right\}}{\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)}$$

μ_i = 0.001037

Fatigue damage

$$DM_i = \sum_{i=1}^{k} \frac{\alpha_i N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)$$

DM = 5.26E-08

A7-2

σ_{hot} = 4.316816

Hot stress range

S_{Ri} = 4.316816 N/mm^2

N_R = 1.00E+04 cycles

α_i = 1

f_0 = 1 operation factor

U = 30 year

= 9.46E+08 second

L = 25.15 m

= $\frac{f_0 U}{4 \log L}$

N_L = 1.69E+08

Hot-spot SN-curve parameters (Class D):

m = 3

Δm = 2

K_2 = 1.52E+12

S_q = 53.4 N/mm^2

Weibull parameter

$$= 1.1 - 0.35\frac{L-100}{300}$$

α = 0.8

ξ = 1.095051

ν_i = $\left(\frac{S_q}{S_{Ri}}\right)^{\xi} lnN_R$ = 144.71

$1+\frac{m}{\xi}$ = 3.74

$1+\frac{m+\Delta m}{\xi}$ = 5.57

$\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)$ = 4.37

$\gamma\left(1+\frac{m}{\xi}, \nu_i\right)$ = 4.368993

$\gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi}, \nu_i\right)$ = 58.2402

$\nu_i^{-\Delta m/\xi}$ = 0.00011

$$\mu_i = 1-\frac{\left\{\gamma\left(1+\frac{m}{\xi}, \nu_i\right) - \nu_i^{-\Delta m/\xi}\gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi}, \nu_i\right)\right\}}{\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)}$$

= 0.00151

Fatigue damage

$$DM_i = \sum_{i=1}^{k}\frac{\alpha_i N_L}{K_2}\frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}}\mu_i\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)$$

DM	=	1.35E-07	

A8-1

σ_{hot}	=	5.478592	

Hot stress range

S_{Ri}	=	5.478592	N/mm^2
N_R	=	1.00E+04	cycles
α_i	=	1	
f_0	=	1	operation factor
U	=	30	year
	=	9.46E+08	second
L	=	25.15	m
	=	$\frac{f_0 U}{4 \log L}$	
N_L	=	1.69E+08	

Hot-spot SN-curve parameters (Class D):

m	=	3	
Δm	=	2	
K_2	=	1.52E+12	
S_q	=	53.4	N/mm^2

Weibull parameter

	=	$1.1 - 0.35 \frac{L - 100}{300}$		
α	=	0.8		
ξ	=	1.095051		
ν_i	=	$\left(\frac{S_q}{S_{Ri}}\right)^{\xi} lnN_R$	=	111.47
$1 + \frac{m}{\xi}$			=	3.74
$1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}$			=	5.57

$\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)$ = 4.37

$\gamma\left(1+\frac{m}{\xi},\ v_i\right)$ = 4.368993

$\gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi},\ v_i\right)$ = 58.2402

$v_i^{-\Delta m/\xi}$ = 0.00018

μ_i = $1-\frac{\left\{\gamma\left(1+\frac{m}{\xi},\ v_i\right)-\ v_i^{-\Delta m/\xi}\,\gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi},\ v_i\right)\right\}}{\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)}$

= 0.002432

Fatigue damage

$$DM_i=\sum_{i=1}^{k}\frac{\alpha_i N_L}{K_2}\frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}}\mu_i\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)$$

DM = 4.43E-07

A8-2

σ_{hot} = 5.877648

Hot stress range

S_{Ri} = 5.877648 N/mm^2

N_R = 1.00E+04 cycles

α_i = 1

f_0 = 1 operation factor

U = 30 year

= 9.46E+08 second

L = 25.15 m

= $\frac{f_0 U}{4\log L}$

N_L = 1.69E+08

Hot-spot SN-curve parameters (Class D):

m = 3

Δm = 2

K_2 = 1.52E+12

S_q = 53.4 N/mm^2

Weibull parameter

$$= 1.1 - 0.35\frac{L-100}{300}$$

α = 0.8

ξ = 1.095051

ν_i = $\left(\frac{S_q}{S_{Ri}}\right)^{\xi} lnN_R$ = 103.21

$1+\frac{m}{\xi}$ = 3.74

$1+\frac{m+\Delta m}{\xi}$ = 5.57

$\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)$ = 4.37

$\gamma\left(1+\frac{m}{\xi},\ \nu_i\right)$ = 4.368993

$\gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi},\ \nu_i\right)$ = 58.2402

$\nu_i^{-\Delta m/\xi}$ = 0.00021

μ_i = $1-\frac{\left\{\gamma\left(1+\frac{m}{\xi},\ \nu_i\right) - \nu_i^{-\Delta m/\xi}\gamma\left(1+\frac{m+\Delta m}{\xi},\ \nu_i\right)\right\}}{\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)}$

= 0.002799

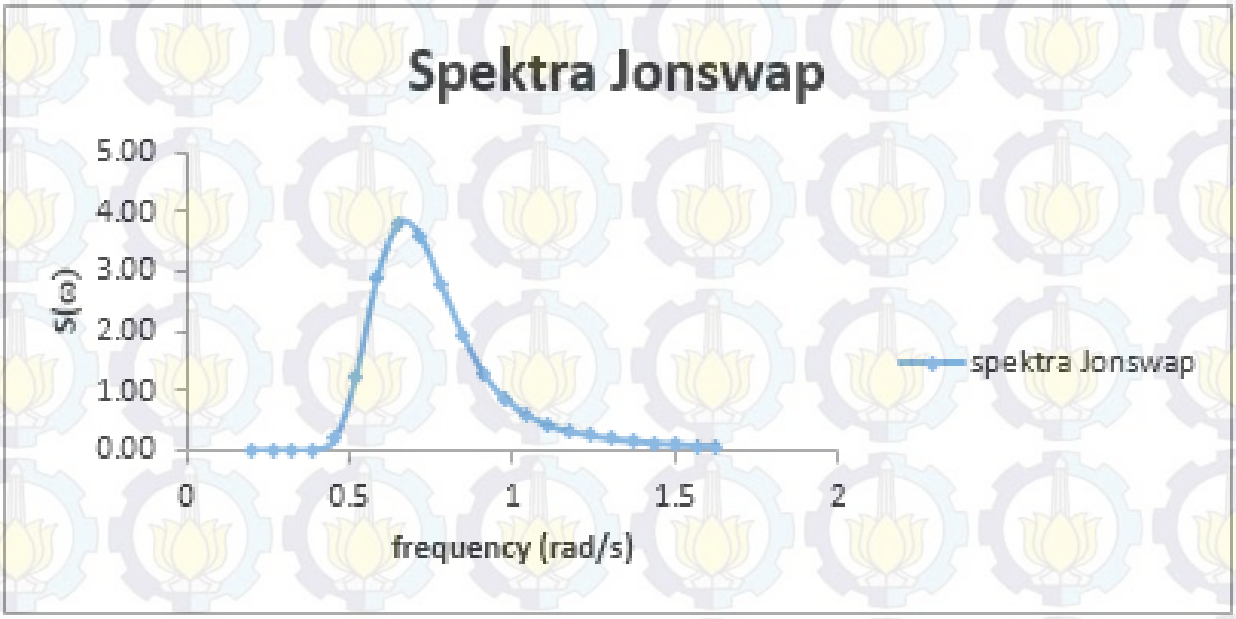
Fatigue damage

$$DM_i = \sum_{i=1}^{k}\frac{\alpha_i N_L}{K_2}\frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}}\mu_i\Gamma\left(1+\frac{m}{\xi}\right)$$

