



TUGAS AKHIR - MO141326

# ANALISA KEKUATAN STRUKTUR GLOBAL *SINGLE POINT MOORING* AKIBAT BEBAN GELOMBANG EKSTRIM

ARDHYAN WISNU PRADHANA

NRP. 4310 100 031

Dosen Pembimbing :

Ir. Imam Rochani, M.Sc.

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

JURUSAN TEKNIK KELAUTAN

Fakultas Teknologi Kelautan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya 2015



FINAL PROJECT - MO141326

# GLOBAL STRENGTH ANALYSIS OF SINGLE POINT MOORING STRUCTURE DUE TO EXTREME WAVES LOAD

ARDHYAN WISNU PRADHANA

NRP. 4310 100 031

Supervisors :

Ir. Imam Rochani, M.Sc.

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

OCEAN ENGINEERING DEPARTMENT

Faculty of Marine Technology

Sepuluh Nopember Institute of Technology

Surabaya 2015

**ANALISA KEKUATAN STRUKTUR GLOBAL *SINGLE POINT*  
*MOORING* AKIBAT BEBAN GELOMBANG EKSTRIM**

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada

Program Studi S-1 Jurusan Teknik Kelautan  
Fakultas Teknologi Kelautan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

**ARDHYAN WISNU PRADHANA**

NRP. 4310 100 031

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir :

1. Ir. Imam Rochani, M.Sc. .... (Pembimbing 1)
2. Ir. Handayanu, M.Sc. .... (Pembimbing 2)



SURABAYA, JANUARI 2015

## ANALISA KEKUATAN STRUKTUR *SINGLE POINT MOORING* AKIBAT BEBAN GELOMBANG EKSTRIM

Nama : Ardhyan Wisnu Pradhana  
NRP : 4310 100 031  
Jurusan : Teknik Kelautan FTK – ITS  
Dosen Pembimbing : Ir. Imam Rochani, MSc.  
Ir. Handayanu, MSc., Ph.D.

### Abstrak

Industri migas yang terus berkembang ke arah laut dalam (*deep water*) turut memacu perkembangan teknologi di bidang eksplorasi, eksploitasi serta transportasi migas. Salah satu contoh adalah mengenai teknologi *loading* dan *offloading* untuk minyak bumi hasil eksploitasi maupun hasil olahan dari minyak tersebut. Salah satu cara memindahkan minyak tersebut adalah dengan kapal tanker. Kapal tanker memerlukan dermaga dengan kedalaman yang dalam agar bisa bersandar. Dengan menggunakan *single point mooring* (SPM) akan memungkinkan kapal tanker dapat melakukan *loading-offloading* tanpa harus merapat ke dermaga. Oleh karena itu SPM harus memiliki kemampuan untuk menahan struktur itu sendiri serta kapal tanker tetap pada posisinya. Namun pada saat kondisi ekstrim tidak dapat dilakukan kegiatan *loading-offloading* dan tanker tidak boleh tertambat. Dalam Tugas Akhir ini akan dibahas mengenai respon gerakan dan kekuatan struktur global SPM akibat beban gelombang ekstrim. Dari hasil analisa, respon gerakan terbesar yang terjadi yaitu pada gerakan *surge* dan *pitch* masing-masing sebesar  $12,984 \text{ m}^2/(\text{rad/s})$  untuk *surge* dan  $299,561 \text{ deg}^2/(\text{rad/s})$  untuk *pitch*. Hasil respon gerakan tersebut digunakan sebagai dasar dalam melakukan analisa *tension* tiap tali tambat berdasar kriteria ULS dan ALS. Nilai *tension* terbesar yang terjadi untuk kondisi ULS yaitu sebesar  $1156830 \text{ N}$  untuk *wire with fibre core* yang terjadi pada tali tambat satu (1) dan  $1006680 \text{ N}$  untuk *chain* pada tali tambat nomor dua (2). Dalam kondisi ALS *tension* terbesar yang terjadi yaitu sebesar  $2313660 \text{ N}$  untuk *wire with fibre core* dan  $2111884 \text{ N}$  untuk *chain* pada tali tambat nomor satu (1) dengan skenario tali tambat nomor empat (4) diputus. Sedangkan untuk batasan *tension* maksimum yang dihitung berdasar kriteria API RP 2SK 2<sup>nd</sup> edition untuk kondisi ULS adalah  $8955089,82 \text{ N}$  untuk *wire with fibre core* dan  $3873756,28 \text{ N}$  untuk *chain*. Kemudian untuk kondisi ALS adalah  $11964000 \text{ N}$  untuk *wire with fibre core* dan  $5175338,4 \text{ N}$  untuk *chain*. Nilai *tension* dan tekanan akibat gelombang yang didapat pada analisa ini kemudian digunakan sebagai beban pada analisa kekuatan struktur global. Pada analisa ini didapatkan hasil *stress* terbesar yang terjadi pada kondisi ULS yaitu sebesar  $161,54 \text{ MPa}$  serta untuk kondisi ALS sebesar  $355,31 \text{ MPa}$ .

**Kata kunci :** SPM, RAO, *tension*, ULS, ALS, simulasi *time-domain*

## **GLOBAL STRENGTH ANALYSIS OF SINGLE POINT MOORING STRUCTURE DUE TO EXTREME WAVES LOAD**

Name : Ardhyan Wisnu Pradhana  
Reg. Number : 4310 100 031  
Departement : Ocean Engineering, FTK – ITS  
Supervisors : Ir. Imam Rochani, MSc.  
Ir. Handayanu, MSc., Ph.D.

### **Abstract**

Oil and gas industry that continues to develop in the deep water will affect on the development of exploration, exploitation and transportation of oil and gas technology. For example, the loading and offloading technology for the petroleum and processed oil. One example the way for transporting the oil is by using oil tanker. Oil tankers require pier with the deeper depth in order to lean. By using a single point mooring (SPM) will allow oil tankers to do loading-offloading without having to tie up to the pier. Therefore SPM must have the ability to hold the structure itself and the oil tankers remain in position. But when in the extreme conditions, loading-offloading activity can not be done and oil tanker should not be moored. In this final project will be discussed on the response of movement and strength of the global structure of SPM due to extreme wave loads. The largest movement response is in surge and pitch respectively  $12.984 \text{ m}^2 / (\text{rad} / \text{s})$  for surge and  $299.561 \text{ deg}^2 / (\text{rad} / \text{s})$  for the pitch. The results of SPM response will be used as a basis for analyzing the tension of each mooring lines based on ULS and ALS criteria. The greatest tension that occurs for ULS conditions is 1156830 N for wire with fibre core which occurs in mooring lines number one (1) and 1006680 N for chain which occurs in mooring lines number two (2). The greatest tension for ALS condition that occurs is 2313660 N for wire with fibre core and 2111884 N for chain on mooring lines number one (1) at broken condition of mooring lines number four (4). As for the maximum tension limit is calculated based on the criteria of API RP 2SK 2nd edition for ULS condition is 8955089.82 N for wire with fiber core and 3873756.28 N for chain. And for the ALS conditions is 11964000 N for wire with fiber core and 5175338.4 N for the chain. The values of line tension and wave pressure in this analysis then used as the load on the analysis of the global structural strength. The results of maximum stress in this analysis for ULS condition is 161,54 MPa, and for ALS condition is 355,31 MPa.

**Keywords** : SPM, RAO, tension, ULS, ALS, time-domain simulation

## **KATA PENGANTAR**

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

Puji syukur penulis ungkapkan kehadiran Allah SWT Tuhan Yang Maha Esa karena atas berkat karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan sebaik-baiknya. Tugas Akhir ini berjudul “**ANALISA KEKUATAN STRUKTUR *SINGLE POINT MOORING* AKIBAT BEBAN GELOMBANG EKSTRIM**” sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan jenjang studi Sarjana (S-1) di Teknik Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Tugas Akhir ini akan membahas tentang perilaku gerak struktur single point mooring (SPM) yang dikorelasikan dengan tension yang terjadi pada tali tambat struktur SPM untuk menentukan apakah kekuatan struktur global SPM tersebut aman ditinjau dari kekuatan tali tambatnya berdasarkan rules dan codes yang ada.

Dalam penulisan laporan Tugas Akhir ini tentunya masih banyak kekurangan yang terjadi karena penulis hanya manusia biasa yang tak luput dari salah. Oleh karena itu saran dan kritik yang membangun sangat diperlukan untuk meningkatkan kemampuan penulis dalam menulis laporan kedepannya. Besar harapan penulis semoga laporan Tugas Akhir ini dapat berguna untuk perkembangan ilmu pengetahuan khususnya dibidang teknologi kelautan.

Surabaya, Januari 2015

Ardhyan Wisnu Pradhana

## UCAPAN TERIMA KASIH

Dalam proses pengerjaan Tugas Akhir ini penulis banyak menerima bantuan motivasi ataupun material dari beberapa pihak baik secara langsung maupun tak langsung. Pada kesempatan ini penulis sangat berterima kasih kepada semua pihak yang telah membantu. Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada kedua orang tua serta adik yang tak henti-hentinya memberikan semangat serta mendoakan penulis. Teman-teman khususnya Yuni Ari Wibowo, Raditya Danu R., Rizki Amalia P., Edi Rochmad P., Tito Firmantara, dan Novananda Sena P. yang telah membantu dalam diskusi dan bertukar ilmu serta bantuan lainnya dalam pengerjaan Tugas Akhir ini.

Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Bapak Ir. Imam Rochani, M.Sc. dan Bapak Ir. Handyanu, M.Sc., Ph.D., yang telah membimbing dan senantiasa membagi ilmunya kepada penulis sehingga pengerjaan Tugas Akhir ini dapat terselesaikan. Tidak lupa juga penulis ucapkan terima kasih kepada pihak Asrama Mahasiswa ITS yang telah memberikan penulis semangat dan bantuan tempat untuk mengerjakan Tugas Akhir ini.

Tugas Akhir ini juga tidak akan selesai tanpa bantuan dan dukungan teman-teman Teknik Kelautan angkatan 2010, kakak-kakak senior dan teman-teman penulis yang tidak bisa disebutkan satu-persatu. Terima kasih atas semua bantuannya, semoga mendapat balasan pahala dari Allah SWT.

Surabaya, Januari 2015

Ardhyan Wisnu Pradhana

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
<i>COVER</i> .....	ii
LEMBAR PENGESAHAN .....	iii
ABSTRAK.....	iv
<i>ABSTRACT</i> .....	v
KATA PENGANTAR .....	vi
UCAPAN TERIMA KASIH.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b> v
DAFTAR LAMPIRAN.....	xv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang Masalah.....	1
1.2. Perumusan Masalah.....	2
1.3. Tujuan.....	3
1.4. Manfaat.....	3
1.5. Batasan Masalah.....	3
1.6. Sistematika Penulisan.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI .....	7
2.1. Tinjauan Pustaka .....	7
2.2. Dasar Teori.....	9
2.2.1. Gerakan Bangunan Apung.....	9
2.2.2. Beban Gelombang.....	11
2.2.3. Spektrum Gelombang .....	12
2.2.4. <i>Response Amplitude Operator</i> .....	14



2.2.5.	Respon Bangunan Apung pada Gelombang Acak.....	16
2.2.6.	Analisa Respon .....	17
2.2.7.	Dasar Analisa Dinamis.....	18
2.2.8.	Analisa Sistem Tambat pada Kondisi ULS dan ALS .....	20
2.2.8.1.	ULS ( <i>Ultimate Limit State</i> ) .....	20
2.2.8.2.	ALS ( <i>Accidental Limit State</i> ) .....	20
2.2.8.3.	<i>Tension</i> pada Tali Tambat .....	20
2.2.9.	Tegangan ( <i>Stress</i> ).....	22
2.2.9.1.	Tegangan Normal.....	22
2.2.9.2.	Tegangan Geser.....	23
2.2.9.3.	Tegangan Von Mises.....	23
BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....		25
3.1.	Langkah Kerja .....	25
3.2.	Penjelasan Diagram Alir .....	27
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN.....		31
4.1.	Pemodelan Struktur <i>Floating Buoy</i> .....	31
4.2.	Validasi Model .....	33
4.3.	Pemodelan Struktur SPM dan <i>Mooring Lines</i> .....	33
4.4.	Skenario Analisa Perilaku Gerak <i>Single Point Mooring</i> .....	35
4.5.	Analisa Perilaku Gerak SPM .....	35
4.5.1.	RAO Gerakan Translasiional.....	36
4.5.2.	RAO Gerakan Rotasional.....	38
4.6.	Analisa Perilaku Gerak SPM pada Gelombang Acak .....	40
4.6.1.	Analisa Spektra Gelombang .....	40
4.6.2.	Analisa Perilaku Gerak SPM.....	43
4.7.	Distribusi <i>Tension</i> Pada Tali Tambat .....	46
4.7.1.	Analisa <i>Tension</i> Tali Tambat Untuk SPM pada Kondisi ULS.....	47
4.7.2.	Analisa <i>Tension</i> Tali Tambat Untuk SPM pada Kondisi ALS.....	50
4.7.2.1.	Kondisi Tali Nomor Empat (4) Putus.....	51

4.7.2.2.	Kondisi Tali Nomor Satu (1) Putus.....	53
4.7.2.3.	Kondisi Tali Nomor Dua (2) Putus.....	55
4.7.2.1.	Kondisi Tali Nomor Tiga (3) Putus.....	57
4.8.	Analisa Kekuatan Struktur SPM .....	60
4.8.1.	Pemodelan Struktur SPM .....	60
4.8.2.	<i>Meshing</i> Model.....	62
4.8.3.	<i>Input</i> Support dan Pembebanan pada Geometri .....	62
4.8.4.	Hasil Analisa Struktur .....	64
BAB V PENUTUP .....		67
5.1.	Kesimpulan.....	67
5.2.	Saran.....	68
DAFTAR PUSTAKA .....		69
LAMPIRAN		
BIODATA PENULIS		

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Amplitudo dan tinggi gelombang pada spektrum.....	12
Tabel 2.2. Kriteria <i>safety factor</i> tali tambat .....	21
Tabel 3.1. <i>Principal dimension</i> struktur.....	27
Tabel 3.2. Data lingkungan tempat struktur beroperasi .....	27
Tabel 3.3. Data <i>mooring line</i> struktur <i>single buoy mooring</i> .....	28
Tabel 4.1. Validasi model berdasar <i>ABS rules</i> .....	33
Tabel 4.2. Panjang tali tambat.....	34
Tabel 4.3. Ringkasan nilai RAO tertinggi .....	40
Tabel 4.4. Spektra gelombang.....	41
Tabel 4.5. Ringkasan nilai respon struktur tertinggi tiap gerakan .....	46
Tabel 4.6. Ringkasan nilai <i>tension</i> terbesar tiap tali tambat kondisi ULS ...	50
Tabel 4.7. Ringkasan nilai <i>tension</i> terbesar tiap tali tambat kondisi ALS ...	59

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Dimensi <i>single buoy mooring</i> .....	4
Gambar 1.2. Dimensi <i>single buoy mooring</i> tampak depan .....	4
Gambar 2.1. <i>Single Point Mooring</i> ( <a href="http://www.marineinsight.com">www.marineinsight.com</a> ).....	7
Gambar 2.2. Enam derajat kebebasan gerakan bangunan apung.....	9
Gambar 2.3. Bentuk umum grafis respons gerakan bangunan apung (Djarmiko, 2012).....	15
Gambar 2.4. Transformasi spektra gelombang menjadi spektra respons (Djarmiko, 2012).....	17
Gambar 2.5. Tegangan Normal yang bekerja pada suatu benda dengan luas A .....	22
Gambar 2.6. Ilustrasi vektor tegangan <i>Von Mises</i> .....	23
Gambar 3.1. Diagram alir penelitian.....	25
Gambar 3.2. Lanjutan diagram alir penelitian .....	26
Gambar 4.1. Model tiga (3) dimensi <i>floating buoy</i> SPM.....	31
Gambar 4.2. Model penegar <i>floating buoy</i> SPM .....	32
Gambar 4.3. Profil penegar berbentuk L.....	32
Gambar 4.4. Profil penegar berbentuk T.....	33
Gambar 4.5. Konfigurasi <i>mooring</i> SPM .....	34
Gambar 4.6. <i>Mooring line</i> pada SPM .....	34
Gambar 4.7. RAO gerakan <i>surge</i> dengan <i>heading</i> 0° .....	36
Gambar 4.8. RAO gerakan <i>heave</i> dengan <i>heading</i> 0° .....	36
Gambar 4.9. RAO gerakan <i>sway</i> dengan <i>heading</i> 0° .....	37
Gambar 4.10. RAO gerakan <i>roll</i> dengan <i>heading</i> 0° .....	38
Gambar 4.11. RAO gerakan <i>pitch</i> dengan <i>heading</i> 0° .....	38
Gambar 4.12. RAO gerakan <i>yaw</i> dengan <i>heading</i> 0° .....	39
Gambar 4.13. Grafik spektrum gelombang JONSWAP ( $H_s = 6\text{m}$ , $T_p =$ 9s).....	42
Gambar 4.14. Langkah perhitungan mencari respon spektra.....	42
Gambar 4.15. Grafik respon spektra gerakan <i>surge</i> dari SPM .....	43

Gambar 4.16. Grafik respon spektra gerakan <i>heave</i> dari SPM.....	43
Gambar 4.17. Grafik respon spektra gerakan <i>sway</i> dari SPM .....	44
Gambar 4.18. Grafik respon spektra gerakan <i>roll</i> dari SPM .....	44
Gambar 4.19. Grafik respon spektra gerakan <i>pitch</i> dari SPM .....	45
Gambar 4.20. Grafik respon spektra gerakan <i>yaw</i> dari SPM.....	45
Gambar 4.21. Nilai <i>tension</i> untuk tali tambat nomor satu (1) kondisi ULS	48
Gambar 4.22. Nilai <i>tension</i> untuk tali tambat nomor dua (2) kondisi ULS.	48
Gambar 4.23. Nilai <i>tension</i> untuk tali tambat nomor tiga (3) kondisi ULS.	49
Gambar 4.24. Nilai <i>tension</i> untuk tali tambat nomor empat (4) kondisi ULS .....	49
Gambar 4.25. Nilai <i>tension</i> untuk tali tambat nomor satu (1) kondisi ALS saat tali nomor empat (4) putus .....	52
Gambar 4.26. Nilai <i>tension</i> untuk tali tambat nomor dua (2) kondisi ALS saat tali nomor empat (4) putus .....	52
Gambar 4.27. Nilai <i>tension</i> untuk tali tambat nomor tiga (3) kondisi ALS saat tali nomor empat (4) putus .....	53
Gambar 4.28. Nilai <i>tension</i> untuk tali tambat nomor dua (2) kondisi ALS saat tali nomor satu (1) putus .....	54
Gambar 4.29. Nilai <i>tension</i> untuk tali tambat nomor tiga (3) kondisi ALS saat tali nomor satu (1) putus .....	54
Gambar 4.30. Nilai <i>tension</i> untuk tali tambat nomor empat (4) kondisi ALS saat tali nomor satu (1) putus .....	55
Gambar 4.31. Nilai <i>tension</i> untuk tali tambat nomor satu (1) kondisi ALS saat tali nomor dua (2) putus.....	56
Gambar 4.32. Nilai <i>tension</i> untuk tali tambat nomor tiga (3) kondisi ALS saat tali nomor dua (2) putus.....	56
Gambar 4.33. Nilai <i>tension</i> untuk tali tambat nomor empat (4) kondisi ALS saat tali nomor dua (2) putus.....	57
Gambar 4.34. Nilai <i>tension</i> untuk tali tambat nomor satu (1) kondisi ALS saat tali nomor tiga (3) putus.....	58
Gambar 4.35. Nilai <i>tension</i> untuk tali tambat nomor dua (2) kondisi ALS saat tali nomor tiga (3) putus.....	58

Gambar 4.36. Nilai tension untuk tali tambat nomor empat (4) kondisi ALS saat tali nomor tiga (3) putus.....	59
Gambar 4.37. Model geometri struktur.....	61
Gambar 4.38. Model penegar struktur SPM .....	61
Gambar 4.39. <i>Meshing</i> geometri struktur .....	62
Gambar 4.40. Lokasi <i>support</i> struktur .....	62
Gambar 4.41. Tekanan terbesar yang terjadi pada struktur akibat beban gelombang.....	63
Gambar 4.42. <i>Input</i> beban tekanan gelombang pada geometri struktur .....	63
Gambar 4.43. <i>Input</i> beban tekanan gelombang arah vertikal pada geometri struktur .....	64
Gambar 4.44. <i>Input</i> beban tarikan tali tambat pada geometri struktur .....	64
Gambar 4.45. Hasil <i>stress</i> yang terjadi pada geometri struktur kondisi ULS .....	65
Gambar 4.46. Detail lokasi <i>stress</i> terbesar yang terjadi pada geometri struktur kondisi ULS.....	65
Gambar 4.47. Hasil <i>stress</i> yang terjadi pada geometri struktur kondisi ALS .....	65
Gambar 4.46. Detail lokasi <i>stress</i> terbesar yang terjadi pada geometri struktur kondisi ULS.....	66

# BAB I PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang Masalah

Industri migas yang terus berkembang ke arah laut dalam (*deep water*) turut memacu perkembangan teknologi di bidang eksplorasi, eksploitasi serta transportasi migas. Salah satu contoh adalah mengenai teknologi *loading* dan *offloading* untuk minyak bumi hasil eksploitasi maupun hasil olahan dari minyak tersebut. Ada beberapa cara yang umum dipakai untuk mentransportasikan minyak tersebut menuju kilang minyak ataupun hasil dari pengilangan minyak untuk didistribusikan lebih lanjut yaitu dengan media pipa (*pipeline*) atau dengan alat transportasi seperti kapal tanker.

*Pipeline* pertama kali dibangun di Amerika pada tahun 1859 untuk mentransportasikan minyak mentah. Dalam satu setengah abad penggunaan *pipeline* dalam industri migas telah membuktikan bahwa *pipeline* adalah moda transportasi yang paling ekonomis untuk transportasi migas. *Pipeline* telah menunjukkan kemampuan beradaptasi dengan berbagai lingkungan termasuk daerah terpencil dan lingkungan yang tidak bersahabat (Guo et al., 2004). Namun jalur pipa memiliki kelemahan yaitu pada saat instalasi yang tergolong sulit dan membutuhkan waktu yang cukup lama terlebih untuk jalur pipa bawah laut (*subsea pipeline*).

Selain itu proses memindahkan minyak dalam jumlah besar juga dapat dilakukan dengan alat transportasi seperti kapal tanker. Berbeda dengan *pipeline*, cara ini lebih fleksibel dan memungkinkan untuk mendistribusikan minyak ke berbagai daerah asalkan daerah tersebut memiliki dermaga. Namun dermaga yang digunakan sebagai tempat sandar dari kapal tanker harus memiliki kedalaman yang cukup dalam sebagai konsekuensi dari kapal tanker yang memiliki *draft* yang tinggi. Untuk dermaga dengan kedalaman yang dangkal maka diperlukan suatu struktur yang dapat menyalurkan muatan dari tanker menuju dermaga tanpa harus bersandar mendekati bibir pantai. Ada beberapa cara yang dapat dilakukan yaitu membangun *jetty* atau menggunakan *single point mooring* (SPM).

*Jetty* dapat digunakan ketika jarak antara dermaga dengan kedalaman yang memungkinkan kapal tanker merapat tidak terlalu jauh, karena jika terlalu jauh maka biaya untuk membuat struktur *jetty* akan sangat mahal. Apabila jarak tersebut cukup jauh maka dapat digunakan opsi lain yaitu menggunakan *single point mooring* (SPM).

Menurut Chakrabarti (1987) jika suatu struktur hanya menggunakan satu tali tambat (*single line*) untuk menambat sebuah shuttle tanker maka struktur tersebut dapat disebut *single point mooring* (SPM) atau *single buoy mooring* (SBM) *system*. Pada referensi lain mengenai definisi dari *single point mooring*, disebutkan bahwa *single point mooring* (SPM) merupakan struktur terapung yang berfungsi sebagai *offshore terminal* yang digunakan untuk menyalurkan minyak dari tanker menuju *site* atau sebaliknya. *Single point mooring* (SPM) dapat diaplikasikan pada kedalaman yang beragam tanpa perlu membangun struktur seperti *jetty* (Indian Oil, SPM Terminal at Valdinar). Dengan kelebihan ini maka memungkinkan untuk tanker dengan ukuran yang sangat besar (*Very Large Crude Oil Carrier*) ataupun tanker dengan ukuran yang super besar (*Ultra Large Crude Oil Carrier*) dapat melakukan kegiatan *loading* atau *offloading*.

Pada penelitian ini akan dibahas bagaimana kekuatan struktur global dari *single point mooring* (SPM) IMODCO 12,5m “BALONGAN UP VI” milik PT. Pertamina yang dibangun di galangan milik PT. PAL Indonesia. Fokus dari penelitian ini adalah bagaimana kekuatan global struktur *single point mooring* (SPM) tersebut saat mengalami eksitasi akibat beban gelombang ekstrim dengan mengacu pada *rules* yang berlaku.

## **1.2 Perumusan Masalah**

Beberapa rumusan masalah yang akan dibahas dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

- a. Bagaimana respon gerakan dari *Single Point Mooring* (SPM) saat terkena beban gelombang ekstrim?



- b. Bagaimana *tension* yang terjadi pada *mooring line* dari *Single Point Mooring* (SPM) saat terkena beban gelombang ekstrim?
- c. Bagaimana tegangan yang terjadi pada struktur *Single Point Mooring* (SPM)?

### 1.3 Tujuan

Beberapa tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini akan dijelaskan sebagai berikut :

- a. Mengetahui respon gerakan dari *Single Point Mooring* (SPM) saat terkena beban gelombang ekstrim.
- b. Mengetahui *tension* yang terjadi pada *mooring line* dari *Single Point Mooring* (SPM) saat terkena beban gelombang ekstrim.
- c. Mengetahui tegangan yang terjadi pada struktur *Single Point Mooring* (SPM).

