



TUGAS AKHIR (MO 184804)

ANALISIS KELELAHAN PADA KONSTRUKSI *SINGLE POINT MOORING* FSO ARCO ARDJUNA

IBRAHIM RAHMATULLAH

NRP. 0431154000097

DOSEN PEMBIMBING

Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc, Ph.D.

Ir. Mas Murtedjo, M.Eng.

DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN

FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2019



FINAL PROJECT (MO 184804)

**FATIGUE LIFE ANALYSIS ON CONSTRUCTION OF
SINGLE POINT MOORING FSO ARCO ARDJUNA**

IBRAHIM RAHMATULLAH

NRP. 04311540000097

SUPERVISORS :

Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc, Ph.D.

Ir. Mas Murtedjo, M.Eng.

OCEAN ENGINEERING DEPARTMENT

FACULTY OF MARINE TECHNOLOGY

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2019

**ANALISIS KELELAHAN PADA KONSTRUKSI *SINGLE POINT*
MOORING FSO ARCO ARDJUNA PADA**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada Program Studi S-1 Departemen Teknik Kelautan Fakultas Teknologi
Kelautan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

Ibrahim Rahmatullah

NRP. 0431154000097

Disetujui oleh:

1. Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D. (Pembimbing 1)

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

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

4. Dr. Eng. Rudi Walujo Prastianto, S.T., M.T. (Penguji 2)

Surabaya, Juli 2019

ANALISIS KELELAHAN PADA KONSTRUKSI *SINGLE POINT MOORING* FSO ARCO ARDJUNA

Nama Mahasiswa : Ibrahim Rahmatullah
NRP : 0431154000097
Departemen : Teknik Kelautan – FTK ITS
Dosen Pembimbing : Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc. Ph. D.
Ir. Mas Murtedjo, M. Eng

ABSTRAK

FSO Arco Ardjuna (AA) merupakan sebuah *Floating Structure* milik PT. PHE ONWJ yang berfungsi utama sebagai penerimaan dan penyimpanan *crude oil* pada Ardjuna Oil Field. Dalam operasinya FSO AA ditambatkan oleh sebuah SPM bertipe CALM yang dapat berputar mengikuti kondisi lingkungan (*weathervane*). FSO ditambatkan pada SPM dengan 2 *Hawser Line* dan SPM ditambatkan ke dasar laut dengan 6 *Anchor Chain* dengan *pattern* 60°. Untuk memperbarui *Class Certificate* maka harus dilakukan *Assesment* terhadap Umur Kelelahan (*Fatigue Life*) pada konstruksi dari SPM yang menambat FSO AA dengan memperhitungkan *Corroation Rate* hingga tahun 2025. Maka untuk mengetahui besar beban siklis yang mengenai konstruksi SPM perlu dilakukan analisis terhadap *Tension* pada *Mooring Line* akibat dari gerakan FSO dan SPM. Hasil analisis gerakan pada FSO menunjukkan nilai paling ekstrim pada gerakan *Rolling* dengan nilai sebesar 4.12 deg/m pada kondisi *Light Load* dengan *heading* 90°. Sedangkan pada Gerakan SPM menunjukkan nilai yang identik antara gerakan *Surge* dan *Sway*, *Roll* dan *Pitch* disebabkan oleh bentuk SPM yang silinder yang memiliki simetris pada semua arah. Hasil dari simulasi *Time-Domain* menunjukkan *Tension* paling maksimum pada *Anchor Chain* 6 dengan nilai sebesar 1006 kN pada LC-2. Dengan *Finite Element Method* (FEM) pada konstruksi SPM, *Principal Stress* dapat diketahui sehingga nilai dari *Hotspot Stress* juga akan didapat. Dengan metode *Fatigue Simplified* menggunakan persamaan *Closed-Form* dari BKI, dengan nilai $\gamma = 0.89$ dan menggunakan jenis sambungan Class E didapat nilai *Fatigue Life* paling minimum selama 42.33 tahun pada *Chain Connection* 6. Dan dengan mempertimbangkan SF dari BKI sebesar 3.0 maka konstruksi SPM masih aman beroperasi hingga 14.11 tahun. Dengan *Design Life* yang telah ditentukan yaitu selama 11 tahun (2014-2025) maka konstruksi SPM masih akan aman beroperasi hingga tahun 2028 dan sudah memenuhi *requirement* dari *Owner*.

Kata Kunci: *Single Point Mooring, CALM Buoy, Tension Mooring Line, Hotspot Stress, Fatigue Life.*

FATIGUE LIFE ANALYSIS ON CONSTRUCTION OF SINGLE POINT MOORING FSO ARCO ARDJUNA

Student Name : Ibrahim Rahmatullah
Reg. Number : 0431154000097
Major : Ocean Engineering – FTK ITS
Supervisor : Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc. Ph. D.
Ir. Mas Murtedjo, M. Eng

ABSTRACT

FSO Arco Ardjuna (AA) is a Floating Structure owned by PT. PHE ONWJ which functions primarily as receipt and storage of crude oil at Ardjuna Oil Field. In its operation the FSO AA is moored by a CALM type SPM that can rotate according to environmental conditions (weathervane). FSO is moored to the SPM with 2 Hawser Line and the SPM is moored to the seabed with 6 Anchor Chain with a 60° pattern. To renew the Class Certificate, an assessment of Fatigue Life must be carried out on the construction of the SPM which is moored the FSO AA by considering the Corrosion Rate until 2025. Therefore, to determine the cyclical load that hit the SPM construction, an analysis of the Mooring Line Tension is necessary due to from the motions of the FSO and SPM. The FSO motion analysis results show the most extreme values in the Rolling Response Amplitude Operator (RAO) with a value of 4.12 deg/m under Light Load conditions with 90° heading. Whereas the SPM RAO shows identical values between the Surge and Sway, Roll and Pitch motion, caused by the cylindrical SPM shape which has symmetry in all directions. The results of the Time-Domain simulation show the maximum Tension in Anchor Chain 6 with a value of 1006 kN on LC-2. With Finite Element Method (FEM) in SPM construction, Principal Stress can be known so that the value of the Hotspot Stress will also be obtained. With the Fatigue Simplified method using the Closed-Form equation from BKI, with a value of $\gamma = 0.89$ and using the Class E connection type, the minimum Fatigue Life value is 42.33 years in Chain Connection 6. And by considering SF from BKI which value is 3.0, SPM construction is still safe at operation until 14.11 years. With Design Life for 11 years (2014-2025), SPM construction will still be safe to operate until 2028 and has met the requirements of the Owner.

Kata Kunci: *Single Point Mooring, CALM Buoy, Tension Mooring Line, Hotspot Stress, Fatigue Life.*

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis ucapkan kepada Allah SWT yang telah memberikan segala rahmat dan hidayah kepada penulis, sehingga dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir yang berjudul, “**Analisis Kelelahan pada Konstruksi *Single Point Mooring* FSO Arco Ardjuna**” ini dengan lancar dan tepat waktu. Laporan Tugas Akhir ini disusun sebagai syarat untuk mendapatkan gelar sarjana (S-1) di Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Laporan Tugas Akhir ini berisi tentang analisis gerakan pada struktur FSO Arco Ardjuna dan *Single Point Mooring* (SPM), analisis *Tension* pada *Mooring Line* yang akan digunakan untuk mengetahui Hotspot Stress dan Umur Kelelahan pada konstruksi SPM.

Penulis mengharapkan saran dan kritik dari para pembaca demi perbaikan dan kesempurnaan penyusunan dan penulisan berikutnya. Penulis juga berharap semoga laporan ini bermanfaat bagi pembaca pada umumnya dan bagi penulis sendiri pada khususnya.

Surabaya, 17 Juli 2019

Ibrahim Rahmatullah

UCAPAN TERIMAKASIH

Penyelesaian Tugas Akhir ini tidak lepas dari bantuan dan dukungan berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan kali ini, penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Allah SWT yang telah memberikan petunjuk dan kemudahan sehingga penulis mampu menyelesaikan Tugas Akhir ini tepat pada waktunya.
2. Mama dan Papa, yang selalu menjadi motivasi utama dan yang senantiasa memberikan doa dan dukungan bagi penulis selama ini.
3. Yangti, Obi, Zia dan Aliyya dan seluruh keluarga yang juga selalu memberikan dukungan dan motivasi pada penulis
4. Bapak Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc, Ph.D. selaku dosen pembimbing pertama dan Ir. Murtedjo, M.Eng. selaku dosen pembimbing kedua yang telah membimbing penulis dengan penuh tanggung jawab dalam menyelesaikan tugas akhir ini,
5. Bapak Dr. Ir. Wahyudi., M.Sc. selaku dosen wali yang selalu membimbing penulis dan membantu dalam segala urusan dari awal hingga akhir perkuliahan.
6. Bapak-bapak dosen penguji yang telah memberikan masukan dan saran sehingga Tugas Akhir ini dapat terselesaikan dengan baik.
7. Sahabat “ngopi” penulis selama kuliah: Hafidz “Jamil”, Alfi “Galer”, Rizal “Nyomang”, Keefie “Lontong”, YoZIA “Acong” , Yosrifal “Tumi”, Chibby “Welut”, Raden mas Danen , Abang Riko, Haekal “kopyor”, Gifari “Kambing”, Alip “Ulo”, Egy “Maling”. Tito “Abrigal”. Tiok, Yandi “Bucin”, Yudha “merem”, Arief “Kribo”, Aripang. Terima kasih telah selalu menjadi sahabat sekaligus keluarga selama di Surabaya.
8. Teman Sangat Dekat saya, Yana, yang tidak pernah Lelah memberikan semangat dan nasehat kepada penulis
9. Teman-teman dari Lumajang: Akmal, Waskito, Zam-Zam, Rozi, Luki, Bagus, Ira, Ulum, dll. Yang menemani perjuangan penulis sejak SMA.
10. Dan semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

DAFTAR ISI

ABSTRACT.....	v
KATA PENGANTAR	vi
UCAPAN TERIMAKASIH.....	vii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL.....	xii
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan.....	3
1.4 Manfaat.....	4
1.5 Batasan Masalah.....	4
BAB 2 DASAR TEORI.....	5
2.1 Tinjauan Pustaka	5
2.2 Dasar Teori	7
2.2.1 <i>Floating Storage and Offloading (FSO)</i>	7
2.2.2 Sistem Tambat.....	7
2.2.3 <i>Single Point Mooring (SPM)</i>	8
2.2.4 Teori Gerak Bangunan Apung	12
2.2.5 <i>Response Amplitude Operator (RAO)</i>	22
2.2.6 Spektrum Gelombang.....	23
2.2.7 Spektrum Respon	24
2.2.8 Konsep Pembebanan	25
2.2.9 <i>Tension pada Mooring Line</i>	25
2.2.10 Tegangan Utama (Principal Stress).....	27
2.2.11 <i>Finite Element Method (FEM)</i>	29
2.2.12 Laju Korosi (<i>Corrosion Rate</i>).....	31
2.2.13 Kelelahan (<i>Fatigue</i>)	32
BAB 3 METODOLOGI	39
3.1 Diagram Alir.....	39
3.2 Prosedur Penelitian.....	40
3.3 Pengumpulan Data.....	42
3.3.1 Data FSO Arco Ardjuna	42
3.3.2 Data <i>Single Point Mooring</i>	43

3.3.3 Data <i>Anchor Chain</i>	44
3.3.4 Mooring Hawser	44
3.3.5 Data Mooring Line Detail and Configuration.....	45
3.3.6 Data Lingkungan.....	47
BAB 4 ANALISIS DAN PEMBAHASAN.....	49
4.1 Pemodelan Struktur	49
4.1.1 FSO Arco Ardjuna	49
4.1.2 Single Point Mooring.....	52
4.2 Validasi Hidrostatik.....	54
4.2.1 FSO Arco Ardjuna	54
4.2.2 Single Point Mooring.....	56
4.3 Analisis Gerakan Struktur pada Kondisi Terapung Bebas (Free Floating). 56	
4.3.1 RAO FSO Arco Ardjuna.....	57
4.3.2 RAO <i>Single Point Mooring</i>	65
4.4 Analisis <i>Tension</i> pada Tali Tambat	71
4.5 Analisis <i>Hotspot Stress</i> pada Konstruksi SPM.....	75
4.5.1 Pemodelan Konstruksi SPM	75
4.5.2 Meshing	77
4.5.3 <i>Boundary Condition</i>	79
4.5.4 <i>Principal Stress</i>	82
4.5.5 <i>Effective Hotspot Stress</i>	85
4.6 Analisis Umur Kelelahan (<i>Fatigue Life</i>) pada Konstruksi SPM	88
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	93
5.1 Kesimpulan.....	93
5.2 Saran	94
DAFTAR PUSTAKA	97
LAMPIRAN A	
LAMPIRAN B	
LAMPIRAN C	
LAMPIRAN D	
LAMPIRAN E	
LAMPIRAN F	
LAMPIRAN G	
BIODATA PENULIS	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 <i>Single Point Mooring</i>	2
Gambar 1.2 (a) FSO Arco Ardjuna yang ditambat SPM; (b) Ardjuna Marine Terminal	3
Gambar 2.1 <i>Turret dan Spread Mooring System</i>	8
Gambar 2.2 <i>Single Buoy Mooring System</i>	9
Gambar 2.3 <i>Single Anchor Leg Mooring (SALM)</i>	9
Gambar 2.4 <i>Catenary Anchor Leg Mooring (CALM)</i> pada FSO AA.....	10
Gambar 2.5 <i>Single Point and Reservoir (SPAR)</i>	10
Gambar 2.6 <i>Single Anchor Loading (SAL)</i>	11
Gambar 2.7 Sistem CALM pada FSO AA.....	11
Gambar 2.8 Moda gerak struktur apung	12
Gambar 2.9 Definisi arah datang gelombang terhadap <i>heading</i> kapal	14
Gambar 2.10 Ilustrasi Gerakan <i>Surging</i>	14
Gambar 2.11 Ilustrasi Gerakan <i>Swaying</i>	15
Gambar 2.12 Ilustrasi Gerakan <i>Heaving</i>	17
Gambar 2.13 Ilustrasi Gerakan <i>Rolling</i>	18
Gambar 2.14 Ilustrasi Gerakan <i>Pitching</i>	19
Gambar 2.15 Ilustrasi Gerakan <i>Pitching</i>	20
Gambar 2.16 Fatigue Cracking Arah etika Arah Principal Stress Berbeda Terhadap Normal Weld Toe	28
Gambar 2.17 Fatigue Cracking Arah etika Arah Principal Stress Berbeda Terhadap Normal Weld Toe	28
Gambar 2.18 Konsep metode elemen hingga	29
Gambar 2.19 Siklus Rentang Tegangan.....	34
Gambar 2.20 Jenis Tegangan dalam Analisa <i>Fatigue</i>	35
Gambar 2.21 Kurva S-N.....	36
Gambar 3.1 Diagram Alir.....	40
Gambar 3.2 <i>Mooring Pattern</i>	45
Gambar 3.3 Konfigurasi <i>Mooring System</i>	46
Gambar 4.1 <i>General Arrangement</i> FSO Arco Ardjuna.....	49
Gambar 4.2 Hasil pemodelan FSO Arco Ardjuna pada Maxsurf tampak <i>isometric</i>	50
Gambar 4.3 Hasil pemodelan FSO Arco Ardjuna pada tampak atas.....	50
Gambar 4.4 Hasil pemodelan FSO Arco Ardjuna pada tampak samping	51
Gambar 4.5 Hasil pemodelan FSO Arco Ardjuna pada tampak samping	51
Gambar 4.6 Hasil pemodelan SPM pada Maxsurf tampak <i>isometric</i>	53
Gambar 4.7 Hasil pemodelan SPM pada Maxsurf tampak atas	53
Gambar 4.8 Hasil pemodelan SPM pada Maxsurf tampak samping	54
Gambar 4.9 Arah Pembebanan untuk analisis gerakan FSO pada kondisi <i>free floating</i>	57
Gambar 4.10 RAO Gerakan <i>Surge</i> FSO <i>Full Load</i> pada Kondisi <i>Free Floating</i>	58
Gambar 4.11 RAO Gerakan <i>Sway</i> FSO <i>Full Load</i> pada Kondisi <i>Free Floating</i>	59
Gambar 4.12 RAO Gerakan <i>Heave</i> FSO <i>Full Load</i> pada Kondisi <i>Free Floating</i>	59
Gambar 4.13 RAO Gerakan <i>Roll</i> FSO <i>Full Load</i> pada Kondisi <i>Free Floating</i>	60
Gambar 4.14 RAO Gerakan <i>Pitvh</i> FSO <i>Full Load</i> pada Kondisi <i>Free Floating</i>	60
Gambar 4.15 RAO Gerakan <i>Yaw</i> FSO <i>Full Load</i> pada Kondisi <i>Free Floating</i>	61
Gambar 4.16 RAO Gerakan <i>Surge</i> FSO <i>Light Load</i> pada Kondisi <i>Free Floating</i>	62

Gambar 4.17 RAO Gerakan <i>Sway</i> FSO <i>Light Load</i> pada Kondisi <i>Free Floating</i>	62
Gambar 4.18 RAO Gerakan <i>Heave</i> FSO <i>Light Load</i> pada Kondisi <i>Free Floating</i>	63
Gambar 4.19 RAO Gerakan <i>Roll</i> FSO <i>Light Load</i> pada Kondisi <i>Free Floating</i>	63
Gambar 4.20 RAO Gerakan <i>Pitch</i> FSO <i>Light Load</i> pada Kondisi <i>Free Floating</i>	64
Gambar 4.21 RAO Gerakan <i>Yaw</i> FSO <i>Light Load</i> pada Kondisi <i>Free Floating</i>	64
Gambar 4.22 Arah Pembebanan untuk analisis gerakan SPM pada kondisi <i>Free Floating</i>	66
Gambar 4.23 RAO Gerakan <i>Surge</i> SPM pada Kondisi <i>Free Floating</i>	67
Gambar 4.24 RAO Gerakan <i>Sway</i> SPM pada Kondisi <i>Free Floating</i>	68
Gambar 4.25 RAO Gerakan <i>Heave</i> SPM pada Kondisi <i>Free Floating</i>	68
Gambar 4.26 RAO Gerakan <i>Roll</i> SPM pada Kondisi <i>Free Floating</i>	69
Gambar 4.27 RAO Gerakan <i>Pitch</i> SPM pada Kondisi <i>Free Floating</i>	69
Gambar 4.28 RAO Gerakan <i>Yaw</i> SPM pada Kondisi <i>Free Floating</i>	70
Gambar 4.29 Konfigurasi untuk analisis <i>Tension</i> dengan kondisi <i>Between Line</i>	73
Gambar 4.30 Konfigurasi untuk analisis <i>Tension</i> dengan kondisi <i>InLine</i>	73
Gambar 4.31 Pemodelan pada ORCAFLEX	74
Gambar 4.32 <i>Structure General Arrangement</i> of SPM	76
Gambar 4.33 Pemodelan Konstruksi SPM pada SOLIDWORK 3D	76
Gambar 4.34 Geometri SPM pada ANSYS <i>Mechanical</i>	77
Gambar 4.35 Grafik <i>Meshing Sensitivity</i>	78
Gambar 4.36 <i>Meshing</i> pada konstruksi SPM dengan 959977 elemen	78
Gambar 4.37 <i>Meshing</i> pada daerah yang dianggap kritis	79
Gambar 4.38 <i>Boundary Condition</i>	80
Gambar 4.39 <i>Hydrostatic Pressure</i> pada ANSYS	80
Gambar 4.40 Pembebanan untuk <i>Tension</i> pada <i>Anchor Chain 1</i>	81
Gambar 4.41 <i>Fixed Support</i> pada <i>Hawser Connection</i>	81
Gambar 4.42 <i>Fixed Support</i> pada <i>Chain Connection</i>	82
Gambar 4.43 <i>Maximum Principal Stress</i> pada <i>Chain Connection 1 (LC-1)</i>	83
Gambar 4.44 <i>Minimum Principal Stress</i> pada <i>Chain Connection 1 (LC-1)</i>	83

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Amplitudo dan Tinggi Gelombang Sebuah Spektrum	24
Tabel 2.2	<i>Corrosion Allowance</i> untuk <i>Mooring System</i> (DNV, 2004)	31
Tabel 2.3	Parameter Kurva S-N Untuk Berbagai Macam Tipe Sambungan Las	37
Tabel 3.1	Ukuran Utama FSO Arco Ardjuna	42
Tabel 3.2	<i>Main Dimension of SPM</i>	43
Tabel 3.3	Karakteristik <i>Anchor Chain</i>	44
Tabel 3.4	Karakteristik <i>mooring hawser</i>	44
Tabel 3.5	Data Lingkungan Perairan Laut Jawa	47
Tabel 3.6	Wave Scatter Diagram untuk Laut Jawa	48
Tabel 4.1	<i>Main dimension SPM</i>	52
Tabel 4.2	Validasi Hidrostatik FSO Arco Ardjuna pada kondisi <i>full load</i>	54
Tabel 4.3	Validasi Hidrostatik FSO Arco Ardjuna kondisi <i>light load</i>	55
Tabel 4.4	Validasi Hidrostatik <i>Single Point Mooring</i> (SPM)	56
Tabel 4.5	Data pada FSO untuk analisis gerakan	57
Tabel 4.6	Nilai Maksimum RAO FSO <i>Full Load</i> pada Kondisi <i>Free Floating</i>	61
Tabel 4.7	Nilai Maksimum RAO FSO <i>Light Load</i> pada Kondisi <i>Free Floating</i>	65
Tabel 4.8	Data pada SPM untuk analisis gerakan	66
Tabel 4.9	Nilai Maksimum RAO SPM pada Kondisi <i>Free Floating</i>	70
Tabel 4.10	<i>Load Case</i> untuk Analisis <i>Tension</i>	74
Tabel 4.11	Hasil <i>Tension</i> pada masing-masing tali	75
Tabel 4.12	Pengecekan SF pada masing-masing <i>Load Case</i>	75
Tabel 4.13	Geometri SPM pada ANSYS <i>Mechanical</i>	78
Tabel 4.14	<i>Principal Stress</i> pada <i>Chain Connection 1</i>	83
Tabel 4.15	<i>Principal Stress</i> pada <i>Chain Connection 2</i>	84
Tabel 4.16	<i>Principal Stress</i> pada <i>Chain Connection 3</i>	84
Tabel 4.17	<i>Principal Stress</i> pada <i>Chain Connection 4</i>	84
Tabel 4.18	<i>Principal Stress</i> pada <i>Chain Connection 5</i>	84
Tabel 4.19	<i>Principal Stress</i> pada <i>Chain Connection 6</i>	85
Tabel 4.20	<i>Principal Stress</i> pada <i>Hawser Connection 1</i>	85
Tabel 4.21	<i>Principal Stress</i> pada <i>Hawser Connection 2</i>	85
Tabel 4.22	<i>Effective Hotspot Stress</i> pada <i>Chain Connection 1</i>	86
Tabel 4.23	<i>Effective Hotspot Stress</i> pada <i>Chain Connection 2</i>	86
Tabel 4.24	<i>Effective Hotspot Stress</i> pada <i>Chain Connection 3</i>	86
Tabel 4.25	<i>Effective Hotspot Stress</i> pada <i>Chain Connection 4</i>	87
Tabel 4.26	<i>Effective Hotspot Stress</i> pada <i>Chain Connection 5</i>	87
Tabel 4.27	<i>Effective Hotspot Stress</i> pada <i>Chain Connection 6</i>	87
Tabel 4.28	<i>Effective Hotspot Stress</i> pada <i>Hawser Connection 1</i>	87
Tabel 4.29	<i>Effective Hotspot Stress</i> pada <i>Hawser Connection 2</i>	88
Tabel 4.30	Perhitungan Umur Kelelahan pada <i>Chain Connection 1</i>	90
Tabel 4.31	Rekapitulasi Hasil Perhitungan <i>Fatigue Life</i> pada <i>Hawser Connection</i>	90
Tabel 4.32	Rekapitulasi Hasil Perhitungan <i>Fatigue Life</i> pada <i>Chain Connection</i>	90

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring dengan perkembangan zaman, perkembangan teknologi pun juga juga meningkat dengan pesat. Hal tersebut menyebabkan peningkatan yang pesat terhadap kebutuhan energi di dunia. Begitu juga pada dunia *oil and gas*, dengan menipisnya cadangan migas di laut dangkal yang diakibatkan oleh meningkatnya kebutuhan energi maka eksplorasi dan eksploitasi cenderung bergeser ke laut dalam. Untuk menyokong eksplorasi dan eksploitasi di laut dalam maka telah dikembangkan banyak teknologi, salah satunya adalah bangunan apung (*floating structure*). *Floating structure* sendiri dinilai lebih ekonomis jika dibandingkan dengan struktur lepas pantai yang terpancang (*fixed structure*) khususnya jika digunakan pada laut dalam. Salah satu jenis *floating structure* adalah FSO (*Floating Storage and Offloading*).