DM = 6.30E-07

LAMPIRAN B

RESPON SPEKTRA


Spektra Jonswap
5.00
4.00
3.00
2.00
1.00
0.00
S(ω)
0
0.5
1
1.5
2
frequency (rad/s)
spektra Jonswap

FULL LOAD

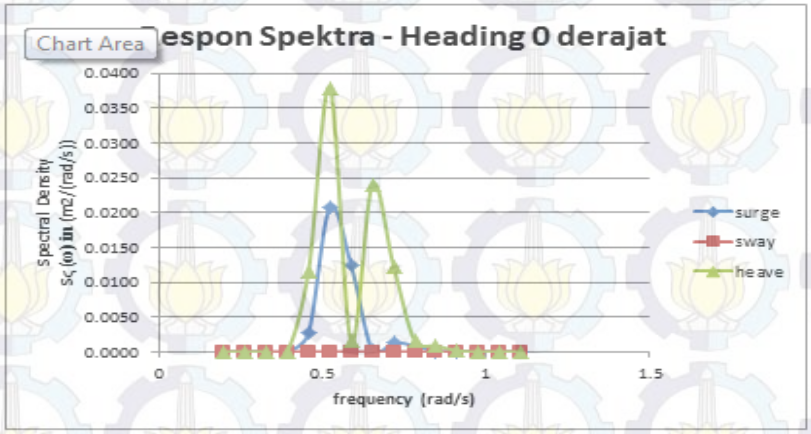
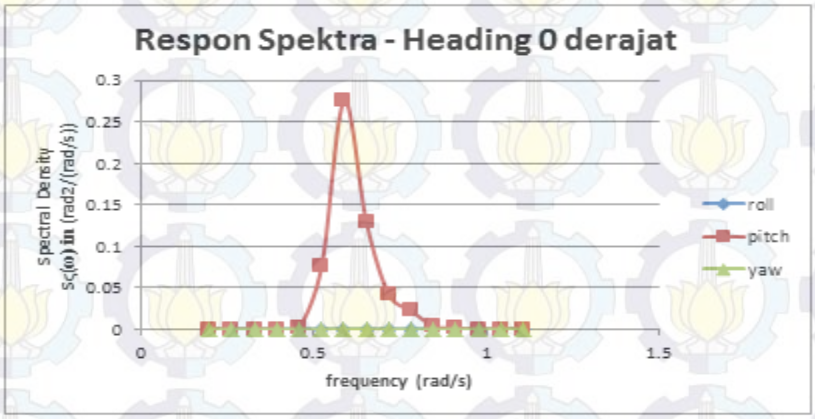
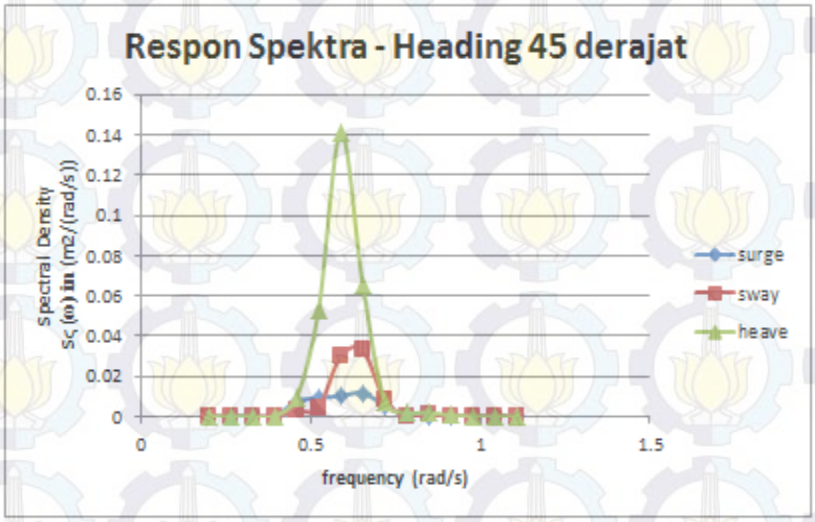
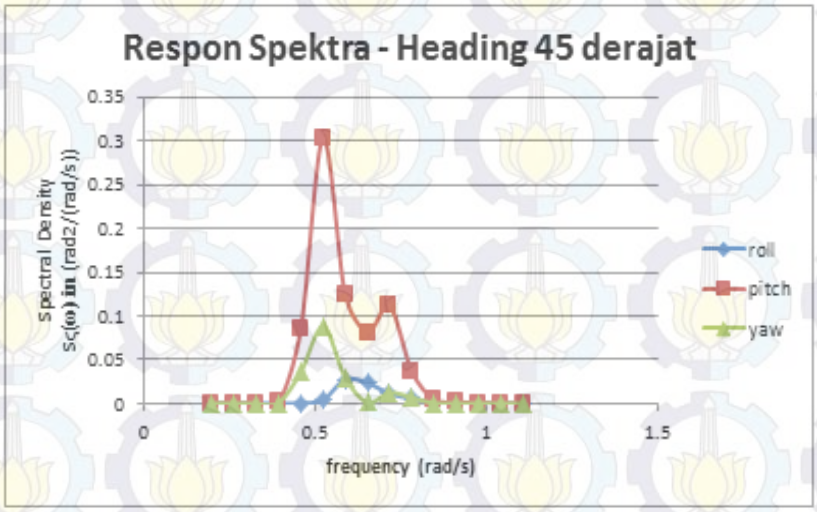
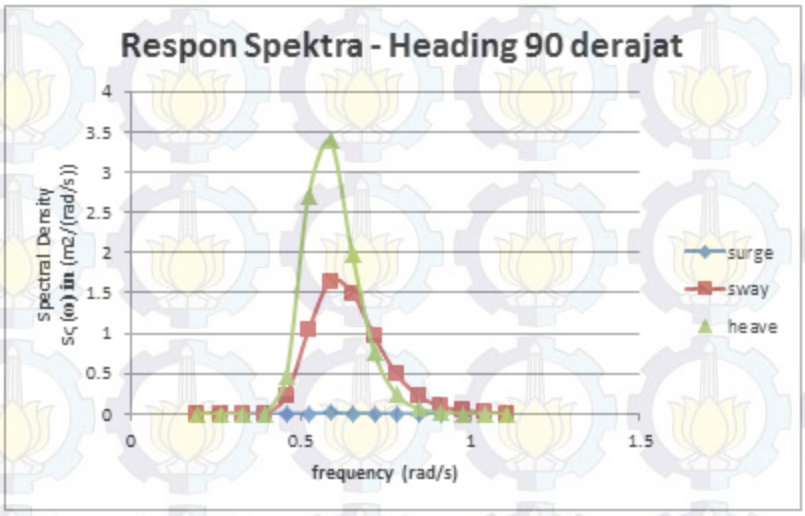