### 1.4 Manfaat penelitian

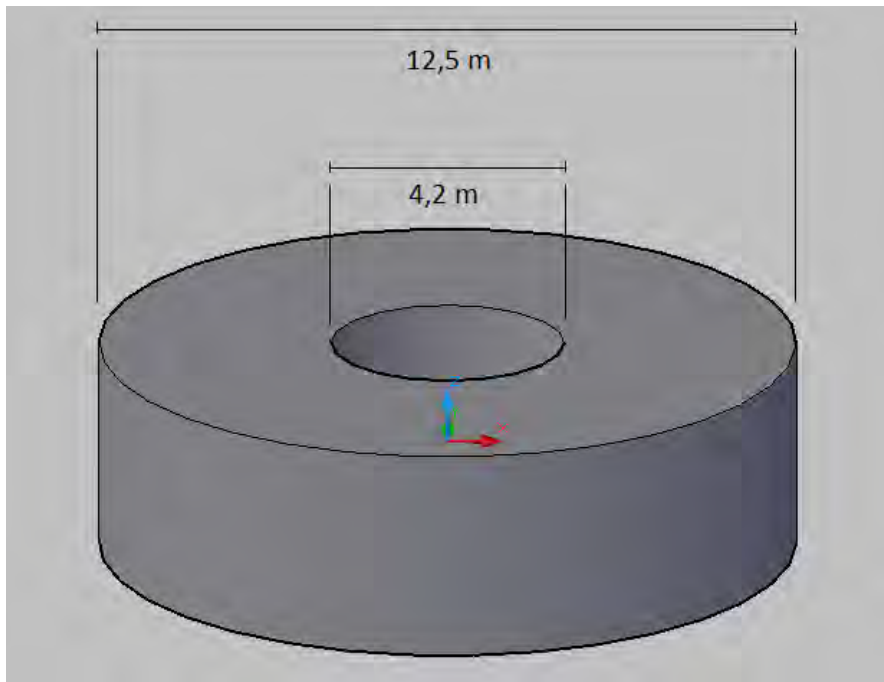
Dari analisa yang dilakukan terhadap SPM akibat beban lingkungan berupa gelombang ekstrim maka dapat diketahui tegangan yang terjadi pada struktur global *single point mooring* (SPM) akibat beban tersebut.

### 1.5 Batasan Masalah

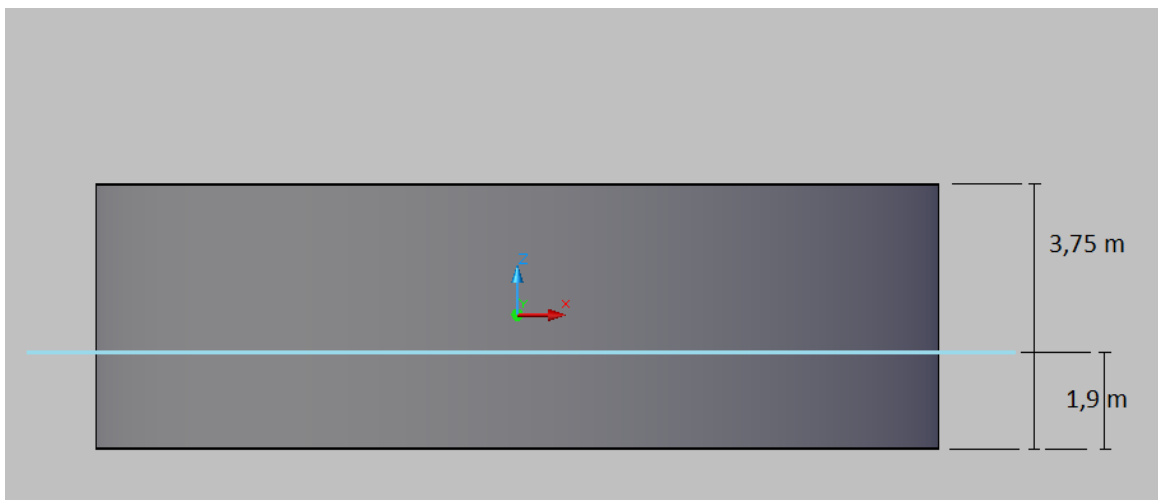
Batasan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

- a. *Single Point Mooring* (SPM) yang digunakan adalah SPM IMODCO 12,5 M “BALONGAN UP VI” dengan rincian ukuran sebagai berikut :

- *Outside diameter* : 12,5 m
- *Inside diameter* : 4,20 m
- *Depth* : 3,75 m
- *Draft* : 1,90 m
- *Weight* : 236 ton



Gambar 1.1 Dimensi *single buoy mooring*.



Gambar 1.2 Dimensi *single buoy mooring* tampak depan.

- b. SPM beroperasi di dermaga kilang minyak Balongan milik PT. Pertamina.
- c. Gerakan SPM yang ditinjau adalah gerak arah *surge*, *heave*, *sway*, *roll*, *pitch* dan *yaw*.
- d. Jumlah tali tambat adalah 4 buah simetris.

- e. *Single Point Mooring* (SPM) dalam kondisi *self floating* tanpa ada *shuttle tanker* yang tertambat (kondisi ekstrim).
- f. Beban gelombang yaitu berupa gelombang ekstrim dengan ketinggian maksimum 6,00 m dengan periode 9 second.
- g. Beban arus dan angin tidak diperhitungkan.
- h. Peralatan perpipaan, *turn table*, setra *skirt* tidak dimodelkan.
- i. Kekuatan daya cengkram (*holding capacity*) dari sistem jangkar tidak diperhitungkan.
- j. Analisis dinamis menggunakan simulasi *time domain* sebagai metode untuk mencari nilai *tension* dari sistem tambat dan simulasi *frequency domain* untuk mencari respon struktur
- k. Perhitungan RAO hanya pada satu sudut *heading* dikarenakan bentuk SPM yang silinder simetris.
- l. Penegar dari struktur yang dimodelkan disederhanakan untuk memudahkan proses pemodelan serta *meshing*.
- m. Beban yang bekerja pada struktur yaitu beban tarikan terbesar dari *mooring line* dan beban tekanan gelombang terbesar yang terjadi.
- n. Standard (*rules*) pada Tugas Akhir mengacu pada DNV OS E301, DNV RP-C205 dan API RP 2SK.

## **1.6. SISTEMATIKA PENULISAN**

Sistematika penulisan Tugas Akhir ini adalah:

### **BAB I PENDAHULUAN**

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

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

Bab ini berisi referensi dan juga teori-teori pendukung yang digunakan sebagai acuan atau pedoman dalam menyelesaikan tugas akhir. Referensi tersebut bersumber pada jurnal lokal maupun internasional, literatur, *rules / code* dan juga buku yang berkaitan dengan topik yang dibahas.

## **BAB III METODOLOGI PENELITIAN**

Bab ini berisi tentang alur pengerjaan tugas akhir dengan tujuan untuk memecahkan masalah yang diangkat dalam bentuk diagram alir atau *flow chart* yang disusun secara sistematis yang dilengkapi pula dengan data-data penelitian serta penjelasan detail untuk setiap langkah pengerjaannya.

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

Bab ini menjelaskan tentang pengolahan data yang diperoleh, kemudian pemodelan struktur dan pemodelan sistem tambat. Selanjutnya, dalam bab ini juga dilakukan pembahasan dan pengolahan *output* yang diperoleh dari *running software* yang mencakup analisis gerakan struktur saat tertambat dengan *mooring line*, serta mencari nilai *tension* pada *mooring line* dalam pembebanan kondisi ULS dan ALS.

## **BAB V PENUTUP**

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

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

#### 2.1 Tinjauan Pustaka

*Single Point Mooring* (SPM) merupakan suatu struktur terapung yang digunakan sebagai sarana tambat tanker sekaligus sebagai sarana untuk mentransfer migas baik dari tanker berkapasitas besar, dari struktur lepas pantai terapung lainnya maupun dari kilang minyak atau tambang migas yang ada di darat (Indian Oil, SPM Terminal at Vadinar).



Gambar 2.1 *Single Point Mooring*([www.marineinsight.com](http://www.marineinsight.com))

Ada beberapa pertimbangan dalam menggunakan SPM diantaranya yaitu untuk kapal tanker dengan ukuran sangat besar atau biasa disebut VLCC (*Very Large Crude Oil Carrier*) atau dengan ukuran yang lebih besar atau biasa disebut ULCC (*Ultra Large Crude Oil Carrier*) memiliki ukuran *draft* yang sangat tinggi sehingga tidak memungkinkan untuk dapat merapat ke daratan. Oleh karena itu dibutuhkan *single point mooring* (SPM) sebagai pengganti fungsi pelabuhan di darat yang dapat diaplikasikan tanpa harus membangun *jetty* terlebih dahulu. Pertimbangan lain yaitu untuk lokasi produksi yang berada pada laut yang jauh dari daratan, maka akan sangat mahal jika proses transfer minyak hasil pengeboran menuju lokasi pengilangan minyak dilakukan dengan *pipeline*. Maka jalan terbaik untuk mentransfer minyak dari lokasi produksi menuju kilang minyak adalah

dengan tanker. Sedangkan untuk mentransfer minyak dari lokasi produksi menuju tanker diperlukan *single point mooring*.

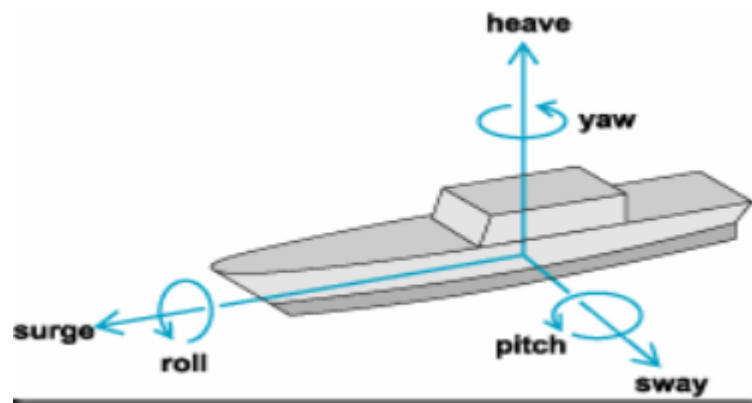
*Single point mooring* terdiri atas tiga bagian utama yaitu *Floating Buoy*, *Mooring System*, serta *Product Transfer Systems* ([www.marineinsight.com](http://www.marineinsight.com), diakses 18 februari 2014). *Mooring system* atau sistem tambat merupakan sistem yang dapat menjaga agar SPM dapat tetap berada pada posisinya selama umur operasi. *Mooring system* terdiri dari *anchor* (jangkar), *anchor chain* (rantai jangkar), *chain stopper* dan lain-lain. *Mooring sistem* memungkinkan *single point mooring* (SPM) untuk tetap dapat bergerak akibat beban gelombang, arus serta beban dari tanker yang sedang tambat namun masih dalam batasan yang ditentukan. *Anchor* atau jangkar yang dihubungkan oleh *anchor chain* berada pada dasar laut dan menancap pada seabed. Jangkar ini berfungsi untuk memberikan daya cengkeram untuk menahan *single point mooring* (SPM) agar tetap pada lokasi operasi.

*Floating Buoy* yaitu struktur SBM yang berbentuk silinder kedap air sebagai daya apung utama dari struktur tersebut. Dalam struktur *floating buoy* terbagi menjadi beberapa kompartemen yang dipisahkan oleh sekat radial. Sekat tersebut berfungsi sebagai pencegah penyebaran air saat terjadi kebocoran. Selain itu sekat tersebut berfungsi sebagai penegar dari struktur *single point mooring* (SPM).

*Product transfer systems* pada *single point mooring* (SPM) berfungsi untuk mentransfer minyak dari *Pipeline End and Manifold* (PLEM) yang dihubungkan dengan *riser* menuju tanker melalui *floating hose*. *Product transfer system* terdapat pada bagian *turn table* yang dapat berputar mengikuti gerakan kapal tanker akibat pengaruh beban lingkungan.

## 2.2 Dasar Teori

### 2.2.1 Gerakan Bangunan Apung



Gambar 2.2 Enam derajat kebebasan gerakan bangunan apung.

Pada dasarnya benda yang mengapung mempunyai 6 mode gerakan bebas (SDOF-*SixDegree Of Freedom*) yang terbagi menjadi dua kelompok, yaitu 3 mode gerakan translasional dan 3 mode gerakan rotasional. Berikut adalah keenam mode gerakan tersebut:

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

Dengan asumsi bahwa 6 mode gerakan di atas adalah *linier* dan harmonik, maka 6 persamaan diferensial gerakan kopel dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\sum_{n=1}^6 [(M_{jk} + A_{jk}) \ddot{\xi}_k + B_{jk} \dot{\xi}_k + C_{jk} \xi_k] = F_j e^{i\omega t}, j=1 \dots \dots \dots (2.1)$$

dengan:

$M_{jk}$  = komponen matriks massa kapal

$A_{jk} B_{jk}$  = matriks untuk koefisien-koefisien massa tambah dan redaman

$C$  = koefisien-koefisien gaya hidrostatis pengembali

$F_{jk}$  = amplitudo gaya eksitasi dalam besaran kompleks

$F_{j1}, F_{j2}$  dan  $F$  adalah amplitudo gaya-gaya eksitasi yang mengakibatkan *surge*, *sway* dan *heave*, sedangkan  $F_{j3}, F_{j5}$  dan  $F_{j6}$  adalah amplitudo momen eksitasi untuk *roll*, *pitch* dan *yaw*. Tanda titik menunjukkan turunan terhadap waktu, sehingga  $\dot{\xi}$  dan  $\ddot{\xi}$  adalah masing-masing kecepatan dan percepatan.

Bila matriks massa, koefisien *added mass*, *damping* dan koefisien pengembali dimasukkan kepersamaan gerak, maka untuk kapal yang simetris dalam arah lateral, enam persamaan gerak *couple* akan dapat dipisahkan menjadi dua bagian, yaitu bagian pertama adalah persamaan *couple* untuk *surge*, *heave* dan *pitch* serta bagian kedua adalah persamaan *couple* untuk *sway*, *roll* dan *yaw*. Jadi untuk kapal dengan bentuk simetris, tidak terjadi *couple* antara *surge*, *heave* dan *pitch* dengan *sway*, *roll* dan *yaw*.

Prosedur komputasi untuk menyelesaikan persamaan gerak kapal, pertama akan dihitung besarnya gaya-gaya eksitasi. Hal ini dapat diturunkan dengan menghitung distribusi tekanan hidrodinamik dengan persamaan *Bernoulli*, yaitu :

$$p = -\rho \left( \frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2} |\nabla \phi|^2 + gz \right) \dots \dots \dots (2.2)$$

dimana potensial kecepatan  $\phi$  adalah:

$$\phi(x, y, z, t) = [-U_x + \phi_s(x, y, z)] + \phi_T(x, y, z) e^{i\omega t} \dots \dots \dots (2.3)$$

Dalam persamaan di atas, variabel pertama dalam ruas kanan merupakan kontribusi dari potensial kecepatan *steady*,  $\phi_s$  dan kecepatan kapal  $u$ . Sedangkan variabel kedua adalah kontribusi dari potensial kecepatan *unsteady* :



$$\phi_T = \phi_I + \phi_D + \sum_{j=1}^6 h_j \phi_j \dots\dots\dots (2.4)$$

Dimana  $\phi_I$ ,  $\phi_D$  dan  $\phi_j$  masing-masing adalah potensial kecepatan dari gelombang insiden, difraksi dan radiasi sebagai akibat mode gerakan ke  $j$ . Langkah berikutnya dalam menyelesaikan persamaan gerak adalah menentukan harga koefisien *added mass*, *damping* dan hidrostatis. Dari persamaan gerak ini didapatkan hasil berupa karakteristik gerakan kapal. Informasi ini umumnya disajikan dalam bentuk grafik, dimana perbandingan gerakan pada mode tertentu  $\zeta$  dengan parameter tinggi atau amplitudo gelombang ( $\zeta_a$ ) yang diberikan sebagai fungsi frekuensi *encounter* ( $\omega_e$ ) dari sumber eksitasi.

### 2.2.2 Beban Gelombang

Teori gelombang pada umumnya dipengaruhi oleh faktor-faktor lingkungan yang meliputi kedalaman laut, tinggi gelombang, dan periode gelombang. Dalam teori gelombang sederhana berlaku asumsi gelombang yang menjalar memiliki dua dimensi yaitu X dan Y. Dan diasumsikan bahwa dasar laut dianggap datar sehingga kedalaman dianggap konstan terhadap permukaan laut. Salah satu teori gelombang yang sederhana yaitu Teori Gelombang Airy.

Teori Gelombang Airy dapat juga disebut sebagai teori gelombang linier. Asumsi-asumsi yang digunakan dalam teori ini adalah :

1. Amplitudo gelombang relatif kecil jika dibanding dengan panjang gelombang dan kedalaman air.
2. Gerakan gelombang Berbentuk silinder tegak lurus terhadap arah penjaran gelombang sehingga gelombang adalah dua dimensi.
3. Permukaan dasar laut rata, tetap dengan impermeable sehingga kecepatan vertikal didasar laut sama dengan nol.
4. Tekanan pada permukaan air adalah uniform dan konstan.
5. Gaya Coriolis (gaya yang diakibatkan oleh perputaran bumi) diabaikan.

6. Tegangan pada permukaan air diabaikan.
7. Fluida irrational.
8. Fluida homogen, incompressible dan non-viscosity.

### 2.2.3 Spektrum Gelombang

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

Tabel 2.1 Amplitudo dan tinggi gelombang pada spektrum

Profil Gelombang	Amplitudo	Tinggi
Gelombang rata-rata	$1.25\sqrt{m_0}$	$2.5\sqrt{m_0}$
Gelombang signifikan	$2.00\sqrt{m_0}$	$4.00\sqrt{m_0}$
Rata-rata 1/10 gelombang tertinggi	$2.55\sqrt{m_0}$	$5.00\sqrt{m_0}$
Rata-rata 1/1000 gelombang tertinggi	$3.44\sqrt{m_0}$	$6.67\sqrt{m_0}$

dengan:

$$m_0 = \text{Luasan dibawah kurva spektrum (zero moment)} = \int_0^{\omega} S_{(\omega)} d\omega$$

Analisis spektrum gelombang dapat menggunakan beberapa teori spektrum gelombang yang telah ada, antara lain model spektrum JONSWAP, *Pierson-Moskowitz*, Bretshneider, ISSC ataupun ITTC. Model matematik spektrum secara umum didasarkan pada satu atau lebih parameter, misalnya tinggi gelombang signifikan, periode gelombang, faktor permukaan, dan lain-lain.

Salah satu model spektra adalah yang diajukan oleh Pierson Morkowitz pada 1964 dan masih secara luas digunakan. Aplikasi umum dari satu parameter spektrum gelombang *Pierson-Moskowitz* dibatasi oleh fakta jika kondisi laut adalah *fully developed*. Pengembangan dari laut juga dibatasi oleh *fetch*. Setelah itu, mulai

dikembangkan suatu spektrum untuk perairan dengan batasan fetch tertentu. Dimana spektrum tersebut merupakan turunan dari spectra *Pierson-Moskowitz*, yakni dikehui sebagai *Joint North Sea Wave Project* (JONSWAP).

Pada Tugas Akhir ini, dalam analisisnya akan digunakan spektrum gelombang JONSWAP. JONSWAP merupakan proyek yang dilakukan pada perairan *North Sea*. Menurut DNV RP-C205 (2010), formulasi spektrum JONSWAP merupakan modifikasi dari spektrum *Pierson-Moskowitz*. Spektrum JONSWAP mendeskripsikan angin yang membangkitkan gelombang dengan kondisi *sea state* yang ekstrim. Seperti halnya dalam penelitian ini, karena SPM beroperasi di Perairan Balongan yang memiliki  $H_s$  (100 yrs) pada  $H_s = 6\text{m}$  maka penggunaan spektrum JONSWAP dapat diaplikasikan.

Kriteria yang ada di DNV RP-C205, bahwa spektrum JONSWAP dapat diaplikasikan untuk perairan dengan :

$$3.6 < T_p / (H_s)^{1/2} < 5 \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

Berikut adalah persamaan spektrum JONSWAP (DNV RP-C205, 2010) :

$$S_J(\omega) = A_\gamma S_{PM}(\omega) \gamma^{\exp\left(-0.5\left(\frac{\omega-\omega_p}{\sigma\omega_p}\right)^2\right)} \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

dengan :

$$A_\gamma = \text{normalizing factor} = 1 - 0.287 \ln(\gamma)$$

$$\gamma = \text{peakedness parameter}$$

(DNV OS E301) Untuk Teluk Meksiko,  $\gamma = 2$  for  $H_s > 6.5$

$$\gamma = 1 \text{ for } H_s \leq 6.5$$

$$\sigma = \text{spectral width parameter}$$

$$= 0,07 \text{ jika } \omega \leq \omega_p$$

$$= 0,09 \text{ jika } \omega > \omega_p$$

$$\omega_p = \text{angular spectral peak frequency (rad/s)}$$

$$= 2\pi / T_p$$

$\omega$  = wave frequency (rad/s)

$S_{PM}(\omega)$  = spektrum *Pierson-Moskowitz*, dengan persamaan :

$$S_{PM}(\omega) = \frac{5}{16} \cdot H_s^2 \cdot \omega_p^2 \cdot \omega^{-5} \exp\left(-\frac{5}{4} \left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^4\right) \quad \dots \quad (2.7)$$

dengan :

$H_s$  = tinggi gelombang signifikan (m)

$T_p$  = periode puncak (s)

#### 2.2.4 Response Amplitude Operator

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

RAO memuat informasi tentang karakteristik gerakan bangunan laut yang disajikan dalam bentuk grafik, dimana absisnya adalah parameter frekuensi, sedangkan ordinatnya adalah rasio antara amplitudo gerakan pada mode tertentu,  $\zeta_{k0}$ , dengan amplitudo gelombang,  $\zeta_0$ . Menurut Chakrabarti (1987), persamaan RAO dapat dicari dengan rumus:

$$RAO(\omega) = \frac{\zeta_{k0}(\omega)}{\zeta_0(\omega)} \quad (\text{m/m}) \quad \dots \quad (2.8)$$

dengan:

$\zeta_{k0}(\omega)$  = amplitudo struktur (m)

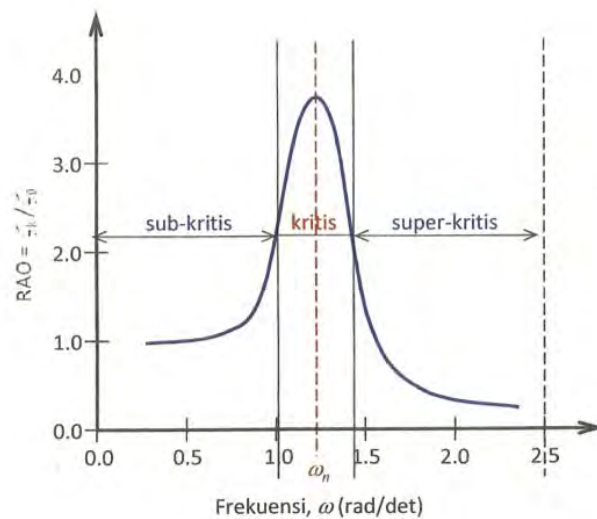
$\zeta_0(\omega)$  = amplitudo gelombang (m)

Respons gerakan RAO untuk gerakan translasi (*surge, sway, heave*) merupakan perbandingan langsung antara amplitudo gerakan dibanding dengan

amplitudo gelombang insiden (keduanya dalam satuan panjang) (Djtmiko, 2012).  
 Persamaan RAO untuk gerakan translasi sama dengan persamaan 2.2 di atas.

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

$$RAO(\omega) = \frac{\zeta_{k0}(\omega)}{\zeta_0(\omega)} = \frac{\zeta_{k0}}{(\omega^2/g)\zeta_0} \text{ (rad/rad)} \quad \dots\dots\dots (2.9)$$



Gambar 2.3 Bentuk umum grafik respons gerakan bangunan apung (Djtmiko, 2012)

Berdasarkan Gambar 2.3, kurva respons gerakan bangunan apung pada dasarnya dapat dibagi menjadi tiga bagian:

- Pertama adalah bagian frekuensi rendah, atau gelombang (dengan periode) panjang, yang disebut daerah sub-kritis. Pada daerah ini bangunan laut akan bergerak mengikuti pola atau kontur elevasi gelombang yang panjang sehingga amplitudo gerakan kurang lebih akan ekuivalen dengan amplitudo gelombang, atau disebut sebagai *contouring*. Dalam korelasi persamaan hidrodinamis, di daerah frekuensi rendah, atau  $\omega^2 < k/(m+a)$ , gerakan akan didominasi oleh faktor kekakuan.

- Kedua adalah daerah kritis, meliputi pertengahan lengan kurva di sisi frekuensi rendah sampai dengan puncak kurva dan diteruskan ke pertengahan lengan kurva di sisi frekuensi tinggi. Puncak kurva berada pada frekuensi alami, yang merupakan daerah resonansi, sehingga respons gerakan mengalami magnifikasi, atau amplitudo gerakan akan beberapa kali lebih besar daripada amplitudo gelombang. Secara hidrodinamis di daerah frekuensi alami, yakni  $k/(m+a) < \omega^2 < k/a$ , gerakan akan didominasi oleh faktor redaman.
- Ketiga adalah daerah super kritis, yaitu daerah frekuensi tinggi, atau gelombang-gelombang (dengan periode) pendek. Pada daerah ini respons gerakan akan mengecil. Semakin tinggi frekuensi, atau semakin rapat antara puncak-puncak gelombang yang berurutan, maka akan memberikan efek seperti bangunan laut bergerak di atas air yang relatif datar. Oleh karena itu gerakan bangunan laut diistilahkan sebagai *platforming*. Dalam hal korelasi hidrodinamis, gerakan di daerah frekuensi tinggi ini, dimana  $\omega^2 < k/a$ , gerakan akan didominasi oleh faktor massa (Djatkiko, 2012).