FSO (*Floating Storage and Offloading*) merupakan struktur terapung yang berfungsi untuk menerima, menyimpan serta menyalurkan hidrokarbon. FSO menerima hidrokarbon melalui *offloading line* lalu menyalurkannya pada *shuttle tanker* untuk ditransportasikan ke suatu *site*. Pergerakan dari *floating structure* sangat bergantung pada kondisi lingkungannya. Apalagi jika struktur berada di lepas pantai (*offshore*) yang cenderung akan terkena cuaca ekstrim, maka perhitungan dan analisis dalam desainnya perlu sangat diperhatikan demi keamanan saat beroperasi. Selain itu sistem tambat (*mooring system*) juga diperlukan pada saat FSO beroperasi untuk menjaga posisi FSO tetap pada tempatnya dan juga agar FSO tetap stabil. Salah satu jenis sistem tambat adalah SPM (*Single Point Mooring*). SPM sendiri juga memiliki beberapa jenis, salah satunya adalah CALM (*Catenary Anchor Leg Mooring*). SPM merupakan tipe sistem tambat yang bersifat dapat mengikuti kondisi lingkungan (*weathervane*). Jadi saat beroperasi, struktur dapat bergerak mengikuti arah gelombang namun tetap tertambat pada *mooring*. Berikut ini adalah gambar SPM :



Gambar 1.1 *Single Point Mooring*

(Sumber: PT. Citra Mas, 2019)

Salah satu FSO yang ada di Indonesia adalah FSO Arco Ardjuna (AA) milik PT. Pertamina Hulu Energi *Offshore North West Java* (PT. PHE ONWJ). FSO AA ditambat dengan SPM tipe CALM yang beroperasi di Ardjuna Marine Terminal, lokasi dan bentuk dari struktur tersebut dapat dilihat pada Gambar 1.2. Pada tahun 2014-2016 telah dilakukan *dry docking* pada FSO AA dan telah berhasil mendapatkan *class certificate* dari Biro Klasifikasi Indonesia (BKI), namun sertifikat tersebut akan habis pada Agustus 2019. Untuk memperpanjang sertifikat tersebut (*new class certificate*) harus dilakukan survei fisik secara menyeluruh beserta *tank cleaning* dan *dry docking*. Namun karena FSO AA baru saja turun dari *dock* pada tahun 2016, maka pihak *owner* meminta keringanan kepada *class* untuk tidak melakukan *dry docking*. Sebagai penggantinya, untuk menjamin kekuatan dan *performance* dari FSO AA, maka dari *class* mensyaratkan untuk melakukan beberapa *Assesment*, salah satunya adalah *Fatigue Assesment* terhadap konstruksi SPM dengan memperhitungkan *corrosion rate/year* hingga tahun 2025.

Tugas Akhir ini akan berfokus pada *Fatigue Assesment* terhadap konstruksi SPM FSO AA. Dalam penelitian ini akan dibahas perilaku gerak 6 *degree of freedom* pada FSO AA dan SPM pada kondisi terapung bebas (*free floating*) yang disebabkan oleh beban lingkungan. Kemudian akan dilanjutkan dengan perhitungan *Tension* pada *anchor chain* dan *hawser*. *Tension* tersebut merupakan beban siklis yang dapat menimbulkan *fatigue*. Maka setelah mendapatkan *Tension* akan dilanjutkan dengan Analisa *fatigue* pada konstruksi SPM sehingga nanti akan didapat umur kelelahan (*fatigue life*) dari struktur SPM.



(a)



(b)

Gambar 1.2 (a) FSO Arco Ardjuna yang ditambat SPM; (b) Ardjuna Marine Terminal

(Sumber: PT. Citra Mas, 2019)

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimanakah respon gerakan dari FSO dan SPM pada kondisi *free floating*?
2. Berapakah *Tension* yang terjadi pada *Anchor Chain* dan *Hawser Line*?
3. Berapakah Umur Kelelahan (*Fatigue Life*) pada konstruksi SPM?

1.3 Tujuan

Tujuan dari Tugas Akhir ini adalah :

1. Menghitung respon gerakan dari FSO AA dan SPM pada saat kondisi *free floating*
2. Menghitung *Tension* yang terjadi pada *Anchor Chain* dan *Hawser Line*.
3. Menghitung Umur Kelelahan (*Fatigue Life*) pada konstruksi SPM.

1.4 Manfaat

Dari Tugas Akhir ini dapat diketahui respon gerak FSO AA dan SPM kondisi *free floating*, *Tension* yang terjadi pada *Anchor Chain* dan *Hawser Line* dan juga umur kelelahan (*Fatigue Life*) dari konstruksi SPM. Diharapkan juga dari penelitian ini dapat dijadikan referensi untuk penelitian-penelitian selanjutnya terkait analisis kelelahan pada konstruksi SPM dan juga sebagai pedoman untuk melaksanakan *reassessment*.

1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah yang diambil pada Tugas Akhir ini adalah :

1. Penelitian ini merupakan studi kasus pada FSO Arco Ardjuna milik Pertamina Hulu Energi *Offshore North West Java* (PT. PHE ONWJ).
2. SPM yang digunakan menggunakan paten dari *Single Buoy Mooring* (SBM) dan bertipe *Catenary Anchor Leg Mooring* (CALM)
3. Skema *heading angle* analisis gerakan hanya pada sudut 0, 45, 90, 135, dan 180.
4. Beban lingkungan yang digunakan adalah beban satu tahunan arus, angin dan gelombang (*wave scatter*).
5. Kondisi pembebanan yang digunakan adalah untuk kondisi FLS (*Fatigue Limit State*).
6. Validasi model (hidrostatik) FSO Arco Ardjuna dan SPM pada kondisi *Light Ship Condition* dan *Full Load Condition* dengan koreksi maksimal 2%.
7. *Corrosion Rate/Year* diperhitungkan hingga tahun 2025
8. Perhitungan *Tension Mooring Line* hanya pada kondisi *Between Line* dan *Inline* dengan system beban lingkungan *Colinear*
9. Analisis kelelahan dilakukan pada titik (sambungan) kritis pada konstruksi SPM.
10. *Floating Hose* dan *Riser* tidak dimodelkan

BAB 2 DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

F(P)SO *System* adalah satu konsep yang dapat menurunkan ukuran bidang ekonomi minimum, dan memungkinkan pengembangan ladang minyak di perairan lebih dalam. Sistem F(P)SO menerima hidrokarbon dari bawah laut (*reservoir*) melalui *flexible riser* melalui *swivel* dari *mooring system*, dan hidrokarbon kemudian dipisahkan menjadi minyak, gas, dan air oleh peralatan proses, dan biasanya dikemas ke dalam modul dan diamankan di dek kapal (Shimamura, 2002).

Bangunan lepas pantai pada kenyataannya akan mengalami beban *fatigue* yang signifikan. Utamanya disebabkan oleh beban lingkungan seperti gelombang, arus dan angin. Meskipun tegangan yang diakibatkan oleh beban dinamis berada dibawah kekuatan statis dari sebuah material, namun lama kelamaan akan mengakibatkan akan mengakibatkan *fatigue damage* dan pada akhirnya akan menyebabkan kegagalan pada struktur. (Syahroni, 2014).

Beberapa penelitian mengenai kelalahan (*fatigue*) pada struktur bangunan lepas pantai telah banyak dilakukan salah satunya adalah oleh (Saidee, 2017), melakukan penelitian mengenai penentuan metode baru untuk perkiraan umur kelelahan dari sebuah *mooring system* yang lebih sederhana dan relative lebih cepat, namun tetap memperhatikan akurasinya.. Peneleitian tersebut menggunakan *mooring system* dari sebuah FPSO sebagai objek penelitian. Dari hasil penelitian tersebut diambil kesimpulan bahwa *fatigue damage* dapat lebih mudah dihitung dengan persaaan weibul dengan kondisi berbasis *Ultimate Limit State* (ULS). Dengan menggunakan metode tersebut analisis dapat dilakukan tanpa melakukan simulasi sehingga dapat mempersingkat waktu.

(Qiau, Yan, & Qu, 2014), menyampaikan studi tentang perbandingan *fatigue damage* dari dua tipe *mooring systems* yang berbeda (*chain-wire-chain* dan *chain-polyester-chain*) yang dianalisa dengan memperhitungkan laju korosi tiap tahun, dengan menggunakan objek *Semi-Submersible*. Dari hasil penelitian tersebut

disimpulkan bahwa laju korosi berpengaruh terhadap *fatigue damage*, terutama untuk analisis *long term*, efek dari laju korosi akan lebih signifikan.

(Sumardiono, 2015). Penelitian tersebut membahas mengenai perkiraan umur kelelahan pada konstruksi FSO Arco Ardjuna dengan menggunakan metode *Full Spectral* dan pendekatan Tegangan *Hotspot*. Selain itu, teori komulatif *Palmgren-Miner* juga digunakan pada penelitian tersebut dan persamaan kelelahan terangkai, dengan parameter bentuk dari distribusi Weibull, digunakan untuk memperkirakan umur kelelahan pada lokasi struktur kritis lainnya pada FSO.

Analisa mengenai *fatigue* pada bangunan lepas pantai juga telah dilakukan oleh (Hamzah, 2016) yang membahas mengenai analisis umur kelelahan konstruksi *bow crane pedestal* yang akan dipasang di atas konstruksi *midship section* nomer 18 FSO Arco Ardjuna. Penelitian tersebut juga menggunakan pendekatan *Hotspot Stress* beserta *S-N Curve* namun menggunakan metode *simplified*.

Berdasarkan penelitian-penelitian yang telah dilakukan di atas, *Single Point Mooring* (SPM) yang menambat FSO AA juga merupakan struktur terapung yang juga akan terkena beban siklis dari lingkungan. Maka Analisa kelelahan (*Fatigue Assesment*) juga perlu dilakukan pada konstruksi *Single Point Mooring* (SPM) FSO AA. Sehingga permintaan dari *owner* akan terpenuhi, dan SPM akan aman untuk beroperasi.

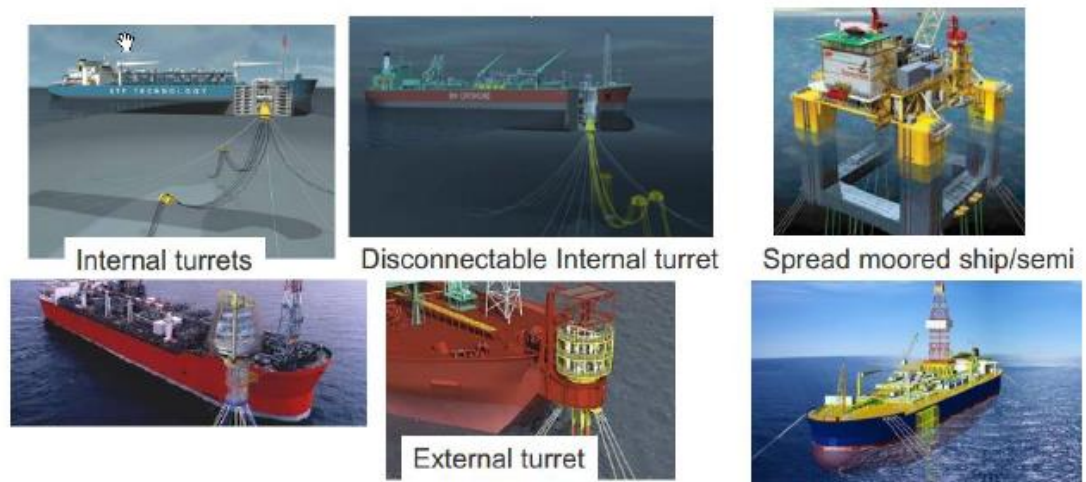
2.2 Dasar Teori

2.2.1 *Floating Storage and Offloading (FSO)*

FSO merupakan salah satu struktur terapung yang dapat digunakan sebagai tempat *storage* maupun *offloading* minyak maupun gas bumi di lepas pantai. FSO memiliki peranan penting dalam eksplorasi dan eksploitasi sumur minyak/gas di perairan dalam. FSO lebih banyak digunakan pada daerah perbatasan lepas pantai karena mudah dalam hal installasinya. Fasilitas produksi seluruhnya terpasang diatas *main deck* kapal. Minyak mentah dialirkan dari sumur-sumur produksi bawah laut melalui *flowlines* dan *risers* naik ke atas kapal yang kemudian dialirkan ke fasilitas produksi di atas kapal.

2.2.2 Sistem Tambat

Sistem tambat pada prinsipnya berfungsi untuk mengamankan kapal agar posisinya tetap pada tempatnya. Sistem tambat dikategorikan menjadi dua jenis yaitu *turret mooring* dan *spread mooring*. Penting untuk mengetahui bahwa *turret mooring* dan *spread mooring* memiliki karakteristik *performance* yang berbeda, baik dari segi gerak kapal yang dapat mempengaruhi operasi pada *topside* dan *offloading system* (Saidee, 2015). *Turret mooring* adalah jenis system tambat bertipe *weathervaning* yang berarti kapal dapat berputar di sekitar *turret* tergantung pada kondisi cuaca. FSO biasanya membutuhkan system tambat jenis ini untuk meminimalkan beban lingkungan. Sedangkan *spread mooring* biasanya digunakan pada kondisi lingkungan yang tidak begitu ekstrim. Pada jenis ini kapal akan dikunci *heading* nya dan haluan biasanya diletakkan berlawanan dengan arah gelombang yang dominan untuk mengurangi beban gelombang yang akan menghantam kapal, untuk lebih jelas dapat dilihat pada gambar.

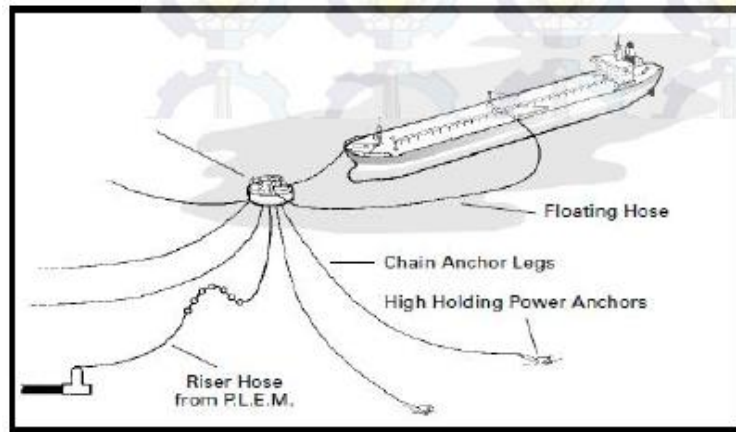


Gambar 2.1 *Turret dan Spread Mooring System*

(Sumber : Saidee, 2015)

2.2.3 *Single Point Mooring (SPM)*

SPM adalah suatu fasilitas yang memiliki dimensi pada bidang horisontal yang kecil dimana kapal dengan ukuran yang besar ditambatkan melalui suatu *bow hawser* dan memungkinkan tanker tersebut untuk berputar 360° mengelilingi titik penambatannya (Afriansyah dan Aryawan, 2013). Perilaku ini membuat SPM sesuai untuk kebanyakan lokasi lepas pantai, sehingga saat ini sistem SPM yang paling banyak digunakan untuk terminal lepas pantai, terutama SPM sistem dari SBM *offshore*. Keuntungan dari sistem ini adalah kapal dapat dirubah posisinya dengan relatif mudah. Sistem ini memiliki prinsip bahwa kapal harus berada searah terhadap arah gelombang. Tali tambat dapat ditambahkan di ujung lain dari kapal, untuk tetap dalam posisi yang benar. Kerugiannya adalah jangkar pada ujung kapal dapat berpindah posisi akibat gerakan kapal, sehingga jangkar harus dipindahkan ke posisi semula. Tetapi, karena adanya alasan ekonomi maka tali tambat dapat diganti dengan thruster pada badan kapal. Sistem SBM ini bisa dilihat dari gambar berikut ini.

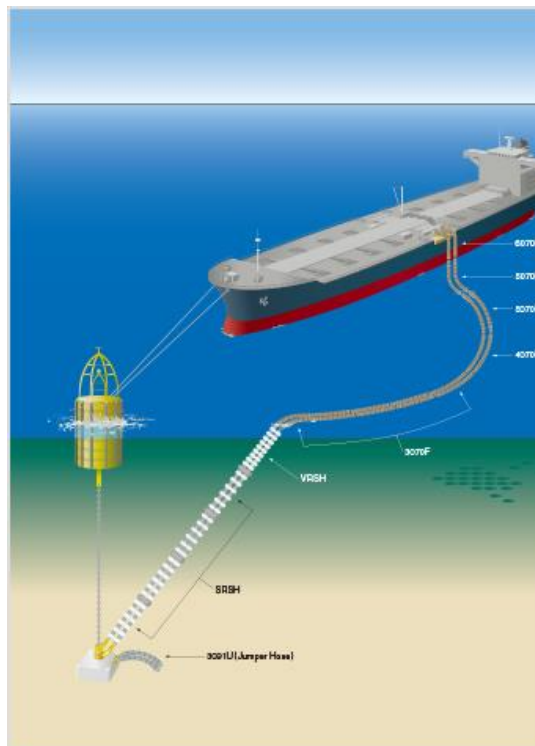


Gambar 2.2 *Single Buoy Mooring System*

(Sumber : Afriansyah dan Aryawan, 2013)

Ada beberapa macam tipe dari SPM (Barltrop, 1998), diantaranya adalah sebagai berikut :

a. *Single Anchor Leg Mooring (SALM)*



Gambar 2.3 *Single Anchor Leg Mooring (SALM)*

(Sumber : www.y-yokohama.com)

b. *Catenary Anchor Leg Mooring (CALM)*



Gambar 2.4 *Catenary Anchor Leg Mooring (CALM)* pada FSO AA

(Sumber : PT. Citra Mas, 2019)

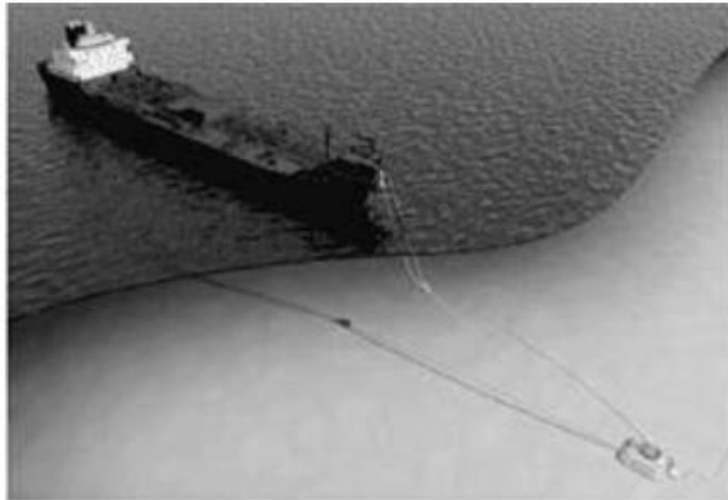
c. *Single Point and Reservoir (SPAR)*



Gambar 2.5 *Single Point and Reservoir (SPAR)*

(Sumber : www.helmidadang.wordpress.com)

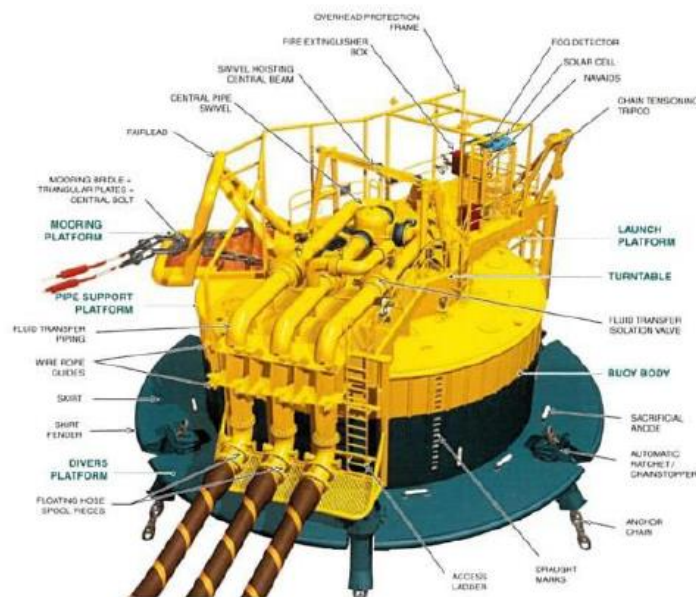
d. *Single Anchor Loading (SAL)*



Gambar 2.6 *Single Anchor Loading (SAL)*

(Sumber : www.helmidadang.wordpress.com)

Dalam Tugas Akhir ini obyek yang dianalisis adalah FSO (*Floating Storage and Offloading System*) yang memiliki sistem tambat berupa *single point mooring* tipe CALM (*Catenary Anchored Leg Mooring* milik PT. PHE ONWJ. Berikut adalah gambaran Sistem CALM pada SPM 3 yang disajikan pada Gambar berikut:



Gambar 2.7 Sistem CALM pada FSO AA

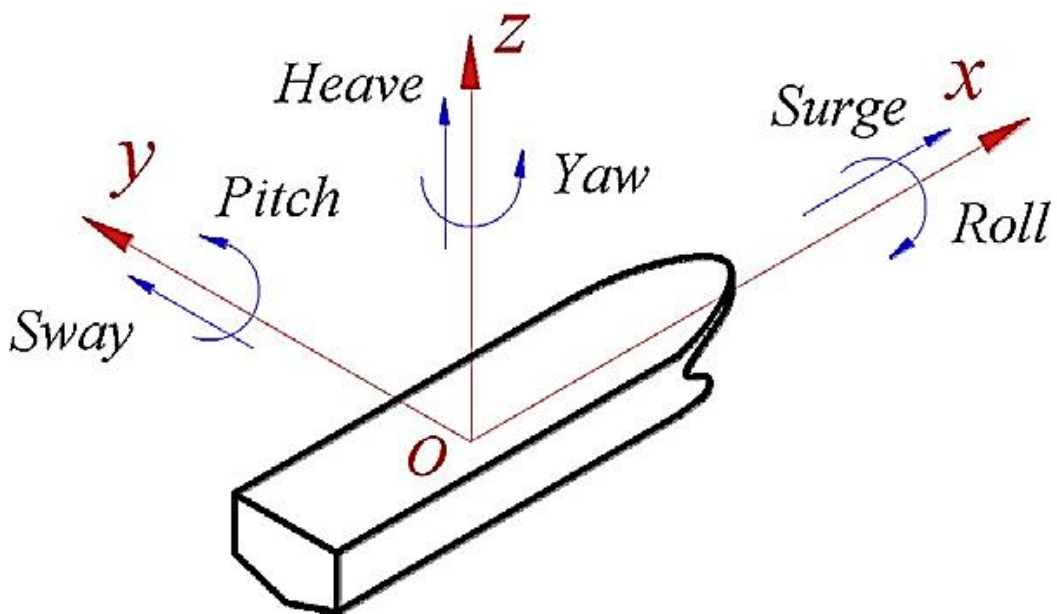
(Sumber : PT. Citra Mas, 2019)

2.2.4 Teori Gerak Bangunan Apung

2.2.4.1 Mode Gerak Bangunan Apung

Gerakan Floating Body diperairan bergelombang terdiri atas 3 gerakan Translational (terhadap sumbu x , y , z) dan 3 gerakan Rotational (terhadap sumbu x , y , z). Ada 3 gerakan gerakan kapal yang merupakan gerak osilasi murni yaitu: *heave*, *roll*, dan *pitch*. Pada 3 Gerakan ini akan memiliki gaya atau momen pengembali (*Restoring Force/Moment*). Untuk 3 gerakan lainnya yaitu *surge*, *sway* dan *yaw*, ketika kapal diganggu dari kondisi setimbangnya maka kapal tidak akan kembali pada posisi semula. Oleh karena itu, untuk gerakan *surge*, *sway* dan *yaw* bukan merupakan gerakan *pure* osilasi. (Bhattacharya, 1978).