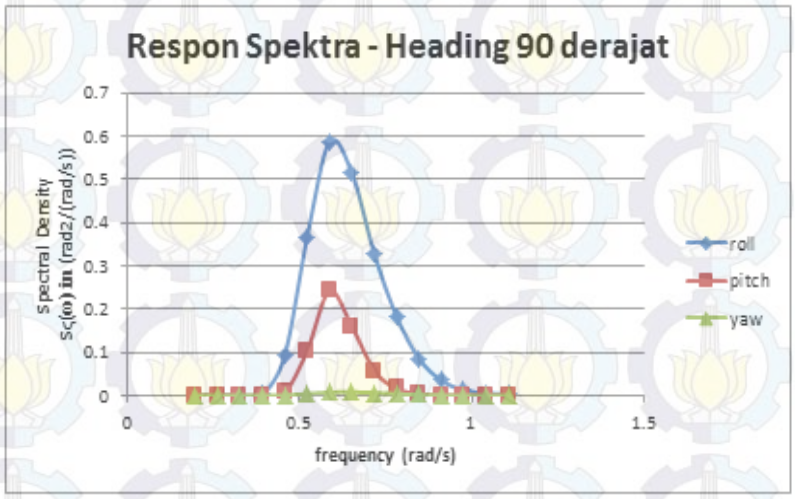
Chart Area
espon Spektra - Heading 0 derajat
0.0400
0.0350
0.0300
0.0250
0.0200
0.0150
0.0100
0.0050
0.0000
Spectral Density
Sζ(ω) in (m2/(rad/s))
0
0.5
1
1.5
frequency (rad/s)
surge
sway
heave

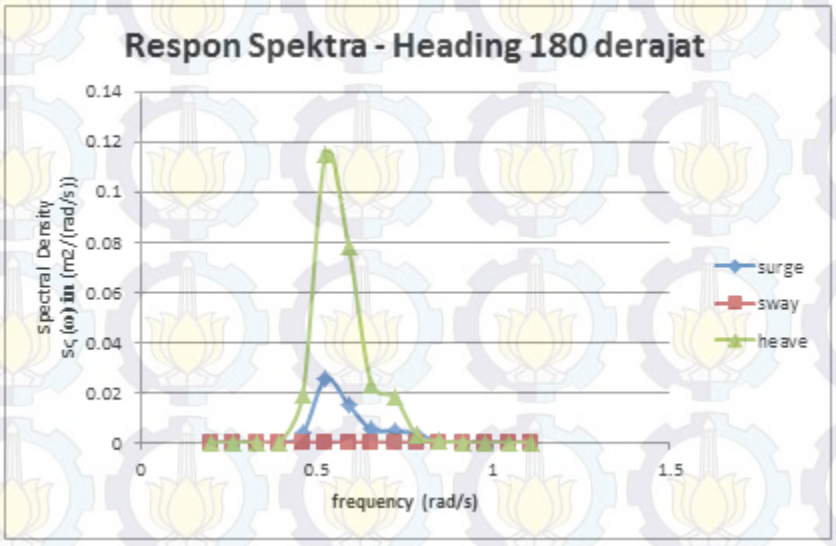

Respon Spektra - Heading 0 derajat
0.3
0.25
0.2
0.15
0.1
0.05
0
Spectral Density
Sζ(ω) in (rad2/(rad/s))
0
0.5
1
1.5
frequency (rad/s)
roll
pitch
yaw

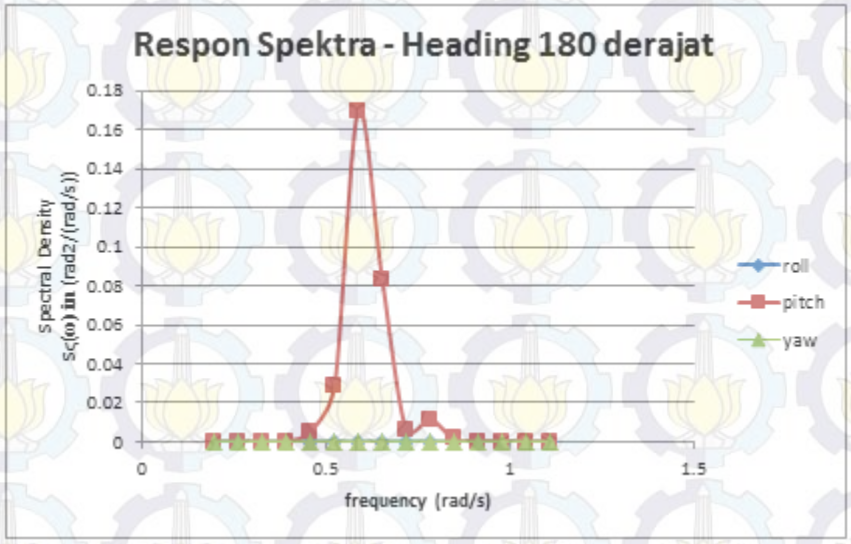

Respon Spektra - Heading 45 derajat
Spectral Density
Sζ (ω) in (m2/(rad/s))
0.16
0.14
0.12
0.1
0.08
0.06
0.04
0.02
0
0
0.5
1
1.5
frequency (rad/s)
surge
sway
heave


Respon Spektra - Heading 45 derajat
Spectral Density
Sζ(ω) in (rad2/(rad/s))
0.35
0.3
0.25
0.2
0.15
0.1
0.05
0
0
0.5
1
1.5
frequency (rad/s)
roll
pitch
yaw