## 2.2.5 Respon Bangunan Apung pada Gelombang Acak

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

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

Dalam analisis respon bangunan apung pada gelombang reguler dapat diketahui pengaruh interaksi hidrodinamik pada massa tambah, *potential damping*

dan gaya eksternal. Analisis tersebut menghasilkan respon struktur pada gelombang reguler. Respon struktur pada gelombang acak dapat dilakukan dengan mentransformasikan spektrum gelombang menjadi spektrum respon. Spektrum respon didefinisikan sebagai respon kerapatan energi pada struktur akibat gelombang. Hal ini dapat dilakukan dengan mengalikan harga pangkat kuadrat dari *Response Amplitude Operator* (RAO) dengan spektrum gelombang pada daerah struktur bangunan apung tersebut beroperasi. Persamaan respon struktur secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut:

$$S_R = [RAO(\omega)]^2 S(\omega) \quad \dots\dots\dots (2.10)$$

dengan :

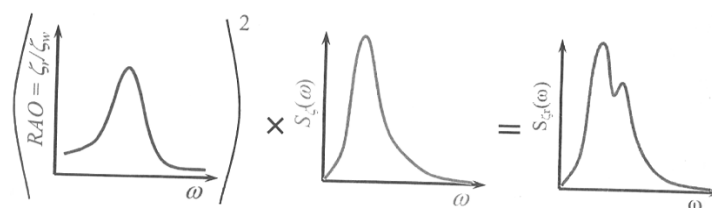
$S_R$  = spektrum respons ( $m^2$ -sec)

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

$RAO(\omega)$  = *transfer function*

$\omega$  = frekuensi gelombang (rad/sec)

$RAO^2 \times \text{Wave Spectrum} = \text{Response Spectrum}$



Gambar 2.4 Transformasi spektra gelombang menjadi spektra respons (Djarmiko, 2012)

### 2.2.6 Analisa Respon

Respon bangunan apung terhadap gerakan frekuensi gelombang menurut Kwan (1991) dapat diprediksi dengan salah satu dari dua metode berikut:

1. Analisis Kuasi-statis

Dalam pendekatan ini, beban gelombang dinamis dicatat oleh *offset* statis bangunan apung yang didefinisikan oleh gerakan gelombang yang diinduksi. Hanya gerakan horisontal yang dijadikan acuan. Beban yang disebabkan oleh gerakan *fairlead* vertikal dan dinamika sistem *mooring* itu sendiri, seperti, efek massa, percepatan fluida dan redaman, diabaikan.

2. Analisis Dinamis

Analisis dinamis memperhitungkan respon dinamis dari tali tambat. Efek variasi waktu akibat massa tali tambat, redaman, dan percepatan relatif fluida disertakan. Dalam pendekatan ini, gerakan *fairlead* variasi waktu dihitung dari gerakan *surge, sway, heave, pitch, roll* dan *yaw* dari bangunan apung.

**2.2.7 Dasar Analisa Dinamis**

Berdasarkan DNV OS E301 (2004), metode analisis simulasi domain pada bangunan lepas pantai dibagi menjadi dua, yaitu:

1. *Frequency Domain Analysis*

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

Pada *frequency domain analysis*, keseimbangan dinamik dari sistem *linear* dapat diformulasikan dengan Pers. (2.10).

$$M_{(\omega)} \ddot{r} + C_{(\omega)} \dot{r} + K_{(\omega)} r = X e^{i\omega t} \dots\dots\dots (2.11)$$

dengan:

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

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



$K(\omega)$  = matrik kekakuan fungsi frekuensi (kN/m)

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

$r$  = vektor *displacement* (m)

## 2. *Time domain analysis*

*Time domain analysis* adalah penyelesaian gerakan dinamis berdasarkan fungsi waktu. Pendekatan yang dilakukan dalam metode ini akan menggunakan prosedur integrasi waktu dan menghasilkan *time history response* berdasarkan fungsi waktu  $x(t)$ . Metode analisis *time domain* umumnya seperti program komputer dapat digunakan untuk menganalisis semua situasi tali tambat dibawah pengaruh dinamika frekuensi gelombang. Periode awal harus dimaksimalkan untuk meminimalkan efek transient. Namun, metode ini dalam membutuhkan proses lebih kompleks dan waktu yang lama. Hal ini membutuhkan simulasi *time history*. *Time history* memberikan hasil *tension* maksimum, beban jangkar, dan lain-lain.

Tugas Akhir ini menggunakan simulasi *time domain* sebagai metode untuk analisa dinamis dalam mencari nilai *tension* dan simulasi *frequency domain* untuk mencari respon struktur. Metode ini biasa digunakan pada kondisi ekstrim tetapi tidak digunakan untuk analisis kelelahan (*fatigue*). *Output* dari simulasi *time domain* adalah:

- Simulasi gelombang reguler dapat digunakan untuk memprediksi fungsi transfer dengan mengambil rasio amplitudo respon dengan input amplitudo gelombang.
- Spektrum respon dapat dihitung dari *time series*, informasi yang diberikan sama dengan analisa domain frekuensi.
- Respon ekstrim dapat disimulasi langsung dari puncak respon selama simulasi.

Keuntungan metode ini dibandingkan *frequency domain* adalah semua tipe *non-linear* (matrik sistem dan beban-beban eksternal) dapat dimodelkan dengan lebih tepat. Sedangkan kerugiannya adalah membutuhkan waktu perhitungan yang

lebih. Menurut DNV OS E301, minimal simulasi *time domain* adalah selama 3 jam (10800 s).

## **2.2.8 Analisa Sistem Tambat pada Kondisi ULS dan ALS**

Menurut API RP 2SK *2<sup>nd</sup> edition*, analisa kekuatan sistem tambat dilakukan dalam dua kondisi pembebanan, yaitu kondisi *Ultimate Limit State* (ULS) dan *Accidental Limit State* (ALS). Berikut adalah penjelasan lebih lanjut mengenai dua kondisi pembebanan tersebut.

### **2.2.8.1 ULS (*Ultimate Limit State*)**

Analisis ULS (*Ultimate Limit State*) dilakukan untuk memastikan bahwa sebuah tali tambat cukup kuat untuk bertahan terhadap efek beban yang ditimbulkan oleh beban lingkungan pada kondisi ekstrim. Dalam analisis *mooring* kondisi ULS, pembebanan terjadi pada kondisi lingkungan ekstrim dimana tali tambat pada SPM bekerja secara optimum/utuh tanpa ada *line* yang diputus.

### **2.2.8.2 ALS (*Accidental limit State*)**

Analisis ALS (*Accidental Limit State*) dilakukan untuk memastikan bahwa suatu sistem tambat memiliki kapasitas yang cukup untuk bertahan pada kegagalan sebuah tali tambat dimana penyebab dari terjadinya kegagalan tersebut tidak diketahui. Dalam analisis *mooring* kondisi ALS, pembebanan terjadi pada kondisi operasi tetapi terdapat satu tali tambat yang diputus secara bebas. Analisis ini biasa disebut dengan analisis *one line damaged*.

### **2.2.8.3 Tension pada Tali Tambat**

Gerakan pada SPM karena pengaruh beban lingkungan menyebabkan adanya tarikan pada *mooring line*. Tarikan (*tension*) yang terjadi pada mooring line dapat dibedakan menjadi 2, yaitu :

#### *a. Mean Tension*

Tension pada *mooring line* yang berkaitan dengan *mean offset* pada vessel.

b. *Maximum Tension*

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

Menurut Faltinsen (1990), perhitungan *tension* maksimum tali tambat dapat menggunakan persamaan di bawah ini:

$$T_{\max} = T_H + wh \quad \dots\dots\dots (2.12)$$

dengan :

- $T_{\max}$  = *tension* maksimum tali tambat (ton)
- $T_H$  = horizontal *pre-tension* (ton)
- $w$  = berat *chain* di air (ton/m)
- $h$  = kedalaman perairan (m)

Untuk mengetahui apakah desain sistem tambat pada suatu struktur telah memenuhi batas aman atau tidak, maka harus dilakukan pengecekan terlebih dahulu. Pengecekan tersebut salah satunya didasarkan pada nilai *tension* yang dihasilkan oleh masing-masing tali tambat. Nilai *tension* pada tali tambat harus sesuai dengan kriteria/batasan yang memenuhi *safety factor*. Kriteria *safety factor* tersebut berdasar pada suatu *rule*. Dan yang digunakan pada Tugas Akhir ini adalah mengacu pada *rule* API RP 2SK (2005), yakni sebagai berikut:

Tabel 2.2 Kriteria *safety factor* tali tambat

<b>Condition</b>	<b>Safety Factor</b>
Intact (ULS)	> 1.67
Damaged (ALS)	> 1.25

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

$$Safety\ Factor = \frac{Minimum\ Breaking\ Load}{Maximum\ Tension} \dots\dots\dots (2.13)$$

**2.2.9 Tegangan (Stress)**

**2.2.9.1 Tegangan Normal**

Tegangan normal adalah intensitas gaya pada suatu titik yang tegak lurus atau normal terhadap penampang, yang didefinisikan sebagai berikut:

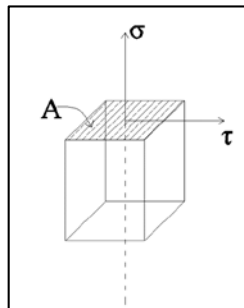
$$\sigma = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} \dots\dots\dots (2.14)$$

dengan:

$\sigma$  : Tegangan normal ( $N/m^2$ )

F : Gaya yang bekerja dalam arah tegak lurus atau normal terhadap penampang (N)

A : Luas penampang ( $m^2$ )



Gambar 2.5 Tegangan Normal yang bekerja pada suatu benda dengan luasan A.

Bila gaya-gaya luar yang bekerja pada suatu batang sejajar terhadap sumbu utamanya dan potongan penampang batang tersebut konstan, tegangan internal yang dihasilkan adalah sejajar terhadap sumbu tersebut. Gaya-gaya seperti itu disebut gaya aksial, dan tegangan yang timbul dikenal sebagai tegangan normal (aksial) seperti terlihat pada gambar 2.5.

### 2.2.9.2 Tegangan Geser

Tegangan geser adalah intensitas gaya pada suatu titik yang sejajar terhadap penampang. Yang didefinisikan sebagai:

$$\tau = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{\Delta A} \dots\dots\dots (2.15)$$

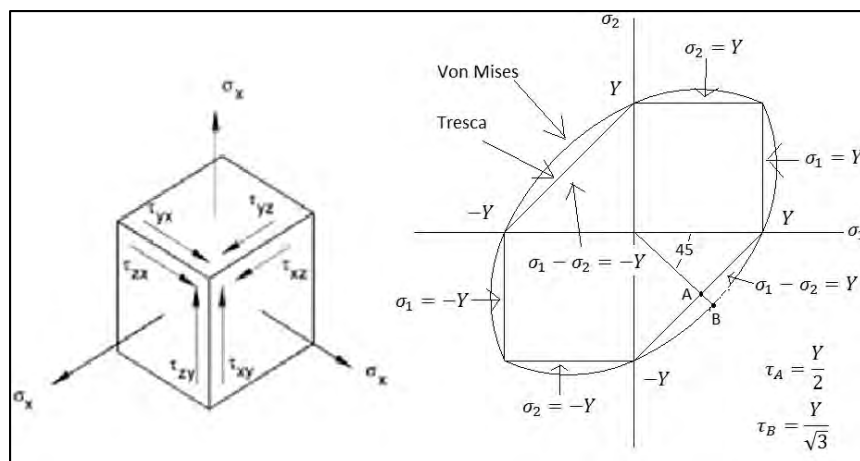
dengan:

$\tau$  : Tegangan Geser ( $N/m^2$ )

V : Gaya yang bekerja dalam arah sejajar terhadap penampang (gaya geser) (N)

A : Luas penampang ( $m^2$ )

### 2.2.9.3 Tegangan Von Mises



Gambar 2.6 Ilustrasi vektor tegangan Von Mises

Tegangan Von Mises bekerja pada elemen tiga dimensi, bekerja tegangan-tegangan searah sumbu x, y dan z. Pada tiap-tiap sumbu dapat diketahui tegangan utama ( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ) yang dihitung dari komponen tegangan dengan persamaan sebagai berikut (ANSYS Guide, 2013):

$$\begin{bmatrix} \sigma_x - \sigma_0 & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} & \sigma_y - \sigma_0 & \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_z - \sigma_0 \end{bmatrix} = Q \dots\dots\dots (2.16)$$

dengan:

$\sigma_0$  = tegangan yang bekerja pada sumbu utama

- $\sigma_x$  = tegangan arah sumbu x
- $\sigma_y$  = tegangan arah sumbu y
- $\sigma_z$  = tegangan arah sumbu z
- $\sigma_{xy}$  = tegangan arah sumbu xy
- $\sigma_{xz}$  = tegangan arah sumbu xz
- $\sigma_{yz}$  = tegangan arah sumbu yz

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

$$\sigma_{VM} = \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)} \dots (2.17)$$

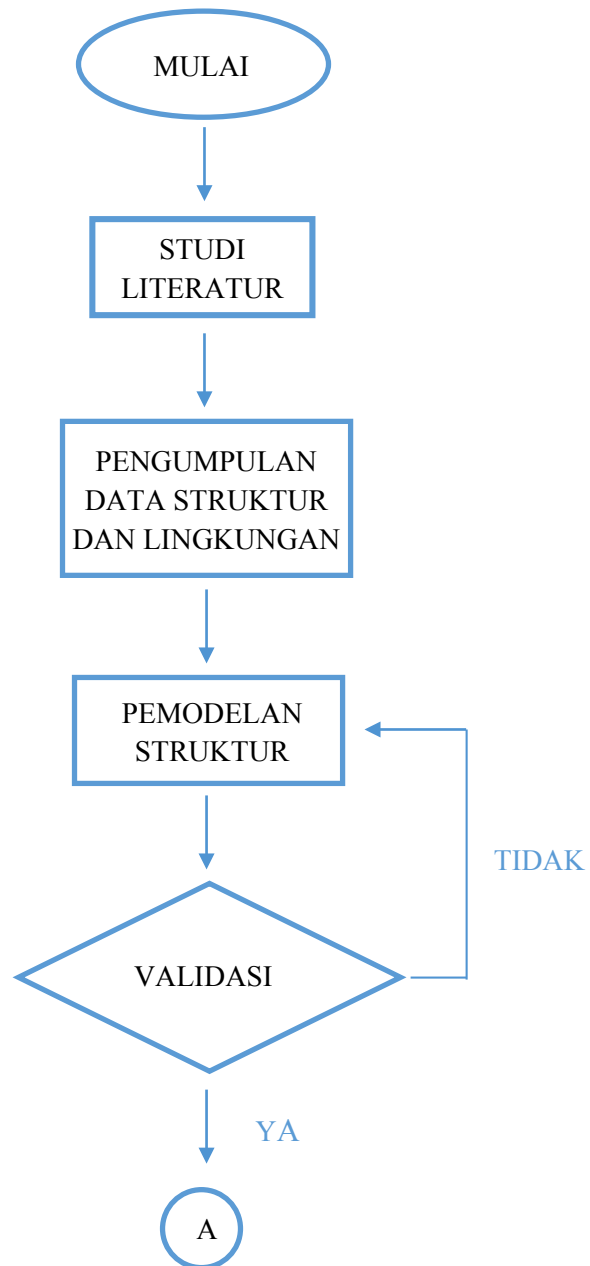
dengan:

- $\sigma_0$  = tegangan *Von Mises*
- $\sigma_x$  = tegangan arah sumbu x
- $\sigma_y$  = tegangan arah sumbu y
- $\sigma_z$  = tegangan arah sumbu z
- $\tau_{xy}$  = tegangan geser arah sumbu xy
- $\tau_{xz}$  = tegangan geser arah sumbu xz
- $\tau_{yz}$  = tegangan geser arah sumbu yz

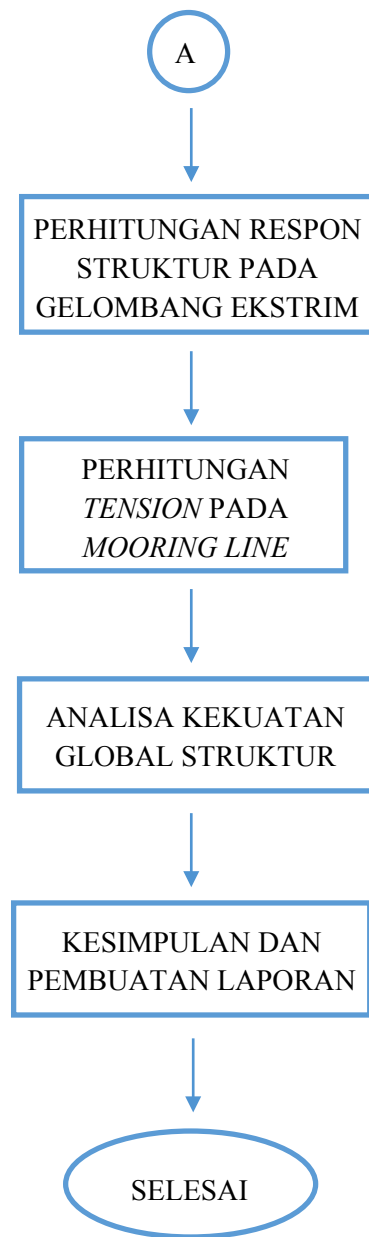
**BAB III**  
**METODOLOGI PENELITIAN**

**3.1 Langkah Kerja**

Metodologi penelitian ini dapat dilihat pada diagram alir berikut.



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian.



Gambar 3.2 Lanjutan diagram alir penelitian.



### 3.2 Penjelasan Diagram Alir

Penjelasan dari diagram alir (*flow chart*) adalah sebagai berikut.

#### 1. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan untuk mencari referensi dari penelitian-penelitian sejenis yang pernah dilakukan sebelumnya.

#### 2. Pengumpulan Data Struktur dan Lingkungan

Data struktur yang dikumpulkan berupa dimensi dari struktur *single point mooring* (SPM) meliputi *outside diameter* (OD), *inside diameter* (ID), tinggi (*depth*), dan sarat (*draft*). Data lingkungan yang dikumpulkan yaitu data gelombang serta kedalaman laut pada lokasi struktur.

##### 2.1 Data Dimensi Struktur

Data *principal dimension* dari struktur dapat dilihat pada tabel 3.1 berikut.

Tabel 3.1 *Principal dimension* struktur.

Deskripsi	Simbol	Satuan	Jumlah
<i>Outside diameter</i>	OD	m	12,50
<i>Inside diameter</i>	ID	m	4,20
<i>Depth</i>	H	m	3,75
<i>Draft</i>	T	m	1,90
<i>Weight</i>		ton	236
<i>Number of mooring line</i>			4

##### 2.2 Data Lingkungan

Tabel 3.2 Data lingkungan tempat struktur beroperasi.

Deskripsi	Satuan	Jumlah
Kedalaman	m	14,0
Tinggi gelombang signifikan	m	6,0
Periode gelombang	s	9,0

### 2.3 Data Mooring Line

Data *mooring line* dari *single buoy mooring* dapat dilihat pada tabel 3.3 berikut.

Tabel 3.3 Data *Mooring Line* Struktur *Single Buoy Mooring*

Deskripsi	Satuan	Jumlah
<b>Tali Tambat</b>		
Banyak tali tambat		4
Sudut antara tali tambat	deg	90
<b>6 x 19 wire with fiber core</b>		
Diameter	m	0.16
Berat di udara	kN/m	0.907
Berat di air	kN/m	0.771
<i>Stiffness</i> , AE	kN	939520
<i>Minimum Breaking Load</i> (MBL)	kN	14955
<b>Chain</b>		
Diameter	m	0.095
Berat di udara	kN/m	1.771
Berat di air	kN/m	1.538
<i>Stiffness</i> , AE	kN	774800
<i>Minimum Breaking Load</i> (MBL)	kN	6469.173

### 3. Pemodelan Struktur

Pemodelan struktur dilakukan dengan menggunakan *software* AutoCad yang kemudian dilakukan validasi untuk model dari struktur tersebut untuk mendapatkan kesamaan dengan data struktur yang didapat.

### 4. Perhitungan Respon Struktur

Perhitungan respon struktur dilakukan dengan menggunakan *software* Ansys dengan memasukan beban lingkungan berupa beban gelombang. Pada perhitungan respon ini struktur dalam kaeadaan tertambat.

5. Perhitungan *Tension* pada *Mooring Line*

Perhitungan *tension* pada *mooring line* menggunakan bantuan *software* ANSYS dengan mengacu pada dua kondisi yaitu kondisi ULS (*Ultimate Limit State*) serta ALS (*Accidental Limit State*). Analisis yang dilakukan pada analisis ALS hanya pada satu arah saja dikarenakan bentuk geometri dari SPM yang simetris.

6. Analisa Kekuatan Global Struktur

Analisa kekuatan global struktur dilakukan berdasarkan data *tension* dan tekanan hidrostatis yang didapat dari hasil output pada analisa sebelumnya. Dalam analisa ini akan diketahui berapa tegangan yang terjadi pada struktur *Single Point Mooring* jika terkena pembebanan tersebut.

7. Penyimpulan dan Penyusunan Laporan

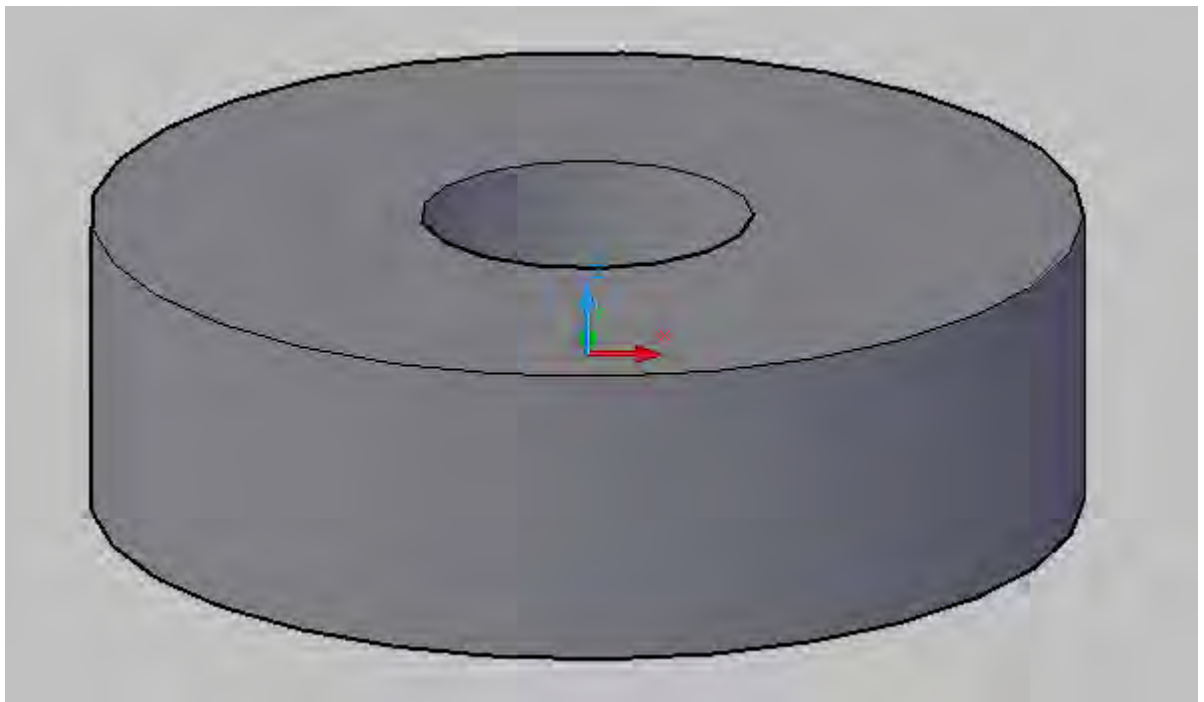
Penarikan kesimpulan dilakukan berdasarkan analisa yang dilakukan sesuai dengan rumusan masalah yang ditetapkan. Penyusunan laporan berdasar analisa yang telah dilakukan.

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

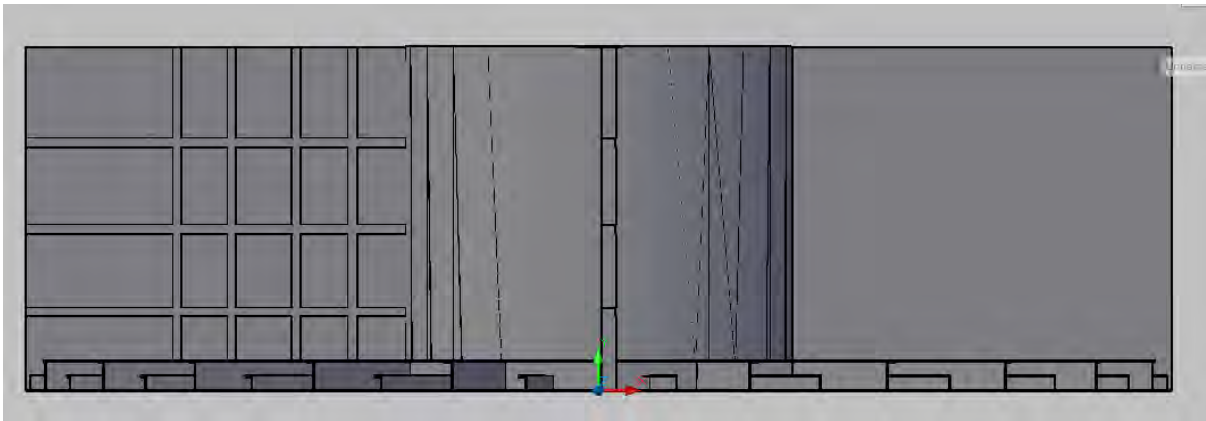
## BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Pemodelan Struktur *Floating Buoy*

Pemodelan struktur pada penelitian ini dilakukan dengan bantuan *software* AutoCad untuk struktur utama berupa *floating buoy* yang kemudian dilanjutkan dengan pemodelan *mooring lines* dengan bantuan *software* Ansys AQWA. Pemodelan struktur pada penelitian ini mengacu pada *General Arrangement* yang didapat dengan sedikit menyederhanakan penegar untuk memudahkan dalam proses pemodelan. Berikut adalah model *floating buoy* dari SPM dengan *software* AutoCad.



Gambar 4.1 Model tiga (3) dimensi *floating buoy* SPM.