Gerakan kapal di laut lepas sangat penting untuk diprediksi. Macam gerakan pada kapal memiliki enam gerakan yang biasa disebut enam derajat kebebasan (*six degree of freedom*) seperti pada penjelasan pada paragraph sebelumnya. Berikut adalah ilustrasi dari *six degree of freedom* :



Gambar 2.8 Moda gerak struktur apung

(Sumber: Jiao dkk, 2018)

1. Mode gerak osilasi translasional :

- *Surging* : Gerak osilasi translasi pada sumbu-x
- *Swaying* : Gerak osilasi translasi terhadap sumbu-y
- *Heaving* : Gerak osilasi translasi terhadap sumbu-z

2. Mode gerak osilasi rotasional :

- *Rolling* : Gerak osilasi rotasional terhadap sumbu-x
- *Pitching* : Gerak osilasi rotasional terhadap sumbu-y
- *Yawing* : Gerak osilasi rotasional terhadap sumbu-z

2.2.4.2 Heading Kapal terhadap Arah Gelombang

Selain faktor gelombang, terdapat juga faktor gelombang papasan, dimana gelombang tersebut berpapasan terhadap kapal. Dalam ilustrasinya diperlihatkan sebagai berikut :

$$T_{\theta} = \frac{L_w}{V_w - V \cos \mu} \quad (2.1)$$

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

dengan:

T_{θ} = Periode *Encountering* (s)

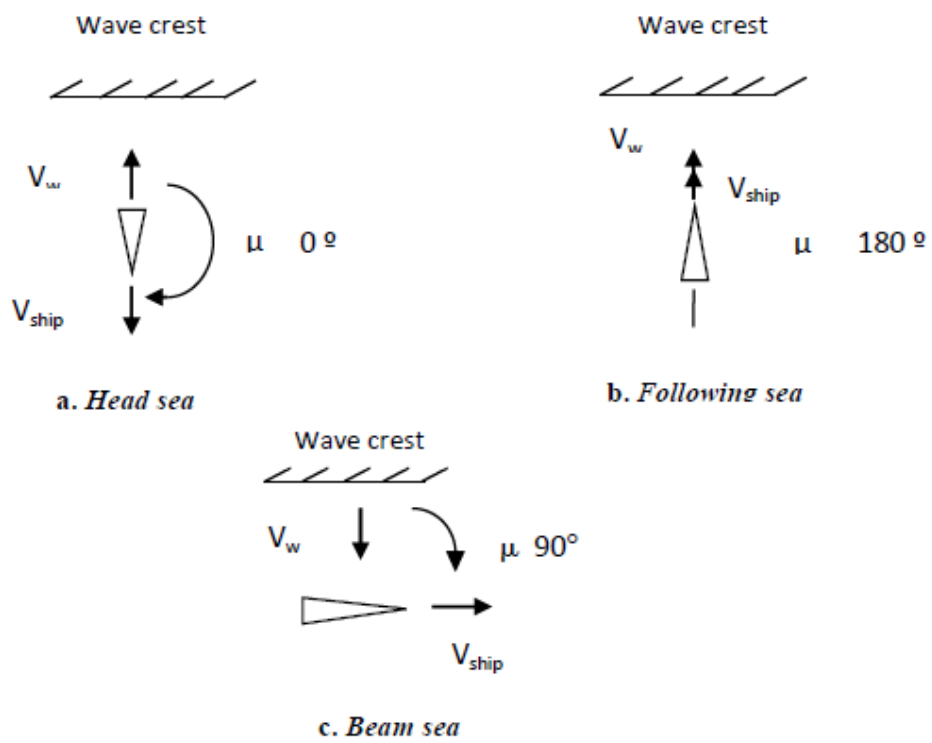
V_w = Kecepatan Gelombang (m/s)

V = Kecepatan Kapal (knot)

μ = Sudut Datang Gelombang

Sebagai gambaran arah kapal terhadap arah gelombang untuk kondisi

Head Sea, Following Sea, Beam Sea dapat dilihat pada gambar berikut :

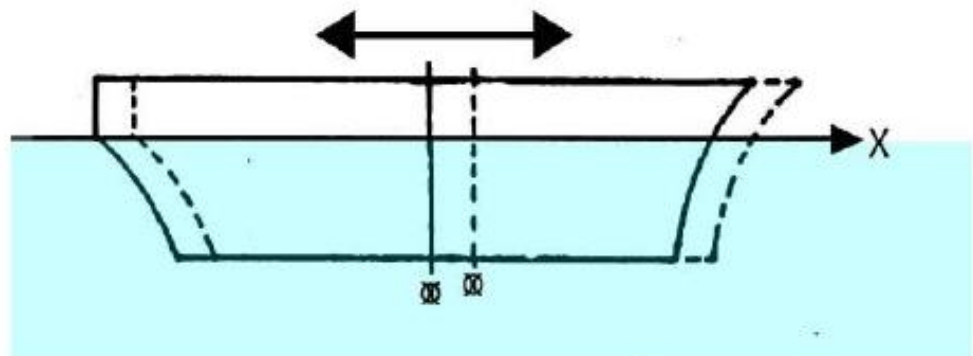


Gambar 2.9 Definisi arah datang gelombang terhadap *heading* kapal

(Sumber : Bhattacharyya 1978)

2.2.4.3 Gerakan *Surge* Murni

Surge merupakan gerak translasi (maju dan mundur) kapal dengan sumbu X sebagai pusat gerak. Berikut adalah ilustrasi gambar untuk gerakan *Surging*



Gambar 2.10 Ilustrasi Gerakan *Surging*

(Sumber : Murtedjo, 1999)

Persamaan umum kapal pada kondisi *surging* adalah :

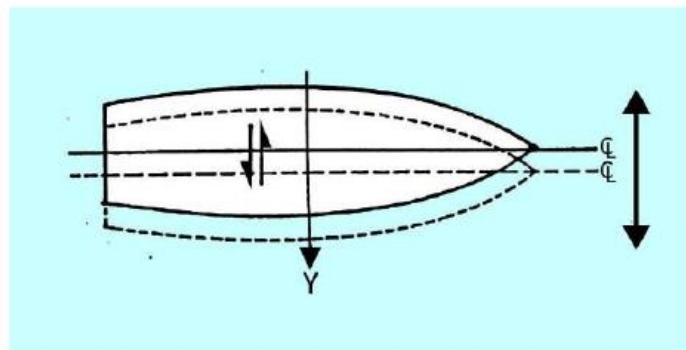
$$a\ddot{X} + b\dot{X} + cX = F_0 \cos \omega e t \quad (2.3)$$

Keterangan:

- $a\ddot{X}$ = *Inertial force* (N)
- $b\dot{X}$ = *Damping force* (N)
- cX = *Restoring force* (N)
- $F_0 \cos \omega e t$ = *Exciting Force* (N)
- a = *Inertial force coefficient*
- b = *Damping force coefficient*
- c = *Restoring force coefficient*
- X = *Surging Displacement* (m)
- \dot{X} = *Surging Velocity* (m/s)
- \ddot{X} = *Surging Acceleration* (m/s²)
- ωe = *Encountering Frequency* (rad/s)
- t = *Time* (s)

2.2.4.4 Gerakan Sway Murni

Sway merupakan gerak translasi kapal secara menyamping ke arah *portside* dan *starboard* dengan sumbu Y sebagai pusat gerak. Berikut adalah gambar untuk mengilustrasikan gerakan *swaying*.



Gambar 2.11 Ilustrasi Gerakan *Swaying*

(Sumber : Murtedjo, 1999)

Persamaan umum kapal pada kondisi *swaying* adalah:

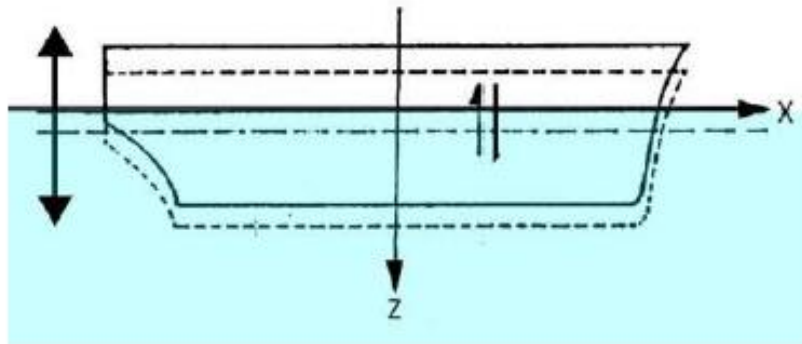
$$a\ddot{Y} + b\dot{Y} + cY = F_o \cdot \cos \omega e t \quad (2.4)$$

Keterangan:

- $a\ddot{Y}$ = *Inertial force* (N)
- $b\dot{Y}$ = *Damping force* (N)
- cY = *Restoring force* (N)
- $F_o \cos \omega e t$ = *Exciting Force* (N)
- a = *Inertial force coefficient*
- b = *Damping force coefficient*
- c = *Restoring force coefficient*
- Y = *Swaying Displacement* (m)
- \dot{Y} = *Swaying Velocity* (m/s)
- \ddot{Y} = *Swaying Acceleration* (m/s²)
- ωe = *Encountering Frequency* (rad/s)
- t = *Time* (s)

2.2.4.5 Gerakan *Heave* Murni

Pada *heaving* gaya ke bawah akibat dari berat kapal membuat kapal tercelup ke air lebih dalam dan kembali ke awal hingga diperoleh kesetimbangan kapal. Ketika gaya *buoyancy* lebih besar akibat kapal tercelup, kapal akan bergerak vertikal ke atas, ketika posisi kapal telah setimbang kapal akan tetap naik dikarenakan ada pengaruh momentum. Berikut adalah gambar ilustrasi gerakan *heaving* :



Gambar 2.12 Ilustrasi Gerakan *Heaving*

(Sumber : Murtedjo, 1999)

Berikut adalah persamaan gerakan *heave* :

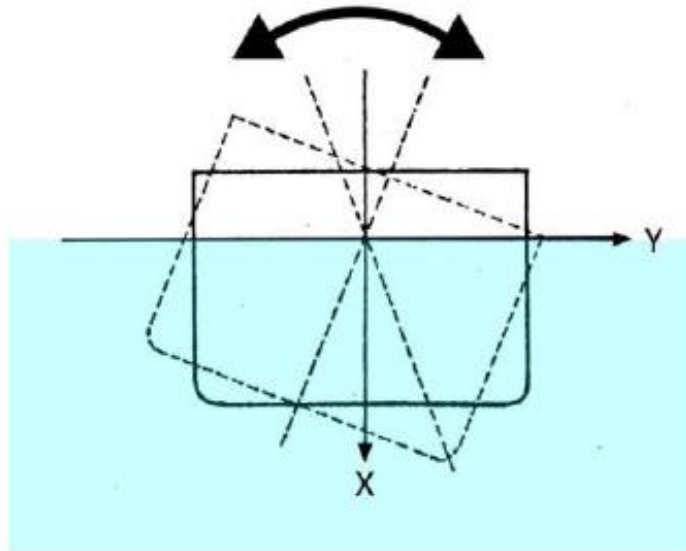
$$a\ddot{Z} + b\dot{Z} + cZ = F_0 \cdot \cos \omega e t \quad (2.5)$$

Keterangan:

- $a\ddot{Z}$ = *Inertial force* (N)
- $b\dot{Z}$ = *Damping force* (N)
- cZ = *Restoring force* (N)
- $F_0 \cos \omega e t$ = *Exciting Force* (N)
- a = *Inertial force coefficient*
- b = *Damping force coefficient*
- c = *Restoring force coefficient*
- Z = *Heaving Displacement* (m)
- \dot{Z} = *Heaving Velocity* (m/s)
- \ddot{Z} = *Heaving Acceleration* (m/s²)
- ωe = *Encountering Frequency* (rad/s)
- t = *Time* (s)

2.2.4.6 Gerakan *Roll Murni*

Rolling merupakan gerakan osilasi rotasional dengan sumbu X sebagai pusat geraknya. Gerakan ini akan berpengaruh terhadap initial velocity sehingga perlu dilakukan perhitungan terhadap momen gaya. Berikut adalah gambar ilustrasi gerakan *rolling*



Gambar 2.13 Ilustrasi Gerakan *Rolling*

(Sumber : Murtedjo, 1999)

Rumus umum dari persamaan gerak akibat *rolling* ialah:

$$a\ddot{\theta} + b\dot{\theta} + c\theta = M_o \cos \omega e t \quad (2.6)$$

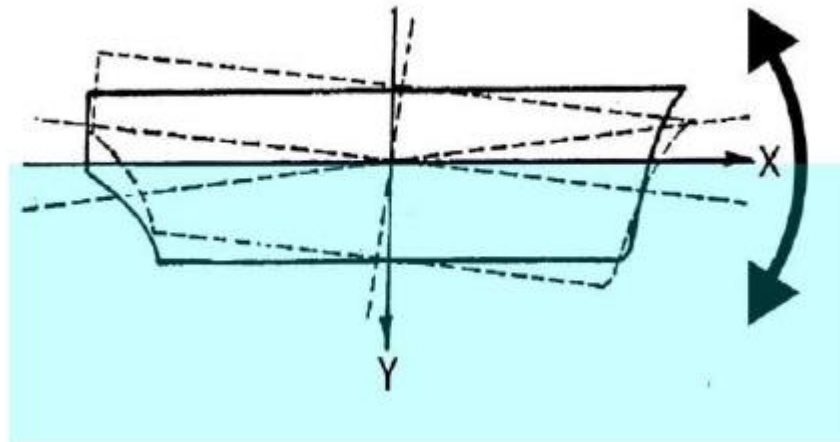
Keterangan:

- $a\ddot{\theta}$ = *Inertial Moment* (N.m)
- $b\dot{\theta}$ = *Damping Moment* (N.m)
- $c\theta$ = *Restoring Moment* (N.m)
- $M_o \cos \omega e t$ = *Exciting Moment* (N.m)
- a = *Inertial Moment Coefficient*
- b = *Damping Moment Coefficient*
- c = *Restoring Moment Coefficient*

- θ = *Rolling Angle* (rad)
- $\dot{\theta}$ = *Rolling Angular Velocity* (rad/s)
- $\ddot{\theta}$ = *Rolling Angular Acceleration* (rad/s²)
- ω_e = *Encountering Frequency* (rad/s)
- t = *Time* (s)

2.2.4.7 Gerakan *Pitch* Murni

Pitching merupakan gerakan osilasi rotasional dengan sumbu Y sebagai pusat gerak. Karena gerak *pitching* akan berpengaruh terhadap kesetimbangan posisi, maka momen yang terjadi akibat *pitching* perlu diperhitungkan. Berikut adalah gambar ilustrasi gerakan *pitching*



Gambar 2.14 Ilustrasi Gerakan *Pitching*

(Sumber : Murtedjo, 1999)

Rumus umum dari persamaan gerakan akibat *pitching* adalah:

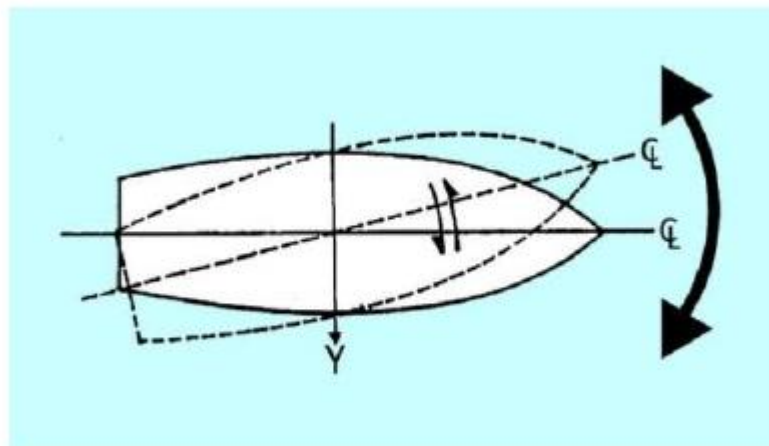
$$a\ddot{\Phi} + b\dot{\Phi} + c\Phi = Mo \cos \omega_e t \quad (2.7)$$

Keterangan:

- $a\ddot{\Phi}$ = *Inertial Moment* (N.m)
- $b\dot{\Phi}$ = *Damping Moment* (N.m)
- $c\Phi$ = *Restoring Moment* (N.m)
- $M_0 \cos \omega_e t$ = *Exciting Moment* (N.m)
- a = *Inertial Moment Coefficient*
- b = *Damping Moment Coefficient*
- c = *Restoring Moment Coefficient*
- Φ = *Pitching Angle* (rad)
- $\dot{\Phi}$ = *Pitching Angular Velocity* (rad/s)
- $\ddot{\Phi}$ = *Pitching Angular Acceleration* (rad/s²)
- ω_e = *Encountering Frequency* (rad/s)
- t = *Time* (s)

2.2.4.8 Gerakan Yaw Murni

Gerak *yaw* merupakan gerak osilasi rotasional kapal dengan sumbu Z sebagai pusat gerak. Sama halnya seperti pada gerak *rolling* dan *pitching*, gerak ini pun akan berpengaruh terhadap kesetimbangan posisi kapal, sehingga perlu memperhitungkan momen gaya. Berikut adalah gambar ilustrasi gerakan *yawing*



Gambar 2.15 Ilustrasi Gerakan *Pitching*

(Sumber : Murtedjo, 1999)

Persamaan umum gerak kapal untuk *yawing* ialah:

$$a\ddot{\psi} + b\dot{\psi} + c\psi = Mo \cos \omega e t \quad (2.8)$$

Keterangan:

- $a\ddot{\psi}$ = *Inertial Moment* (N.m)
- $b\dot{\psi}$ = *Damping Moment* (N.m)
- $c\psi$ = *Restoring Moment* (N.m)
- $Mo \cos \omega e t$ = *Exciting Moment* (N.m)
- a = *Inertial Moment Coefficient*
- b = *Damping Moment Coefficient*
- c = *Restoring Moment Coefficient*
- ψ = *Yawing Angle* (rad)
- $\dot{\psi}$ = *Yawing Angular Velocity* (rad/s)
- $\ddot{\psi}$ = *Yawing Angular Acceleration* (rad/s²)
- ωe = *Encountering Frequency* (rad/s)
- t = *Time* (s)

2.2.4.9 Gerakan Couple 6 Degree of Freedom

Karena bangunan apung yang ditinjau terdiri dari enam mode gerakan bebas (*six degree of freedom*), dengan asumsi bahwa gerakan-gerakan osilasi tersebut adalah linier dan harmonik, maka persamaan diferensial gerakan kopel dapat dituliskan sebagai berikut (Djatkiko, 2012) :

$$\sum_{n=1}^6 [(M_{jk} + A_{jk})\ddot{\xi}_k + B_{jk}\dot{\xi}_k + K_{jk}\xi_k = F_j e^{i\omega t} ; j, k = 1 \dots 6 \quad (2.9)$$

dengan:

M_{jk} = matriks massa dan momen inersia massa bangunan laut

A_{jk} = matriks koefisien-koefisien massa tambah hidrodinamik

B_{jk} = matriks koefisien-koefisien redaman hidrodinamik

K_{jk} = matriks koefisien-koefisien kekakuan atau gaya dan momen hidrostatik

F_j = matriks gaya eksitasi dan momen eksitasi dalam fungsi kompleks (dinyatakan oleh $e^{i\omega t}$)

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

2.2.5 Response Amplitude Operator (RAO)

Response Amplitude Operator (RAO) merupakan alat untuk mentransfer beban luar dalam hal ini gelombang dalam rentang frekuensi menjadi bentuk respon yang diterima pada suatu struktur. Sehingga umumnya RAO juga dikenal sebagai *transfer function* (Chakrabarti, 1987). Selain itu RAO juga bisa diartikan sebagai hubungan antara amplitudo respon terhadap amplitudo gelombang ($\zeta_{\text{respon}}/\zeta_{\text{gelombang}}$). Amplitudo respon bisa berupa gerakan, tegangan, maupun getaran.

RAO untuk gerakan translasi (*surge, sway, heave*) merupakan perbandingan langsung antara amplitudo gerakan struktur dibanding dengan amplitudo gelombang insiden (keduanya dalam satuan elevasi panjang) (Djarmiko, 2012). Persamaan RAO untuk gerakan translasi sebagai berikut :

$$RAO(\omega) = \left(\frac{\zeta_t}{\zeta_0}\right) (m/m) \quad (2.10)$$

Keterangan:

$\zeta_t(\omega)$ = Amplitudo gerakan translasional struktur (m)

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

Sedangkan 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 (DjTamiko, 2012):

$$RAO(\omega) = \frac{\zeta_{ko}}{\zeta_0} = \frac{\zeta_{kr}}{\zeta_0} \left(\frac{rad}{m} \right) \quad (2.11)$$

Keterangan:

$\zeta_{r(\omega)}$ = Amplitudo gerakan rotasional struktur (rad)

$\zeta_{0(\omega)}$ = Amplitudo gelombang (m)

2.2.6 Spektrum Gelombang

Analisis spektrum gelombang dapat menggunakan beberapa teori spektrum gelombang yang telah ada, antara lain model spektrum JONSWAP, Pierson-Moskowitz, ISSC ataupun ITTC. Pemilihan teori spektrum gelombang didasarkan pada kondisi riil dari perairan yang ditinjau. Dalam penggunaan model matematis, penerapan spektrum biasanya menggunakan parameter tunggal atau lebih, misalnya tinggi gelombang signifikan (H_s), periode gelombang (T), faktor permukaan (η).

Untuk perairan tertutup, analisa spektrum gelombang banyak menggunakan teori spektrum gelombang JONSWAP. Persamaan spektrum JONSWAP dikemukakan oleh Hasselman et al (1973) berdasarkan percobaan yang dilakukan di daerah *north sea*. Formula atau persamaan untuk spektrum JONSWAP ditulis dari modifikasi persamaan *Pierson-Moskowitz* (Chakrabarti, 1987) yaitu:

$$S(\omega) = \bar{a}g^2\omega^{-5} \exp\left(-1.25 \left[\frac{\omega}{\omega_p}\right]\right) * \gamma \left[\exp\left(-(\omega-\omega_p)^2/(2\sigma^2\omega_p^2)\right) \right] \quad (2.12)$$

dengan:

$S(\omega)$ = Spektrum gelombang ($m^2\text{-det/rad}$)

- γ = Parameter puncak (*peakedness parameter*)
- ω = Frekuensi gelombang (*wave frequency*) dalam rad/s
- ω_p = Frekuensi puncak (*peak frequency*) dalam rad/s
- σ = 0.07 untuk $\omega < \omega_p$; 0.09 untuk $\omega > \omega_p$
- \bar{a} = $0.0076 (X_0)^{-0.22}$, dimana $X_0 = \frac{gX}{U\omega}$; untuk X_0 yang tidak diketahui
 $\bar{a} = 0.0081$

Persamaan JONSWAP dewasa ini banyak dipakai untuk analisis bangunan lepas pantai di Indonesia dengan mengambil harga γ sekitar 2.0 s.d. 2.5. Artinya menurunkan puncak spektra, atau dengan kata lain dominasi tidak terkonsentrasi pada periode atau frekuensi gelombang tertentu saja.

Tabel 2.1 Amplitudo dan Tinggi Gelombang Sebuah Spektrum

Profil Gelombang	Amplitudo	Tinggi Gelombang
Gelombang Rata-rata	$1.25 (m_0)^{1/2}$	$2.50 (m_0)^{1/2}$
Gelombang signifikan	$2.00 (m_0)^{1/2}$	$4.00 (m_0)^{1/2}$
Rata-rata 1/10 Gelombang tertinggi	$2.55 (m_0)^{1/2}$	$5.09 (m_0)^{1/2}$
Rata-rata 1/100 Gelombang tertinggi	$3.44 (m_0)^{1/2}$	$6.67 (m_0)^{1/2}$

Persamaan pada Tabel di atas (Bhattacharya, 1978) lebih memudahkan untuk menghitung variabel-variabel dari profil gelombang, dimana faktor di depan $\sqrt{m_0}$ diperoleh berdasarkan kurva tinggi gelombang dengan pendekatan matematis dari distribusi weibull.