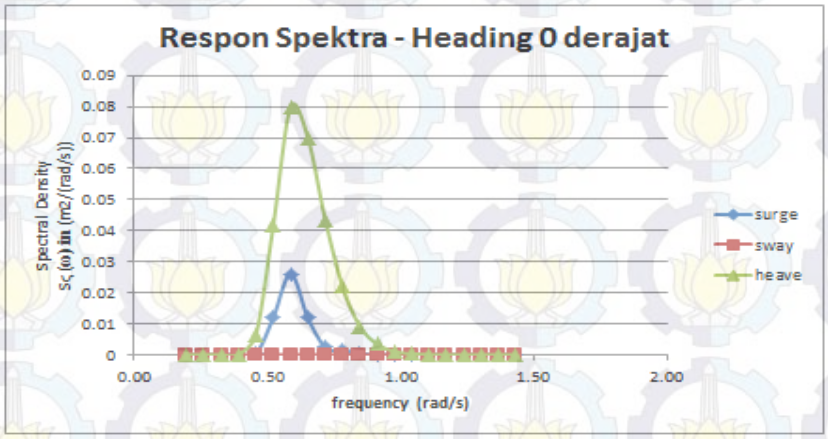

Respon Spektra - Heading 90 derajat
Spectral Density
Sζ (ω) in (m2/(rad/s))
4
3.5
3
2.5
2
1.5
1
0.5
0
0
0.5
1
1.5
frequency (rad/s)
surge
sway
heave

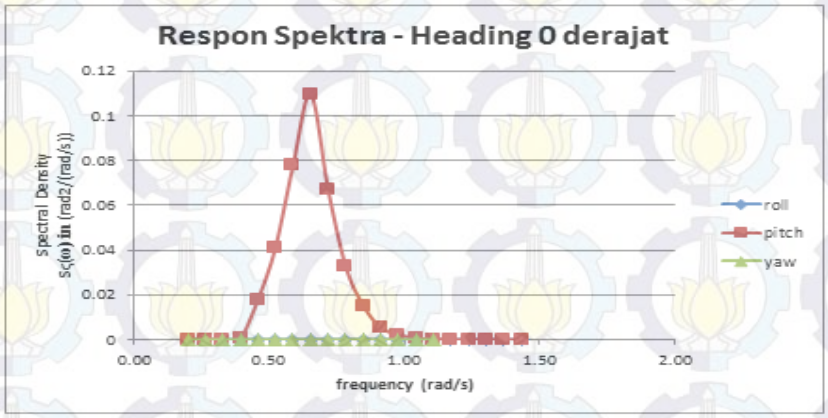

Respon Spektra - Heading 90 derajat
Spectral Density
Sζ(ω) in (rad2/(rad/s))
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
0
0.5
1
1.5
frequency (rad/s)
roll
pitch
yaw

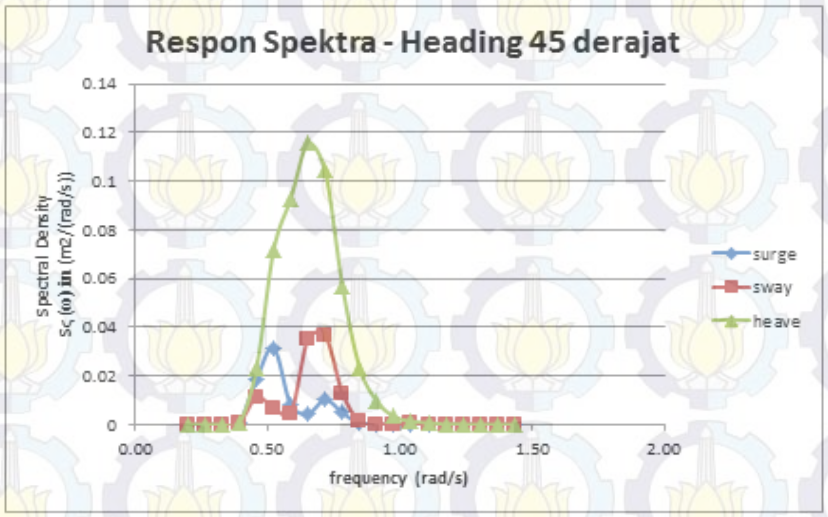

Respon Spektra - Heading 180 derajat
Spectral Density
Sζ (ω) in (m2/(rad/s))
0.14
0.12
0.1
0.08
0.06
0.04
0.02
0
0
0.5
1
1.5
frequency (rad/s)
surge
sway
heave

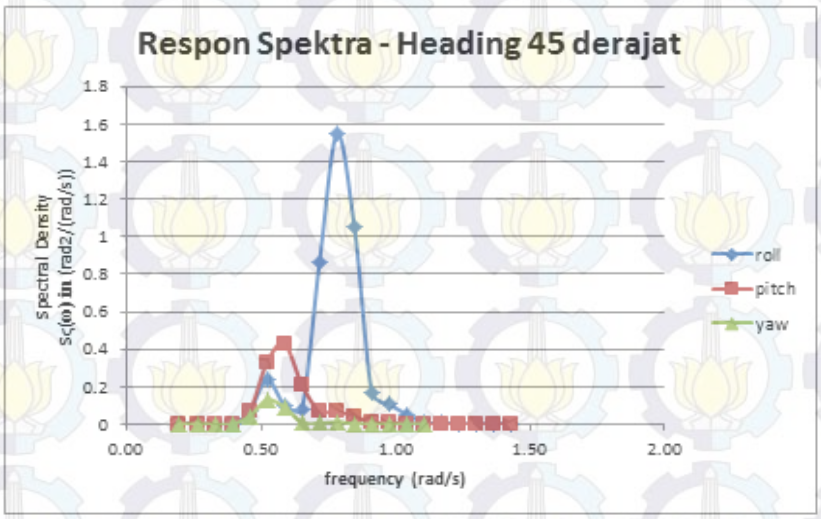

Respon Spektra - Heading 180 derajat
Spectral Density
Sζ(ω) in (rad2/(rad/s))
0.18
0.16
0.14
0.12
0.1
0.08
0.06
0.04
0.02
0
0
0.5
1
1.5
frequency (rad/s)
roll
pitch
yaw