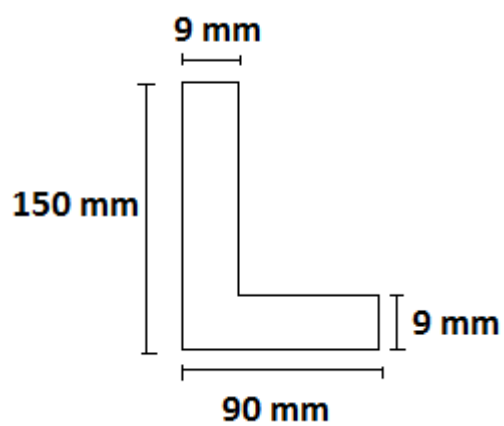
Gambar 4.2 Model penegar *floating buoy* SPM.

Pemodelan tersebut berdasarkan ukuran yang didapat pada data *General Arrangement* SPM dengan ukuran *buoy* sebagai berikut.

- *Outside Diameter* : 12,5 m
- *Inside Diameter* : 4,20 m
- *Depth* : 3,75 m
- *Draft* : 1,90 m

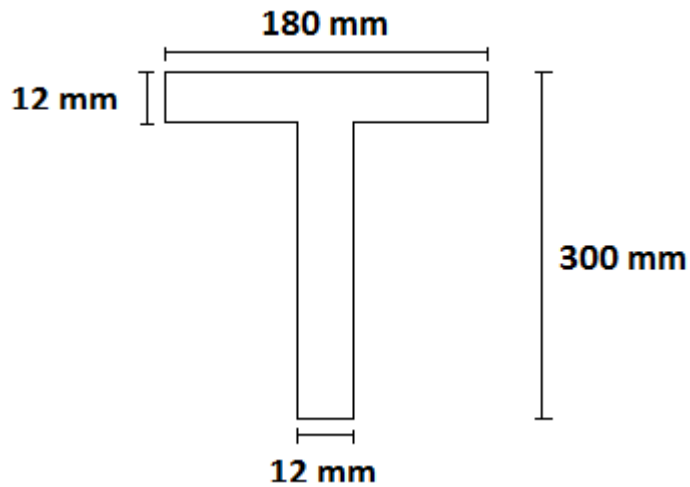
Pemodelan penegar dari struktur *buoy* dengan mengacu pada data *General Arrangement* dengan bentuk dan ukuran sebagai berikut.

- Profil L 150 mm x 90 mm x 9 mm



Gambar 4.3 Profil penegar berbentuk L.

- Profil T 300 mm x 12 mm / 180 mm x 12 mm



Gambar 4.4 Profil penegar berbentuk T.

#### 4.2 Validasi Model

Setelah selesai melakukan pemodelan dengan *software* Ansys AQWA, langkah selanjutnya adalah melakukan validasi terhadap parameter-parameter dari model yang telah dibuat. Validasi model dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui kelayakan suatu model tersebut ketika dilakukan simulasi. Cara untuk melakukan validasi model adalah dengan membandingkan hasil perhitungan hidrostatis yang dihasilkan oleh *software* Ansys AQWA terhadap data yang tersedia. Dari pemodelan ini didapatkan hasil seperti yang tersaji dalam tabel 4.1 berikut.

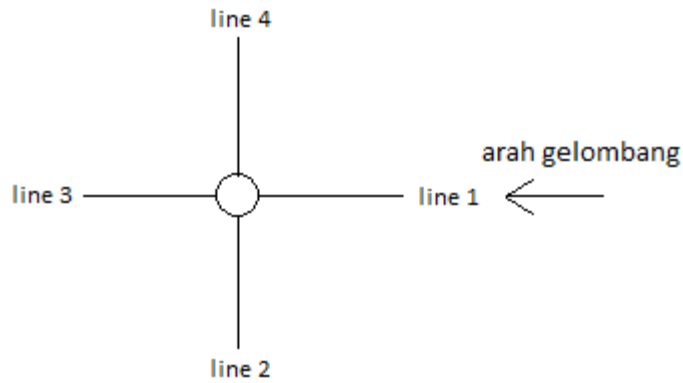
Tabel 4.1 Validasi model berdasar *ABS rules*.

Tabel Validasi						
Item	Unit	Model	GA	Selisih	Prosentase	Toleransi
Displasmen	ton	232	236	4	1,69%	< 2%
Draft	m	1,9	1,9	0	0,00%	< 1%

#### 4.3 Pemodelan Struktur SPM dan *Mooring Lines*

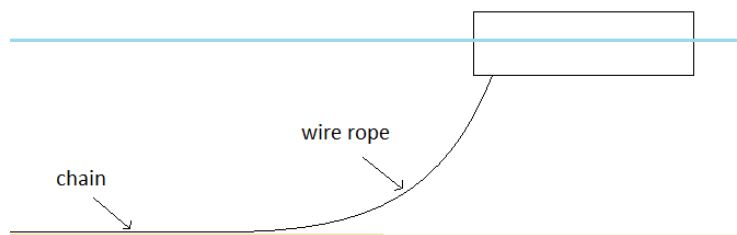
Setelah dilakukan pemodelan struktur *floating buoy* dengan *software* AutoCad, kemudian dilanjutkan dengan pemodelan struktur beserta *mooring lines*

dengan software Ansys. Konfigurasi *mooring lines* yang digunakan adalah sebagai berikut.



Gambar 4.5 Konfigurasi *mooring* SPM.

Konfigurasi *mooring lines* terdiri dari empat (4) buah *mooring lines* yang ditempatkan sesuai dengan data *General Arrangement* yang didapat. *Mooring lines* yang digunakan merupakan perpaduan antara 6 x 19 *wire with fibre core* dengan diameter 0,16 m dengan panjang 62,5 m diukur dari badan struktur *floating buoy* yang dipadukan dengan *chain* dengan diameter 0,09525 m dengan panjang 60 m dapat dilihat pada gambar dan tabel berikut.



Gambar 4.6 *Mooring line* pada SPM.

Tabel 4.2 Panjang tali tambat

Deskripsi	Panjang Tali
6 x 19 <i>wire with fibre core</i>	62,5 m
<i>Chain</i>	60,0 m
<b>Total Panjang Tali Tambat</b>	122,5 m



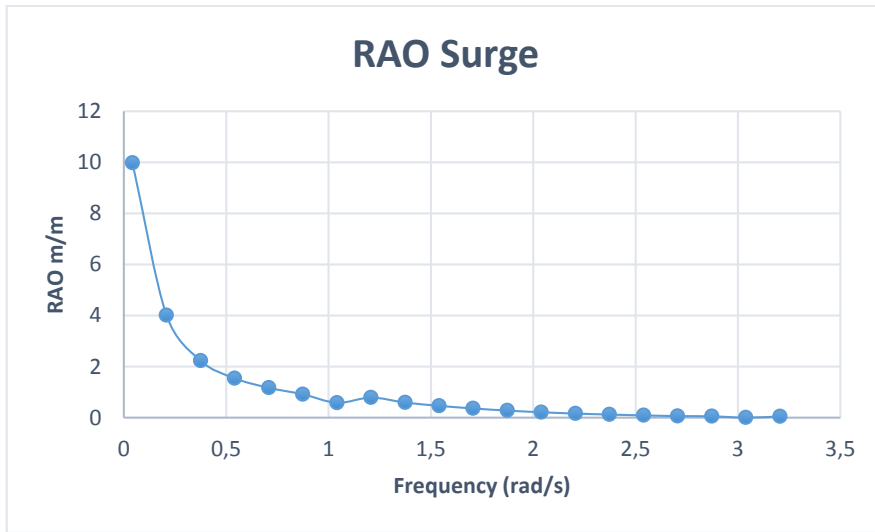
#### **4.4 Skenario Analisa perilaku Gerak *Single Point Mooring***

Untuk melangkah ke tahap selanjutnya maka terlebih dulu dibuat skenario untuk memudahkan dalam analisa perilaku gerak *single point mooring*. Pada saat dilakukan analisa perilaku gerak, *single point mooring* berada dalam keadaan *self floating* tanpa ada kapal *tanker* yang tertambat dikarenakan kondisi lingkungan yang ekstrim. Maka dalam hal ini yang mempengaruhi perilaku gerak *single point mooring* hanya SPM itu sendiri beserta tali tambatnya. Untuk skenario pembebanan pada SPM diambil satu arah *Heading* gelombang dengan arah gelombang *inline* (segaris dengan tali tambat) dikarenakan bentuk geometri struktur yang silinder simetris maka akan menghasilkan respon yang sama untuk tiap arah *heading* gelombang. Dalam hal ini yang dipakai adalah arah  $0^\circ$ .

#### **4.5 Analisa Perilaku Gerak SPM**

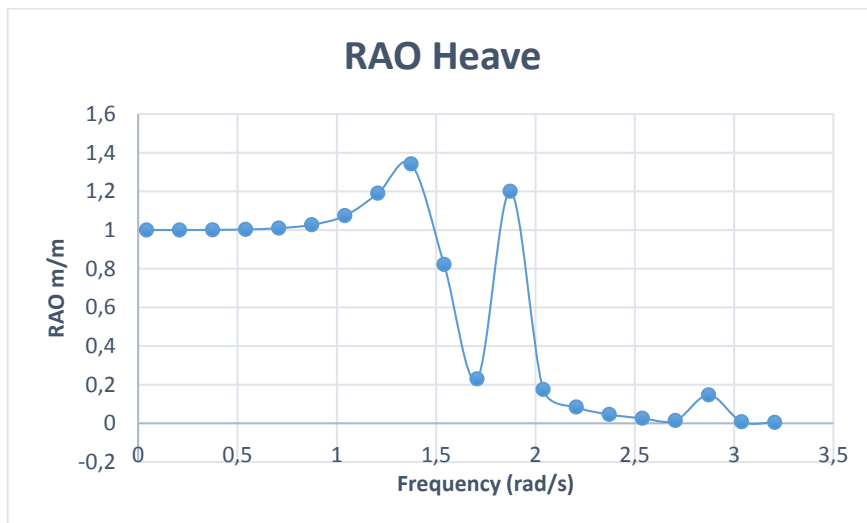
Analisa perilaku gerak SPM pada gelombang reguler yang dilakukan dengan *software* Ansys akan menghasilkan RAO (*Response Amplitude Operator*) untuk arah pembebanan yang ditinjau, yakni  $0^\circ$  *inline* (searah dengan tali tambat). RAO tersebut dijabarkan dalam gerakan enam derajat kebebasan (*six degree of freedom*) *surge*, *sway*, *heave*, *roll*, *pitch* dan *yaw*. Data RAO ini menunjukkan karakteristik perilaku gerak SPM saat tertambat dengan empat (4) buah *mooring lines* dalam kondisi *self floating* pada gelombang reguler. Grafik fungsi transfer/RAO akan disajikan dengan absis (sumbu-x) berupa *wave frequency* (rad/s) dan sumbu-y berupa besar RAO (m/m, untuk gerakan translasional dan deg/m, untuk gerakan rotasional). Berikut adalah hasil analisis perilaku gerak SPM pada gelombang reguler untuk kondisi *self floating*.

### 4.5.1 RAO Gerakan Translasiional



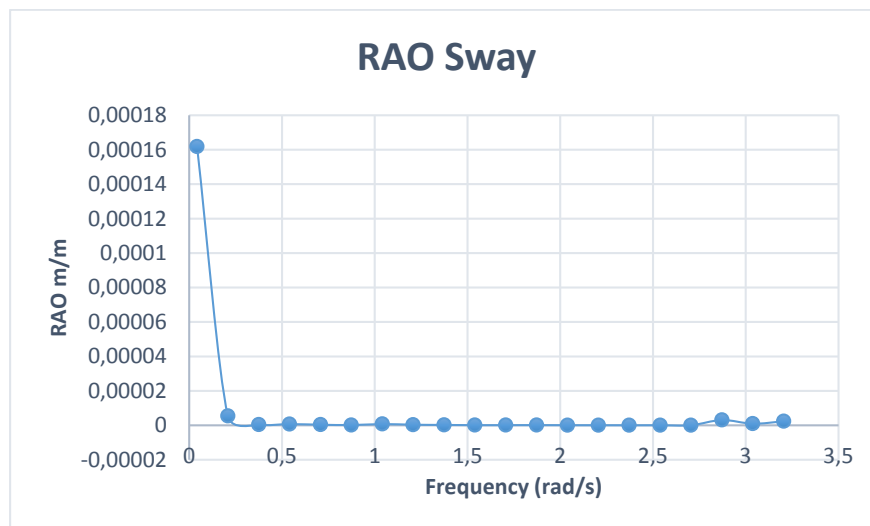
Gambar 4.7 RAO gerakan *surge* dengan *heading* 0°.

Gerakan *surge* merupakan salah satu dari gerakan translasiional sebuah bangunan apung yang mana gerakan terjadi sejajar dengan sumbu x. Pada struktur *single buoy mooring* ini karakteristik gerakan dapat dilihat pada gambar 4.7. Pada grafik tersebut terlihat bahwa nilai RAO yang terbesar terjadi pada frekuensi rendah yaitu sebesar 10 m/m pada frekuensi 0,042 rad/s yang mana kemudian nilai RAO tersebut berangsur-angsur turun pada frekuensi yang lebih besar. Efek paling kecil terjadi pada frekuensi 3,038 rad/s yaitu sebesar 0,003909 m/m.



Gambar 4.8 RAO gerakan *heave* dengan *heading* 0°.

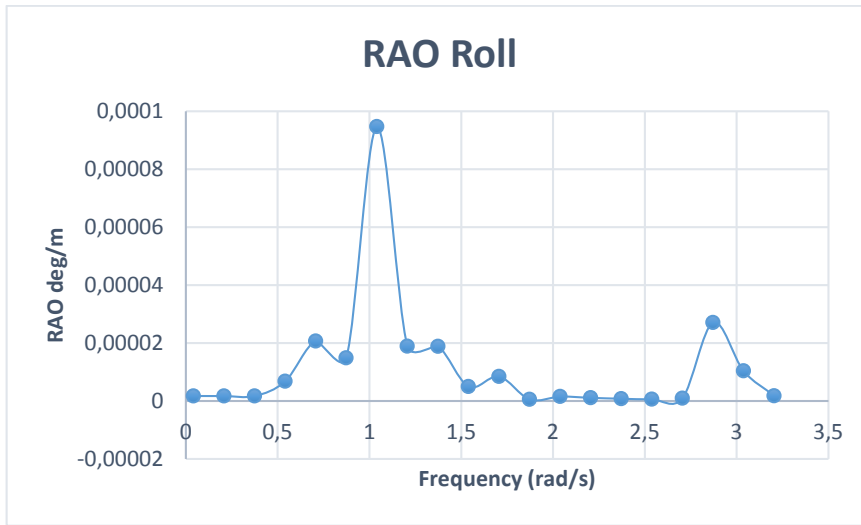
Gerakan *heave* merupakan salah satu pola gerakan vertikal sebuah bangunan apung. Pada gerakan *heave*, grafik RAO dari bangunan apung mempunyai karakteristik yaitu pada frekuensi rendah nilai RAO cenderung mendekati satu (1) atau tepat menunjukkan angka satu (1) yang berarti bahwa perilaku struktur akibat adanya gelombang dengan frekuensi tersebut hampir tidak ada. Kemudian grafik akan secara bertahap naik hingga mencapai nilai puncak dimana pada titik ini terjadi resonansi yang diakibatkan karena frekuensi natural struktur *single buoy mooring* yang mendekati atau sama dengan frekuensi gelombang. Pada grafik menunjukkan bahwa pada frekuensi 1,374 rad/s terjadi puncak resonansi dengan nilai RAO *heave* terbesar yaitu 1,341 m/m.



Gambar 4.9 RAO gerakan *sway* dengan *heading* 0°.

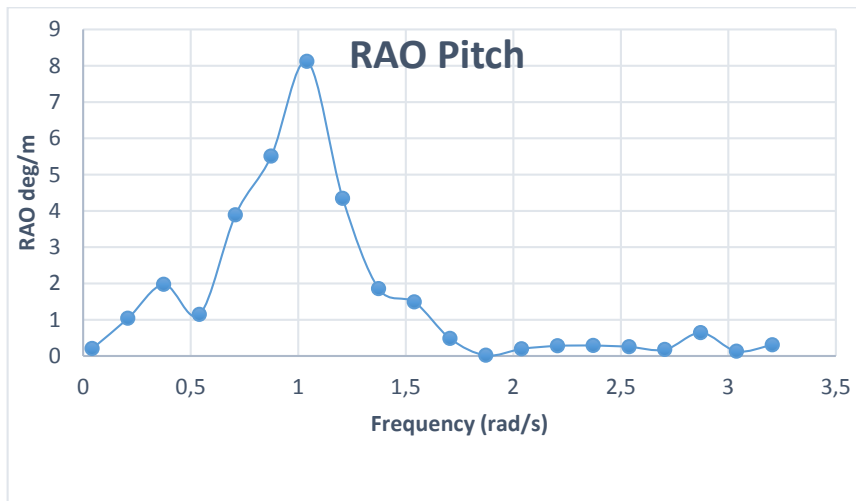
Gerakan *sway* memiliki karakteristik yang hampir sama dengan gerakan *surge* yang mana nilai maksimum dari RAO berada pada frekuensi rendah. Pada gambar 4.9 dapat dilihat bahwa pada frekuensi 0,042 rad/s nilai tertinggi dari RAO terjadi yaitu sebesar 0,00016 m/m. Kemudian grafik tersebut berangsur-angsur turun pada frekuensi yang lebih tinggi dan mencapai nilai RAO *sway* terendah pada frekuensi 2,372 rad/s yaitu sebesar  $1,376 \times 10^{-8}$  m/m.

#### 4.5.2 RAO Gerakan Rotasional



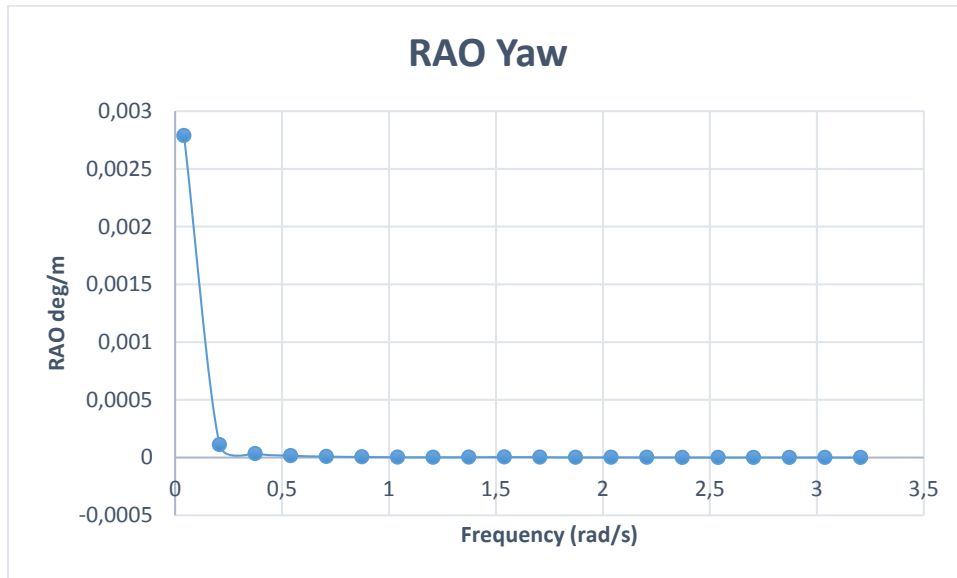
Gambar 4.10 RAO gerakan roll dengan *heading* 0°.

Pada gambar 4.10 dapat dilihat bahwa pada daerah subkritis (frekuensi rendah), perilaku gerak *roll* dari *single buoy mooring* menunjukkan nilai yang kecil. Kemudian grafik tersebut naik pada daerah dimana terjadi resonansi, dan menurun pada daerah super kritis (frekuensi tinggi). Pada gambar 4.10 terlihat bahwa daerah resonansi terjadi pada frekuensi 1,041 rad/s dengan besar nilai RAO *roll* yaitu  $9,47 \times 10^5$  deg/m.



Gambar 4.11 RAO gerakan *pitch* dengan *heading* 0°.

Pada gambar 4.11 yang merupakan grafik dari perilaku gerakan *pitch* dapat dilihat bahwa terjadi puncak resonansi pada frekuensi 1,041 rad/s yang mengakibatkan terjadinya nilai RAO *pitch* tertinggi yaitu sebesar 8,120 deg/m. Kemudian nilai tersebut berangsur-angsur turun pada frekuensi dengan nilai yang lebih tinggi.



Gambar 4.12 RAO gerakan *yaw* dengan *heading* 0°.

Grafik RAO untuk gerakan *yaw* dapat dilihat pada gambar 4.12 di mana pada grafik tersebut terlihat bahwa perilaku gerak terbesar terjadi pada frekuensi rendah dengan nilai frekuensi 0,042 rad/s dengan besaran RAO *yaw* yaitu 0,0027 deg/m, kemudian nilai tersebut turun pada frekuensi yang lebih tinggi.

Dari analisa perilaku gerakan *single buoy mooring* di atas, dapat disimpulkan yaitu gerakan *single buoy mooring* mengalami enam (6) gerakan bangunan apung dikarenakan struktur tersebut berada dalam kondisi diam. Gerakan *single buoy mooring* yang memiliki besaran yang paling signifikan terjadi pada gerakan *surge* dan *pitch*. Berikut adalah ringkasan besaran RAO tertinggi yang dapat dilihat pada tabel 4.3.

Tabel 4.3 Ringkasan nilai RAO tertinggi.

Jenis Gerakan	Besaran	Satuan
<i>Surge</i>	10	m/m
<i>Heave</i>	1,341	m/m
<i>Sway</i>	0,00016	m/m
<i>Roll</i>	$9,47 \times 10^5$	deg/m
<i>Pitch</i>	8,120	deg/m
<i>Yaw</i>	0,0027	deg/m

#### 4.6 Analisa Perilaku Gerak SPM pada Gelombang Acak

##### 4.6.1 Analisa Spektra Gelombang

Pada analisa ini, pemilihan spektrum gelombang yang digunakan untuk analisa respon gerak struktur pada gelombang acak adalah berdasarkan pendekatan dari kondisi laut tempat dimana struktur tersebut beroperasi. Kondisi gelombang yang akan digunakan pada analisa ini merupakan gelombang dengan ketinggian ekstrim. Dari beberapa jenis spektrum gelombang yang akan digunakan pada analisa kali ini adalah spektrum JONSWAP dengan modifikasi *Pierson-Moskowitz*, dengan parameter yang diperhitungkan salah satunya adalah  $H_s$  (tinggi gelombang signifikan) berdasarkan DnV RP C205. Adapun kriteria yang diperlukan untuk dapat diaplikasikanya spektrum ini seperti dijelaskan pada bab II yaitu :

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

Dan untuk perairan Balongan didapatkan nilai  $T_p / (H_s)^{1/2} = 9 / (6)^{1/2}$

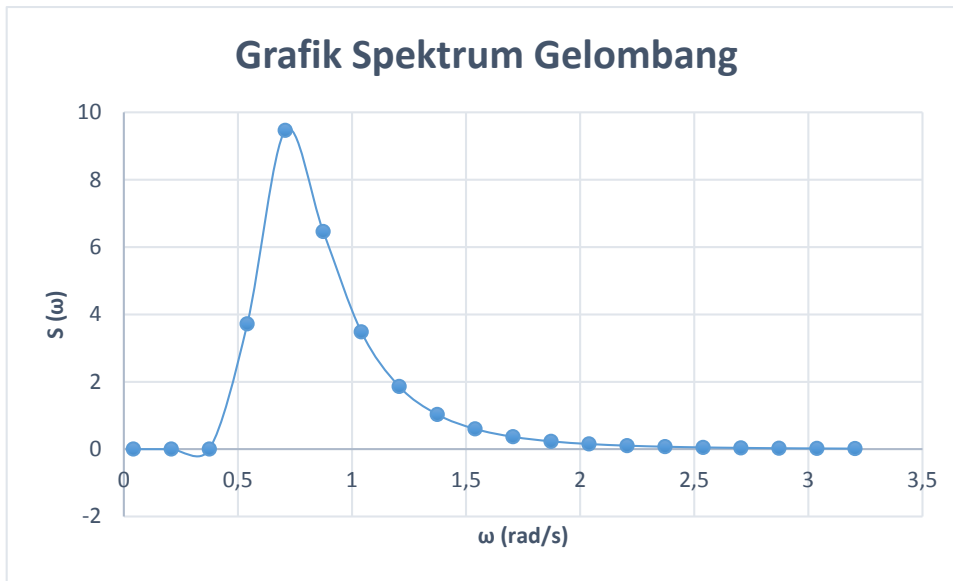
$$= 3,674 \text{ (memenuhi)}$$

Dari perhitungan kriteria di atas, maka spektrum JONSWAP berdasar DnV RP C205 dapat digunakan untuk analisa spektra gelombang karena telah memenuhi nilai yang disyaratkan. Berikut adalah perhitungan serta grafik spektra gelombang untuk perairan Balongan tempat *single buoy mooring* dioperasikan.

Tabel 4.4 Spektra gelombang.

$\omega$ (rad/ s)	$S_{PM}(\omega)$	$S_j(\omega)$
0,042	0	0
0,208	2,4685E-65	2,4685E-65
0,375	0,00022939	0,00022939
0,541	3,71741627	3,71741627
0,708	9,46742762	9,46742762
0,874	6,46360063	6,46360063
1,041	3,48133579	3,48133579
1,207	1,85957624	1,85957624
1,374	1,02930501	1,02930501
1,54	0,59993186	0,59993186
1,706	0,36601471	0,36601471
1,873	0,23197479	0,23197479
2,039	0,15277601	0,15277601
2,206	0,10354401	0,10354401
2,372	0,07226832	0,07226832
2,539	0,05154381	0,05154381
2,705	0,03761375	0,03761375
2,872	0,02791085	0,02791085
3,038	0,02109294	0,02109294
3,205	0,01615202	0,01615202

Pada tabel di atas,  $S_j(\omega)$  merupakan hasil nilai spektrum gelombang sebagai fungsi perubahan frekuensi. Seperti yang telah dibahas sebelumnya bahwa perhitungan didasarkan pada formulasi spektrum gelombang JONSWAP dengan  $H_s = 6$  m. Berikut adalah gambar grafik spektrum JONSWAP untuk perairan Balongan.



Gambar 4.13 Grafik spektrum gelombang JONSWAP ( $H_s = 6\text{m}$ ,  $T_p = 9\text{s}$ ).