2.2.7 Spektrum Respon

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

$$S_R(\omega) = [RAO(\omega)]^2 x S(\omega) \quad (2.13)$$

Dimana :

- $S_R(\omega)$ = spektrum respon ($m^2 - sec$)
 $S(\omega)$ = spektrum gelombang ($m^2 - sec$)
 $RAO(\omega)$ = response amplitude operator
 ω = frekuensi gelombang (rad/sec)

2.2.8 Konsep Pembebanan

Suatu sistem *mooring* dianalisa berdasarkan desain kriteria yang diformulasikan dalam 3 batasan sebagai berikut (DNV OS-E301) :

1. *Ultimate Limit State* (ULS), untuk memastikan bahwa sebuah *mooring system* cukup kuat untuk bertahan terhadap efek beban yang ditimbulkan oleh beban lingkungan pada kondisi ekstrem.
2. *Accidental Limit State* (ALS), untuk memastikan bahwa suatu sistem *mooring* memiliki kapasitas yang cukup untuk bertahan pada kegagalan sebuah *mooring line* yang dimana penyebab dari terjadinya kegagalan tidak diketahui.
3. *Fatigue Limit State* (FLS), untuk memastikan bahwa sebuah *mooring system* memiliki kapasitas yang cukup untuk bertahan pada beban yang bersifat *cyclic*.

2.2.9 Tension pada Mooring Line

Tension Force pada sebuah *mooring line* merupakan sebuah sarana penerapan gaya yang menahan *floating structure*, yang disebabkan oleh berat dan atau sifat elastis dari *mooring line*, tergantung pada peletakkan (pattern) dari *mooring line* (Faltinsen, 1990). *Tension* yang terjadi pada *mooring line* dapat dibedakan menjadi 2, yaitu:

1. *Mean Tension*.

Mean Tension pada *mooring line* yang dijelaskan bersesuaian dengan *mean offset* pada *vessel*. *Mean offset* sendiri adalah rata-rata

perpindahan vessel yang disebabkan oleh beberapa komponen seperti angin, arus, gelombang dan gaya luar lainnya.

2. *Maximum Tension*

Menurut API RP-2SK (2005), *Maximum Tension* adalah Mean Tension ditambah dengan kombinasi *Wave Frequency Tension* dan *Low Frequency Tension*. Berikut adalah persamaan dari *Maximum Tension* :

$$T_{max} = T_{mean} + T_{wfmax} + T_{lfsig} \quad (2.14)$$

$$T_{max} = T_{mean} + T_{lfmax} + T_{wfsig} \quad (2.15)$$

Dimana :

$$T_{max} = \text{Maximum Tension}$$

$$T_{mean} = \text{Mean Tension}$$

$$T_{wfmax} = \text{Maximum Wave Frequency Tension}$$

$$T_{wfsig} = \text{Significant Wave Frequency Tension}$$

$$T_{lfmax} = \text{Maximum Low Frequency Tension}$$

$$T_{lfsig} = \text{Maximum Low Frequency Tension}$$

Sedangkan menurut Faltinsen (1990), persamaan dalam menyelesaikan *Tension* dapat ditulis sebagai berikut:

$$T_{max} = T_H + wh \quad (2.16)$$

Dimana:

$$T_{max} = \text{Tension (ton)}$$

$$T_H = \text{Horizontal Pre-tension (ton)}$$

$$w = \text{Berat chain di dalam air (ton/m)}$$

$$h = \text{kedalaman air (m)}$$

Persamaan di atas digunakan dalam analisa *tension anchor chain* dalam keadaan statis, sedangkan dalam keadaan dinamis, menurut Faltinsen (1990), persamaannya dapat dituliskan sebagai berikut:

$$F_1^M = \sum_{i=1}^n T_{Hi} \cos \theta_i \quad (2.17)$$

$$F_2^M = \sum_{i=1}^n T_{Hi} \sin \theta_i \quad (2.18)$$

$$F_6^M = \sum_{i=1}^n T_{Hi} [x_i \sin \theta_i - y_i \cos \theta_i] \quad (2.19)$$

Dimana:

F_1, F_2, F_6 = Gaya horizontal transversal, lateral, dan arah yaw

T_{Hi} = *Pre-tension* horizontal pada *chain number i*

Dengan ketentuan bahwa Gaya horizontal tersebut sama dengan rata-rata gaya dari beban gelombang, beban angin, dan beban arus pada saat struktur tertambat dalam keadaan kesetimbangannya.

2.2.10 Tegangan Utama (Principal Stress)

Dari teori elastisitas, volume kecil dari material pada sembarang titik pada atau di dalam tubuh padat dapat diputar sehingga hanya tegangan normal tetap dan semua tegangan geser adalah nol. Pada bidang-bidang di mana terjadi tegangan normal yang maksimum atau minimum, tidak akan didapati tegangan geser. Bidang ini disebut sebagai bidang utama tegangan, dan tegangan yang bekerja pada bidang ini, yaitu tegangan normal maksimum dan minimum, disebut tegangan utama (Popov, 1984).

Tegangan Utama dapat dihitung berdasarkan persamaan berikut :

$$\sigma_1 \text{ atau } \sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (2.20)$$

Dimana :

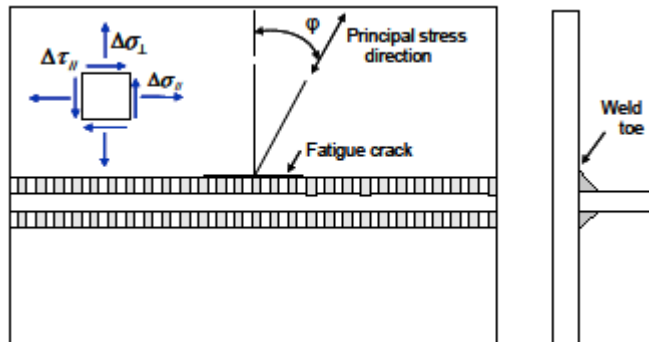
σ_1 = Tegangan Utama Maksimum

σ_2 = Tegangan Utama Minimum

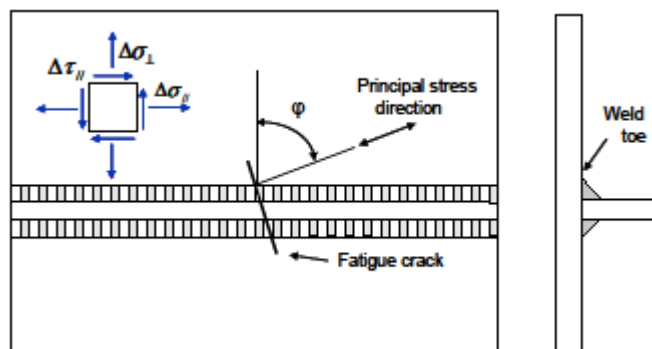
σ_x = Tegangan Normal Sumbu X

σ_y = Tegangan Normal Sumbu Y

Menurut DNV CN No.30.7 (2014), Ketika lokasi potensial terjadinya *fatigue crack* pada *weld toe*, *hot spot stress* lokal yang relevan merupakan jarak dari *maximum principal stress* berdekatan dengan lokasi *crack* yang potensial dengan konsentrasi tegangan yang diperhitungkan. *Maximum principal stress* dipertimbangkan pada parameter yang signifikan untuk analisis pertumbuhan *fatigue crack*. Ketika arah *principal stress* berbeda dari normal ke *weld toe*, hal ini menjadi konservativ untuk menggunakan *principal stress range* bersamaan dengan klasifikasi dari koneksi normal *stress range*. Namun ketika arah *principal stress* mendekati normal terhadap *weld toe*, pertumbuhan dari *fatigue crack* tidak berada pada sekitar *weld toe* namun *fatigue crack* akan tumbuh normal terhadap arah *principal stress*.



Gambar 2.16 Fatigue Cracking Arah etika Arah Principal Stress Berbeda Terhadap Normal Weld Toe

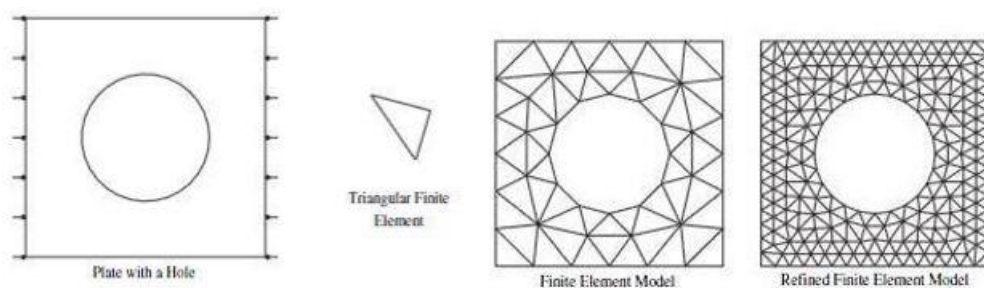


Gambar 2.17 Fatigue Cracking Arah etika Arah Principal Stress Berbeda Terhadap Normal Weld Toe

2.2.11 *Finite Element Method (FEM)*

Finite Element Method (FEM) adalah metode numerik untuk penyelesaian masalah teknik dan fisika matematis. Konsep dasar dari metode FEM adalah menyelesaikan suatu masalah dengan cara membagi objek analisis menjadi beberapa bagian yang terhingga. Bagian-bagian tersebut kemudian dianalisis dan hasilnya digabung untuk mendapatkan penyelesaian dari keseluruhan objek. Kata “*finite* atau terhingga” digunakan untuk penegasan bahwa bagian-bagian tersebut tidak tak terhingga, seperti yang lazim digunakan pada metode integral analitik.

Membagi bagian analisis menjadi bagian-bagian kecil disebut “*discretizing* atau diskritisasi”. Bagian-bagian kecil ini disebut elemen, yang terdiri dari titik-titik sudut (disebut nodal, atau node) dan daerah elemen yang terbentuk dari titik-titik tersebut seperti contohnya ditunjukkan pada Gambar. Dengan membagi objek menjadi bagian-bagian kecil akan membantu dalam pembuatan persamaan diferensial. Secara matematis, FEM diartikan sebagai teknik numerik untuk menyelesaikan problem yang dinyatakan dalam persamaan diferensial. Jenis elemen hingga terbagi atas dua yaitu *solid finite element* dan *shell finite element*. Pemilihan jenis elemen tersebut ditentukan berdasarkan model struktur atau benda yang ingin dimodelkan.



Gambar 2.18 Konsep metode elemen hingga

(Sumber: Patria, 2017)

Pada analisis struktur, penyelesaian yang didapat adalah deformasi (*displacement*) pada setiap titik yang selanjutnya digunakan untuk mendapatkan besaran regangan dan tegangan. Sementara untuk masalah selain analisis struktur yang dapat dilakukan dengan FEM adalah *heat transfer* dan *fluid flow*.

Persamaan sederhana dari kesetimbangan sistem struktur yang dimodelkan dalam FEM dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut:

$$F = K \times d \dots \dots \dots (2.27)$$

dengan:

- F = gaya yang bekerja pada struktur (N)
- K = kekakuan pada benda struktur (N/m)
- d = *displacement* pada struktur FEM (mm)

Sedangkan untuk persamaan elemen yang dihasilkan secara umum adalah sebagai berikut:

$$\begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \dots \\ f_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & \dots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & \dots & k_{2n} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & \dots & k_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ k_{n1} & k_{n2} & k_{n3} & \dots & k_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ \dots \\ d_n \end{Bmatrix} \dots \dots \dots (2.28)$$

dengan:

- {F} = matriks gaya yang bekerja pada struktur (N)
- [K] = matriks pada benda struktur (N/m)
- {d} = matriks *displacement* pada struktur FEM (mm)

2.2.12 Laju Korosi (*Corrosion Rate*)

Sesuai dengan persyaratan dari *class*, laju korosi tetap harus dipertimbangkan dalam analisis kelelahan. Menurut DNV (2013), minimum *corrosion allowance* untuk *mooring system* dapat menggunakan tabel berikut apabila *corrossion allowance* pada material spesifik tidak tersedia

Tabel 2.2 *Corrosion Allowance* untuk *Mooring System* (DNV, 2004)

Table E1 Corrosion allowance for chain			
<i>Part of mooring line</i>	<i>Corrosion allowance referred to the chain diameter</i>		
	<i>No inspection (mm/year)</i>	<i>Regular inspection ¹⁾ (mm/year)</i>	<i>Requirements for the Norwegian continental shelf</i>
Splash zone ³⁾	0.4	0.2	0.8 ²⁾
Catenary ⁴⁾	0.3	0.2	0.2
Bottom ⁵⁾	0.4	0.3	0.2 ⁶⁾
1) Regular inspection e.g. in accordance with the Classification Societies or according to operators own inspection program approved by the National Authorities if necessary. The mooring lines have to be replaced when the diameter of the chain with the breaking strength used in design of the mooring system is reduced by 2%. 2) The increased corrosion allowance in the splash zone is required by NORSOK M-001 and is required for compliance with NPD, see DNV-OSS-201. 3) Splash Zone is defined as 5 m above the still water level and 4 m below the still water level. 4) Suspended length of the mooring line below the splash zone and always above the touch down point. 5) The corrosion allowance given in the table is given as guidance, lower values may be accepted provided it is documented. 6) Investigation of the soil condition shall be carried out in order to document that bacterial corrosion is not taking place.			

Pada kenyataannya, ketika korosi terjadi, geometri *mooring system* tidak berubah. Karenanya ketika mengidentifikasi kapasitas karakteristik dari *mooring system* yang terkorosi, *Minimum Breaking Load* (MBL) yang akan digunakan harus dikurangi berdasarkan perbandingan dari tebal atau diameter dari *mooring* setelah dan sebelum terjadi korosi berdasarkan persamaan berikut (DNV, 2004) :

$$S_{mbs-corr} = S_{mbs} \cdot \left(\frac{D_{corr}}{D_{new}} \right)^2 \quad (2.21)$$

Dimana :

S_{mbs} = Minimum Breaking Load awal (ton)

$S_{mbs-corr}$ = Minimum Breaking Load setelah terkorosi (ton)

D_{corr} = Diameter setelah terkorosi (mm)

D_{new} = Diameter awal (mm)

2.2.13 Kelelahan (*Fatigue*)

Kelelahan (*fatigue*) merupakan fenomena akumulasi kerusakan material yang disebabkan oleh beban siklik atau berulang. Banyak bagian dari struktur yang harus bertahan dari tegangan yang menimpanya selama masa operasinya. Biasanya amplitudo beban pada tiap *cycle* tidak cukup besar untuk membuat sebuah struktur mengalami kegagalan. Namun kegagalan dapat terjadi ketika akumulasi kerusakan yang dialami oleh struktur mencapai suatu level yang kritis. *Fatigue* berdasarkan siklus bebannya dapat dibagi menjadi :

a. *Low-cycle (low stress) fatigue*

Suatu kegagalan kelelahan (*fatigue failure*) disebut sebagai "*low-cycle fatigue*" apabila jumlah kejadian untuk menuju ke kegagalan struktur adalah kurang dari 10^4 .

b. *High-cycle (high stress) fatigue*

Jumlah kejadian dari "*high-cycle fatigue*" biasanya mencapai jutaan kali kejadian, bahkan lebih. Untuk struktur bangunan laut, hal ini telah menjadi perhatian khusus.

2.2.13.1 Metode Perhitungan Umur Kelelahan (*Fatigue Life*)

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

Menurut Rohith dan Jayalekshmi (2017), Analisa umur kelelahan menggunakan metode S-N didekati dengan tiga pendekatan sebagai berikut :

1. *Deterministic Fatigue Analysis*

Analisis deterministik telah dilakukan selama bertahun-tahun dan telah terbukti sebagai pendekatan yang *reliable* untuk struktur yang tidak sensitif secara dinamis dan untuk situasi di mana semua gelombang yang digunakan dalam analisis adalah gelombang periode panjang untuk menghindari resonansi pada struktur. Analisis kelelahan deterministik tidak menggunakan spektrum gelombang maupun RAO, tetapi sebagai gantinya melakukan analisis gelombang diskrit yang relatif sedikit untuk menentukan nilai rentang tegangan. Oleh karena itu, hasil analisis deterministik mungkin cukup sensitif terhadap pemilihan gelombang dan periode.

2. *Spectral Fatigue Analysis*

Analisis spektral adalah pendekatan statistik untuk menghitung kelelahan pada suatu struktur. Pendekatan kelelahan spektral menggunakan spektrum gelombang dan fungsi transfer (RAO), sehingga memungkinkan hubungan rasio respon struktural dengan tinggi gelombang sebagai fungsi frekuensi gelombang yang akan dikembangkan untuk gelombang rentang frekuensi. Jumlah siklus dari *stress* tergantung pada stres *range* yang dihitung. Oleh karena itu, analisis spektral merupakan distribusi energi aktual pada seluruh rentang frekuensi gelombang.

3. *Simplified Fatigue Analysis*

Analisis *simplified* merupakan penyederhanaan dari metode spectral dan deterministik. Analisis *simplified* berdasarkan pada deskripsi sederhana dari data lingkungan dan respons terkait, analisis *simplified* akan sangat berguna jika digunakan pada awal fase desain.

2.2.13.2 Siklus Rentang Tegangan (*Stress Range*)

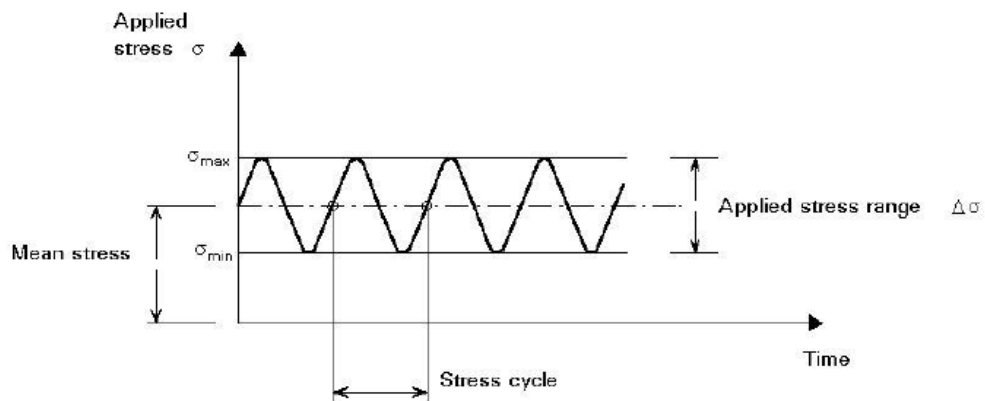
Menurut Paik dan Thayamballi (2007), dalam penaksiran *fatigue damage* suatu sambungan las struktur, poin utama yang perlu diperhatikan adalah rentang siklus tegangan maksimum dan minimum dengan tegangan rata-rata, seperti yang ditunjukkan pada Gambar. Maka tegangan rata-rata (*mean stress*) dan rentang tegangan (*stress range*) dinyatakan dalam persamaan berikut :

$$\sigma_{mean} = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (2.22)$$

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} = \sigma_a \quad (2.23)$$

Dimana :

- σ_{mean} = Tegangan rata-rata
- σ_{max} = Tegangan maksimum
- σ_{min} = Tegangan minimum
- $\Delta\sigma$ = Rentang Tegangan
- σ_a = Amplitudo Tegangan



Gambar 2.19 Siklus Rentang Tegangan

Untuk perhitungan rentang tegangan dalam analisa fatigue, jenis tegangan dibedakan menjadi 3 (tiga) macam, yaitu :

1. Tegangan Nominal (*Nominal Stress*)

Tegangan nominal didefinisikan sebagai tegangan yang diperoleh dari model finite element method dengan meshing yang agak kasar berdasar pada beban yang digunakan dan dimensi dari komponen. Ketika

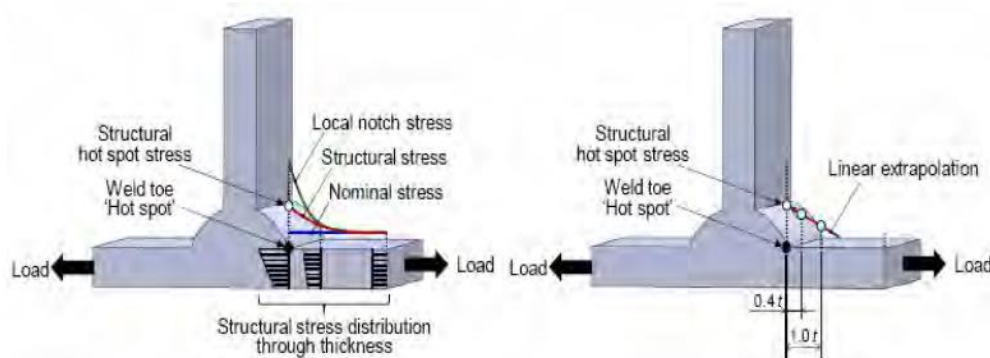
menghitung tegangan nominal, meningkatnya tegangan karena adanya diskontinuitas pada geometri struktur dan kualitas las-lasan dapat diabaikan.

2. Tegangan *Hotspot* (*Hotspot Stress*)

Hot-spot stress didefinisikan sebagai tegangan lokal pada daerah kritis (*hotspot*) dalam detail struktur dimana retak karena kelelahan dapat terjadi. Dalam kasus ini meningkatnya tegangan karena perubahan komponen geometri cukup diperhitungkan, namun efek dari kualitas las-lasan tidak diperhatikan.

3. Tegangan Takik (*Notch Stress*)

Notch stress didefinisikan sebagai tegangan lokal yang meningkat pada suatu notch, yaitu pada kaki las atau di daerah tepi dari suatu potongan. Pendekatan notch stress memperhitungkan konsentrasi tegangan yang disebabkan oleh kualitas las-lasan.



Gambar 2.20 Jenis Tegangan dalam Analisa *Fatigue*

2.2.13.3 Kurva S-N

Dasar dari kurva S-N atau *Wohler curve* adalah plot dari *stress* (S) dan *cycle* (N). Kurva S-N digunakan dalam karakteristik *fatigue* pada material yang mengalami pembebanan yang berulang (siklik) pada magnitude konstan. Tipe material yang berupa sambungan termasuk pelat dengan pelat, pipa dengan pelat, dan sambungan pipa dengan pipa memiliki klasifikasi tipe alphabet, dimana tiap tipe berhubungan dengan kurva S-N yang dibuat berdasarkan uji coba kelelahan. Kurva S-N didesain berdasar pada kurva

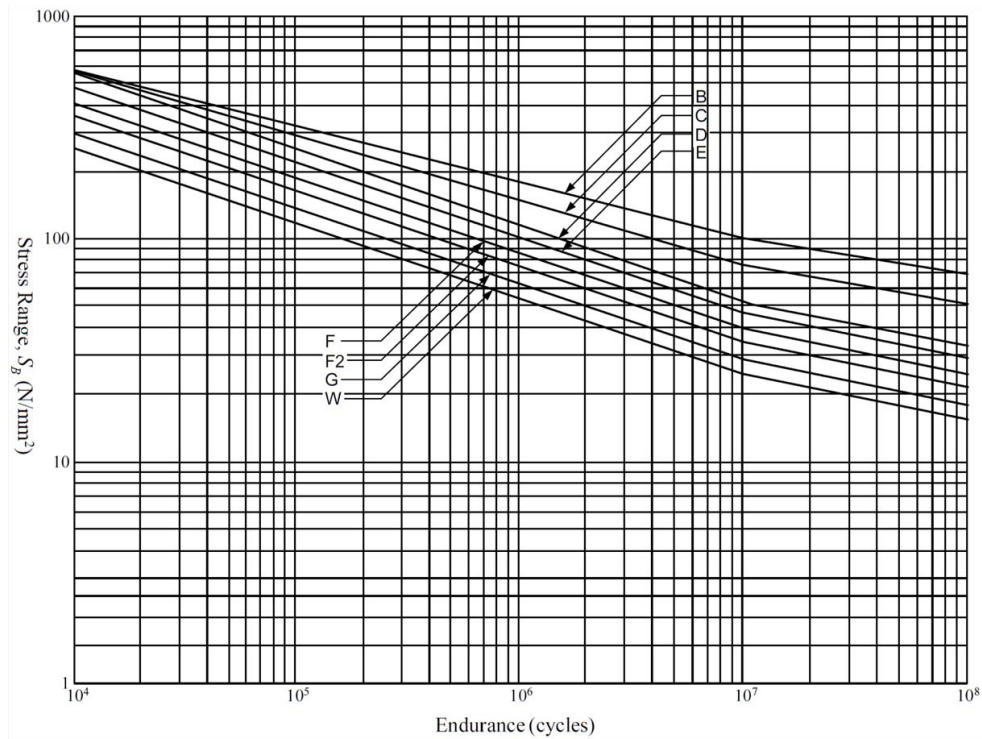
rataan-minus-dua-standart-deviasi untuk data uji coba yang relevan. Kurva S-N dinyatakan sebagai berikut (BKI, 2013) :

$$NS^m = K_2 \text{ atau } \log(N) = \log(K_2) - m \log(S) \quad (2.24)$$

Dimana :

- S = Rentang Tegangan (Mpa)
- N = Perkiraan jumlah siklus untuk kegagalan dibawah rentang tegangan S
- m dan K_2 = Konstanta yg bergantung pada jenis material dan las-lasan, jenis pembebanan, konfigurasi geometris dan kondisi lingkungan (udara atau air laut)

Bentuk Kurva S-N dan Parameter K_2 dan m dapat dilihat pada Tabel 2.3 dan Gambar berikut ini :



Gambar 2.21 Kurva S-N

(Sumber : BKI, 2013)

Tabel 2.3 Parameter Kurva S-N Untuk Berbagai Macam Tipe Sambungan Las

Class	K ₁	K ₁		m	Standard deviation		K ₂	σ _q N/mm ²
		log ₁₀	log _e		log ₁₀	log _e		
B	2.343 × 10 ¹⁵	15.3697	35.3900	4.0	0.1821	0.4194	1.01 × 10 ¹⁵	100.2
C	1.082 × 10 ¹⁴	14.0342	32.3153	3.5	0.2041	0.4700	4.23 × 10 ¹³	78.2
D	3.988 × 10 ¹²	12.6007	29.0144	3.0	0.2095	0.4824	1.52 × 10 ¹²	53.4
E	3.289 × 10 ¹²	12.5169	28.8216	3.0	0.2509	0.5777	1.04 × 10 ¹²	47.0
F	1.726 × 10 ¹²	12.2370	28.1770	3.0	0.2183	0.5027	0.63 × 10 ¹²	39.8
F2	1.231 × 10 ¹²	12.0900	27.8387	3.0	0.2279	0.5248	0.43 × 10 ¹²	35.0
G	0.566 × 10 ¹²	11.7525	27.0614	3.0	0.1793	0.4129	0.25 × 10 ¹²	29.2
W	0.368 × 10 ¹²	11.5662	26.6324	3.0	0.1846	0.4251	0.16 × 10 ¹²	25.2

2.2.13.4 Perkiraan Umur Kelelahan (*Fatigue Life*)

Perkiraan umur kelelahan dari sebuah struktur pada tahap desain maupun merupakan hal yang penting untuk mencapai kelayakan dan efektifitas biaya mengingat umur operasi dari struktur yang terbatas (Almar-Naess, 1985). Analisa kelelahan dengan metode S-N curve pada sambungan struktur dilakukan berdasarkan hukum kegagalan Palmgren-Miner (miner's rule). Menurut white dan ayyub (1996) miners's rule merupakan hipotesis kumulatif kerusakan berdasarkan konsep *strain energy*. Konsep *strain energy* menyatakan bahwa kerusakan terjadi ketika total *strain energy* pada siklus (n) dari variable amplitudo pembebanan adalah sama dengan total dari siklus N dari konstan amplitudo pembebanan.