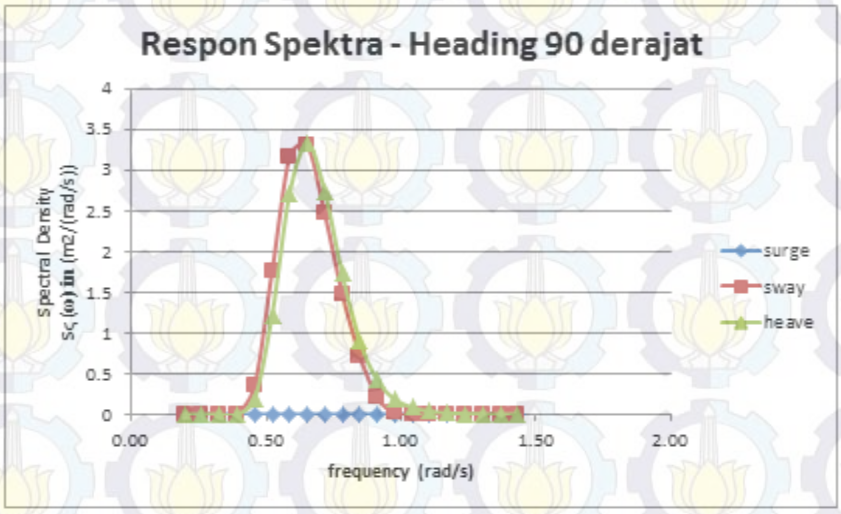
LIGHT LOAD

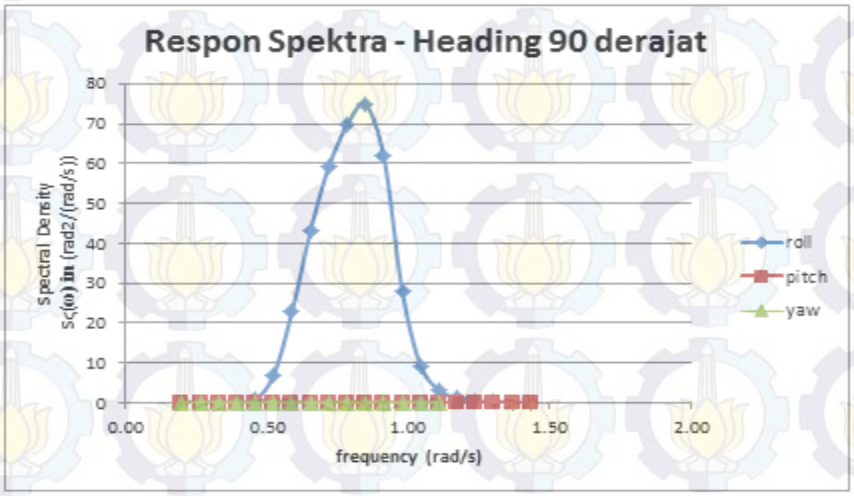

Respon Spektra - Heading 0 derajat
Spectral Density
Sζ (ω) in (m2/(rad/s))
0.09
0.08
0.07
0.06
0.05
0.04
0.03
0.02
0.01
0
0.00
0.50
1.00
1.50
2.00
frequency (rad/s)
surge
sway
heave

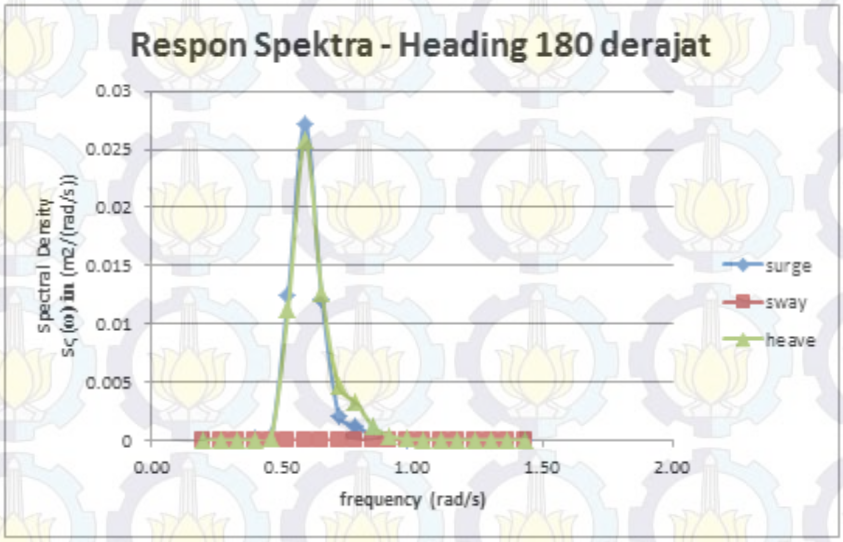

Respon Spektra - Heading 0 derajat
Spectral Density
Sζ(ω) in (rad2/(rad/s))
0.12
0.1
0.08
0.06
0.04
0.02
0
0.00
0.50
1.00
1.50
2.00
frequency (rad/s)
roll
pitch
yaw

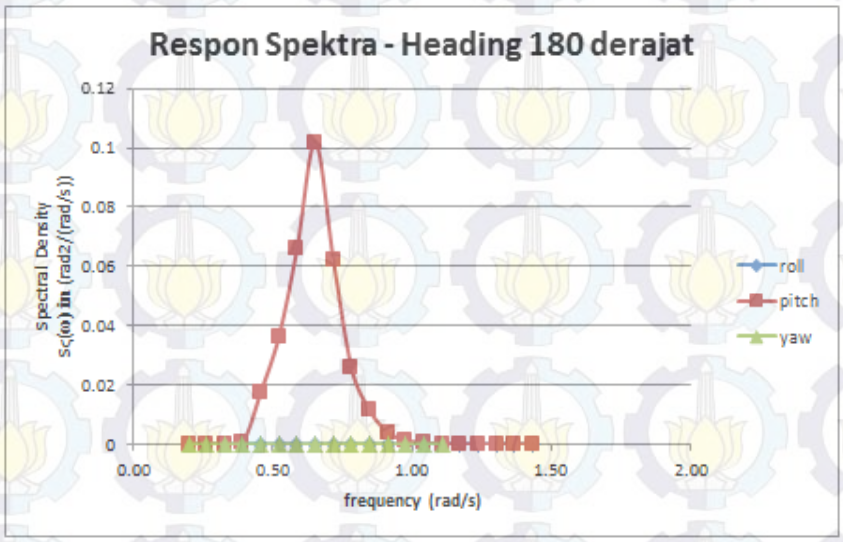

Respon Spektra - Heading 45 derajat
Spectral Density
Sζ (ω) in (m2/(rad/s))
0.14
0.12
0.1
0.08
0.06
0.04
0.02
0
0.00
0.50
1.00
1.50
2.00
frequency (rad/s)
surge
sway
heave


Respon Spektra - Heading 45 derajat
Spectral Density
Sζ(ω) in (rad2/(rad/s))
1.8
1.6
1.4
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
0.00
0.50
1.00
1.50
2.00
frequency (rad/s)
roll
pitch
yaw


Respon Spektra - Heading 90 derajat
Spectral Density
Sζ (ω) in (m2/(rad/s))
4
3.5
3
2.5
2
1.5
1
0.5
0
0.00
0.50
1.00
1.50
2.00
frequency (rad/s)
surge
sway
heave