Pada analisa ini akan ditentukan respon struktur dari *single buoy mooring* sebagai respon kerapatan energi pada struktur akibat gelombang. Spektra respons didapatkan dengan cara mengkalikan harga spektra gelombang dengan RAO kuadrat. Maka grafik respon struktur pada enam derajat kebebasan yang dihasilkan adalah sebagai berikut :

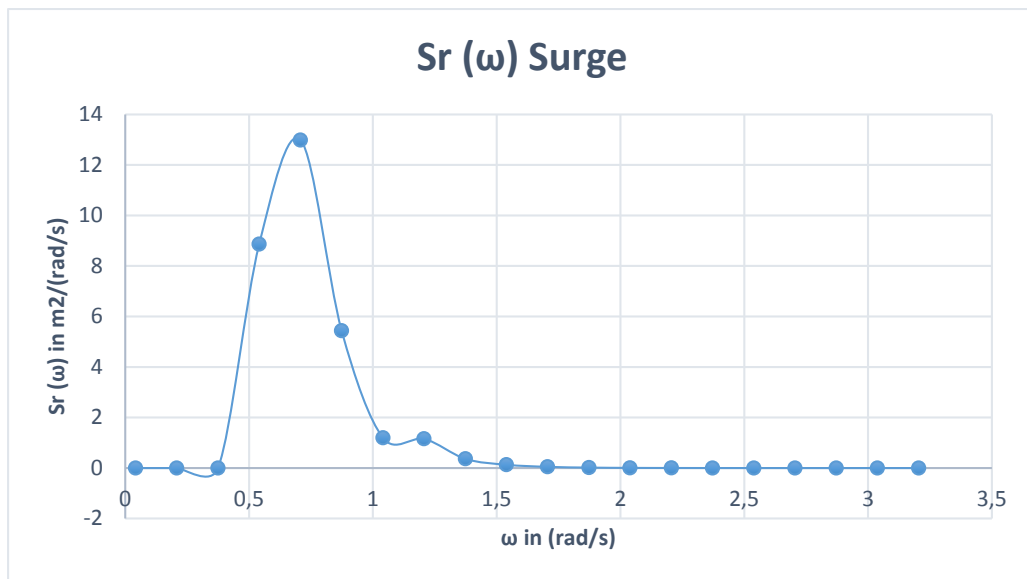
$$\boxed{\text{RAO}^2} \times \boxed{S(\omega)} = \boxed{S_r(\omega)}$$

Gambar 4.14 Langkah perhitungan mencari respon spektra.

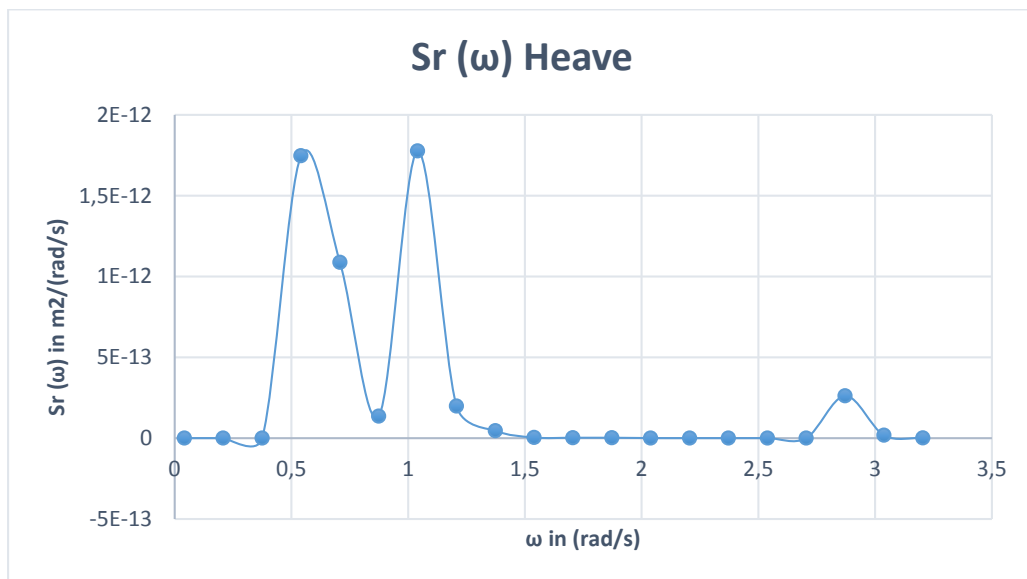
Sama halnya dengan analisa RAO sebelumnya, pada analisa respon spektra dari *single buoy mooring* akan dijelaskan setiap arah gerakannya. Berikut adalah penjelasannya secara lebih lengkap.



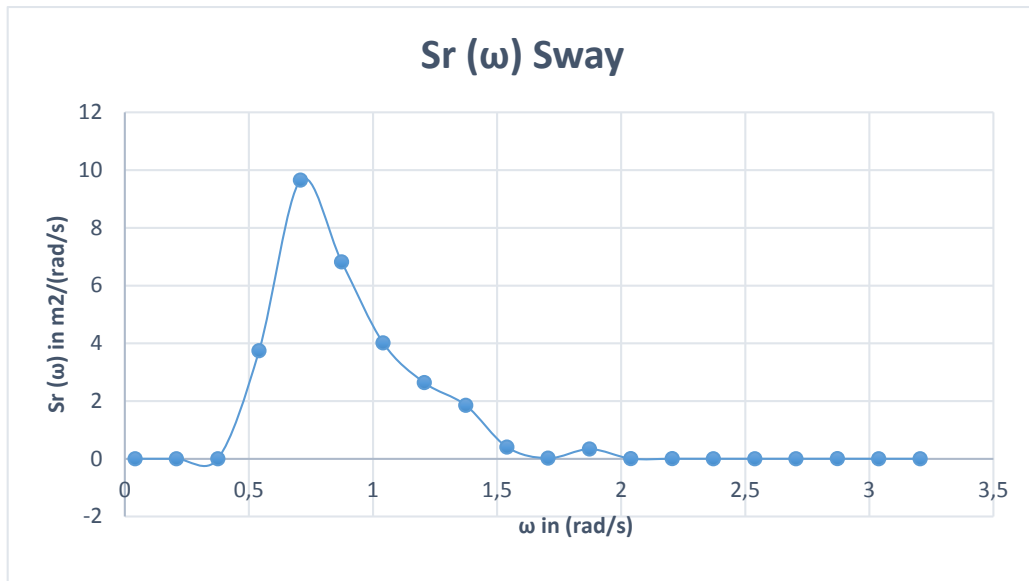
#### 4.6.2 Analisa Perilaku Gerak SPM



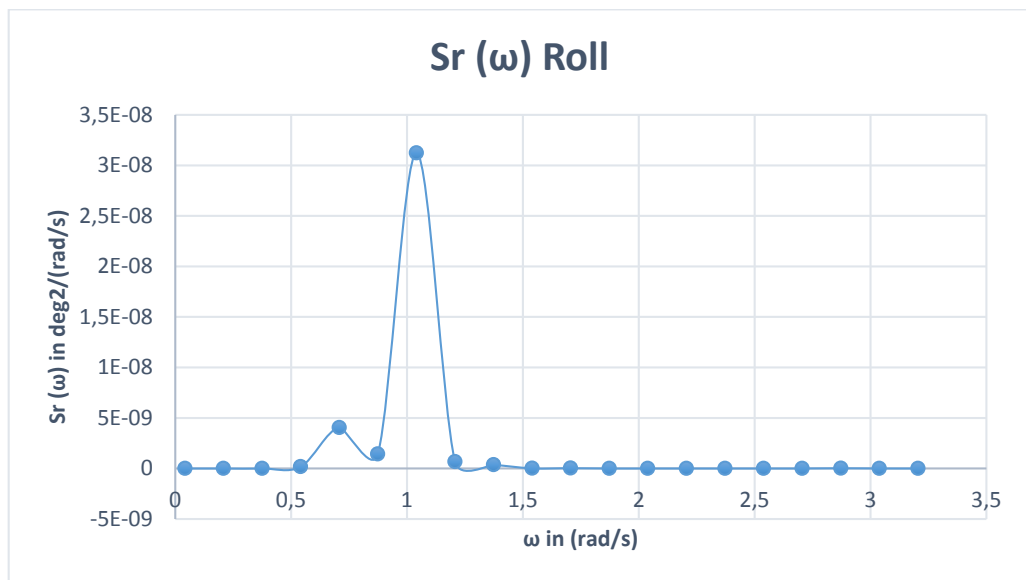
Gambar 4.15 Grafik respon spektra gerakan *surge* dari SPM.



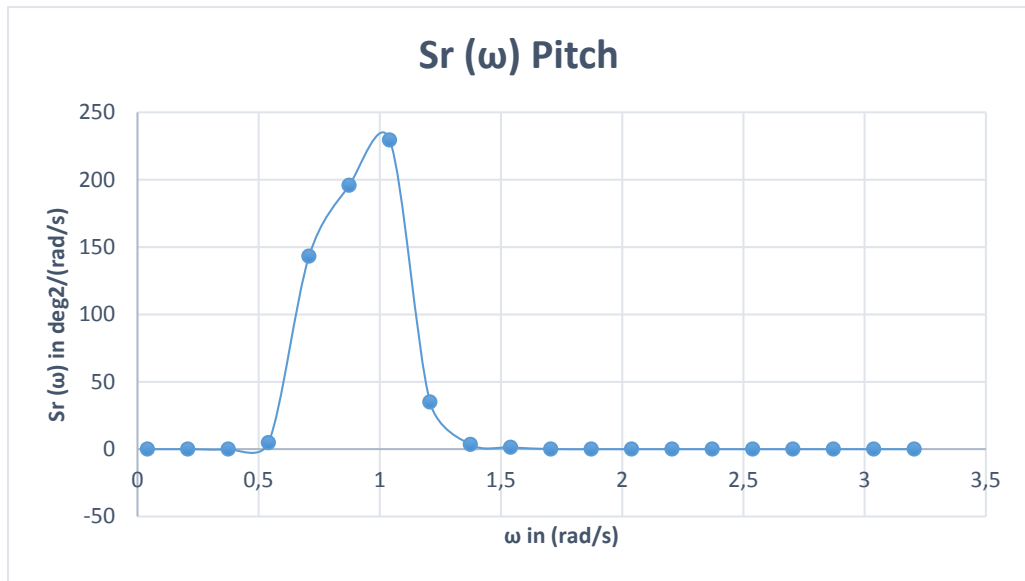
Gambar 4.16 Grafik respon spektra gerakan *heave* dari SPM.



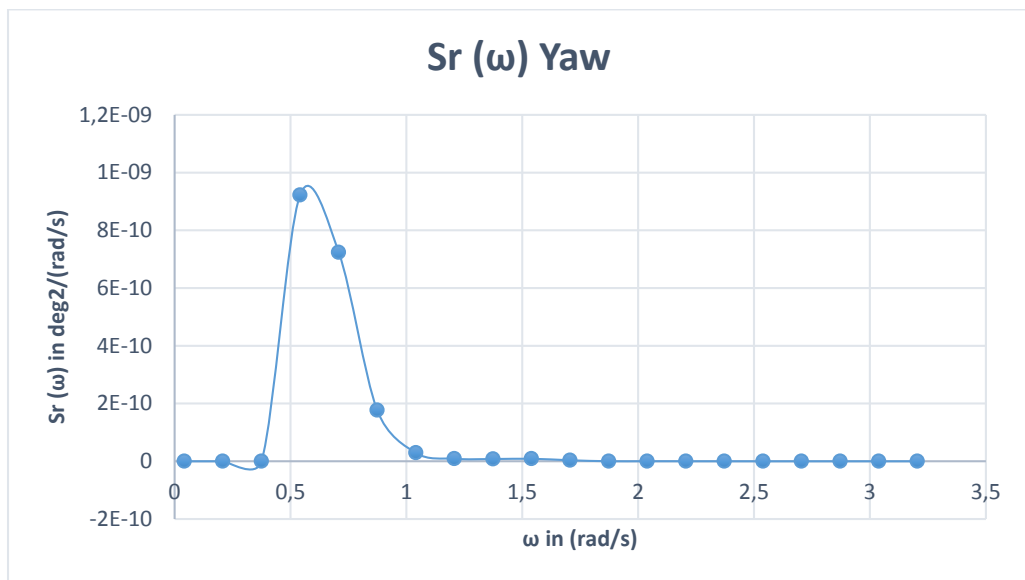
Gambar 4.17 Grafik respon spektra gerakan *sway* dari SPM.



Gambar 4.18 Grafik respon spektra gerakan *roll* dari SPM.



Gambar 4.19 Grafik respon spektra gerakan *pitch* dari SPM.



Gambar 4.20 Grafik respon spektra gerakan *yaw* dari SPM.

Dari gambar 4.15 – gambar 4.20 yang telah ditampilkan maka dapat disimpulkan bahwa respon struktur *single buoy mooring* pada kondisi gelombang ekstrim yaitu untuk gerakan *surge* terbesar dengan nilai  $S_R(\omega)_{surge} = 12,984$  [ $m^2/(rad/s)$ ]. Respon struktur untuk gerakan *heave* terbesar dengan nilai  $S_R(\omega)_{heave} = 1,78 \times 10^{-12}$  [ $m^2/(rad/s)$ ]. Respon struktur untuk gerakan *sway* terbesar terjadi dengan nilai  $S_R(\omega)_{sway} = 9,64$  [ $m^2/(rad/s)$ ]. Sedangkan untuk gerakan rotasional,

respon struktur untuk gerakan *roll* terbesar dengan nilai  $S_R(\omega)_{roll} = 3,12 \times 10^{-8}$  [ $\text{deg}^2/(\text{rad/s})$ ]. Respon struktur untuk gerakan *pitch* terbesar dengan nilai  $S_R(\omega)_{pitch} = 299,561$  [ $\text{deg}^2/(\text{rad/s})$ ]. Sedangkan respon struktur untuk gerakan *yaw* terbesar terjadi dengan nilai  $S_R(\omega)_{yaw} = 9,22 \times 10^{-10}$  [ $\text{deg}^2/(\text{rad/s})$ ]. Secara ringkas, nilai respon terbesar dapat dilihat pada tabel 4.5 berikut.

Tabel 4.5 Ringkasan nilai respon struktur tertinggi tiap gerakan.

Arah Gerakan	Besar Respon Struktur	Satuan
<i>Surge</i>	12,984	$\text{m}^2/(\text{rad/s})$
<i>Heave</i>	$1,78 \times 10^{-12}$	$\text{m}^2/(\text{rad/s})$
<i>Sway</i>	9,64	$\text{m}^2/(\text{rad/s})$
<i>Roll</i>	$3,12 \times 10^{-8}$	$\text{deg}^2/(\text{rad/s})$
<i>Pitch</i>	299,561	$\text{deg}^2/(\text{rad/s})$
<i>Yaw</i>	$9,22 \times 10^{-10}$	$\text{deg}^2/(\text{rad/s})$

#### 4.7 Distribusi *Tension* Pada Tali Tambat

Tali tambat yang menerima *tension* maksimum memiliki *safety factor* minimal. Besar *tension* yang didapatkan pada analisa ini akan dicocokkan atau dikoreksi dengan suatu kriteria *safety factor* berdasarkan API RP 2SK 2<sup>nd</sup> edition. Perlu diketahui bersama bahwa semakin besar nilai *tension* yang terjadi dibandingkan dengan nilai batas kapasitas tegangan (*breaking strength*) tali tambat yang diterima, maka akan semakin rentan tali tersebut untuk putus. Oleh sebab itu sebelum menganalisa *tension* pada tali tambat terlebih dahulu dilakukan perhitungan secara mendetail tentang desain panjang tali tambat.

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

tambat dari *mooring system* yang diputus secara bebas. Berikut adalah hasil analisa *tension* tali tambat pada *single point mooring* untuk kedua kondisi tersebut.

#### 4.7.1 Analisa *Tension* Tali Tambat Untuk SPM pada Kondisi ULS

Resume hasil analisa *tension* untuk kondisi ULS (*all lines intact*) dari penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 4.21 hingga Gambar 4.24 serta beberapa penjelasannya. Sebelumnya perlu dihitung terlebih dahulu berapa nilai *tension* maksimum yang diijinkan oleh API RP 2SK 2<sup>nd</sup> edition. Perhitungannya adalah sebagai berikut:

- Untuk *Wire with Fibre Core*

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

$$1.67 = \frac{14955000 \text{ N}}{\text{Maximum Tension}}$$

$$\text{Maximum Tension} = 8955089,82 \text{ N}$$

- Untuk *Chain*

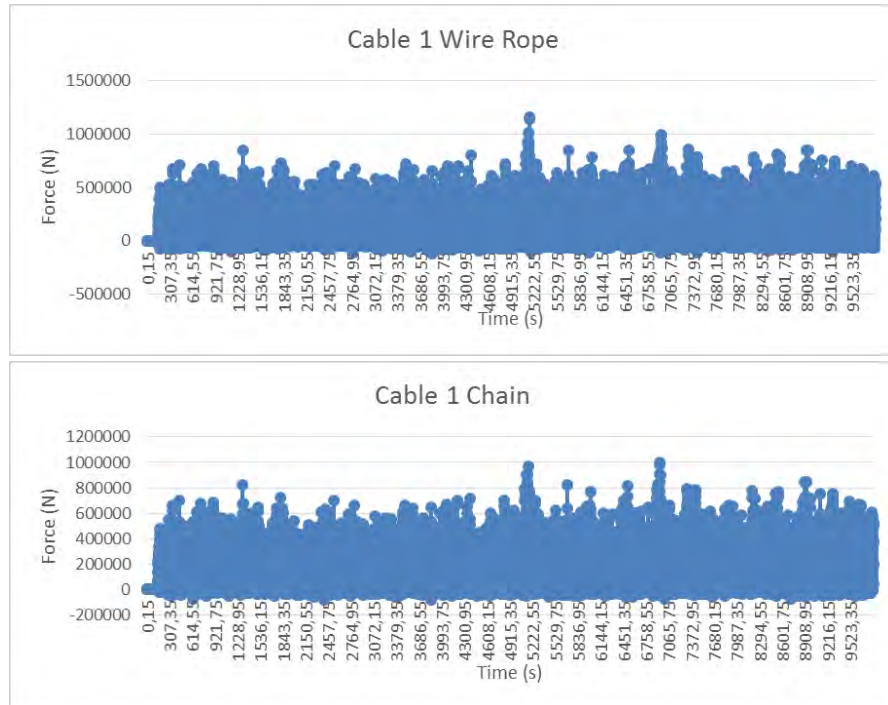
$$\text{Safety Factor} = \frac{\text{Minimum Breaking Load}}{\text{Maximum Tension}}$$

$$1.67 = \frac{6469173 \text{ N}}{\text{Maximum Tension}}$$

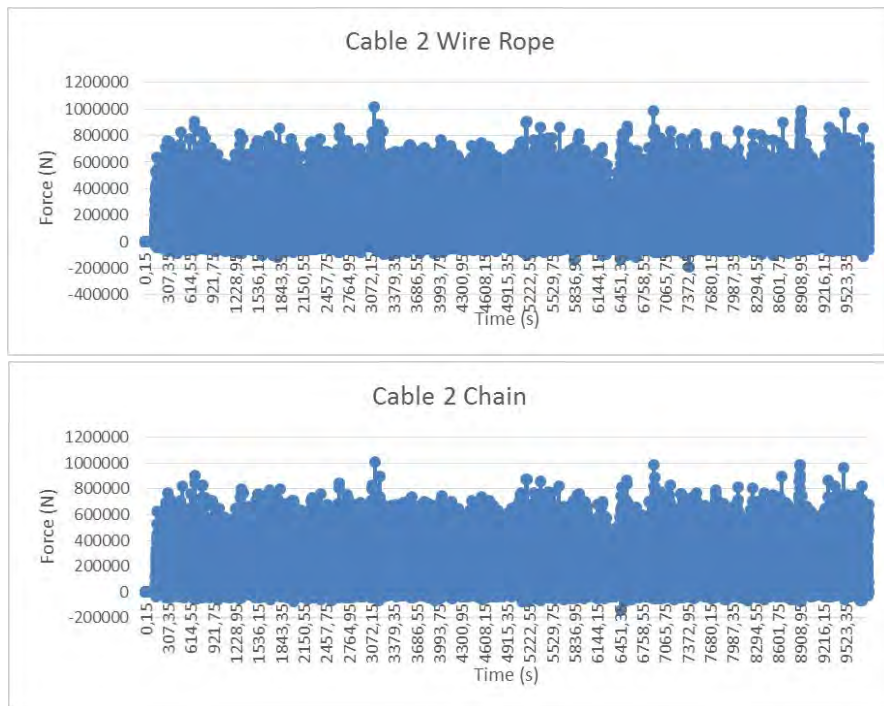
$$\text{Maximum Tension} = 3873756.28 \text{ N}$$

Dari perhitungan kriteria tersebut maka dapat disimpulkan bahwa nilai *tension* maksimum tali tambat yang dihasilkan pada kondisi ULS untuk material *wire with fibre core* tidak boleh melebihi 8955089,82 N dan untuk material *chain*

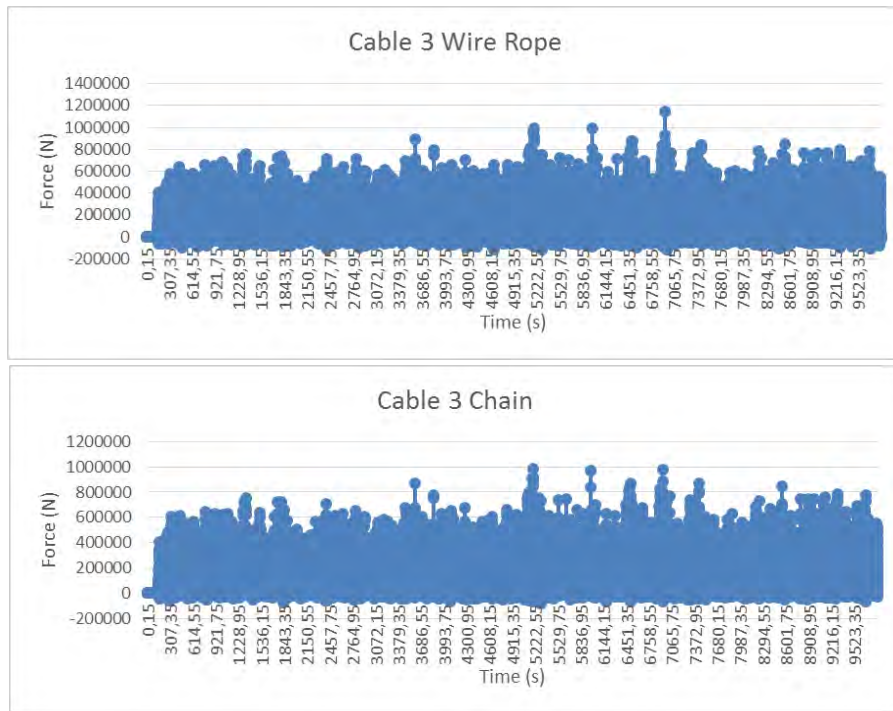
tidak boleh melebihi 3873756.28 N. Berikut adalah gambar grafik nilai *tension* yang terjadi untuk tiap-tiap tali tambat.



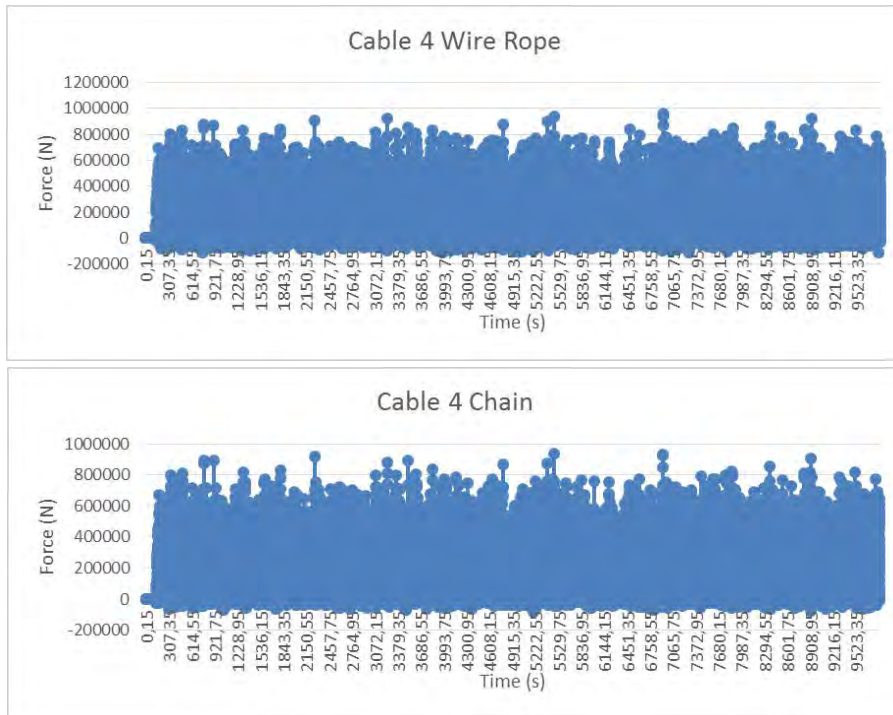
Gambar 4.21 Nilai *tension* untuk tali tambat nomor satu (1) kondisi ULS.



Gambar 4.22 Nilai *tension* untuk tali tambat nomor dua (2) kondisi ULS.



Gambar 4.23 Nilai *tension* untuk tali tambat nomor tiga (3) kondisi ULS.



Gambar 4.24 Nilai *tension* untuk tali tambat nomor empat (4) kondisi ULS.

Dari gambar grafik dapat disimpulkan bahwa keempat tali tambat memiliki nilai tension dibawah kriteria yang disyaratkan oleh API RP 2SK 2<sup>nd</sup> edition yaitu untuk *wire with fibre core* tidak boleh melebihi 8955089,82 N dan untuk material *chain* tidak boleh melebihi 3873756.28 N. Berikut adalah tabel nilai tension maksimum untuk tiap-tiap tali tambat.

Tabel 4.6 Ringkasan nilai *tension* terbesar tiap tali tambat kondisi ULS.