Berikut adalah persamaan umur kelelahan berdasarkan hukum Palmgren-Miner :

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \quad (2.25)$$

Dimana :

D = Rasio kerusakan (*Damage Ratio*)

n_i = Jumlah siklus pada rentang tegangan S_i yang terjadi secara aktual pada struktur

N_i = Jumlah siklus pada rentang tegangan S_i yang didapat dari kurva S-N

Persamaan Palmgren-Miner mengasumsikan bahwa kegagalan terjadi pada $D=1$. Maka *fatigue life* dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$L = L_0/D \quad (2.26)$$

Dimana :

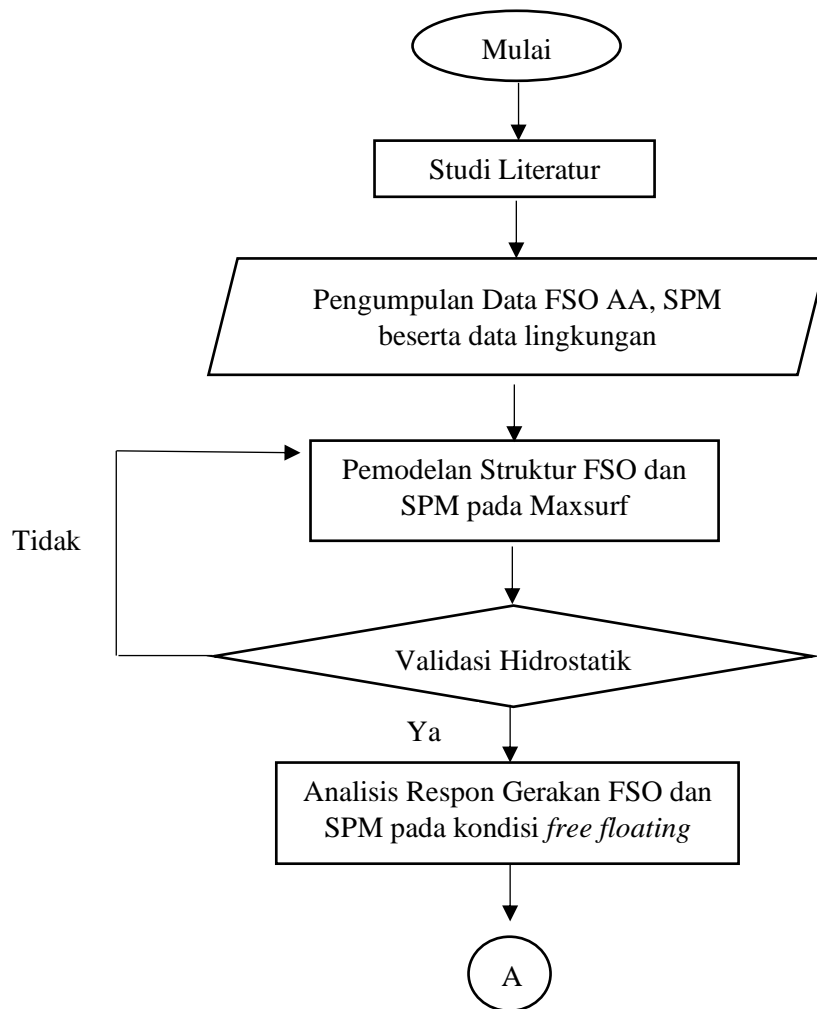
L = Umur kelelahan (*fatigue life*) dari struktur

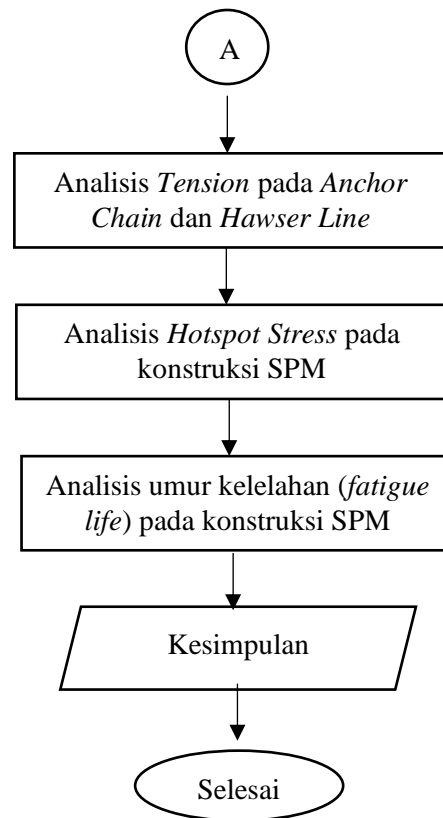
L_0 = waktu dari total jumlah siklus dari rentang tegangan yang terjadi (n_0)

BAB 3 METODOLOGI

3.1 Diagram Alir

Prosedur Penelitian disajikan dalam diagram alir di bawah ini :





Gambar 3.1 Diagram Alir

3.2 Prosedur Penelitian

Adapun langkah-langkah penelitian dalam diagram alir pada Metodologi Penelitian dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Informasi dan penelitian-penelitian yang telah dilakukan mengenai FSO, beserta *mooring system* didapatkan dengan penelusuran literatur. Pada tugas akhir ini, studi literatur diambil dari berbagai sumber seperti buku, materi perkuliahan, jurnal dan penelitian sebelumnya termasuk laporan tugas akhir terdahulu yang memiliki keterkaitan topik serupa untuk mencari dasar teori yang digunakan dan *rules* atau *codes* yang relevan yang dibutuhkan selama pengerjaan tugas akhir ini.

2. Pengumpulan Data

Pengumpulan data struktur dan hidrostatik FSO AA dan SPM, beserta data detail *mooring line* dan *hawser line* dan data lingkungan didapatkan dari PT. Pertamina Hulu Energi ONWJ dan PT. Citra Mas.

3. Pemodelan Struktur

Pemodelan struktur FSO dan SPM saat kondisi terapung bebas dalam Tugas Akhir ini dilakukan dengan bantuan *software* Maxsurf. FSO beserta SPM dimodelkan berdasarkan data-data yang telah didapatkan.

4. Validasi Model

Validasi dilakukan dengan membandingkan data hidrostatik dari FSO AA dan SPM hasil pemodelan pada *software* Maxsurf dengan data hidrostatik yang telah ada (didapat dari PT. Citra Mas).

5. Analisis Respon Gerak FSO dan SPM Kondisi *Free Floating*

Menganalisis respon gerakan pada struktur FSO dan struktur SPM untuk mengetahui karakteristik gerakan pada masing-masing struktur dalam kondisi terapung bebas dan juga didapatkan data RAO pada masing-masing struktur.

6. Analisis *Tension* pada *Anchor Chain* dan *Hawser Line*

Pada tahap ini, akan dihitung berapa besar *Tension* maksimum yang terjadi pada *Anchor Chain* dan *Hawser Line* akibat respon gerakan dari FSO AA dan SPM. Untuk perhitungan *Tension* ini, akan dibantu dengan menggunakan *software* ORCAFLEX.

7. Analisis *Hotspot Stress* pada Konstruksi SPM

Setelah mengetahui besar *Tension* yang terjadi, untuk Analisa kelelahan maka harus dianalisa terlebih dahulu *Hotspot Stress* nya. Untuk melakukan analisa *Hotspot Stress* maka sebelumnya harus dimodelkan (FEM) terlebih dahulu konstruksi dari SPM. Pada tahap ini pemodelan konstruksi lokal SPM dan Analisa *Hotspot Stress* akan dilakukan menggunakan *software* ANSYS.

8. Analisis Umur Kelelahan (*Fatigue Life*) pada konstruksi SPM

Pada tahap ini akan dilakukan Analisa *Fatigue Life* pada konstruksi SPM. Pada Tugas akhir ini untuk Analisa *Fatigue Life* akan mengacu pada *rules* atau *codes*.

9. Pengambilan Keputusan dari Hasil Penelitian

3.3 Pengumpulan Data

3.3.1 Data FSO Arco Ardjuna

Berikut ini adalah data FSO Arco Ardjuna yang terangkum pada Tabel 3.1

Tabel 3.1 Ukuran Utama FSO Arco Ardjuna

Designation	Units	Minimum Operating Draft	Maximum Operating Draft
Length, Loa	M	142,6	
Breadth, B	M	48,2	
Depth, D	M	26,5	
Displacement	Tonne	15529	153202
Draft to Baseline	M	2,5	24
WSA	m ²	6681	12813
Max. Cross Sect. Area	m ²	114,34	1150,63
Waterplane area	m ²	6239	6,239
Cp		0,91	0,91
Cb		0,87	0,9
Cm		0,959	0,99
Cwp		0,91	0,91
LCB from zero pt.	M	-2,69	-2,78
LCF from zero pt.	M	-2,79	-2,79
KB	M	1,26	12,02
KMt	M	78	19,73
KMI	M	590,8	71,3

(Sumber : PT. Citra Mas)

3.3.2 Data *Single Point Mooring*

Berikut pada Tabel 3.2 ini adalah data ukuran utama SPM :

Tabel 3.2 *Main Dimension of SPM*

Designation	Unit	Data
<i>Shell Outer Diameter</i>	m	12
<i>Centre Wall Diameter</i>	m	3,57
<i>Skirt Outer Diameter</i>	m	16,26
<i>Buoy Body Height</i>	m	5,3
<i>Skirt Thickness</i>	mm	12
<i>Skirt Heigh Baseline</i>	m	1
<i>Buoy Installed Draft</i>	m	2,38
<i>Centre of Gravity (KG)</i>	m	3,42

(Sumber : PT. Citra Mas)

3.3.3 Data Anchor Chain

Berikut ini adalah data karakteristik *Anchor Chain* yang terangkum pada Tabel 3.3 :

Tabel 3.3 Karakteristik *Anchor Chain*

<i>Number of Legs</i>	6
<i>Anchoring Pattern</i>	Even spacing (60)
<i>Paid out Length</i>	350 m
<i>Pretension</i>	262.17 kN
<i>Pretension angle (w/horizontal)</i>	45,26
<i>Number of Segment</i>	1
<i>Chain diameter</i>	102 mm
<i>Chain type</i>	R3
<i>Minimum breaking load</i>	8315 kN
<i>Minimum breaking load after corrosion</i>	7051 kN
<i>Unit weight in Air</i>	210.16 kg/m
<i>Unit weight in Water</i>	182.72 kg/m
<i>Stiffness EA</i>	868 MN
<i>Anchoring radius</i>	337.5 m

(Sumber : PT. Citra Mas)

3.3.4 Mooring Hawser

Berikut ini adalah data *mooring hawser* yang terangkum pada Tabel 3.4 :

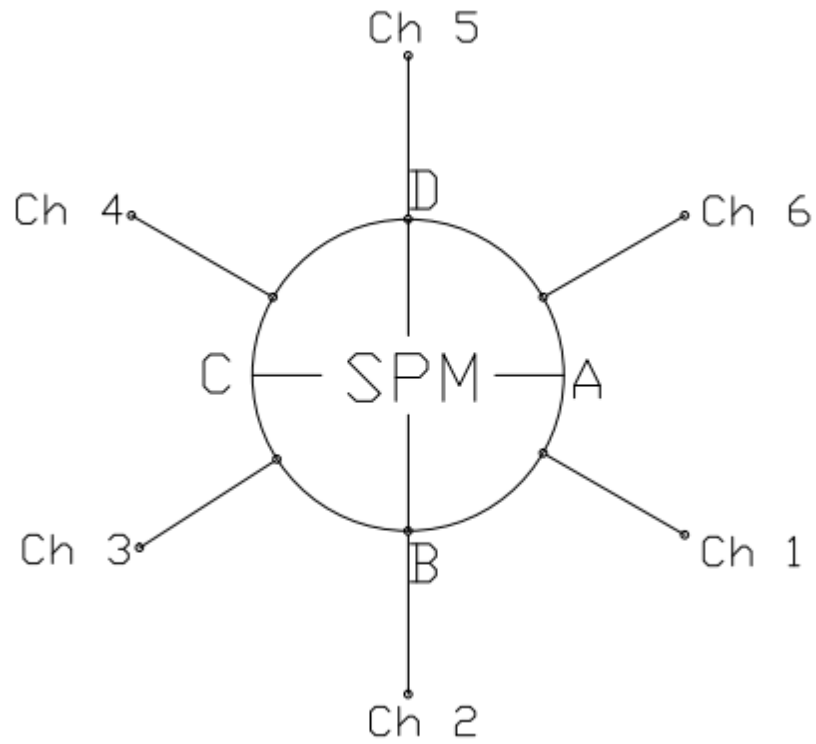
Tabel 3.4 Karakteristik *mooring hawser*

<i>Number of Lines</i>	<i>Twin Line</i>
<i>Material</i>	<i>Nylon</i>
<i>Length</i>	220 ft
<i>Design Mooring Force</i>	400 tonnes
<i>New Dry Breaking Strength per Hawser</i>	4094 kN

(Sumber : PT. Citra Mas)

3.3.5 Data Mooring Line Detail and Configuration

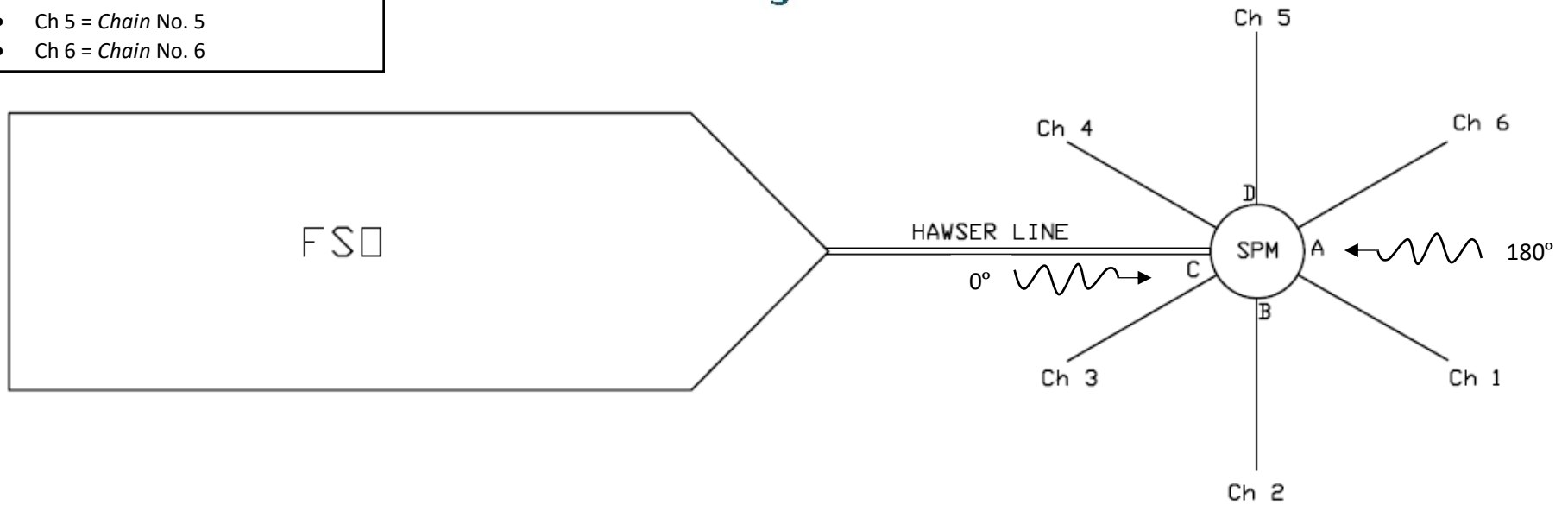
Untuk konfigurasi dan gambar bentuk detail *anchor legs* disajikan pada gambar 3.1 dan 3.2:



Gambar 3.2 *Mooring Pattern*

Keterangan :

- SPM = *Single Point Mooring*
- FSO = *Floating Storage Offloading*
- Ch 1 = *Chain No. 1*
- Ch 2 = *Chain No. 2*
- Ch 3 = *Chain No. 3*
- Ch 4 = *Chain No. 4*
- Ch 5 = *Chain No. 5*
- Ch 6 = *Chain No. 6*



Gambar 3.3 Konfigurasi *Mooring System*

3.3.6 Data Lingkungan

Berikut adalah data lingkungan dan *wave scatter diagram* untuk perairan laut Jawa disajikan pada Tabel 3.5 dan Tabel 3.6:

Tabel 3.5 Data Lingkungan Perairan Laut Jawa

Parameter	Unit	<i>1-year return period</i>	<i>10- years return period</i>	<i>100- years return period</i>
Kedalaman	M	45	45	45
Tinggi Gelombang Maksimum/Hm	M	3,2	-	6,4
Periode Gelombang Maksimum/Tm	S	6,6	-	9,4
Tinggi Gelombang Signifikan/Hs	M	1,8	-	3,6
Periode Gelombang Signifikan/Ts	S	6,3	-	8,3
Periode Puncak	S	6,3	-	9
Kecepatan Angin	m/s	12,3	-	25,7
Spektrum		JONSWAP		
Kecepatan Arus pada 0% Kedalaman	m/s	0,72	0,94	1,15
Kecepatan Arus pada 10% Kedalaman	m/s	0,62	0,78	0,93
Kecepatan Arus pada 20% Kedalaman	m/s	0,54	0,66	0,77
Kecepatan Arus pada 30% Kedalaman	m/s	0,48	0,57	0,65
Kecepatan Arus pada 40% Kedalaman	m/s	0,44	0,5	0,56
Kecepatan Arus pada 50% Kedalaman	m/s	0,41	0,46	0,5
Kecepatan Arus pada 60% Kedalaman	m/s	0,39	0,42	0,45
Kecepatan Arus pada 70% Kedalaman	m/s	0,37	0,4	0,42
Kecepatan Arus pada 80% Kedalaman	m/s	0,36	0,38	0,39
Kecepatan Arus pada 90% Kedalaman	m/s	0,35	0,37	0,38
Kecepatan Arus pada 100% Kedalaman	m/s	0,34	0,35	0,36

(Sumber : PT. Citra Mas)

Tabel 3.6 Wave Scatter Diagram untuk Laut Jawa

WAVE HEIGHT		INTERVAL OF WAVE PERIOD (seconds)														TOTAL	
INTERVAL (m)	MEDIAN (m)	0 - 1	1 - 2	2 - 3	3 - 4	4 - 5	5 - 6	6 - 7	7 - 8	8 - 9	9 - 10	10 - 11	11 - 12	12 - 13	13 - 14		14 - 15
		0.5	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5		14.5
0.00 - 0.25	0.125	0	1,293,425	2,573,005	1,250,079	614,135	339,009	207,031	136,654	98,720	70,207	53,403	41,828	33,558	27,465	22,859	6,761,378
0.25 - 0.50	0.375	0	6	867,956	776,739	254,490	90,852	38,800	19,281	10,762	6,564	4,287	2,956	2,128	1,587	1,218	2,077,626
0.50 - 0.75	0.625	0	0	9,053	94,398	50,201	18,798	7,560	3,430	1,732	955	566	356	235	162	116	187,562
0.75 - 1.00	0.875	0	0	12	7,104	10,216	4,984	1,934	743	303	134	64	33	18	11	7	25,563
1.00 - 1.25	1.125	0	0	0	325	1,882	1,188	385	107	31	10	3	1	1	0	0	3,933
1.25 - 1.50	1.375	0	0	0	9	258	202	49	9	2	0	0	0	0	0	0	529
1.50 - 1.75	1.625	0	0	0	0	24	23	4	0	0	0	0	0	0	0	0	51
1.75 - 2.00	1.875	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
2.00 - 2.25	2.125	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.25 - 2.50	2.375	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.50 - 2.75	2.625	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.75 - 3.00	2.875	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL		0	1,293,431	3,450,026	2,128,654	931,207	455,058	255,763	160,224	111,550	77,870	58,323	45,174	35,940	29,225	24,200	9,056,645

(Sumber : PT. Citra Mas)

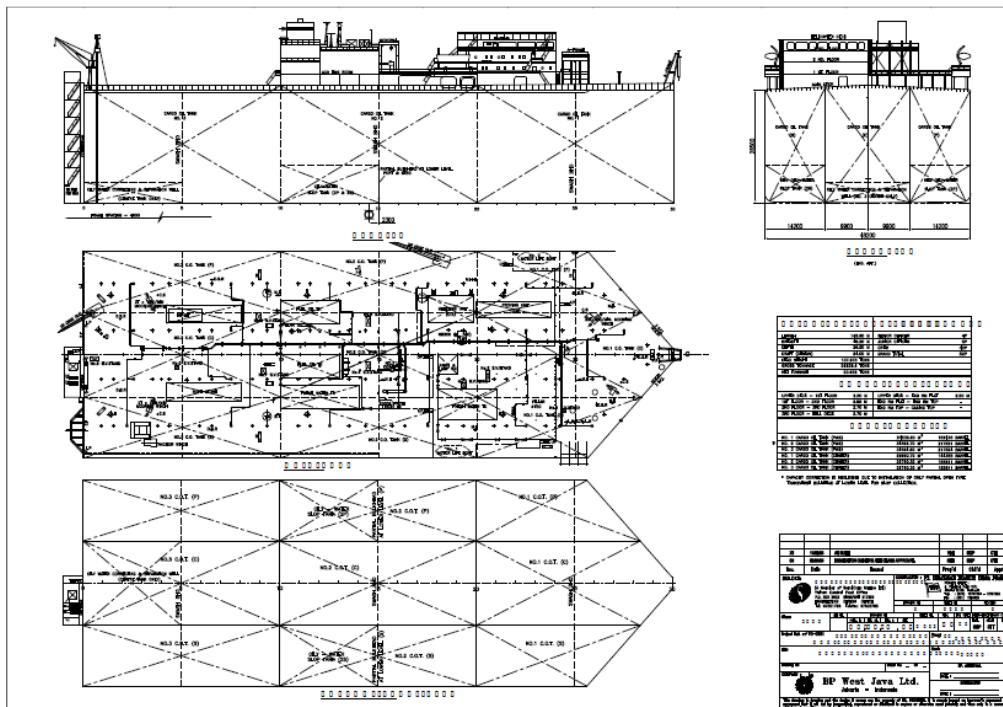
BAB 4 ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Pemodelan Struktur