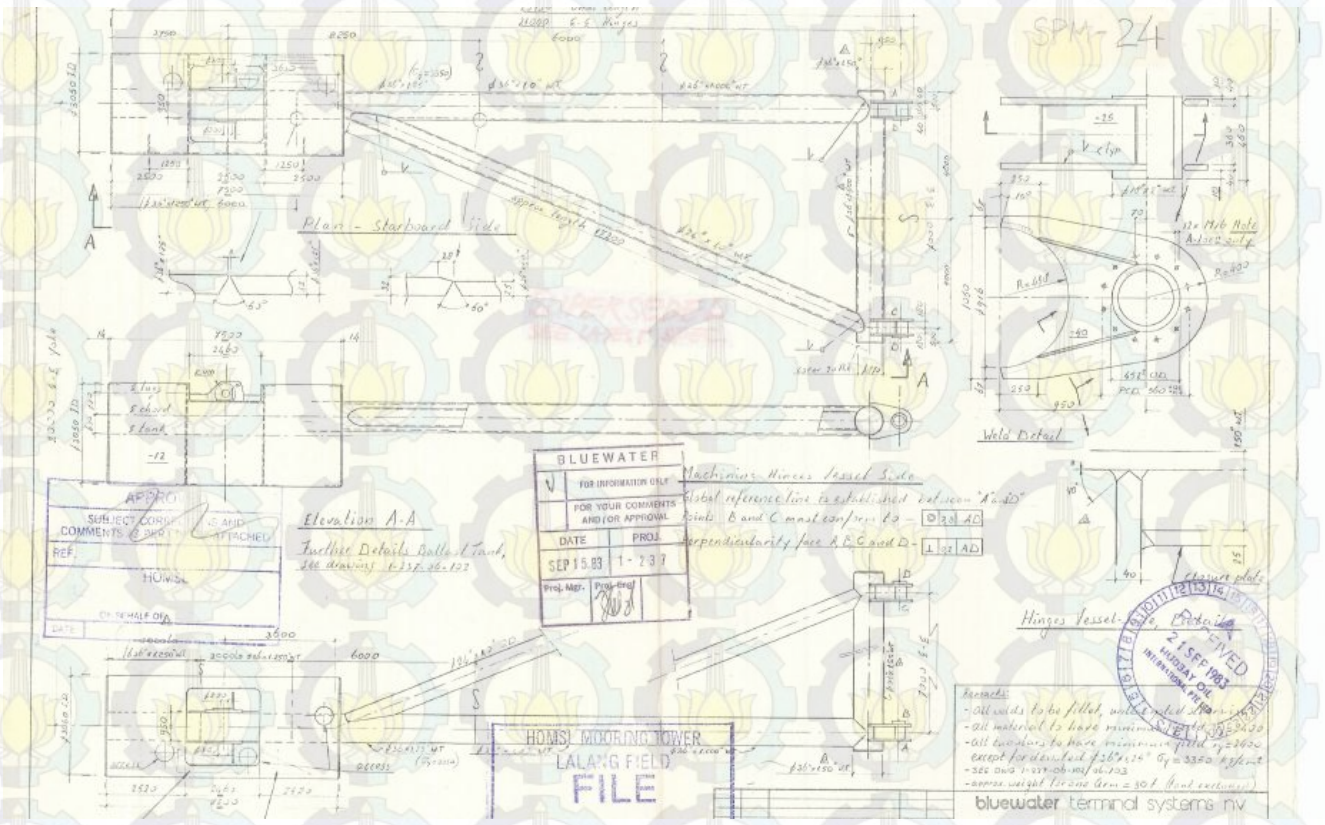

Respon Spektra - Heading 90 derajat
Spectral Density
Sζ(ω) in (rad2/(rad/s))
80
70
60
50
40
30
20
10
0
0.00
0.50
1.00
1.50
2.00
frequency (rad/s)
roll
pitch
yaw

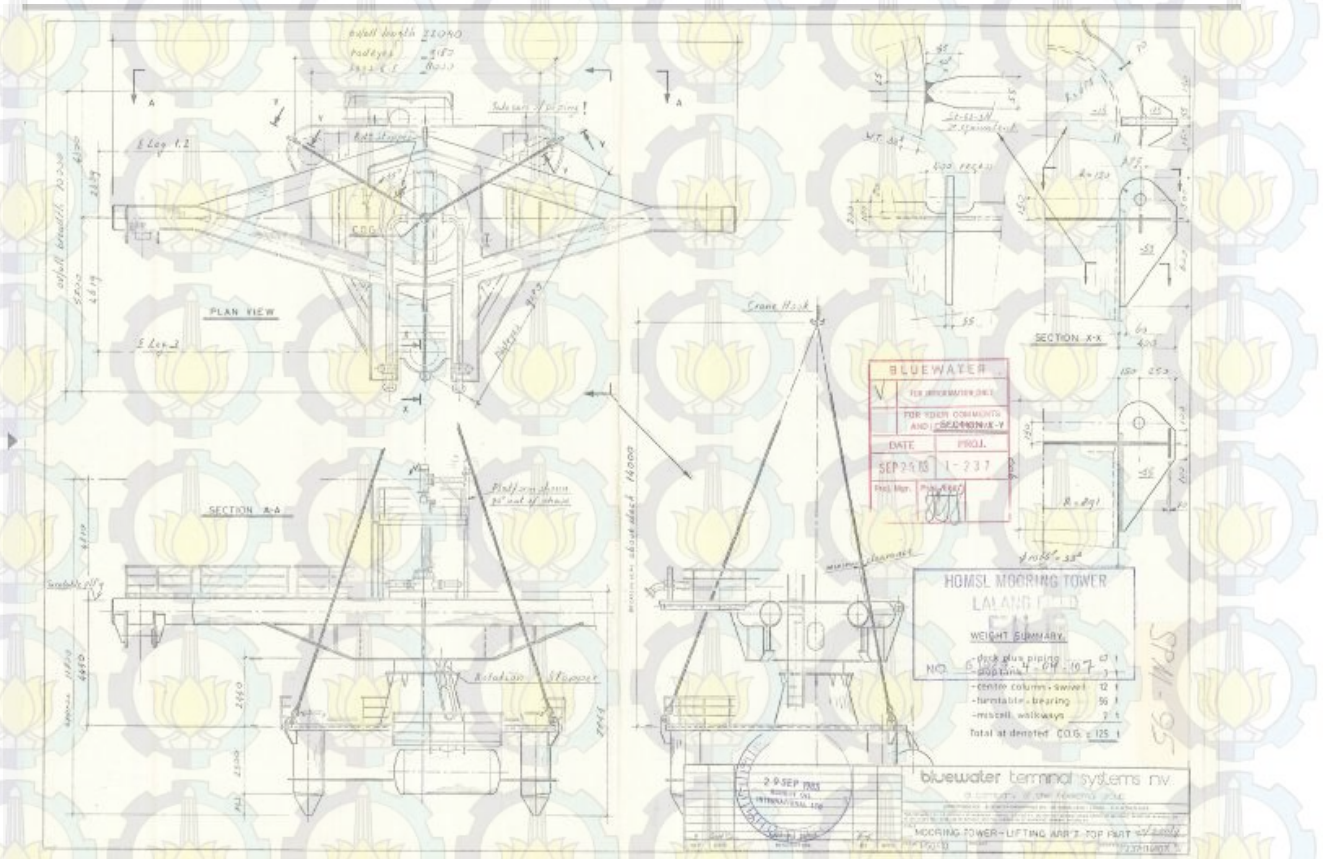

Respon Spektra - Heading 180 derajat
Spectral Density
Sζ(ω) in (m2/(rad/s))
0.03
0.025
0.02
0.015
0.01
0.005
0
0.00
0.50
1.00
1.50
2.00
frequency (rad/s)
surge
sway
heave