Nomor Tali Tambat	Tension Maksimum yang Diijinkan (N)		Tension Wire Rope (N)	Tension Chain (N)	Keterangan
	Wire with Fibre Core	Chain			
Cable 1	8955089,82	3873756.28	1156830	1003145	Memenuhi
Cable 2	8955089,82	3873756.28	1014970	1006680	Memenuhi
Cable 3	8955089,82	3873756.28	1143700	985960	Memenuhi
Cable 4	8955089,82	3873756.28	955730	936935	Memenuhi

#### 4.7.2 Analisa Tension Tali Tambat Untuk SBM pada Kondisi ALS

Resume hasil analisis *tension* untuk kondisi ALS (*one line damaged*) dari penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 4.25 hingga Gambar 4.36 serta beberapa penjelasannya. Sebelumnya perlu dihitung terlebih dahulu berapa nilai *tension* maksimum yang diijinkan oleh API RP 2SK 2<sup>nd</sup> edition untuk kondisi ALS. Perhitungannya adalah sebagai berikut:

- Untuk *Wire with Fibre Core*

$$1.25 = \frac{\text{Minimum Breaking Load}}{\text{Maximum Tension}}$$

$$1.25 = \frac{14955000 \text{ N}}{\text{Maximum Tension}}$$



$$\text{Maximum Tension} = 11964000 \text{ N}$$

- **Untuk Chain**

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

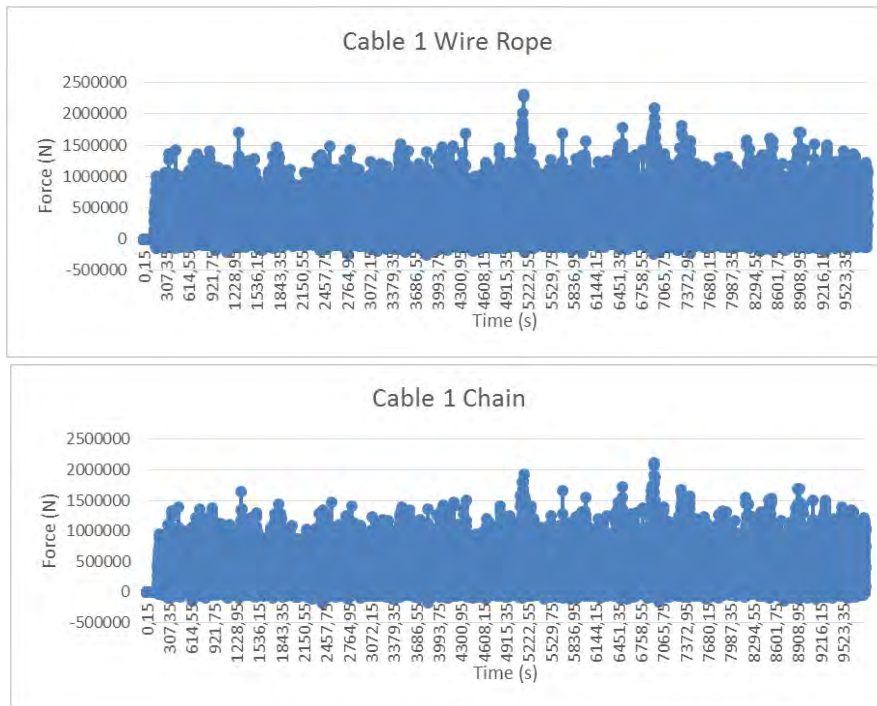
$$1.25 = \frac{6469173 \text{ N}}{\text{Maximum Tension}}$$

$$\text{Maximum Tension} = 5175338.4 \text{ N}$$

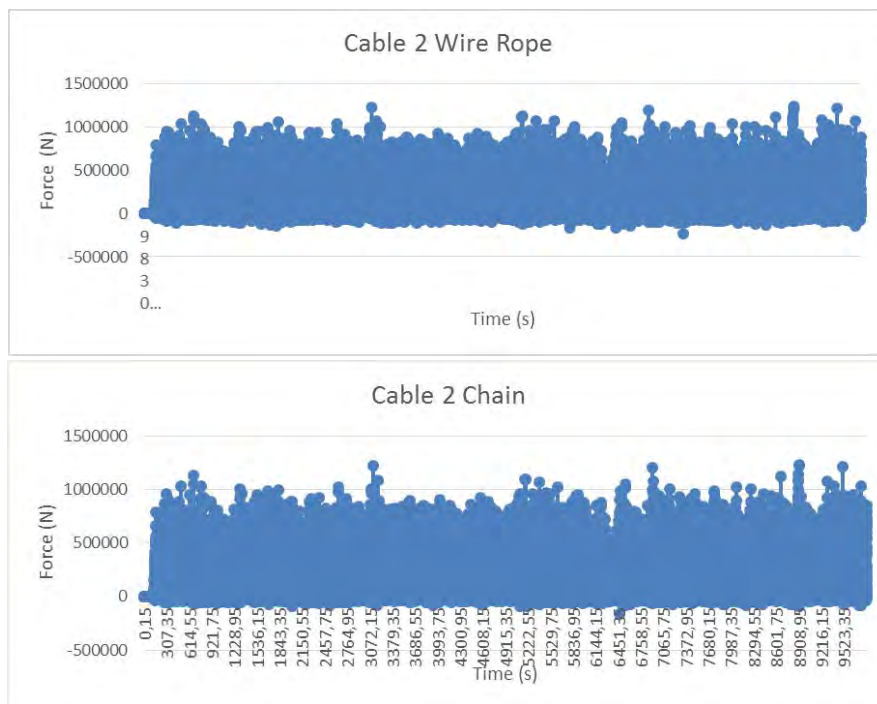
Dari perhitungan kriteria tersebut maka dapat disimpulkan bahwa nilai *tension* maksimum tali tambat yang dihasilkan pada kondisi ALS untuk material *wire with fibre core* tidak boleh melebihi 11964000 N dan untuk material *chain* tidak boleh melebihi 5175338.4 N. Berikut rangkuman hasil analisa *tension* tali tambat untuk kondisi ALS.

#### 4.7.2.1 Kondisi Tali Nomor Empat (4) Putus

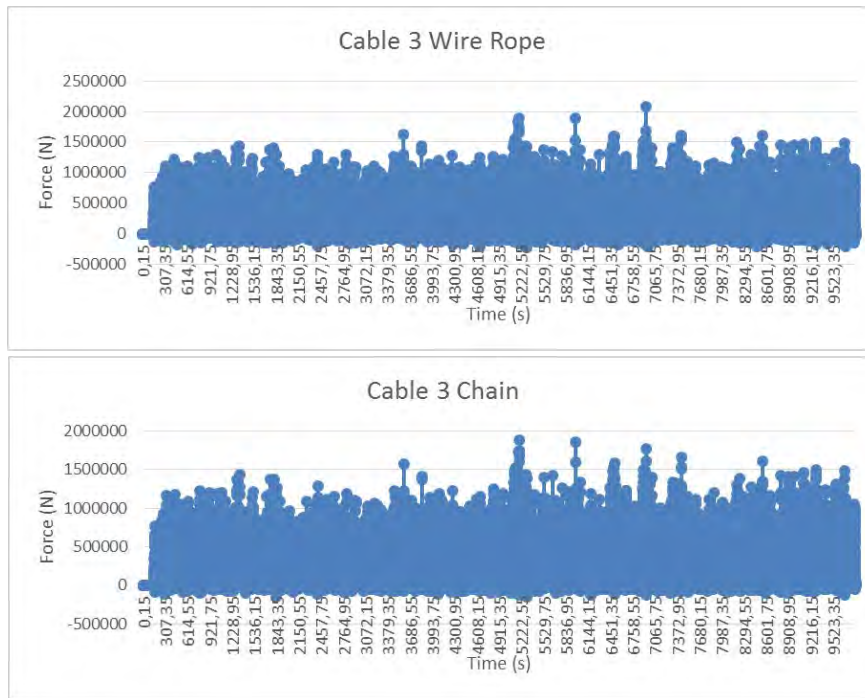
Dalam analisa ini, salah satu tali tambat yaitu tali nomor empat (4) diputus kemudian diberikan beban yang sama seperti kondisi ULS sehingga didapatkan *tension* ketiga tali yang tersisa seperti pada gambar berikut.



Gambar 4.25 Nilai *tension* untuk tali tambat nomor satu (1) kondisi ALS saat tali nomor empat (4) putus



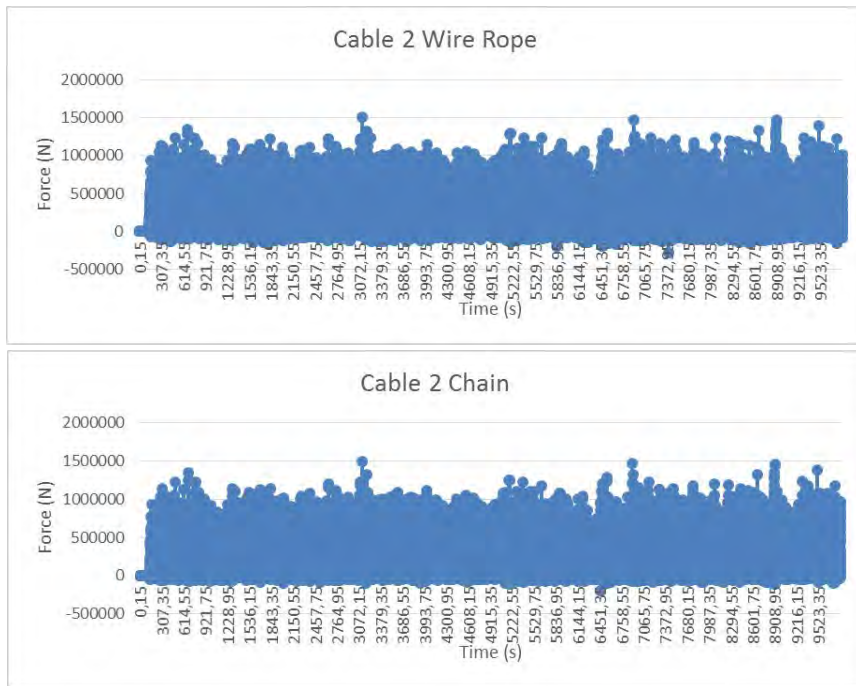
Gambar 4.26 Nilai *tension* untuk tali tambat nomor dua (2) kondisi ALS saat tali nomor empat (4) putus



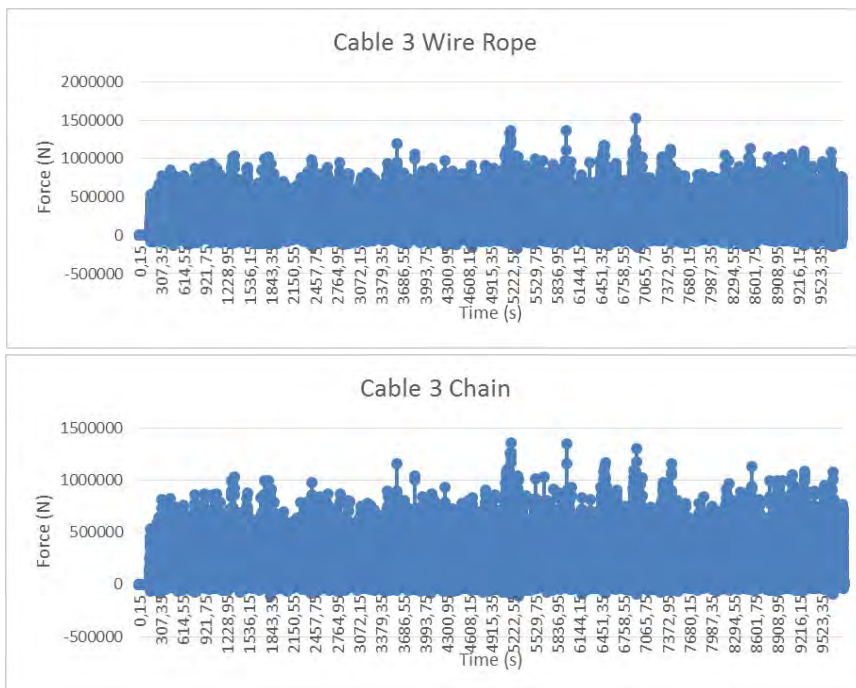
Gambar 4.27 Nilai *tension* untuk tali tambat nomor tiga (3) kondisi ALS saat tali nomor empat (4) putus

#### 4.7.2.2 Kondisi Tali Nomor Satu (1) Putus

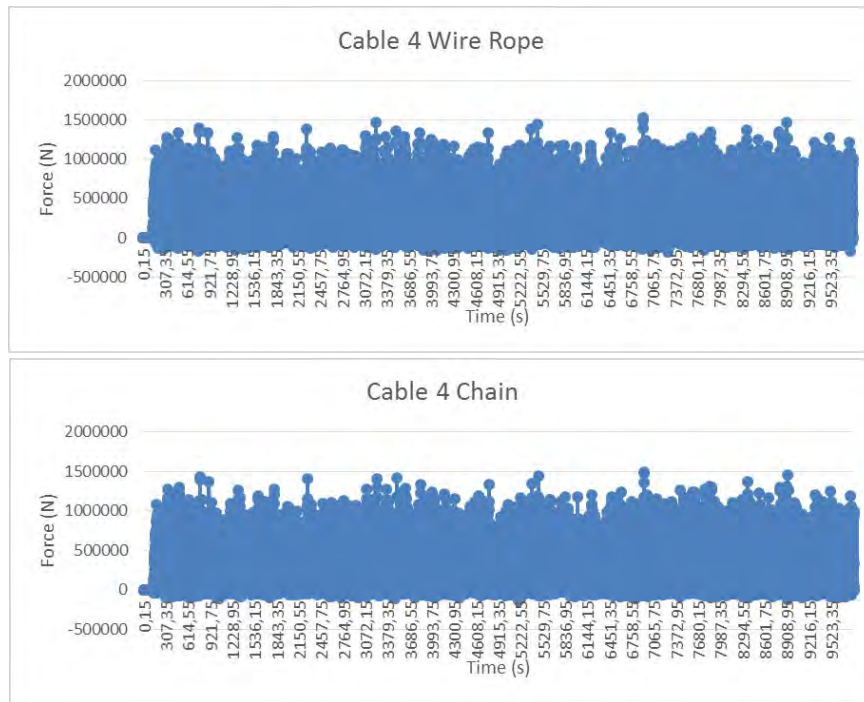
Dalam analisa ini, salah satu tali tambat yaitu tali nomor satu (1) diputus kemudian diberikan beban yang sama seperti kondisi ULS sehingga didapatkan *tension* ketiga tali yang tersisa seperti pada gambar berikut.



Gambar 4.28 Nilai *tension* untuk tali tambat nomor dua (2) kondisi ALS saat tali nomor satu (1) putus



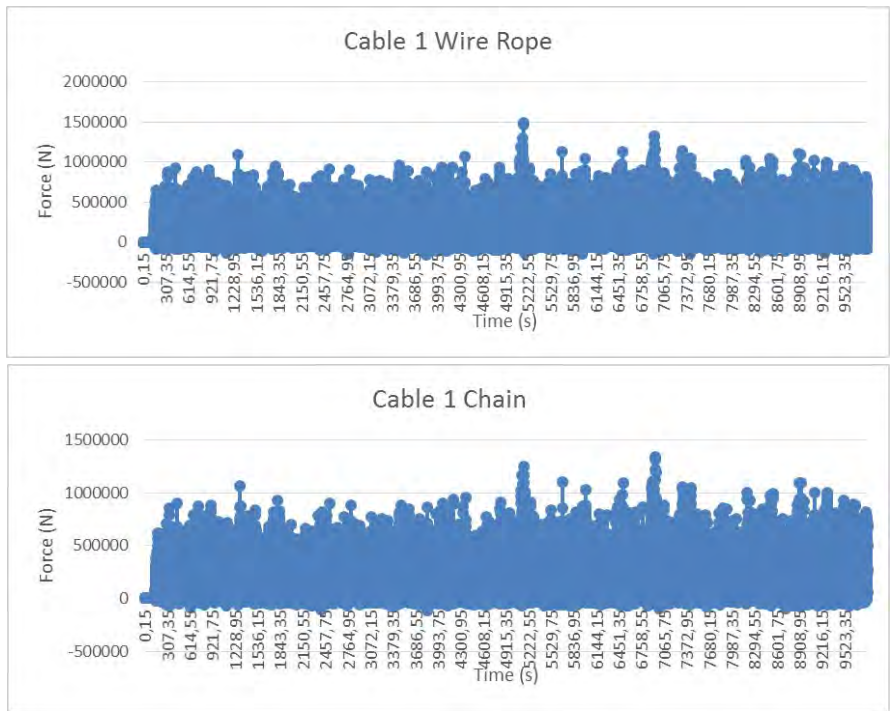
Gambar 4.29 Nilai *tension* untuk tali tambat nomor tiga (3) kondisi ALS saat tali nomor satu (1) putus



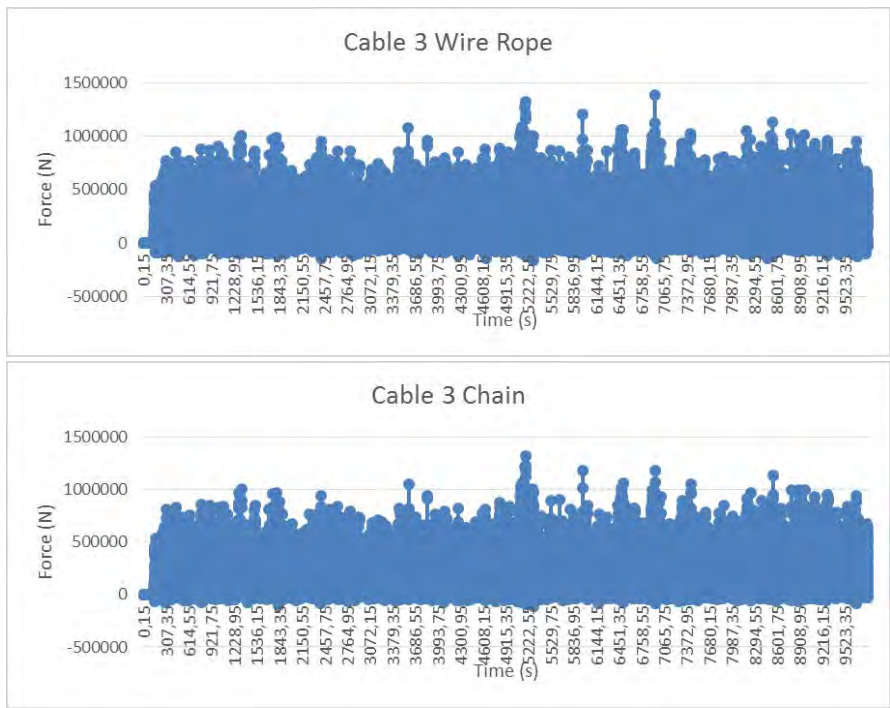
Gambar 4.30 Nilai *tension* untuk tali tambat nomor empat (4) kondisi ALS saat tali nomor satu (1) putus

#### 4.7.2.3 Kondisi Tali Nomor Dua (2) Putus

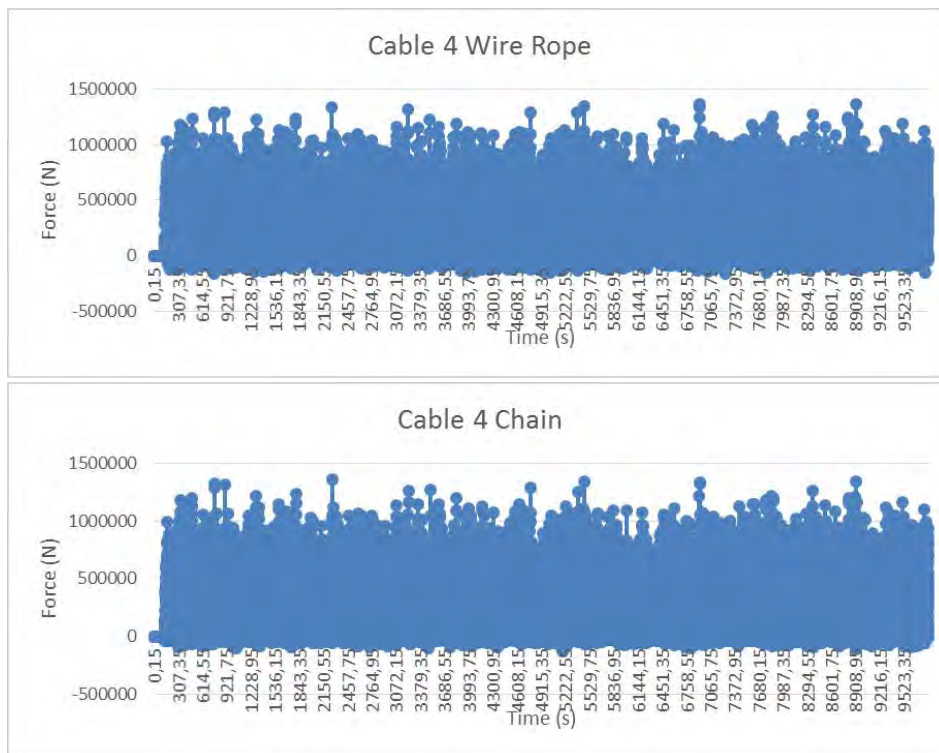
Dalam analisa ini, salah satu tali tambat yaitu tali nomor dua (2) diputus kemudian diberikan beban yang sama seperti kondisi ULS sehingga didapatkan *tension* ketiga tali yang tersisa seperti pada gambar berikut.



Gambar 4.31 Nilai *tension* untuk tali tambat nomor satu (1) kondisi ALS saat tali nomor dua (2) putus



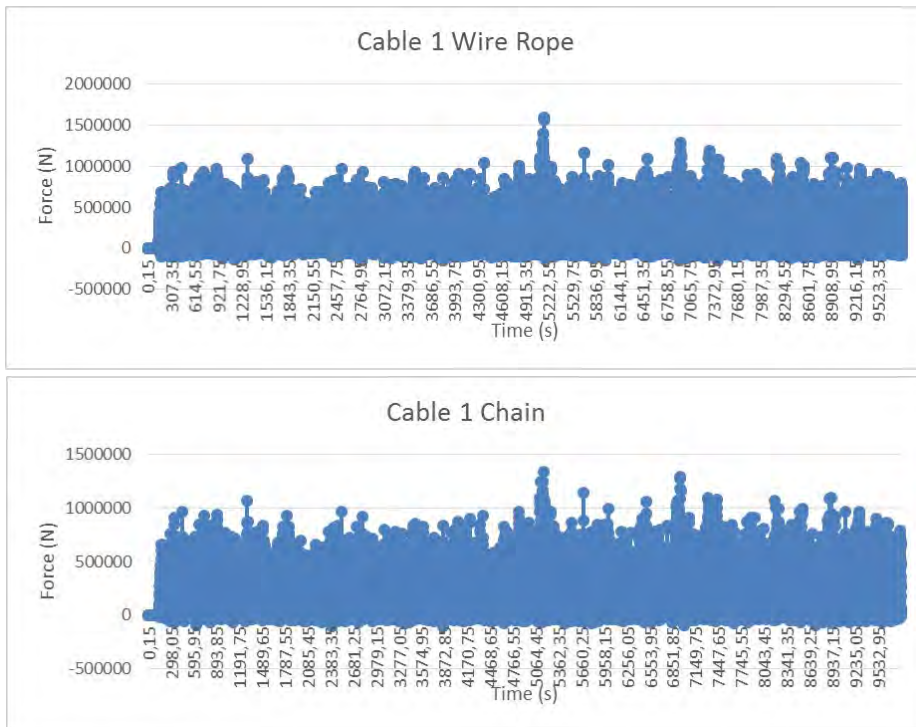
Gambar 4.32 Nilai *tension* untuk tali tambat nomor tiga (3) kondisi ALS saat tali nomor dua (2) putus



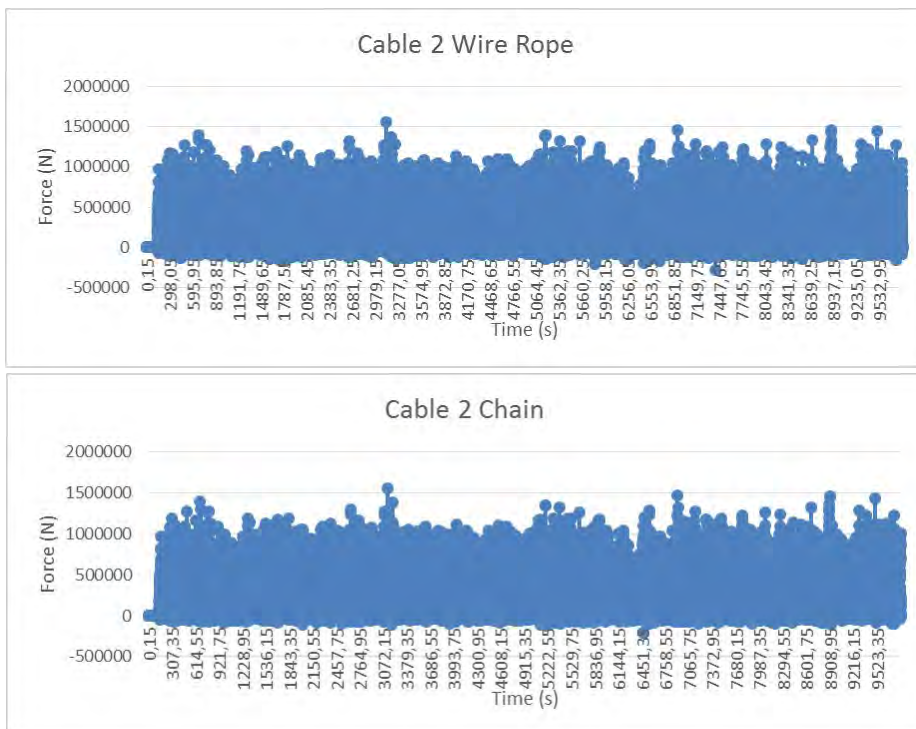
Gambar 4.33 Nilai *tension* untuk tali tambat nomor empat (4) kondisi ALS saat tali nomor dua (2) putus

#### 4.7.2.4 Kondisi Tali Nomor Tiga (3) Putus

Dalam analisa ini, salah satu tali tambat yaitu tali nomor tiga (3) diputus kemudian diberikan beban yang sama seperti kondisi ULS sehingga didapatkan *tension* ketiga tali yang tersisa seperti pada gambar berikut.