4.1.1 FSO Arco Ardjuna

Pada tahap ini akan dilakukan pemodelan struktur FSO terlebih dahulu. Pemodelan FSO dilakukan dengan menggunakan bantuan *software* MAXSURF dan berdasarkan pada data *General Arrangement* dan *Principal Dimension* dari FSO yang telah diperoleh dari PT. Citra Mas Sebagai berikut :

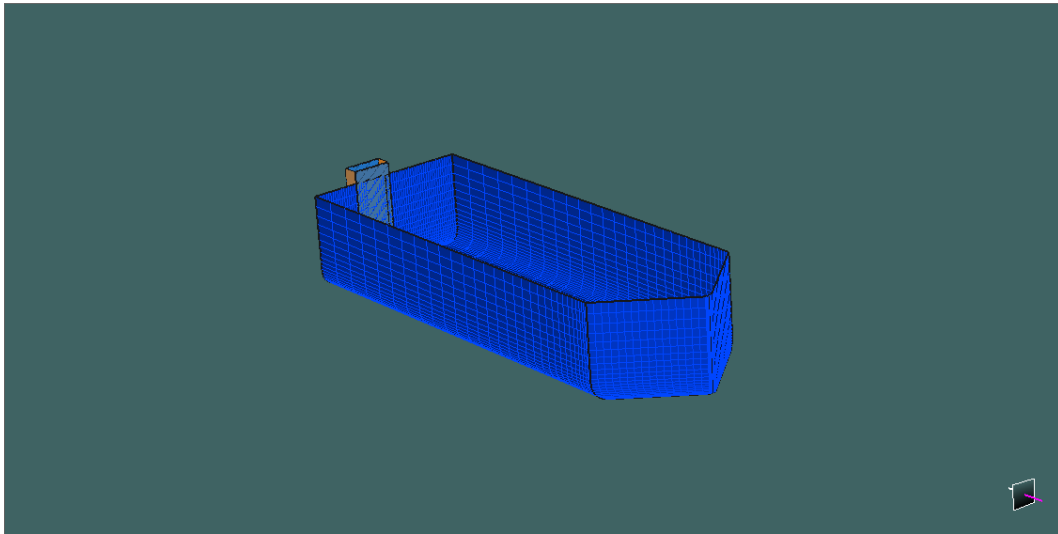
<i>Length</i> (Loa)	: 142.6 m
<i>Breadth</i> (B)	: 48.2 m
<i>Depth</i> (H)	: 26.5 m
<i>Draft</i> (T)	: 24.00 m
<i>Displacement</i> (Δ)	: 153202 Ton



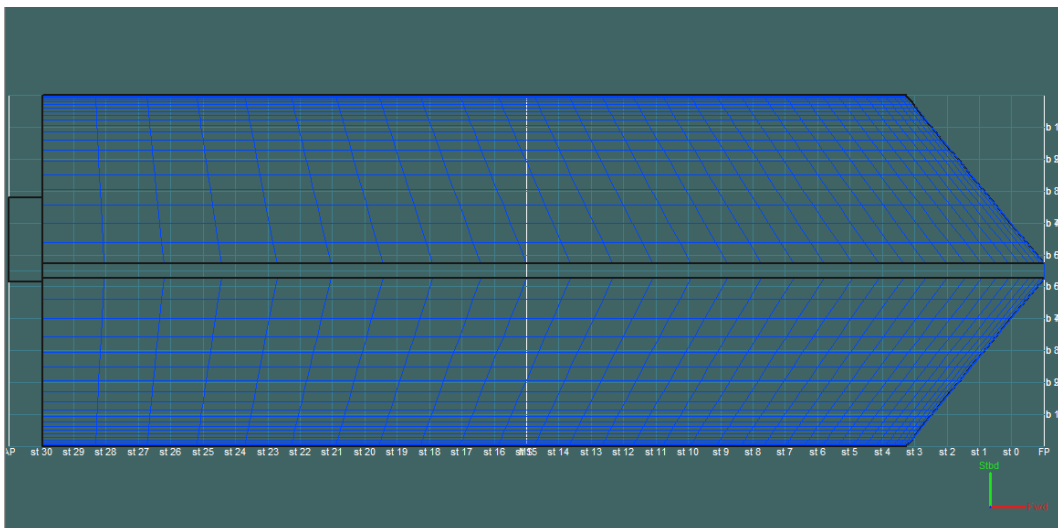
Gambar 4.1 *General Arrangement* FSO Arco Ardjuna

(Sumber: PT. Citra Mas)

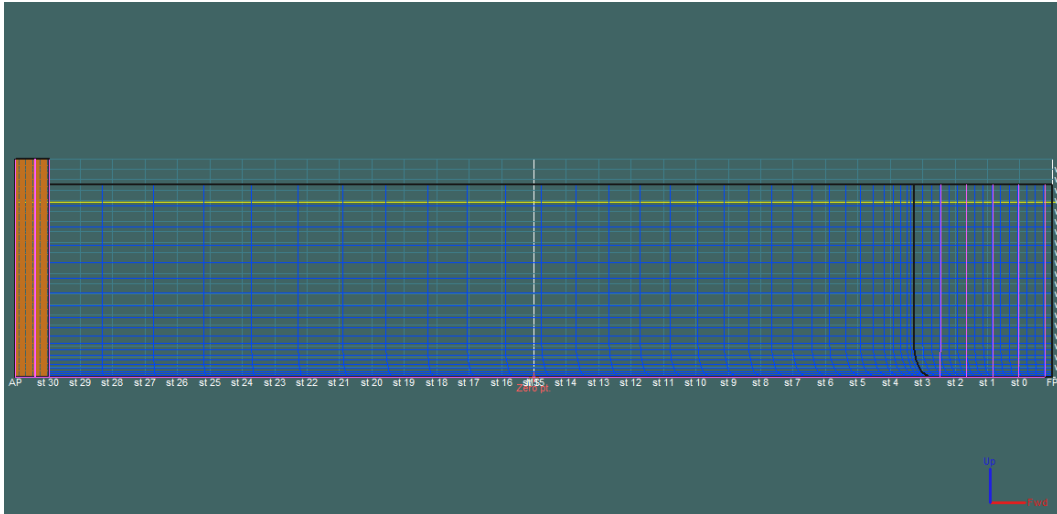
Selanjutnya untuk hasil dari pemodelan FSO Arco Ardjuna dapat dilihat pada Gambar 4.2 sampai Gambar 4.5.



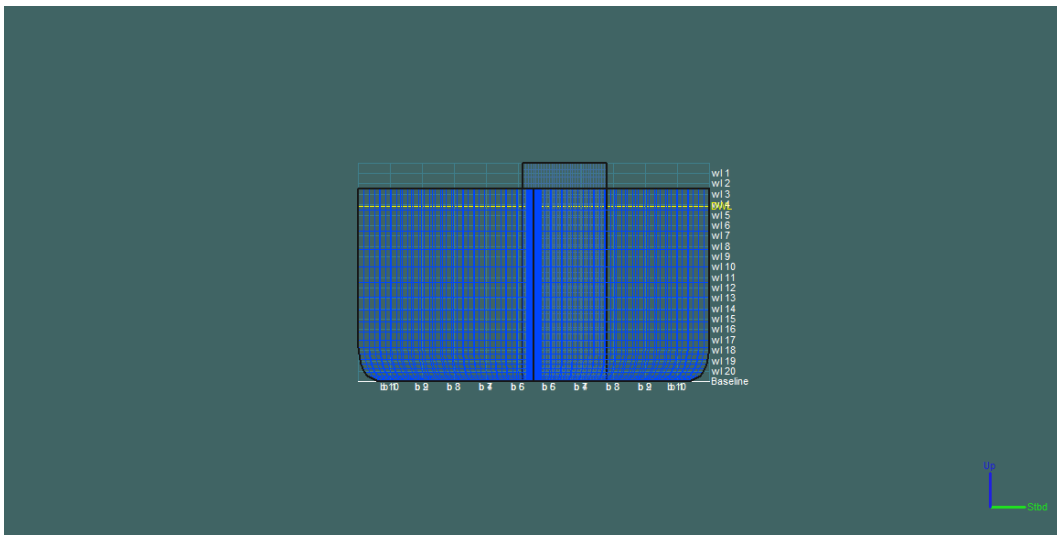
Gambar 4.2 Hasil pemodelan FSO Arco Ardjuna pada Maxsurf tampak *isometric*
(3D View)



Gambar 4.3 Hasil pemodelan FSO Arco Ardjuna pada tampak atas
(Half Breadth Plan)



Gambar 4.4 Hasil pemodelan FSO Arco Ardjuna pada tampak samping
(*Sheer Plan*)



Gambar 4.5 Hasil pemodelan FSO Arco Ardjuna pada tampak samping
(*Body Plan*)

4.1.2 Single Point Mooring

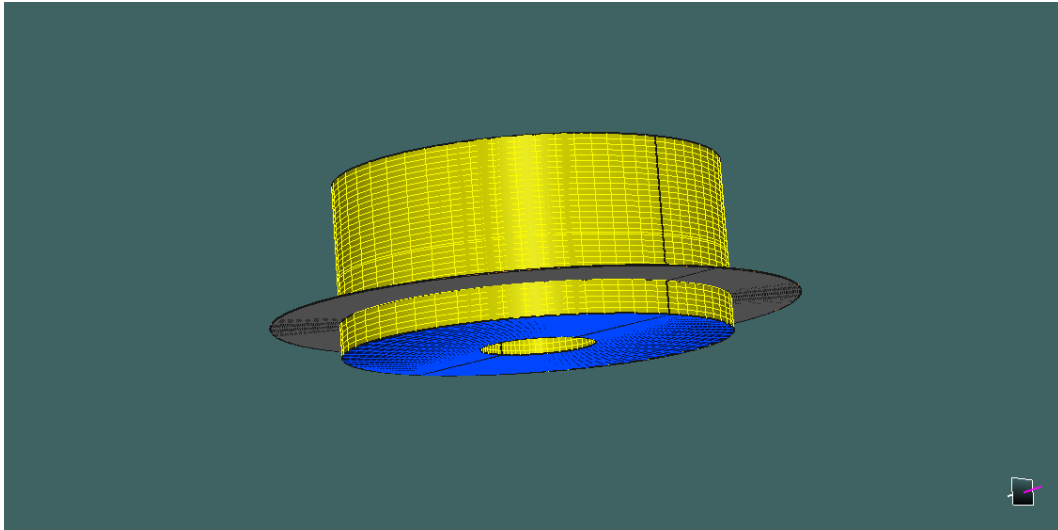
Single Point Mooring (SPM) yang digunakan adalah tipe *CALM buoy*. Pada pemodelan SPM ini juga menggunakan bantuan *software* MAXSURF dengan berdasar pada data *main dimension* yang didapat dari PT. Citra Mas sebagai berikut.

Tabel 4.1 *Main dimension* SPM

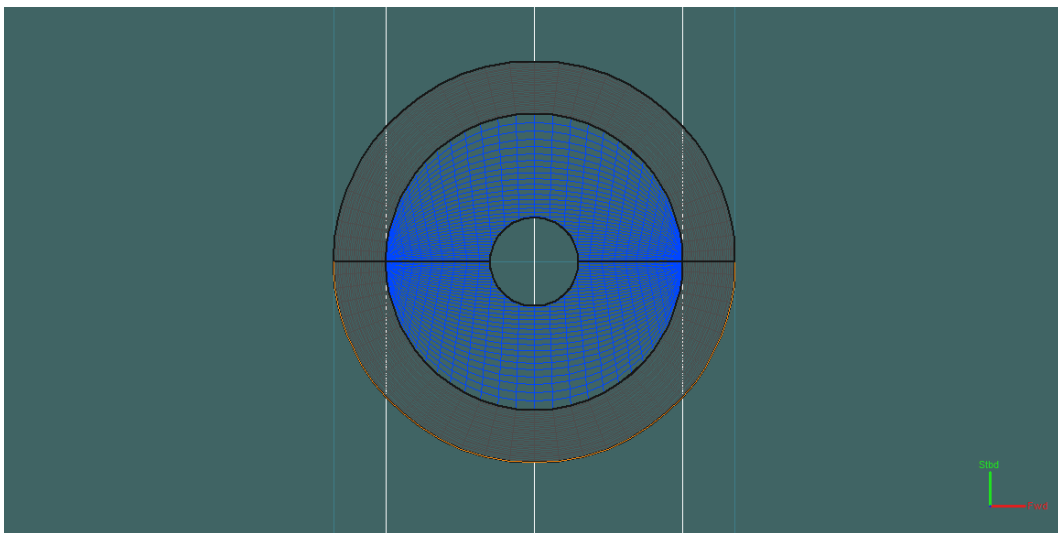
Designation	Unit	Data
<i>Shell Outer Diameter</i>	m	12
<i>Centre Wall Diameter</i>	m	3.57
<i>Skirt Outer Diameter</i>	m	16.26
<i>Buoy Body Height</i>	m	5.3
<i>Skirt Thickness</i>	mm	12
<i>Skirt Heigh Baseline</i>	m	1
<i>Buoy Installed Draft</i>	m	2.38
<i>Centre of Gravity (KG)</i>	m	3.42

(Sumber : PT. Citra Mas)

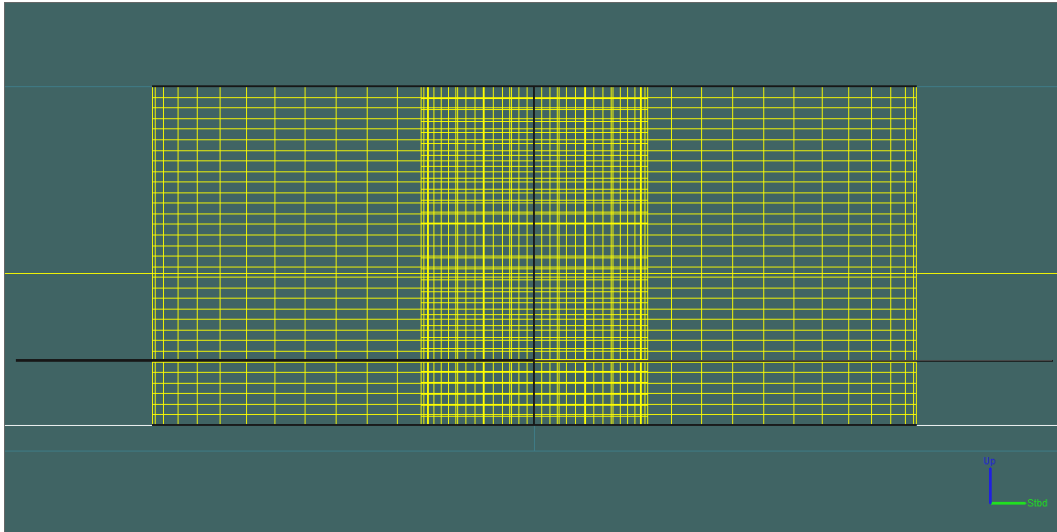
Selanjutnya untuk hasil pemodelan dari SPM dapat dilihat seperti terlihat pada Gambar 4.6 sampai Gambar 4.8



Gambar 4.6 Hasil pemodelan SPM pada Maxsurf tampak *isometric*
(3D View)



Gambar 4.7 Hasil pemodelan SPM pada Maxsurf tampak atas
(Half Breadth Plan)



Gambar 4.8 Hasil pemodelan SPM pada Maxsurf tampak samping
(*Sheer Plan*)

4.2 Validasi Hidrostatik

Validasi hidrostatik dilakukan dengan membandingkan data hidrostatik dari struktur yang telah dimodelkan pada MAXSURF dengan data hidrostatik dari struktur yang sebenarnya . Toleransi atau faktor *error* dari nilai validasi yang diijinkan adalah kurang dari 2%, mengacu pada ketentuan ABS MODU (2012).

4.2.1 FSO Arco Ardjuna

Berdasarkan dari data hidrostatik FSO AA yang didapat dari PT. Citra Mas, validasi hidrostatik dari model FSO AA akan dilakukan pada kondisi *full load* ($T=24\text{m}$) dan *light ship* ($T=2.5\text{m}$). Hasil validasi hidrostatik FSO AA dapat dilihat pada tabel 4.2 dan 4.3

Tabel 4.2 Validasi Hidrostatik FSO Arco Ardjuna pada kondisi *full load*

No	Data	Unit	FSO	MAXSURF	Koreksi	Status
1	Length, Loa	M	142,6	142,6	0,00%	Memenuhi
2	Breadth, B	M	48,2	48,2	0,00%	Memenuhi
3	Depth, D	M	26,5	26,5	0,00%	Memenuhi
4	Displacement	Tonne	153202	153492	-0,19%	Memenuhi
5	Draft to Baseline	M	24	24	0,00%	Memenuhi
6	WSA	m ²	12813	13059,259	-1,92%	Memenuhi

7	Max. Cross Sect. Area	m ²	1150,63	1150,797	-0,01%	Memenuhi
8	Waterplane area	m ²	6239	6269,527	-0,49%	Memenuhi
9	Cp		0,91	0,913	-0,33%	Memenuhi
10	Cb		0,9	0,908	-0,89%	Memenuhi
11	Cm		0,99	0,995	-0,51%	Memenuhi
12	Cwp		0,91	0,912	-0,22%	Memenuhi
13	LCB from zero pt.	M	-2,78	-2,762	0,65%	Memenuhi
14	LCF from zero pt.	M	-2,79	-2,782	0,29%	Memenuhi
15	KB	M	12,02	12,053	-0,27%	Memenuhi
16	KMt	M	19,73	19,793	-0,32%	Memenuhi
17	KMI	M	71,3	71,859	-0,78%	Memenuhi

Tabel 4.3 Validasi Hidrostatik FSO Arco Ardjuna kondisi *light load*

No	Data	Unit	FSO	MAXSURF	Koreksi	Status
1	Length, Loa	M	142,6	142,6	0,00%	Memenuhi
2	Breadth, B	M	48,2	48,2	0,00%	Memenuhi
3	Depth, D	M	26,5	26,5	0,00%	Memenuhi
4	Displacement	Tonne	15529	15388	0,91%	Memenuhi
5	Draft to Baseline	M	2,5	2,5	0,00%	Memenuhi
6	WSA	m ²	6681	6631,036	0,75%	Memenuhi
7	Max. Cross Sect. Area	m ²	114,34	116,413	-1,81%	Memenuhi
8	Waterplane area	m ²	6239	6194,897	0,71%	memenuhi
9	Cp		0,91	0,916	-0,66%	memenuhi
10	Cb		0,87	0,885	-1,72%	Memenuhi
11	Cm		0,959	0,967	-0,83%	Memenuhi
12	Cwp		0,91	0,913	-0,33%	Memenuhi
13	KB	M	1,26	1,269	-0,71%	Memenuhi
14	KMI	M	590,8	591,78	-0,17%	Memenuhi

Berdasarkan hasil pada table 4.2 dan 4.3 maka sesuai yang disyaratkan oleh *class* maka validasi hidrostatik dari model FSO AA sudah memenuhi.

4.2.2 Single Point Mooring

Untuk model SPM juga dilakukan hal yang sama yaitu melakukan validasi hidrostatik antara model Maxsurf dan data sebenarnya. Untuk hasil dari validasi hidrostatik dari SPM akan disajikan dalam tabel 4.4

Tabel 4.4 Validasi Hidrostatik *Single Point Mooring* (SPM)

No	Designation	Unit	Data	MAXSURF	Correction	Status
1	<i>Shell Outer Diameter</i>	M	12	12		memenuhi
2	<i>Centre Wall Diameter</i>	M	3.57	3.57		memenuhi
3	<i>Skirt Outer Diameter</i>	M	16.26	16.26		memenuhi
4	<i>Buoy Body Height</i>	M	5.3	5.3		memenuhi
5	<i>Skirt Thickness</i>	Mm	12	12		memenuhi
6	<i>Skirt Height Baseline</i>	M	1	1		memenuhi
7	<i>Buoy Installed Draft</i>	M	2.38	2.38		memenuhi
8	<i>Centre of Gravity (KG)</i>	M	3.42	3.42		memenuhi
9	<i>Displacement</i>	Ton	255.34	252.6	-1.07%	memenuhi

Berdasarkan hasil dari table 4.4 maka model dari SPM pun juga telah memenuhi persyaratan dari *class*.

4.3 Analisis Gerakan Struktur pada Kondisi Terapung Bebas (Free Floating)

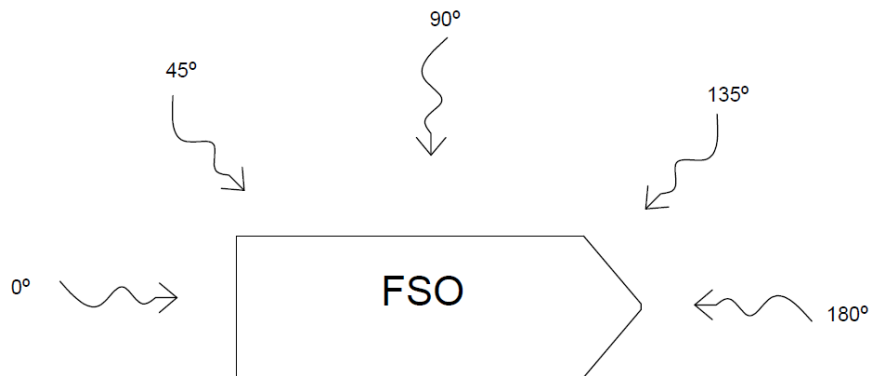
Sesuai dengan yang dijelaskan pada bab-bab sebelumnya bahwa perilaku gerak bangunan apung merupakan hal yang sangat penting untuk dianalisis. Analisis gerakan *free floating* ini akan dilakukan pada struktur FSO dan SPM. Hasil dari analisis gerakan ini akan disajikan dalam bentuk fungsi transfer dari nilai amplitudo gelombang dan amplitude gerakan kapal, yang biasanya disebut sebagai *Response Amplitude Operator* (RAO). Gerakan struktur yang akan dianalisis adalah pada 6 mode gerakan yaitu *Surge, Sway, Heave, Roll, Pitch* dan *Yaw*.

4.3.1 RAO FSO Arco Ardjuna

Dikarenakan umur FSO yang sudah termasuk tua, maka kemampuan untuk mengangkut muatan pun juga ikut berkurang. Pada kondisi saat ini FSO AA hanya mampu beroperasi dengan muatan maksimum sebanyak 80% (T=20m). Berdasarkan kondisi terkini dari FSO dan juga berdasarkan dari data yang didapat dari PT. Citra Mas maka RAO pada FSO akan dihitung pada kondisi *full load* (T=20m) dan *light load* (T=6.91m). Dan untuk arah pembebanannya adalah 0, 45, 90, 135 dan 180. Analisis gerakan pada FSO akan dilakukan dengan *software* MOSES. Data-data yang akan digunakan untuk analisis gerakan FSO akan disajikan pada Tabel 4.5 dan untuk arah pembebanan untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 4.9.