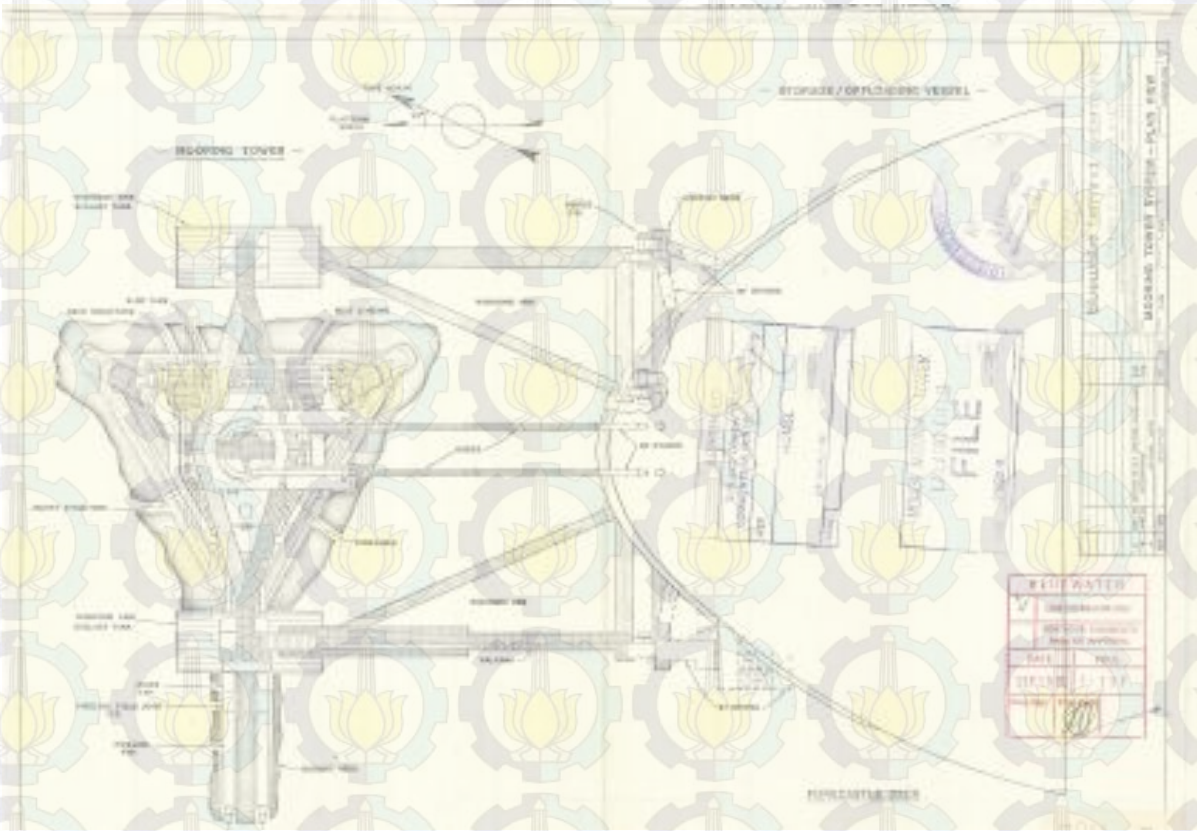

Respon Spektra - Heading 180 derajat
Spectral Density
Sζ(ω) in (rad2/(rad/s))
0.12
0.1
0.08
0.06
0.04
0.02
0
0.00
0.50
1.00
1.50
2.00
frequency (rad/s)
roll
pitch
yaw