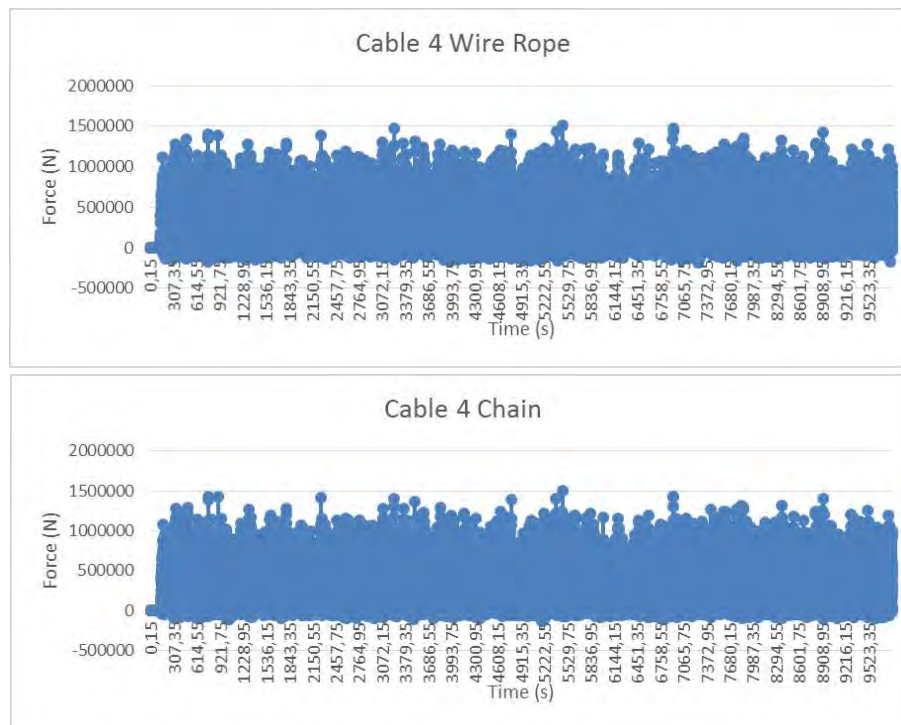


Gambar 4.34 Nilai *tension* untuk tali tambat nomor satu (1) kondisi ALS saat tali nomor tiga (3) putus



Gambar 4.35 Nilai *tension* untuk tali tambat nomor dua (2) kondisi ALS saat tali nomor tiga (3) putus





Gambar 4.36 Nilai *tension* untuk tali tambat nomor empat (4) kondisi ALS saat tali nomor tiga (3) putus

Dari grafik *tension* yang ditunjukkan pada Gambar 4.25 – Gambar 4.36, selama durasi waktu simulasi 3 jam (10800 s) maka didapat nilai *tension* terbesar untuk tiap-tiap tali tambat yang tersisa. Nilai tersebut dapat dilihat pada tabel 4.7 berikut.

Tabel 4.7 Ringkasan nilai *tension* terbesar tiap tali tambat kondisi ALS

Nomor Tali yang Diputus	Nomor Tali yang Dianalisa	<i>Tension</i> Maksimum yang diijinkan (N)		<i>Tension Wire Rope</i> (N)	<i>Tension Chain</i> (N)	Keterangan
		<i>Wire with Fibre Core</i>	<i>Chain</i>			
4	1	11964000	5175338.4	2313660	2111884	Memenuhi
4	2	11964000	5175338.4	1236263	1229400	Memenuhi
4	3	11964000	5175338.4	2079455	1878019	Memenuhi
1	2	11964000	5175338.4	1503659	1491378	Memenuhi
1	3	11964000	5175338.4	1524933	1359945	Memenuhi
1	4	11964000	5175338.4	1529168	1488624	Memenuhi
2	1	11964000	5175338.4	1492684	1337527	Memenuhi
2	3	11964000	5175338.4	1386303	1314613	Memenuhi

Lanjutan Tabel 4.7

Nomor Tali yang Diputus	Nomor Tali yang Dianalisa	Tension Maksimum yang diijinkan (N)		Tension Wire Rope (N)	Tension Chain (N)	Keterangan
		Wire with Fibre Core	Chain			
2	4	11964000	5175338.4	1368044	1358059	Memenuhi
3	1	11964000	5175338.4	1595628	1334676	Memenuhi
3	2	11964000	5175338.4	1561492	1548738	Memenuhi
3	4	11964000	5175338.4	1504360	1499096	Memenuhi

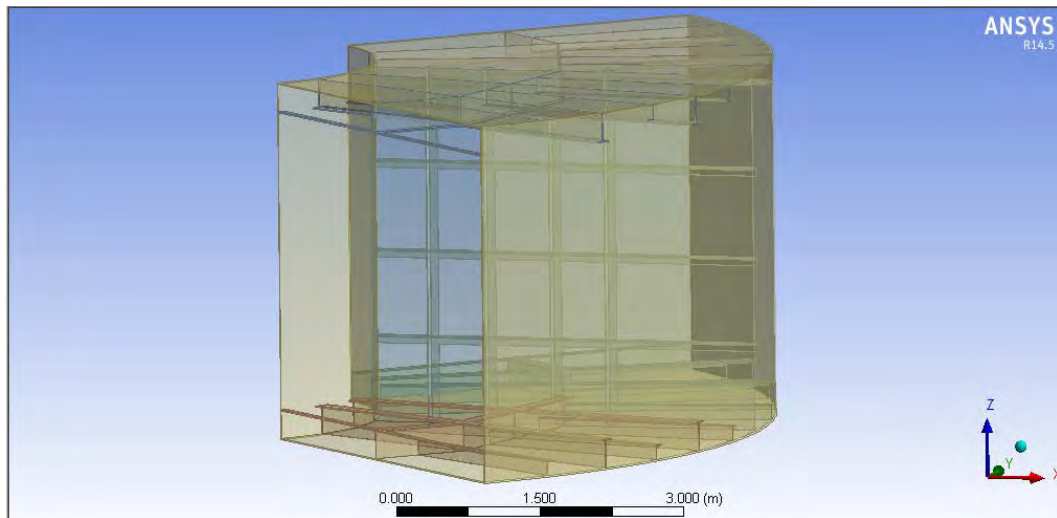
Dari Tabel 4.7 dinyatakan bahwa nilai *tension* yang terbesar dialami oleh tali tambat nomor 1 saat kondisi tali tambat nomor 4 diputus yaitu sebesar 2046621 N dibawah ketentuan *tension* maksimum untuk material *wire with fibre core* sebesar 11964000 N dan untuk material *chain* sebesar 5175338.4 N . Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa untuk kondisi ALS, seluruh nilai *tension* maksimum berada pada batas aman sesuai kriteria API RP 2SK 2<sup>nd</sup> edition. Selanjutnya hasil *tension* terbesar yang terjadi akan digunakan sebagai *input* beban pada analisa kekuatan struktur SPM.

#### 4.8 Analisa Kekuatan Struktur SPM

Pada analisa kekuatan struktur ini dilakukan berdasarkan beban yang didapatkan dari hasil *output* analisa sebelumnya berupa *tension* tali tambat dan tekanan hidrostatis yang terjadi. Beban yang akan digunakan diambil nilai maksimum yang terjadi. Uraian lebih lengkapnya adalah sebagai berikut.

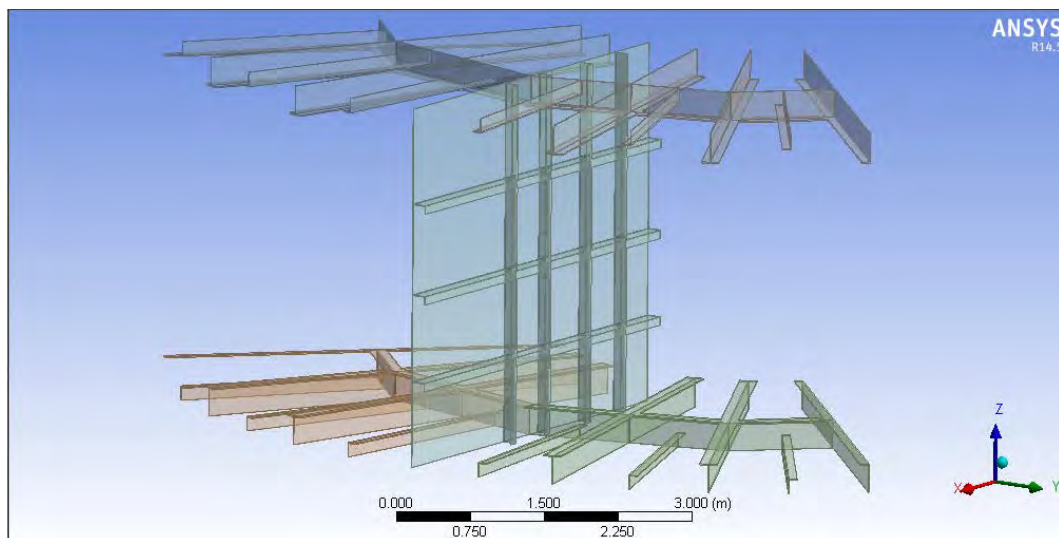
##### 4.8.1 Pemodelan Struktur SPM

Pemodelan struktur dilakukan berdasarkan gambar *general arrangement* yang didapat. Penegar serta sekat dimodelkan untuk mendekati kondisi sebenarnya. Namun dilakukan beberapa penyederhanaan pada saat memodelkan penegar untuk memudahkan dalam proses pemodelan. Pemodelan dilakukan dengan menggunakan *software* AutoCAD yang kemudian diimport kedalam *software* ANSYS untuk dilakukan analisa selanjutnya. Berikut adalah model yang digunakan untuk analisa dapat dilihat pada gambar 4.37.



Gambar 4.37 Model geometri struktur

Pemodelan dilakukan hanya seperempat bagian dari struktur SPM dimana pada bagian ini terjadi beban terbesar. Dengan memodelkan seperempat bagian dari SPM akan dapat diketahui bagian lainya dikarenakan bentuk geometri dari SPM yang simetris. Gambar model penegar dari struktur SPM yang digunakan dalam analisa ini dapat dilihat pada gambar 4.38 berikut ini.

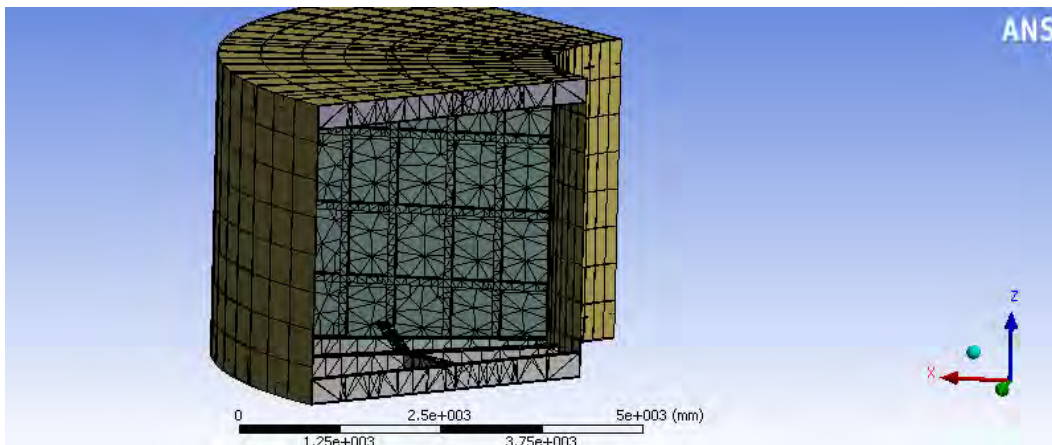


Gambar 4.38 Model penegar struktur SPM

Pada saat memodelkan penegar pada SPM ini dilakukan penyederhanaan dengan tujuan untuk memudahkan pada proses pemodelan serta pada saat melakukan *meshing*. Sehingga tidak semua penegar disertakan dalam pemodelan.

#### 4.8.2 Meshing Model

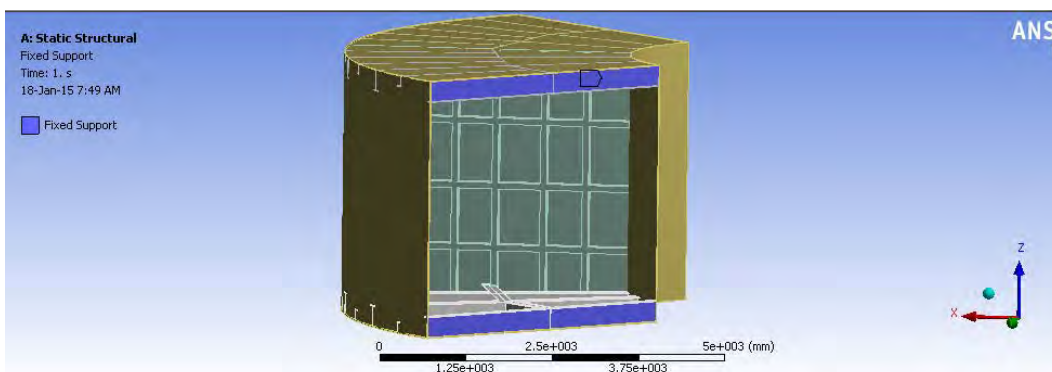
Setelah memodelkan geometri struktur kemudian dilakukan *meshing* dengan tujuan untuk menganalisa *stress* yang terjadi. *Meshing* ini akan membagi struktur menjadi elemen-elemen kecil sehingga analisa dapat dilakukan dengan lebih teliti. Dengan dilakukan *meshing* maka nantinya dapat diketahui nilai *stress* yang terjadi pada struktur untuk tiap elemen-elemen *meshing*. Pada analisa ini kriteria *meshing* yang digunakan mengikuti *default* dari *software* ANSYS. Model *meshing* untuk analisa ini dapat dilihat pada gambar 4.39 berikut ini.



Gambar 4.39 *Meshing* geometri struktur

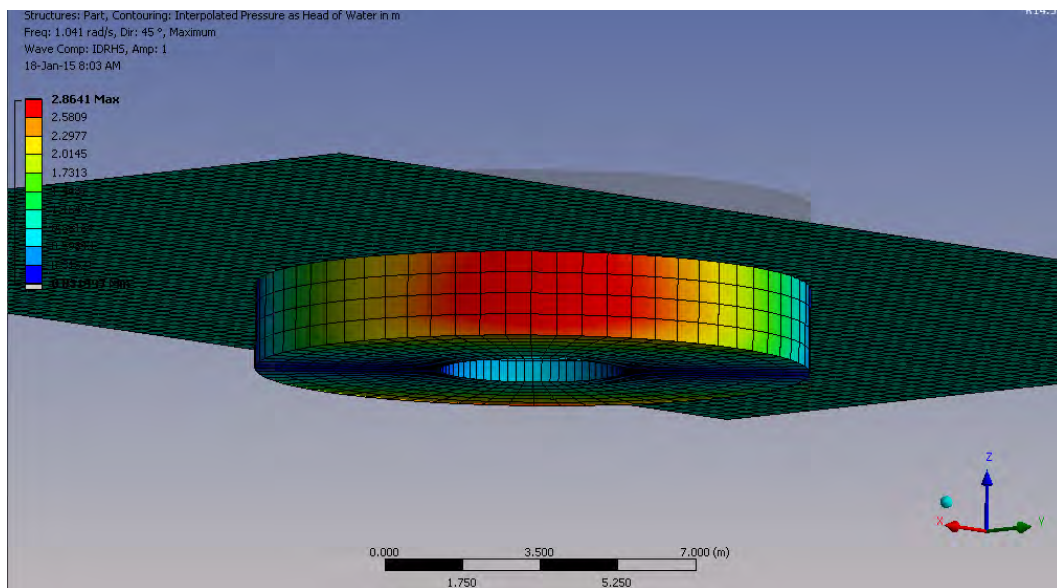
#### 4.8.3 Input Support dan Pembebanan pada Geometri

Langkah selanjutnya setelah dilakukan *meshing* yaitu menentukan kondisi batas berupa *support* dari struktur sebelum nantinya diberi pembebanan. Pada analisa ini, *support* dari struktur yang digunakan yaitu berupa *Fixed Support* yang bekerja pada ujung dari geometri struktur. Lokasi *support* pada struktur dapat dilihat pada gambar 4.40 berikut ini.



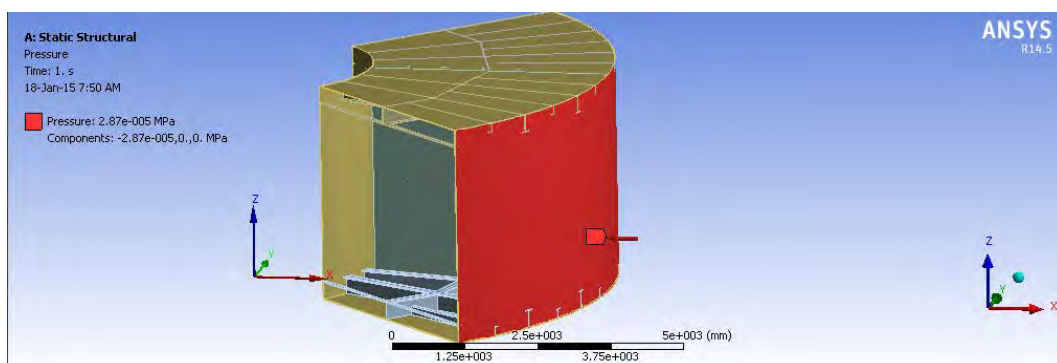
Gambar 4.40 Lokasi *support* struktur

Setelah geometri struktur diberi *support* kemudian langkah selanjutnya yaitu memasukan beban yang terjadi yang didapatkan dari analisa sebelumnya. Perlu diketahui bahwa dari analisa sebelumnya didapatkan *output* berupa line tension dari dua kriteria kondisi yaitu ULS dan ALS. Beban *line tension* yang akan digunakan kali ini diambil nilai *tension* yang terbesar yang terdapat pada kondisi ALS dengan nilai *tension* sebesar 2046621 N. Selain *line tension*, dari analisa sebelumnya juga didapatkan beban berupa *pressure* gelombang yang yang terjadi. Beban *pressure* dari gelombang diambil nilai terbesar yang mengenai struktur SPM. *Pressure* gelombang yang terjadi dapat dilihat pada gambar 4.41 berikut ini.

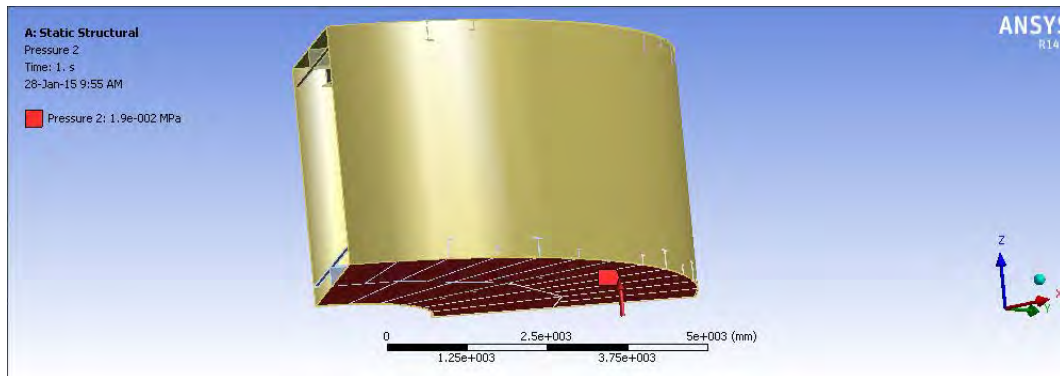


Gambar 4.41 Tekanan terbesar yang terjadi pada struktur akibat beban gelombang

Beban tekanan akibat gelombang tersebut kemudian dikenakan sesuai dengan lokasi beban bekerja pada analisa sebelumnya yaitu pada permukaan struktur seperti yang ada pada gambar 4.42 dan 4.43 berikut ini.

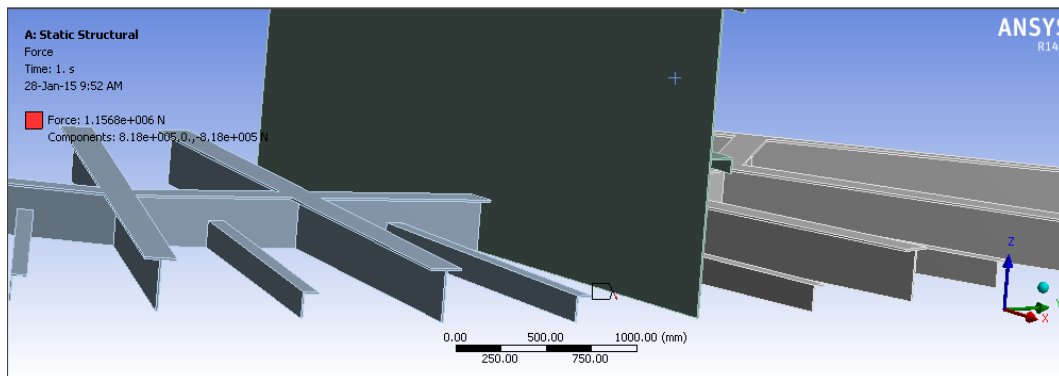


Gambar 4.42 *Input* beban tekanan gelombang pada geometri struktur



Gambar 4.43 *Input* beban tekanan gelombang arah vertikal pada geometri struktur

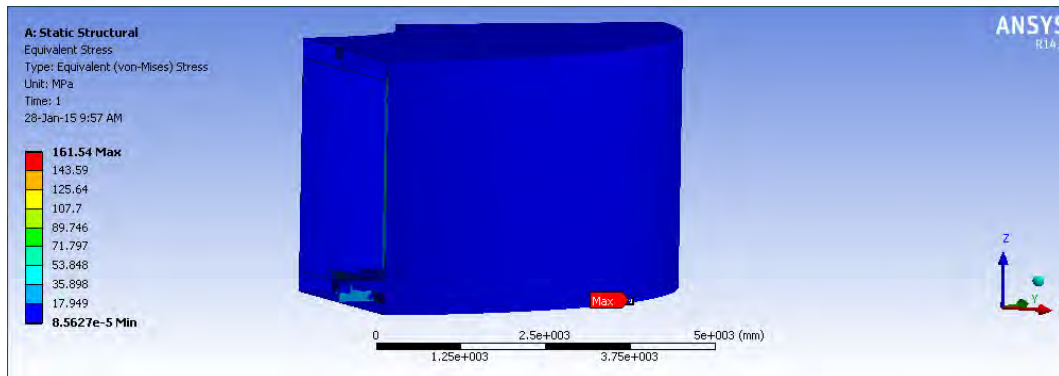
Selanjutnya memasukan beban berupa line tension kondisi ULS maupun ALS yang bekerja pada struktur. Beban tersebut diuraikan sesuai arah kerja beban dalam hal ini kearah sumbu x dan z seperti yang ada pada gambar 4.43 berikut.



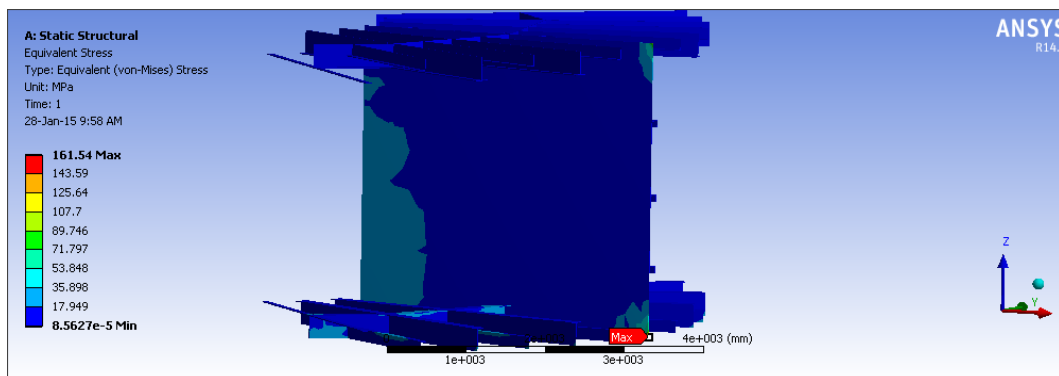
Gambar 4.44 *Input* beban tarikan tali tambat pada geometri struktur

#### 4.8.4 Hasil Analisa Struktur

Hasil dari analisa ini yaitu berupa stress yang terjadi pada struktur akibat beban-beban yang terjadi. Stress terbesar yang terjadi pada struktur pada kondisi ULS yaitu sebesar 161,54 Mpa yang terjadi pada koneksi antar penegar struktur dengan plat. Lokasi stress maksimum yang terjadi pada struktur dapat dilihat pada gambar 4.44 dan gambar 4.45 berikut ini.