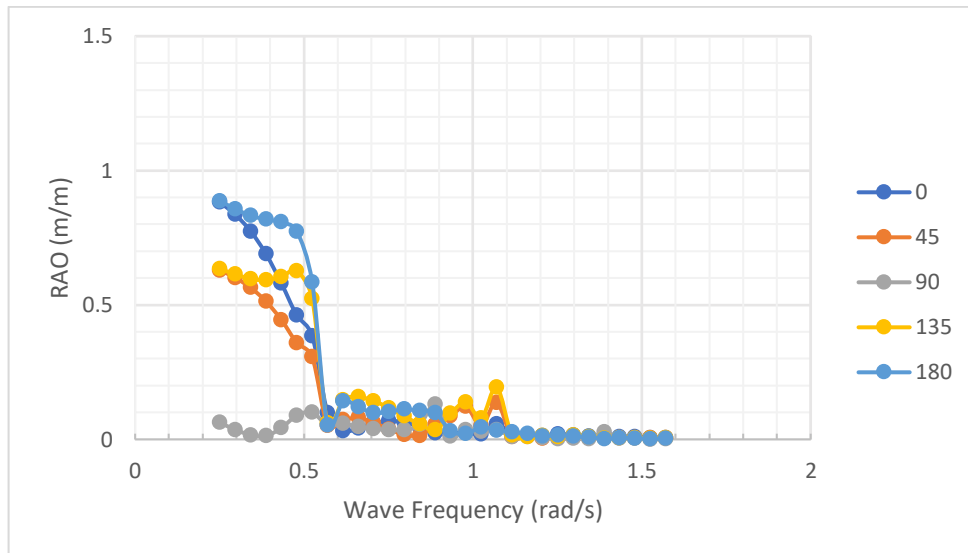
Tabel 4.5 Data pada FSO untuk analisis gerakan

Designation	Unit	FSO Full Load	FSO Light Load
Draught	m	20	6.91
Displacement	ton	127645	43725
VCG/KG	m	12.275	11.819
Kxx	m	12.055	13.208
Kyy	m	35.092	28.334
Kzz	m	36.999	30.05



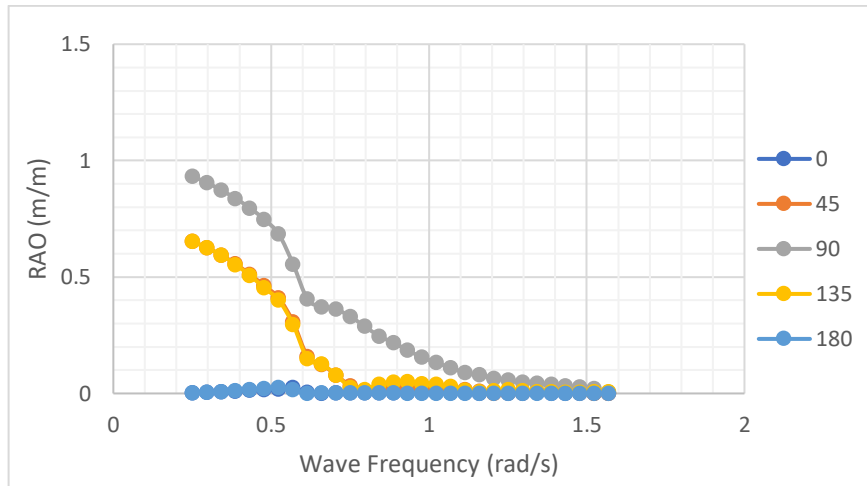
Gambar 4.9 Arah Pembebanan untuk analisis gerakan FSO pada kondisi *free floating*

Sesuai dengan yang dijelaskan sebelumnya, respon gerakan akan disajikan dalam bentuk RAO. Hasil RAO *free floating* FSO pada kondisi *Full Load* untuk 6 derajat kebebasan dapat dilihat Pada Gambar 4.10 sampai Gambar 4.15



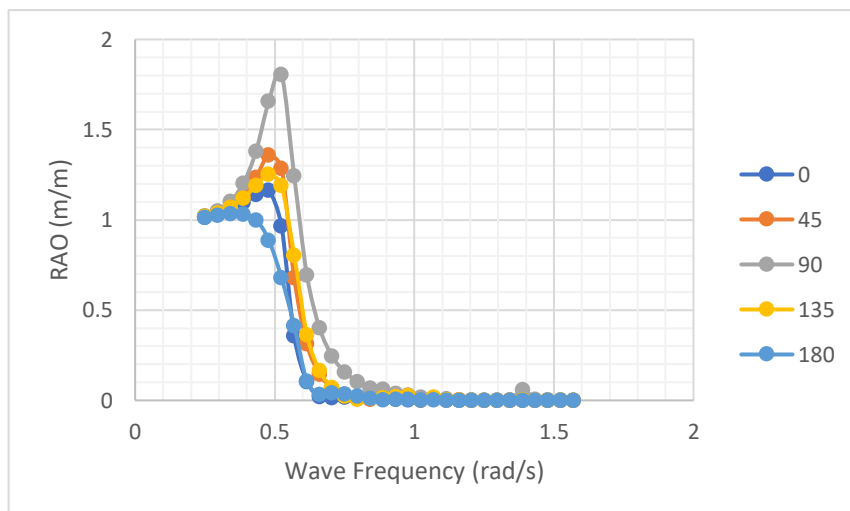
Gambar 4.10 RAO Gerakan *Surge* FSO *Full Load* pada Kondisi *Free Floating*

Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa nilai RAO gerakan *Surge* menghasilkan nilai yang ekstrim pada frekuensi sekitar 0.25 rad/s untuk semua arah pembebanan. Dan untuk nilai RAO yang paling maksimum untuk gerakan *Surge* adalah sebesar 0.887 (m/m) yang terjadi pada frekuensi 0.2513 rad/s dan pada arah pembebanan 180 derajat.



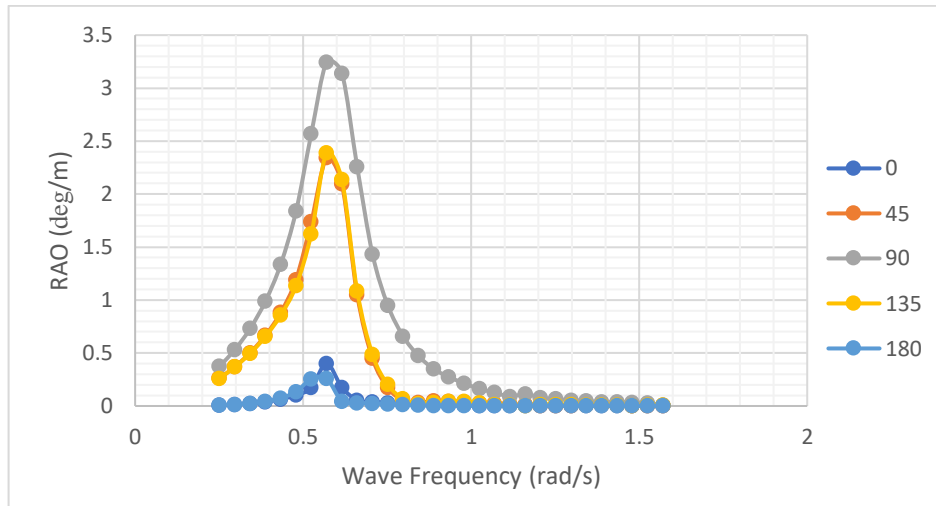
Gambar 4.11 RAO Gerakan *Sway* FSO *Full Load* pada Kondisi *Free Floating*

Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa nilai RAO *Sway* menghasilkan nilai yang ekstrim pada frekuensi sekitar 0.25 rad/s untuk semua arah pembebanan. Dan untuk nilai RAO yang paling maksimum untuk gerakan *Sway* adalah sebesar 0.932 (m/m) yang terjadi pada frekuensi 0.2513 rad/s dan pada arah pembebanan 90 derajat.



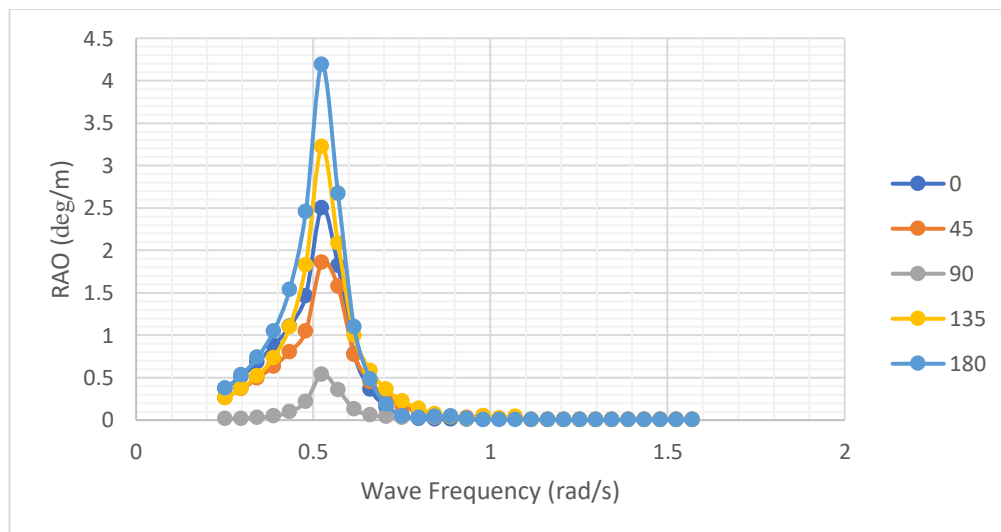
Gambar 4.12 RAO Gerakan *Heave* FSO *Full Load* pada Kondisi *Free Floating*

Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa nilai RAO *Heave* menghasilkan nilai yang ekstrim pada frekuensi sekitar 0.5 rad/s untuk semua arah pembebanan. Dan untuk nilai RAO yang paling maksimum untuk gerakan *Heave* adalah sebesar 1.81 (m/m) yang terjadi pada frekuensi 0.52 rad/s dan pada arah pembebanan 90 derajat.



Gambar 4.13 RAO Gerakan *Roll* FSO *Full Load* pada Kondisi *Free Floating*

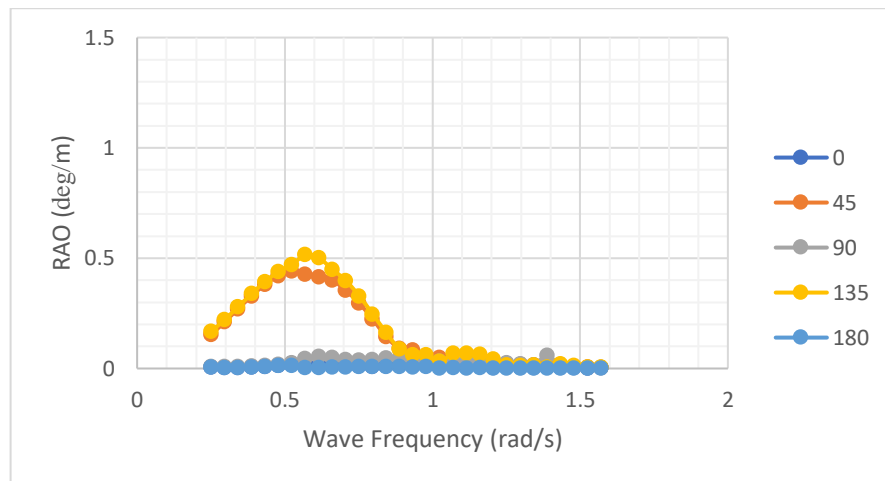
Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa nilai RAO *Roll* menghasilkan nilai yang ekstrim pada frekuensi sekitar 0.6 rad/s untuk semua arah pembebanan. Dan untuk nilai RAO yang paling maksimum untuk gerakan *Roll* adalah sebesar 3.25 (deg/m) yang terjadi pada frekuensi 0.57 rad/s dan pada arah pembebanan 90 derajat.



Gambar 4.14 RAO Gerakan *Pitch* FSO *Full Load* pada Kondisi *Free Floating*

Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa nilai RAO *Pitch* menghasilkan nilai yang ekstrim pada frekuensi sekitar 0.5 rad/s untuk semua arah pembebanan. Dan untuk

nilai RAO yang paling maksimum untuk gerakan *Pitch* adalah sebesar 4.19 (deg/m) yang terjadi pada frekuensi 0.52 rad/s dan pada arah pembebanan 180 derajat.



Gambar 4.15 RAO Gerakan *Yaw* FSO *Full Load* pada Kondisi *Free Floating*

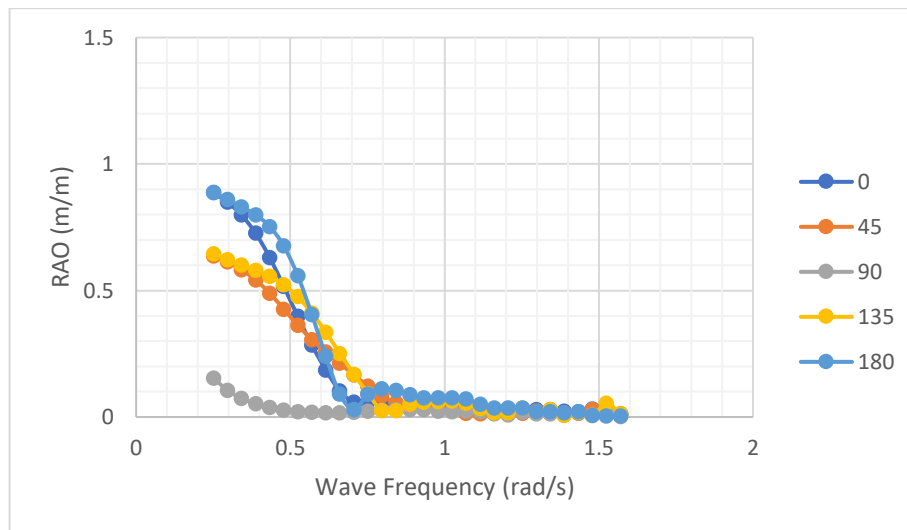
Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa nilai RAO *Yaw* menghasilkan nilai yang ekstrim pada frekuensi sekitar 0.5 rad/s untuk semua arah pembebanan. Dan untuk nilai RAO yang paling maksimum untuk gerakan *Yaw* adalah sebesar 0.52 (deg/m) yang terjadi pada frekuensi 0.57 rad/s dan pada arah pembebanan 135 derajat.

Rekapitulasi dari nilai Maksimum RAO FSO *Full Load* pada kondisi *Free Floating* untuk masing-masing gerakan dan untuk masing-masing arah dapat dilihat di Tabel 4.6 di bawah ini.

Tabel 4.6 Nilai Maksimum RAO FSO *Full Load* pada Kondisi *Free Floating*

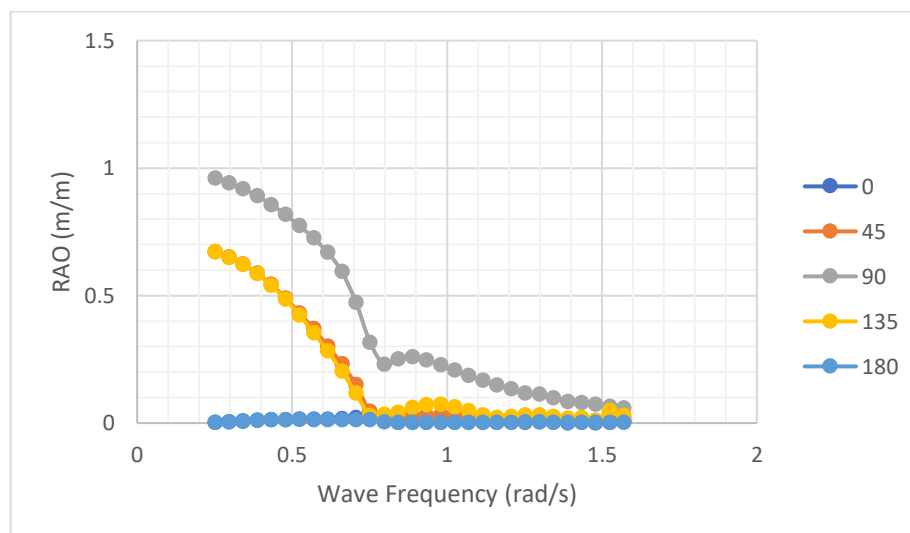
Heading (deg)	Surge (m/m)	Sway (m/m)	Heave (m/m)	Roll (deg/m)	Pitch (deg/m)	Yaw (deg/m)
0	0.882	0.025	1.164	0.4	2.499	0.025
45	0.629	0.626	1.36	2.343	1.858	0.441
90	0.13	0.905	1.805	3.245	0.54	0.059
135	0.634	0.626	1.253	2.388	3.22	0.516
180	0.887	0.026	1.034	0.259	4.188	0.015
RAO Max	0.887	0.905	1.805	3.245	4.188	0.516

Sedangkan untuk hasil RAO *free floating* FSO pada kondisi *Light Load* untuk 6 derajat kebebasan dapat dilihat Pada Gambar 4.16 sampai Gambar 4.21



Gambar 4.16 RAO Gerakan *Surge* FSO *Light Load* pada Kondisi *Free Floating*

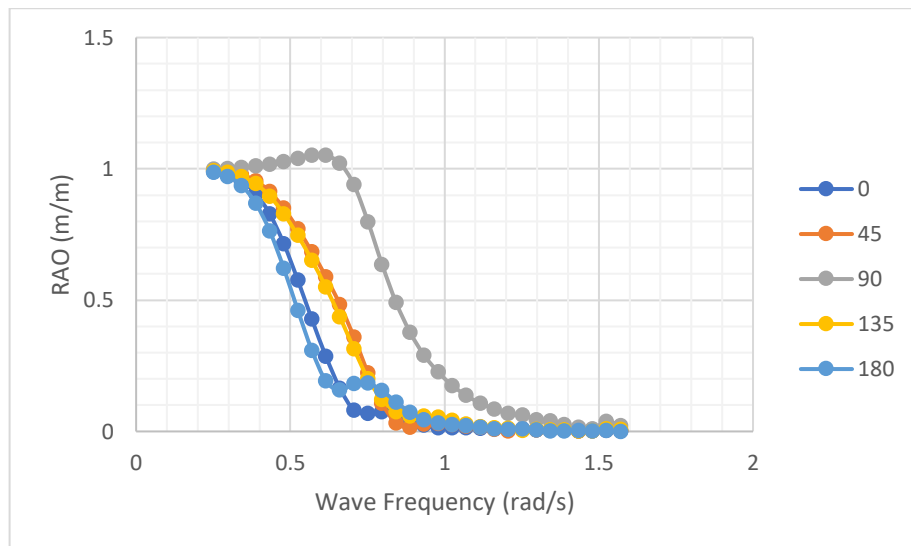
Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa nilai RAO *Surge* menghasilkan nilai yang ekstrim pada frekuensi sekitar 0.25 rad/s untuk semua arah pembebanan. Dan untuk nilai RAO yang paling maksimum untuk gerakan *Surge* adalah sebesar 0.88 (m/m) yang terjadi pada frekuensi 0.25 rad/s dan pada arah pembebanan 180 derajat.



Gambar 4.17 RAO Gerakan *Sway* FSO *Light Load* pada Kondisi *Free Floating*

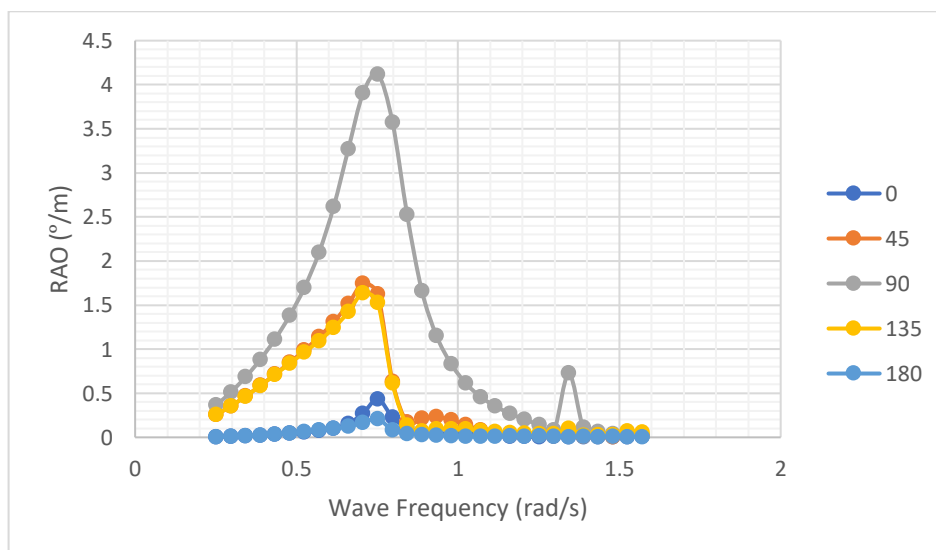
Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa nilai RAO *Sway* menghasilkan nilai yang ekstrim pada frekuensi sekitar 0.25 rad/s untuk semua arah pembebanan. Dan untuk

nilai RAO yang paling maksimum untuk gerakan *Heave* adalah sebesar 0.96 (m/m) yang terjadi pada frekuensi 0.251 rad/s dan pada arah pembebanan 90 derajat.



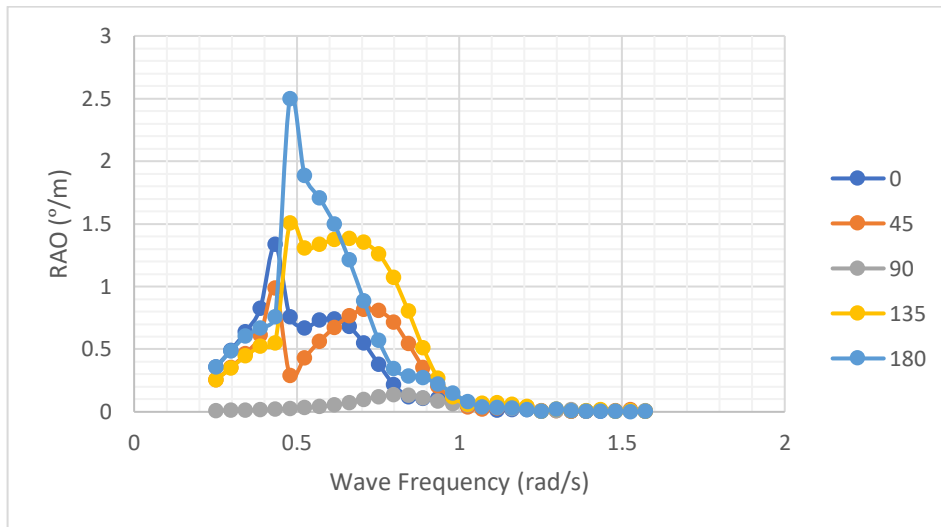
Gambar 4.18 RAO Gerakan *Heave* FSO *Light Load* pada Kondisi *Free Floating*

Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa nilai RAO *Heave* menghasilkan nilai yang ekstrim pada frekuensi sekitar 0.25 rad/s untuk semua arah pembebanan. Dan untuk nilai RAO yang paling maksimum untuk gerakan *Heave* adalah sebesar 1.05 (m/m) yang terjadi pada frekuensi 0.62 rad/s dan pada arah pembebanan 90 derajat.



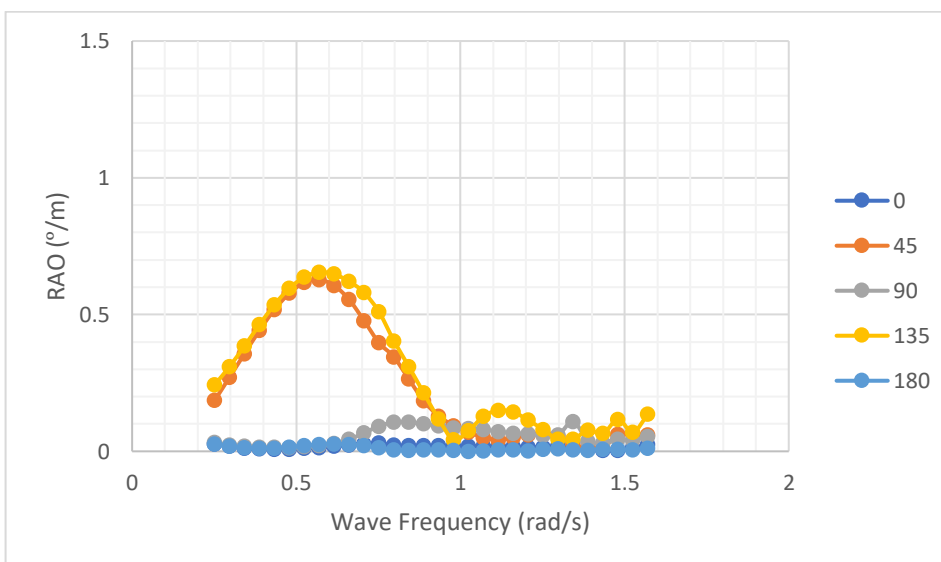
Gambar 4.19 RAO Gerakan *Roll* FSO *Light Load* pada Kondisi *Free Floating*

Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa nilai RAO *Roll* menghasilkan nilai yang ekstrim pada frekuensi sekitar 0.75 rad/s untuk semua arah pembebanan. Dan untuk nilai RAO yang paling maksimum untuk gerakan *Roll* adalah sebesar 4.12 (deg/m) yang terjadi pada frekuensi 0.75 rad/s dan pada arah pembebanan 90 derajat.