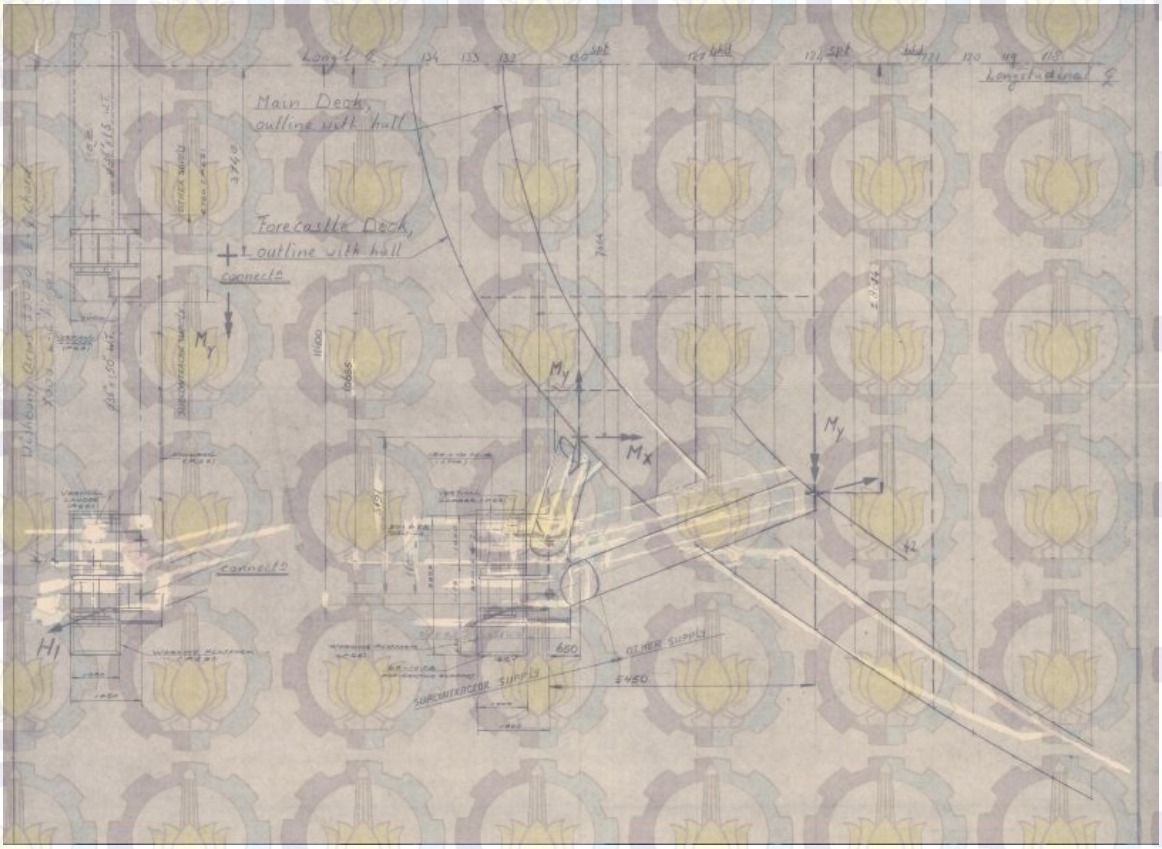
LAMPIRAN C

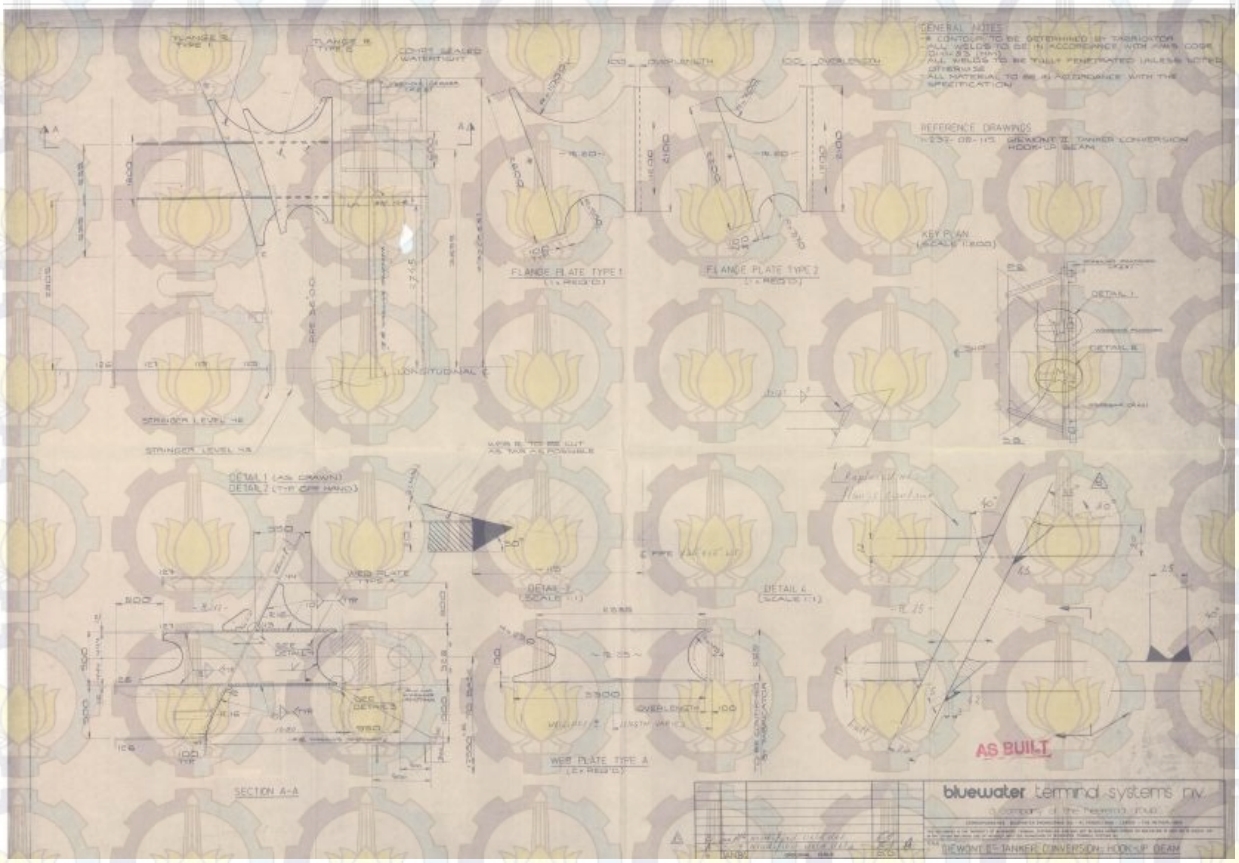
DATA KONSTRUKSI *YOKE ARM* DAN FSO LADINDA


SPM-24
Plan - Starboard Side
Elevation A-A
Weld Detail
BLUEWATER
FOR INFORMATION ONLY
FOR YOUR COMMENTS AND/OR APPROVAL
DATE
PROJ.
SEP 15.83
1-237
HOMSL MOORING TOWER
LALANG FIELD
FILE
bluewater terminal systems nv


PLAN VIEW
SECTION A-A
SECTION X-X
Crane Hook
BLUEWATER
HOMSL MOORING TOWER
LALANG FIELD
WEIGHT SUMMARY
bluewater terminal systems nv
MOORING TOWER - LIFTING ARRT FOR PART


MOORING TOWER
STORAGE/OFFLOADING VESSEL
FILE


Main Deck, outline with hull
Forecastle Deck, outline with hull
connect.
connect.
OTHER SUPPLY
SUBCONTRACTOR SUPPLY


GENERAL NOTES
REFERENCE DRAWINGS
KEY PLAN
FLANGE PLATE TYPE 1
FLANGE PLATE TYPE 2
LONGITUDINAL E
STRINGER LEVEL H8
DETAIL 1 (AS DRAWN)
DETAIL 2 (TYP FOR HAND)
WEB PLATE TYPE A
DETAIL 3
DETAIL 4
DETAIL 5
DETAIL 6
SECTION A-A
AS BUILT
bluewater terminal systems pty.
DEWONT II - TANKER CONVERSION HOOK-UP BEAM

BIODATA PENULIS

Sekar Rismarini dilahirkan di Kota Yogyakarta pada 23 April 1993. Lahir dari keluarga yang sederhana yang merupakan anak kedua dari 2 bersaudara pasangan Heddy Julistiono dan Sri Rejeki. Penulis menempuh pendidikan SD, SMP dan SMA di Bogor. Setelah itu, tahun 2011 penulis melanjutkan pendidikan di Jurusan Teknik Kelautan ITS Surabaya. Selama di bangku perkuliahan penulis aktif di berbagai organisasi mahasiswa, kegiatan sosial, dan kegiatan-kegiatan yang lain. Penulis lebih aktif pada organisasi mahasiswa di Jurusan seperti Himpunan Mahasiswa Jurusan Teknik Kelautan Departemen Hubungan Luar. Penulis menjabat sebagai sekertaris departemen pada periode 2012-2013 dan menjabat sebagai staff ahli pada periode 2013-2014. Penulis juga pernah mengikuti PKM-K dengan judul ROSSI (Roll isi singkong) yang dibiayai, namun hanya lolos sampai jenjang institut. Penulis percaya bahwa Allah SWT merahasiakan masa depan untuk menguji umat-Nya agar berprasangka baik, berencana dengan baik, berusaha yang terbaik dan bersyukur sebanyak-banyaknya. Maka dari itu jangan pernah menyerah dan percaya selalu pada rencana-Nya.

Contact Person: sekarismarini@gmail.com