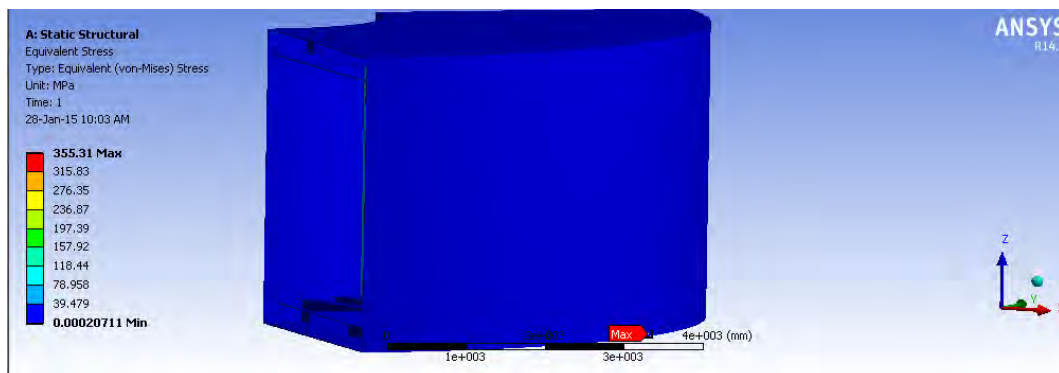


Gambar 4.45 Hasil *stress* yang terjadi pada geometri struktur kondisi ULS

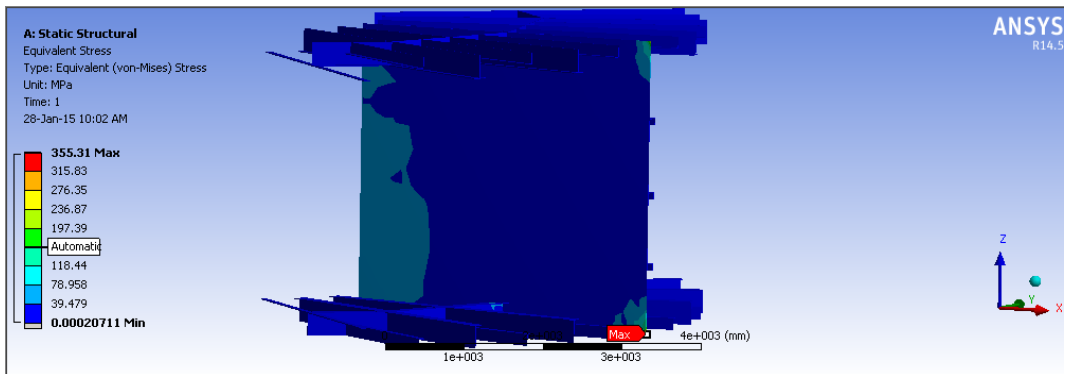


Gambar 4.46 Detail lokasi *stress* terbesar yang terjadi pada geometri struktur kondisi ULS

Stress terbesar yang terjadi pada struktur pada kondisi ALS yaitu sebesar 355,31 Mpa yang terjadi pada koneksi antar penegar struktur dengan plat. Lokasi stress maksimum yang terjadi pada struktur dapat dilihat pada gambar 4.46 dan gambar 4.47 berikut ini.



Gambar 4.47 Hasil *stress* yang terjadi pada geometri struktur kondisi ALS



Gambar 4.48 Detail lokasi *stress* terbesar yang terjadi pada geometri struktur kondisi ALS



## BAB V

### PENUTUP

#### 5.1 Kesimpulan

Dari beberapa analisa yang telah dilakukan pada Bab IV dapat ditarik beberapa kesimpulan sekaligus untuk menjawab beberapa permasalahan yang ditetapkan pada Tugas Akhir ini. Beberapa kesimpulan tersebut adalah :

1. Respon gerakan dari struktur *single buoy mooring* dalam kondisi *self floating* ditinjau dari enam (6) gerakan bangunan apung yang memiliki nilai tertinggi yaitu pada gerakan *surge* dan *pitch* masing-masing sebesar 12,984 m<sup>2</sup>/(rad/s) untuk *surge* dan 299,561 de g<sup>2</sup>/(rad/s) untuk *pitch*. Nilai ini didapatkan dari kondisi pembebanan dengan *heading* 0° *inline* (segaris dengan salah satu tali tambat). Analisa dilakukan hanya pada satu *heading* dikarenakan geometri struktur yang simetris sehingga dari satu *heading* dianggap sudah mewakili.
2. Dalam analisa ini, *tension* terbesar yang dialami tali tambat pada struktur *single buoy mooring* yang diakibatkan oleh beban gelombang ekstrim dalam kondisi ULS adalah sebesar 1156830 N untuk *wire with fibre core* yang terjadi pada tali tambat nomor satu (1) dan 1006680 N untuk *chain* yang terjadi pada tali tambat nomor dua (2). Sedangkan dalam kondisi ALS *tension* terbesar yang terjadi yaitu sebesar 2313660 N untuk *wire with fibre core* dan 2111884 N untuk *chain* pada tali tambat nomor satu (1) dengan skenario tali tambat nomor empat (4) diputus. Hasil *tension* terbesar yang terjadi bila dibandingkan dengan kriteria *safety factor* berdasarkan API RP 2SK 2<sup>nd</sup> *edition* untuk batas maksimum kondisi ULS yang diijinkan yaitu 8955089,82 N untuk *wire with fibre core* dan 3873756.28 N untuk *chain*. Sedangkan untuk kondisi ALS, kriteria *safety factor* berdasarkan API RP 2SK 2<sup>nd</sup> *edition* untuk batas maksimum yang diijinkan yaitu 11964000 N untuk *wire with fibre core* dan 5175338.4 N untuk *chain*.
3. Dari hasil analisa yang dilakukan, didapatkan nilai tegangan maksimum yang terjadi pada struktur SPM yang diakibatkan oleh beban-beban yang

bekerja untuk kondisi ULS adalah sebesar 161,54 Mpa. Sedangkan pada kondisi ALS sebesar 355,31 Mpa. Tegangan tersebut terjadi pada koneksi antara penegar dan plat pada struktur SPM.

## 5.2 Saran

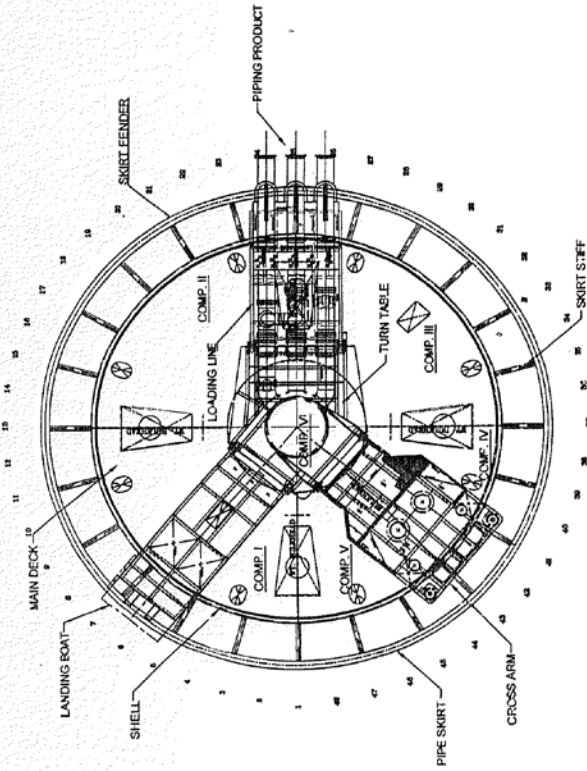
Saran yang dapat diberikan untuk penelitian lebih lanjut mengenai Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Dianjurkan untuk memodelkan struktur SPM untuk lebih detail lagi, seperti pemodelan turn table, perpipaan serta *skirt* yang ada sehingga pemodelan akan mendekati kenyataan. Hal ini akan berpengaruh pada perhitungan massa struktur, frekuensi natural serta respon gerak dari struktur tersebut.
2. Dianjurkan untuk melakukan analisa *fatigue life* (FLS) dan keandalan dari tali tambat struktur SPM untuk mendapatkan tingkat keamanan yang tinggi. Hal ini berkaitan dengan pentingnya peranan sistem tali tambat atau *mooring line* dalam menjaga SPM untuk tetap berada pada posisinya.
3. Dianjurkan untuk memperhitungkan beban arus yang terjadi untuk lebih mendekati kondisi kenyataan di lapangan.

arah	0
------	---

Frequency	Surge	Sway	Heave	Roll	Pitch	Yaw
0,042	9,98065	0,00016176	1,000007	1,7552E-06	0,203938	0,0027882
0,208	4,015612	5,3794E-06	1,000125	1,7301E-06	1,037464	0,0001117
0,375	2,232879	3,495E-07	1,000787	1,7351E-06	1,971003	3,39E-05
0,541	1,543975	6,8536E-07	1,003004	6,8226E-06	1,142742	1,575E-05
0,708	1,171097	3,3893E-07	1,009545	2,0669E-05	3,889125	8,744E-06
0,874	0,917156	1,4469E-07	1,027192	1,4867E-05	5,505005	5,229E-06
1,041	0,585888	7,1438E-07	1,07388	9,4701E-05	8,120376	2,897E-06
1,207	0,78832	3,2661E-07	1,190269	1,8932E-05	4,340095	2,173E-06
1,374	0,594322	2,1086E-07	1,341411	1,8859E-05	1,854263	2,759E-06
1,54	0,466193	7,7679E-08	0,821469	4,9834E-06	1,486875	3,839E-06
1,706	0,362669	7,982E-08	0,229347	8,4984E-06	0,480302	3,118E-06
1,873	0,279555	9,9771E-08	1,199839	5,4831E-07	0,017063	9,738E-07
2,039	0,213979	4,4831E-08	0,174607	1,5437E-06	0,197208	1,265E-06
2,206	0,16298	3,3819E-08	0,083526	1,1145E-06	0,278747	9,815E-07
2,372	0,123332	1,3762E-08	0,045488	8,0849E-07	0,287872	7,142E-07
2,539	0,091788	2,4225E-08	0,02582	6,0851E-07	0,253912	4,853E-07
2,705	0,063731	4,6912E-08	0,014138	9,3585E-07	0,176124	2,905E-07
2,872	0,055363	3,0592E-06	0,146986	2,7107E-05	0,641364	3,361E-07
3,038	0,003909	9,2302E-07	0,00803	1,0415E-05	0,130049	1,208E-07
3,205	0,050882	2,3121E-06	0,004501	1,8019E-06	0,30736	1,886E-07

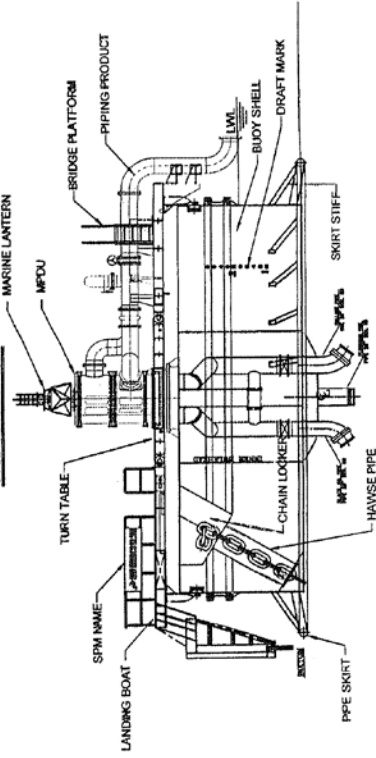
TOP VIEW



PRINCIPAL DIMENSION

OUTSIDE DIAMETER	: 12.5 M
INSIDE DIAMETER	: 4.20 M
SKIRT DIAMETER	: 15.3 M
DEPTH	: 3.75 M
DRAFT	: 1.90 M
COMPARTMENT	: 6 UNITS + 1 UNIT UNDER MPDU
WEIGHT	: 236 TON

OUTBOARD PROFILE



APPROVED BY :	
OWNER REPRESENTATIVE PT. PERTAMINA RU VI BALONGAN	
DATE	16 JUNE 2010
NAME	SIGIT PURNANTORO
SIGNATURE	<i>[Signature]</i>

Year : 2010	Month :	Day :	Scale :	Sheet No :
Drawn :	Checked :	Approved :	Scale :	ROSPENKA
Design :	Checked :	Approved :	Scale :	PERTAMINA
Owner :	Checked :	Approved :	Scale :	GENERAL ARRANGEMENT
Approved by :	Checked :	Approved :	Scale :	
Drawn by :	Checked :	Approved :	Scale :	
Checked by :	Checked :	Approved :	Scale :	
Approved by :	Checked :	Approved :	Scale :	
Drawing No. : SW/002-21.100-EG-008-10				Page : 1 from 1
Drawing Title : SW/002-21.100-EG-008-10				REV
INDONESIA				REV
BIRU ENGINEERING AS				REV
				03
				10
				06

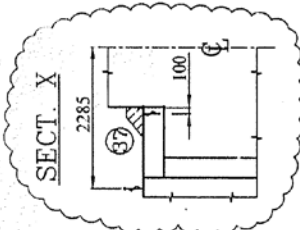
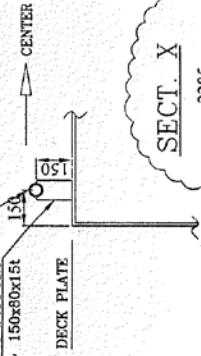
**MAIN DECK**

**DECK RAILING**

②① DECK RAILING  
PIPE Ø1 1/2" SCH.80  
LENGTH = 36500

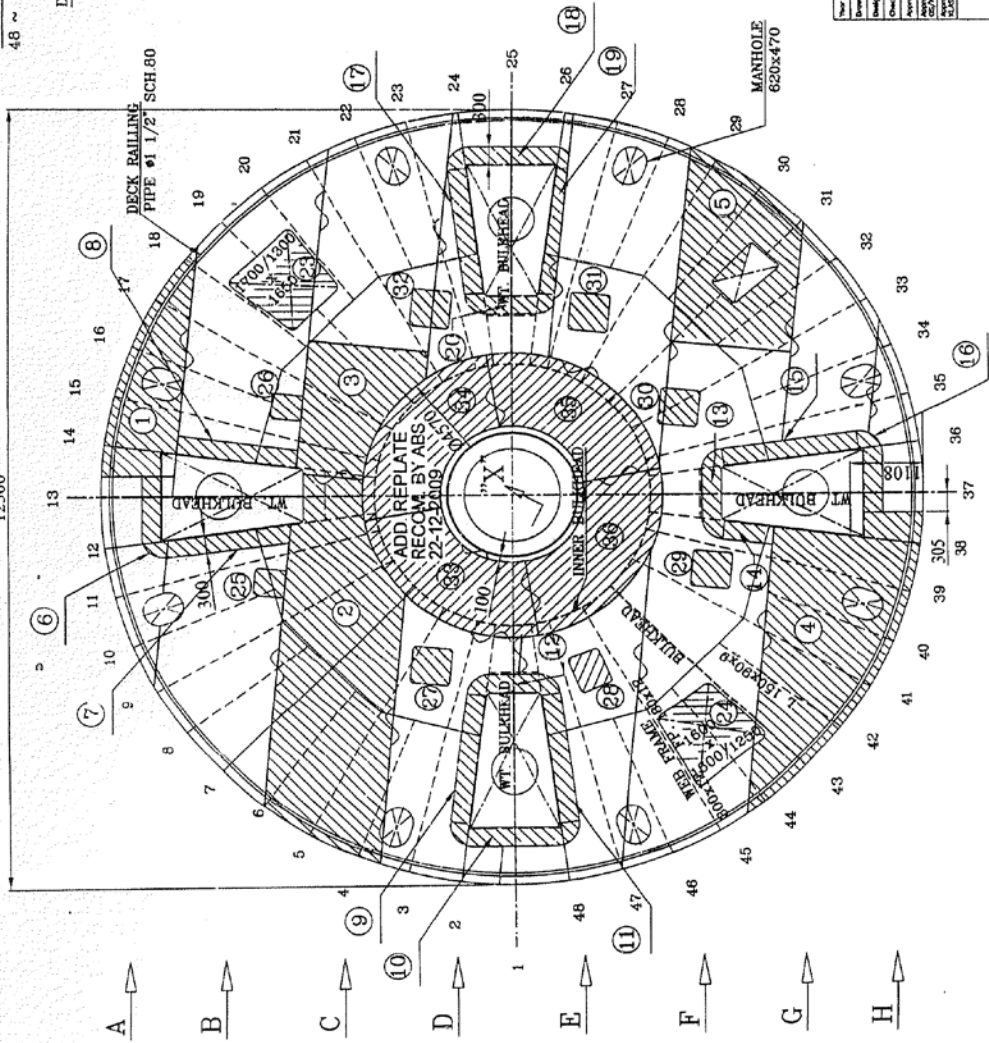
②② PIPE SUPPORT  
48 ~ 150x80x15t

DECK PLATE



DECK PLATE : 12 MM  
DECK GIRDER : L 150x80x9  
INNER BULKHEAD : 10 MM  
W.T. BULKHEAD : 10 MM  
WEB FRAME : 300x12 / FT. 180x12  
ORDINARY FRAME : L 150x80x9

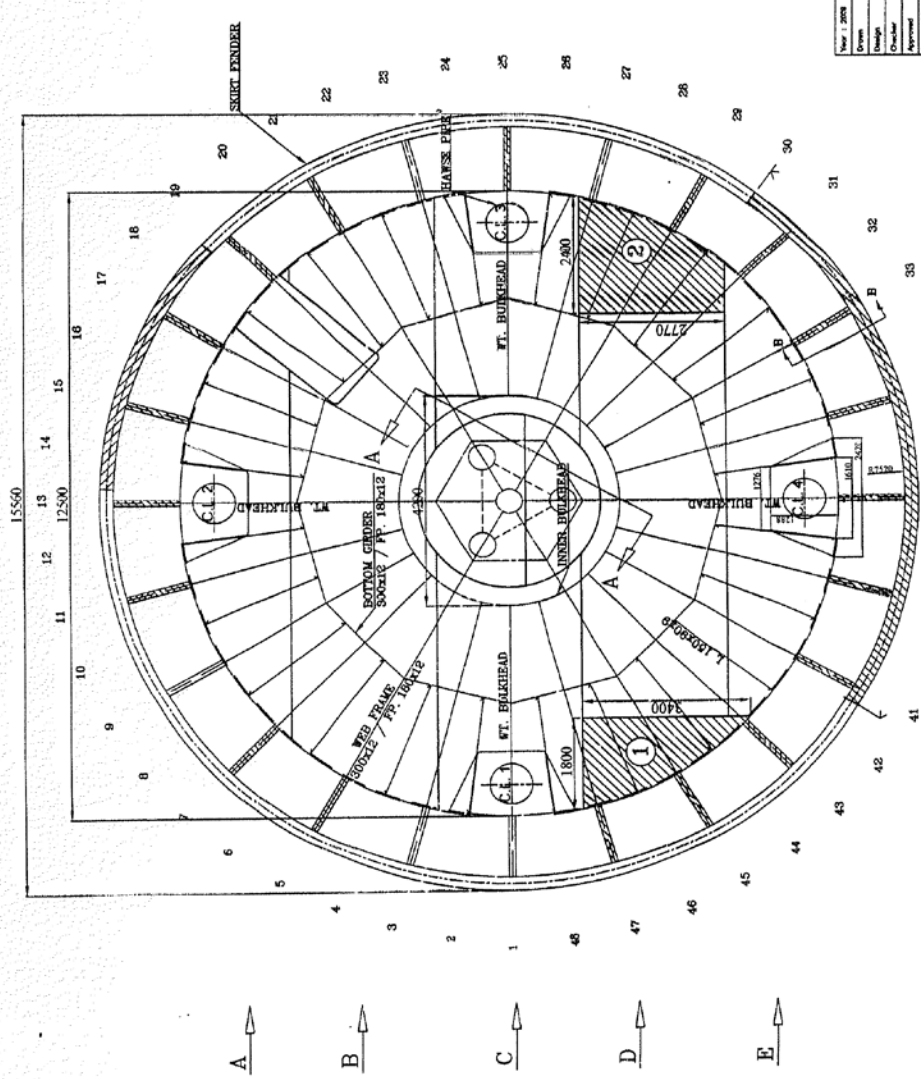
APPROVED BY :	
OWNER REPRESENTATIVE PT. PERTAMINA RU VI BALONGAN	
DATE	16 JPAI - 2010
NAME	Siti Pujiyanti
SIGNATURE	



Year	2008	Job/Proj	SPM IMODCO 12.5 M "BALONGAN UP VI"
Drawn	W. H.	Checked	W. H.
Design	W. H.	Approved by	W. H.
Checker	W. H.	Approved to	W. H.
Author	W. H.	Checked by	W. H.
Scale	1:1	Drawn No.	SPM/09-16-10-142-09
Sheet No.	1	Page	1 from 2
PT. PERTAMINA		PT. PERTAMINA	
INDONESIA		INDONESIA	
REV		REV	
0003		0003	
05		05	
16		16	

BOTTOM PLAN

PORT SIDE (P)  
 FORE



BOTTOM PLATE : 15 MM  
 BOTTOM GIRDERS : 300x12 / FP. 180x12  
 INNER BULKHEAD : 10 MM  
 BT. BULKHEAD : 10 MM  
 WEB FRAME : 300x12 / FP. 180x12  
 ORDINARY FRAME : L 150x80x8

APPROVED BY :  
 OWNER REPRESENTATIVE  
 PT. PERTAMINA RU. VI BALONGAN

DATE	16 JAN - 2010
NAME	Steir Raji Anthono
SIGNATURE	<i>[Signature]</i>

Drawn	Checked	Design	Approved	Approved	Approved

Ship's No.	RUSPAKSA
Owner	PERTAMINA
Project	
Classification	
Scale	
Sheet No.	1
Drawing No.	574125.E - I.D. S.H. 141-09
Page	2 from 12
REV	0013456

PT. PERTAMINA  
 INDONESIA



<b>Aqwa Hydrostatic Results</b>			
<b>Structure</b>	<b>Part</b>		
<b>Hydrostatic Stiffness</b>			
Centre of Gravity Position:	X: 0. m	Y: 0. m	Z: 1.875 m
	Z	RX	RY
Heave(Z):	1092724.3 N/m	-4.6498e-3 N/m <sup>2</sup>	-1.6435e-2 N/m <sup>2</sup>
Roll(RX):	-0.2664149 N.m/m	104611.22 N.m/m <sup>2</sup>	-7.2052e-4 N.m/m <sup>2</sup>
Pitch(RZ):	-0.9416609 N.m/m	-7.2052e-4 N.m/m <sup>2</sup>	104611.18 N.m/m <sup>2</sup>
<b>Hydrostatic Displacement Properties</b>			
Actual Volumetric Displacement:	232.54793 m <sup>3</sup>		
Equivalent Volumetric Displacement:	232.84 m <sup>3</sup>		
Centre of Buoyancy Position:	X: -3.62e-10 m	Y: 2.3815e-7 m	Z: -0.9499958 m
Out of Balance Forces/Weight:	FX: 5.2871e-8	FY: 3.6813e-8	FZ: -1.4178e-3
Out of Balance Moments/Weight:	MX: -7.2235e-8 m	MY: -3.6871e-7 m	MZ: 1.6605e-9 m
<b>Cut Water Plane Properties</b>			
Cut Water Plane Area:	108.70914 m <sup>2</sup>		
Centre of Floatation:	X: 8.6176e-7 m	Y: -2.4381e-7 m	
Principal 2nd Moment of Area:	X: 1179.7853 m <sup>4</sup>	Y: 1179.7854 m <sup>4</sup>	
Angle Principal Axis makes with X (FRA):	-5101.416 °		
<b>Small Angle Stability Parameters</b>			
C.O.G. to C.O.B.(BG):	2.8249958 m		
Metacentric Heights (GMX/GMY):	2.8869245 m	2.886925 m	
COB to Metacentre (BMX/BMY):	5.7119203 m	5.7119207 m	
Restoring Moments/Degree Rotations (MX/MY):	1825.8099 N.m/m <sup>2</sup>	1825.8102 N.m/m <sup>2</sup>	



## **DAFTAR LAMPIRAN**

LAMPIRAN A TABEL NILAI RAO STRUKTUR SPM

LAMPIRAN B *GENERAL ARRANGEMENT* STRUKTUR SPM

LAMPIRAN C HASIL PERHITUNGAN HIDROSTATIK

## DAFTAR PUSTAKA

- API RP 2SK 2<sup>nd</sup> edition, 1996, “*Recommended Practice for Design and Analysis of Station Keeping Systems for Floating Structures*”, Washington, DC..
- Chakrabarti, S.K., 1987, *Hydrodynamic of Offshore Structure*, Computational Mechanics Publication Shouthampton, Boston, USA.
- Djutmiko, E.B., 2012, “*Perilaku dan Operabilitas Bangunan Laut Di Atas Gelombang Acak*”, Surabaya : ITS Press. ITS Surabaya. Indonesia.
- DNV OS E301, 2004, “*Position Mooring*”, Det Norske Veritas, Norway.
- DNV RP C205, 2010, “*Environmental Conditions and Environmental Loads*”, Det Norske Veritas , Norway.
- Faltinsen, O.M., 1990, “*Sea Loads On Ships And Offshore Structures*”, United Kingdom : Cambridge University Press.
- Guo, B., Song, S., Chacko, J., Ghalambor, A., 2004, *Offshore Pipeline*, New York : Elsevier.
- Indiyono, P., 2004, *Hidrodinamika Bangunan Lepas Pantai*, Surabaya : FTK-ITS
- Kwan, C. T. dan Bruen, F. J., 1991, “*Mooring Line Dynamics: Comparison of Time Domain, Frequency Domain, and Quasi-Static Analyses*”, Offshore Technology Conference: 6-9 Mei 1991.
- Popov, E. P., 1993, *Mechanical of Material*, Prentice Hall Inc. Englewood Cliffts, New Jersey, USA.
- [www.indianoil.com](http://www.indianoil.com), *SPM Terminal at Valdinar*, Diakses 18 Februari 2014
- [www.marineinsight.com](http://www.marineinsight.com), Diakses 18 Februari 2014

## BIODATA PENULIS



Ardhyan Wisnu Pradhana dilahirkan di Gresik pada 11 Oktober 1992. Menempuh pendidikan di SDN Sidokumpul II Gresik, SMPN 1 Gresik, dan SMAN 1 Gresik. Setelah itu penulis melanjutkan studi program Sarjana (S-1) di Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan - Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Selama masa kuliah, penulis pernah aktif menjadi staff ahli Kesekretariatan HIMATEKLA 12/13 periode 2012 - 2013. Dalam berbagai kepanitiaan baik lingkup Institut maupun Jurusan juga pernah diikuti penulis. Penulis juga sempat aktif dalam kegiatan pengkaderan sebagai koordinator OC (*Organizing Comitee*) pengkaderan Jurusan Teknik Kelautan periode 2011 – 2012 serta anggota IC (*Instructor Comitee*) pengkaderan Jurusan Teknik Kelautan periode 2012 – 2013. Semasa kuliah penulis pernah bekerja praktek di perusahaan galangan bangunan lepas pantai di Batam yaitu PT. PROFAB Indonesia. Bidang yang dipilih oleh penulis adalah hidrodinamika lepas pantai sehingga Tugas Akhir yang diambil berhubungan dengan kriteria Olah Gerak Bangunan Apung.