Gambar 4.20 RAO Gerakan *Pitch* FSO *Light Load* pada Kondisi *Free Floating*

Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa nilai RAO *Pitch* menghasilkan nilai yang ekstrim pada frekuensi sekitar 0.5 rad/s untuk semua arah pembebanan. Dan untuk nilai RAO yang paling maksimum untuk gerakan *Pitch* adalah sebesar 2.5 (deg/m) yang terjadi pada frekuensi 0.48 rad/s dan pada arah pembebanan 180 derajat.



Gambar 4.21 RAO Gerakan *Yaw* FSO *Light Load* pada Kondisi *Free Floating*

Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa nilai RAO *Yaw* menghasilkan nilai yang ekstrim pada frekuensi sekitar 0.5 rad/s untuk semua arah pembebanan. Dan untuk nilai RAO yang paling maksimum untuk gerakan *Yaw* adalah sebesar 0.65 (deg/m) yang terjadi pada frekuensi 0.57 rad/s dan pada arah pembebanan 135 derajat. Rekapitulasi dari nilai Maksimum RAO FSO *Full Load* pada kondisi *Free Floating* untuk masing-masing gerakan dan untuk masing-masing arah dapat dilihat di Tabel 4.7 di bawah ini.

Tabel 4.7 Nilai Maksimum RAO FSO *Light Load* pada Kondisi *Free Floating*

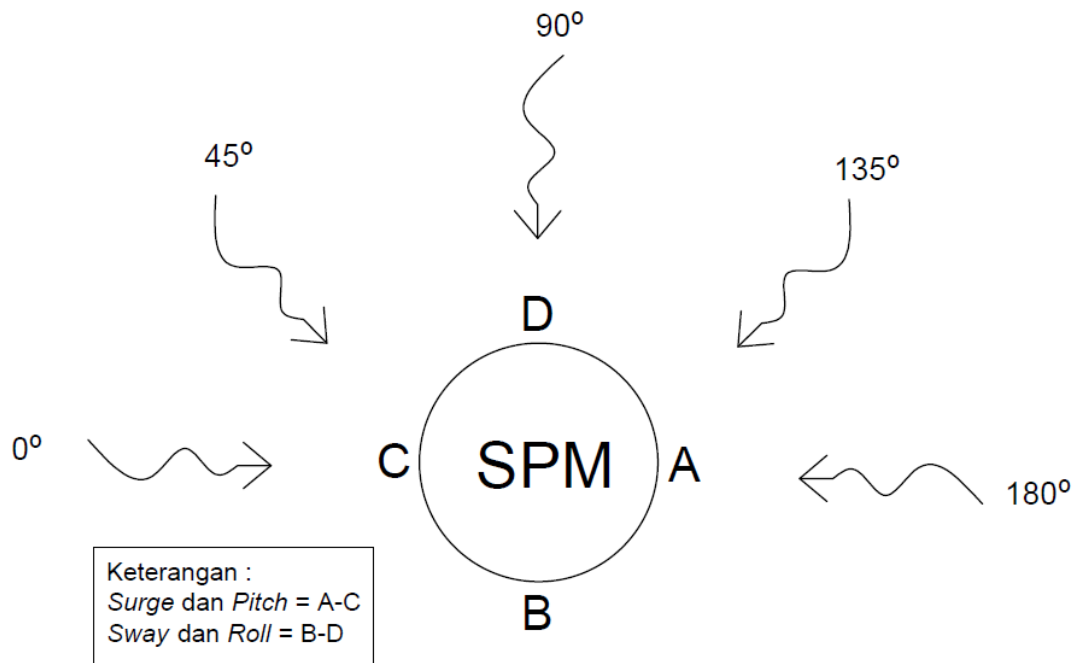
Heading (deg)	Surge (m/m)	Sway (m/m)	Heave (m/m)	Roll (deg/m) Roll	Pitch (deg/m) Pitch	Yaw (deg/m) Yaw
0	0.886	0.022	0.988	0.434	1.335	0.03
45	0.637	0.671	0.994	1.748	0.987	0.628
90	0.153	0.959	1.051	4.119	0.136	0.109
135	0.645	0.959	1.051	1.639	1.505	0.655
180	0.888	0.014	0.987	0.209	2.5	0.027
RAO Max	0.888	0.959	1.051	4.119	2.5	0.655

4.3.2 RAO *Single Point Mooring*

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, bahwa analisis gerakan juga akan dilakukan pada struktur SPM, untuk mengetahui perilaku gerakannya. Analisis yang akan dilakukan pada SPM juga sama seperti pada yang dilakukan pada FSO sebelumnya. Yaitu dengan menghasilkan RAO pada kondisi *free floating*. RAO pada SPM akan dihitung pada ketinggian sarat air 2.38 meter, seperti pada saat melakukan validasi hidrostatis. Dan untuk arah pembebanan yang digunakan adalah 0, 45, 90, 135 dan 180. Perhitungan RAO pada SPM akan dilakukan menggunakan *software* MAXSURF. Data-data yang akan digunakan untuk analisis gerakan SPM dapat dilihat pada Tabel 4.8 dan juga untuk arah pembebanan yang akan dianalisis pada SPM kondisi *free floating* akan dijelaskan pada Gambar 4.22.

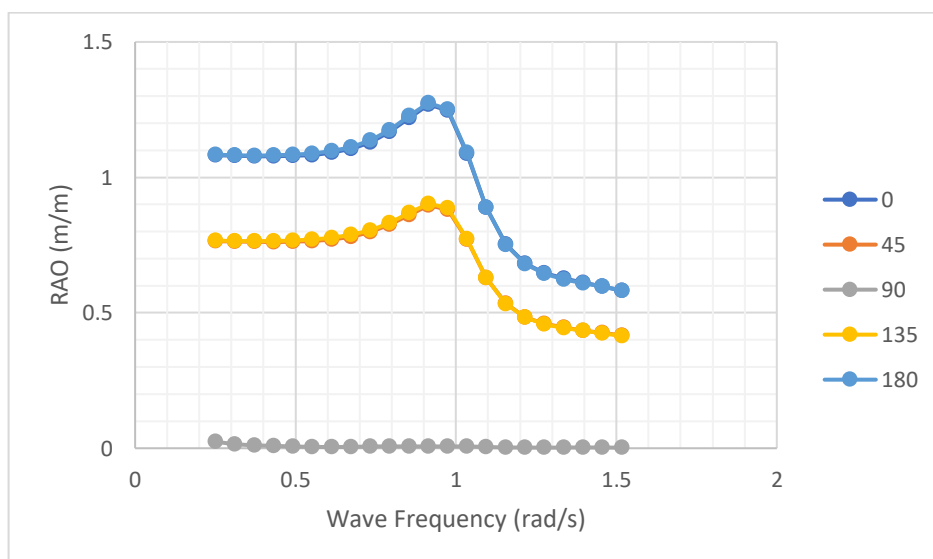
Tabel 4.8 Data pada SPM untuk analisis gerakan

Designation	Unit	Value
Draught	M	2.38
Displacement	Ton	252.6
VCG/KG	M	3.42
Kxx	M	7.63
Kyy	M	7.63
Kzz	M	10.61



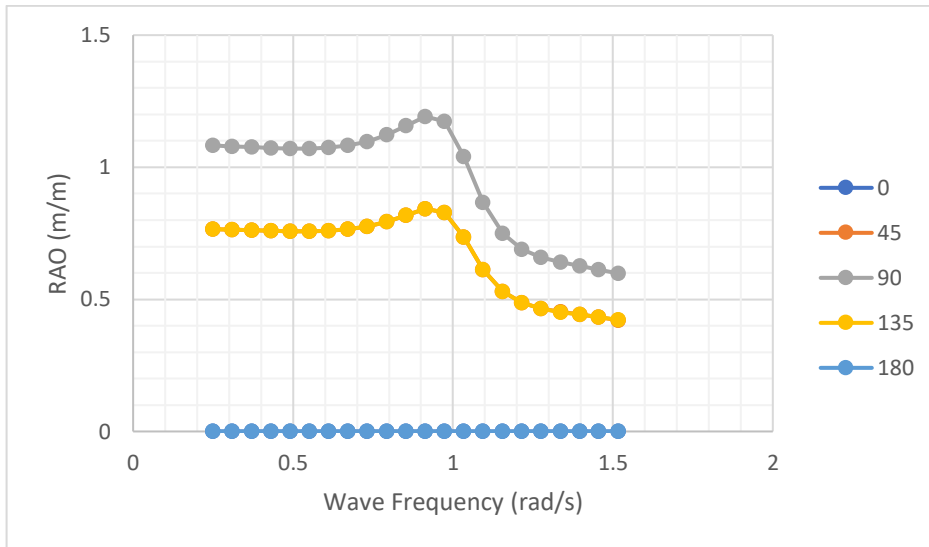
Gambar 4.22 Arah Pembebanan untuk analisis gerakan SPM pada kondisi *Free Floating*

Sesuai dengan yang dijelaskan sebelumnya, respon gerakan akan disajikan dalam bentuk RAO. Hasil RAO SPM pada kondisi *free floating* untuk 6 derajat kebebasan dapat dilihat Pada Gambar 4.23 sampai Gambar 4.28.



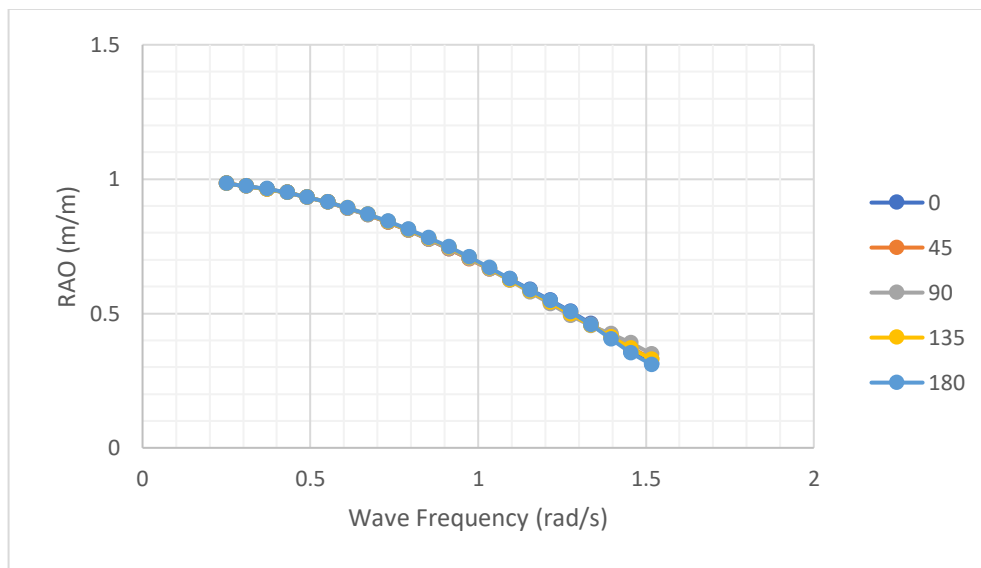
Gambar 4.23 RAO Gerakan *Surge* SPM pada Kondisi *Free Floating*

Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa nilai RAO *Surge* menghasilkan nilai yang ekstrim pada frekuensi sekitar 0.9 rad/s untuk semua arah pembebanan. Dan untuk nilai RAO yang paling maksimum untuk gerakan *Heave* adalah sebesar 1.28 (m/m) yang terjadi pada frekuensi 0.91 rad/s dan pada arah pembebanan 180 derajat.



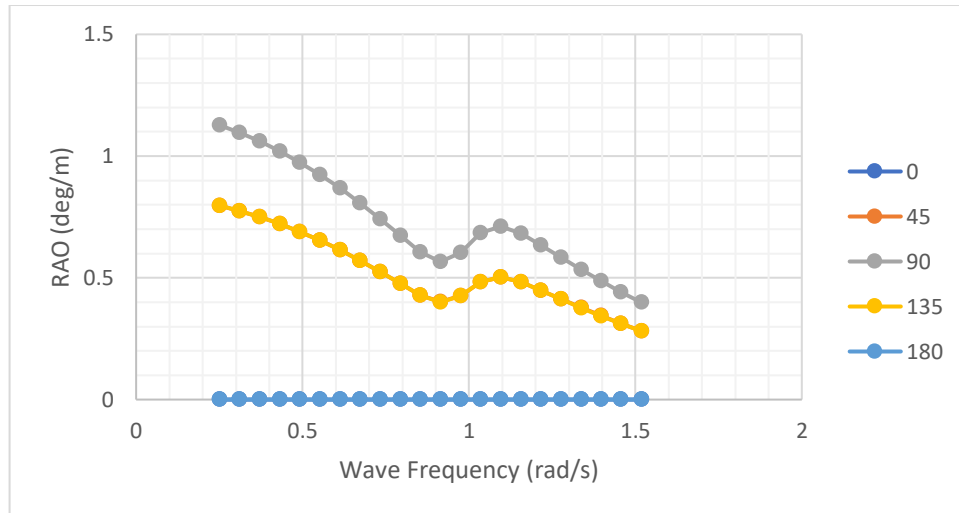
Gambar 4.24 RAO Gerakan *Sway* SPM pada Kondisi *Free Floating*

Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa nilai RAO *Sway* menghasilkan nilai yang ekstrim pada frekuensi sekitar 0.9 rad/s untuk semua arah pembebanan. Dan untuk nilai RAO yang paling maksimum untuk gerakan *Sway* adalah sebesar 1.19 (m/m) yang terjadi pada frekuensi 0.91 rad/s dan pada arah pembebanan 90 derajat.



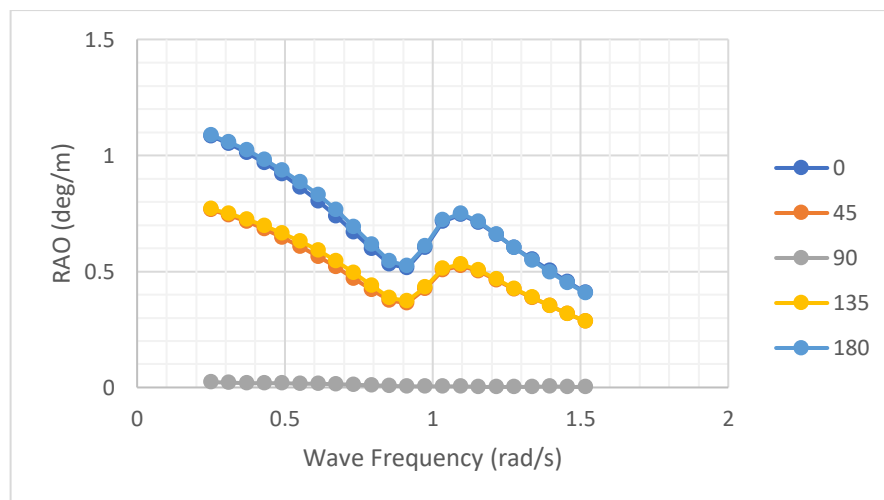
Gambar 4.25 RAO Gerakan *Heave* SPM pada Kondisi *Free Floating*

Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa nilai RAO *Heave* menghasilkan nilai yang ekstrim pada frekuensi sekitar 0.25 rad/s untuk semua arah pembebanan. Dan untuk nilai RAO yang paling maksimum untuk gerakan *Heave* adalah sebesar 0.98 (m/m) yang terjadi pada frekuensi 0.25 rad/s pada semua arah.



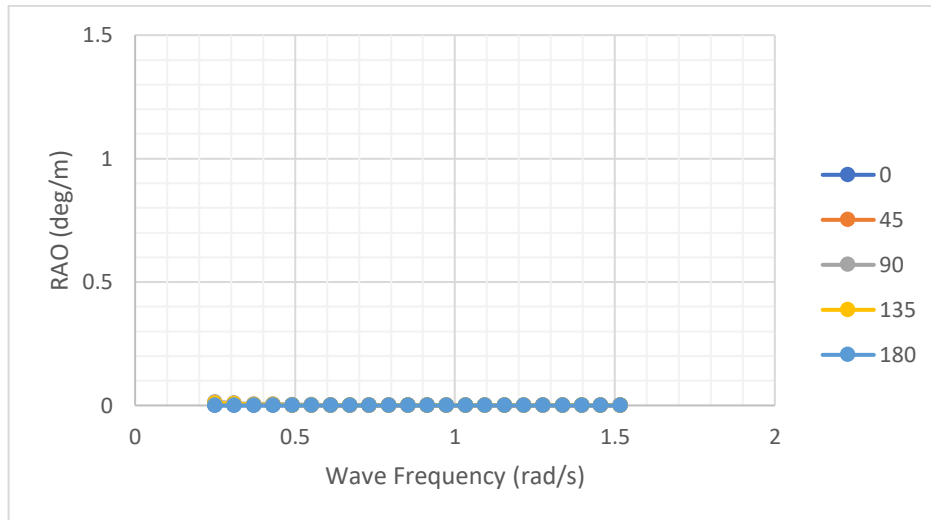
Gambar 4.26 RAO Gerakan *Roll* SPM pada Kondisi *Free Floating*

Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa nilai RAO *Roll* menghasilkan nilai yang ekstrim pada frekuensi sekitar 0.25 rad/s untuk semua arah pembebanan. Dan untuk nilai RAO yang paling maksimum untuk gerakan *Roll* adalah sebesar 1.13 (deg/m) yang terjadi pada frekuensi 0.25 rad/s dan pada arah pembebanan 90 derajat.



Gambar 4.27 RAO Gerakan *Pitch* SPM pada Kondisi *Free Floating*

Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa nilai RAO *Pitch* menghasilkan nilai yang ekstrim pada frekuensi sekitar 0.25 rad/s untuk semua arah pembebanan. Dan untuk nilai RAO yang paling maksimum untuk gerakan *Pitch* adalah sebesar 1.09 (deg/m) yang terjadi pada frekuensi 0.25 rad/s dan pada arah pembebanan 180 derajat.



Gambar 4.28 RAO Gerakan *Yaw* SPM pada Kondisi *Free Floating*

Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa nilai RAO *Yaw* menghasilkan nilai yang ekstrim pada frekuensi sekitar 0.25 rad/s untuk semua arah pembebanan. Dan untuk nilai RAO yang paling maksimum untuk gerakan *Yaw* adalah sebesar 0.015 (deg/m) yang terjadi pada frekuensi 0.25 rad/s dan pada arah pembebanan 90 derajat.

Rekapitulasi dari nilai Maksimum RAO FSO *Full Load* pada kondisi *Free Floating* untuk masing-masing gerakan dan untuk masing-masing arah dapat dilihat di Tabel 4.9 di bawah ini.

Tabel 4.9 Nilai Maksimum RAO SPM pada Kondisi *Free Floating*

Heading (deg)	Surge (m/m)	Sway (m/m)	Heave (m/m)	Roll (deg/m)	Pitch (deg/m)	Yaw (deg/m)
0	1.269	0	0.983	0	1.083	0
45	0.897	0.843	0.983	0.797	0.765	0.01
90	0	1.192	0.983	1.127	0	0.015
135	0.903	0.843	0.983	0.797	0.769	0.01
180	1.275	0	0.983	0	1.087	0
RAO Max	1.275	1.192	0.983	1.127	1.087	0.015

Berdasarkan hasil RAO SPM pada Gambar 4.23 sampai Gambar 4.28 bisa dilihat bahwa bentuk dari grafik RAO untuk gerakan *Surge* dan *Sway* memiliki bentuk yang hampir sama. Begitu pula untuk gerakan *Roll* dan *Pitch* memiliki bentuk

grafik yang hampir sama. Dan juga pada grafik *Heave*, bentuk dan nilai dari semua arah hampir berhimpit. Hal tersebut terjadi diakibatkan oleh bentuk dari struktur SPM yang berupa silinder sehingga SPM memiliki bentuk yang simetris pada semua arah.

4.4 Analisis *Tension* pada Tali Tambat

Pada saat FSO beroperasi, pada *Mooring Line* akan terjadi *Tension* guna meredam gerakan dari FSO dan SPM yang disebabkan oleh kondisi lingkungan. *Tension* pada *Mooring Line* akan diaplikasikan pada konstruksi SPM untuk menghitung umur kelelahan dari konstruksi SPM. Untuk itu, maka perlu dipastikan terlebih dahulu bahwa *Mooring Line* akan kuat untuk menerima *Tension* yang terjadi dengan *Safety Factor* (SF) yang diijinkan oleh *class*. Untuk itu maka perlu terlebih dahulu dihitung *Maximum Breaking Load* (MBL) dari *Anchor Chain* dan *Hawser Line* setelah terkorosi berdasarkan persamaan (2.21) sesuai dengan aturan dari *class* (DNVGL-OS-E301). Perhitungannya adalah sebagai berikut :

$$S_{mbs-corr} = S_{mbs} \cdot \left(\frac{D_{corr}}{D_{new}} \right)^2$$

Dimana :

S_{mbs}	= MBL awal = 8315 kN
$S_{mbs-corr}$	= MBL setelah terkorosi (kN)
D_{new}	= Diameter awal = 102 mm (pada tahun 2014)
D_{corr}	= Diameter setelah terkorosi = 99.8 mm (terkorosi selama 11 tahun (2014-2025) dengan corrosion rate sebesar 0.2 mm/year berdasarkan tabel 2.2)

Maka,

$$\begin{aligned} S_{mbs-corr} &= 8315 \cdot (99.8/102)^2 \\ &= 7864.76 \text{ kN (MBL untuk Anchor Chain)} \end{aligned}$$

Dengan cara yang sama didapat MBL setelah terkorosi untuk *Hawser Line* adalah 4041.08 kN

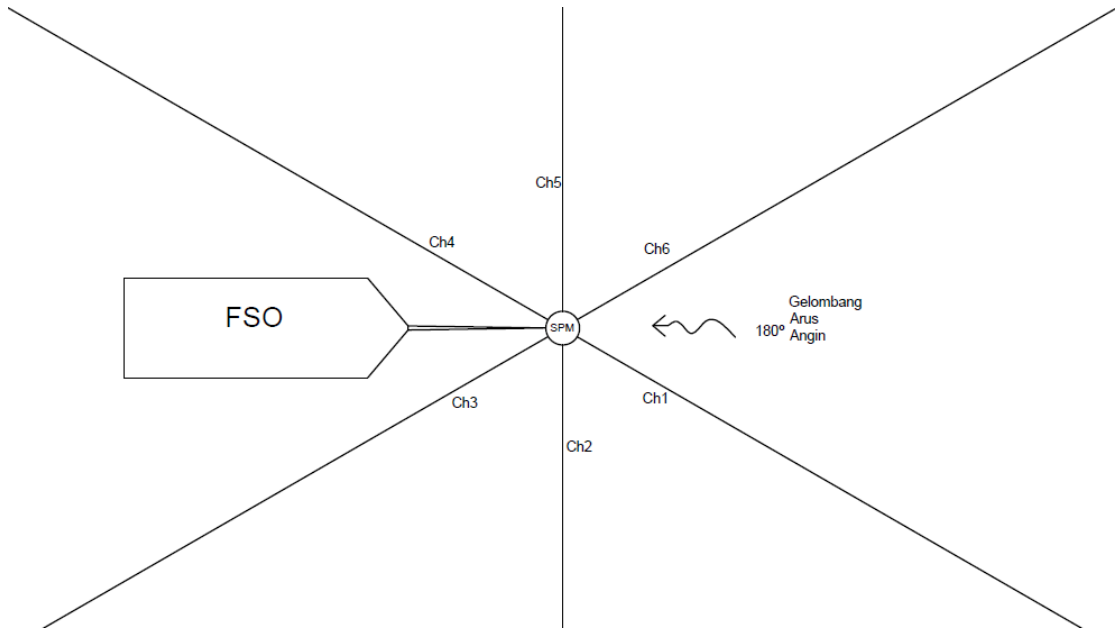
Setelah mengetahui MBL setelah terkorosi, perlu juga untuk mengetahui SF yang akan digunakan. Menurut API RP2SK nilai SF yang diijinkan untuk Analisis Dinamis adalah 1.67 pada kondisi *All Line Intact*. Menurut BKI, untuk menghitung SF pada *Mooring Line* dapat digunakan persamaan dibawah ini.

$$SF = \frac{S_{mbs-corr} (kN)}{Max\ Tension (kN)} \quad (4.1)$$

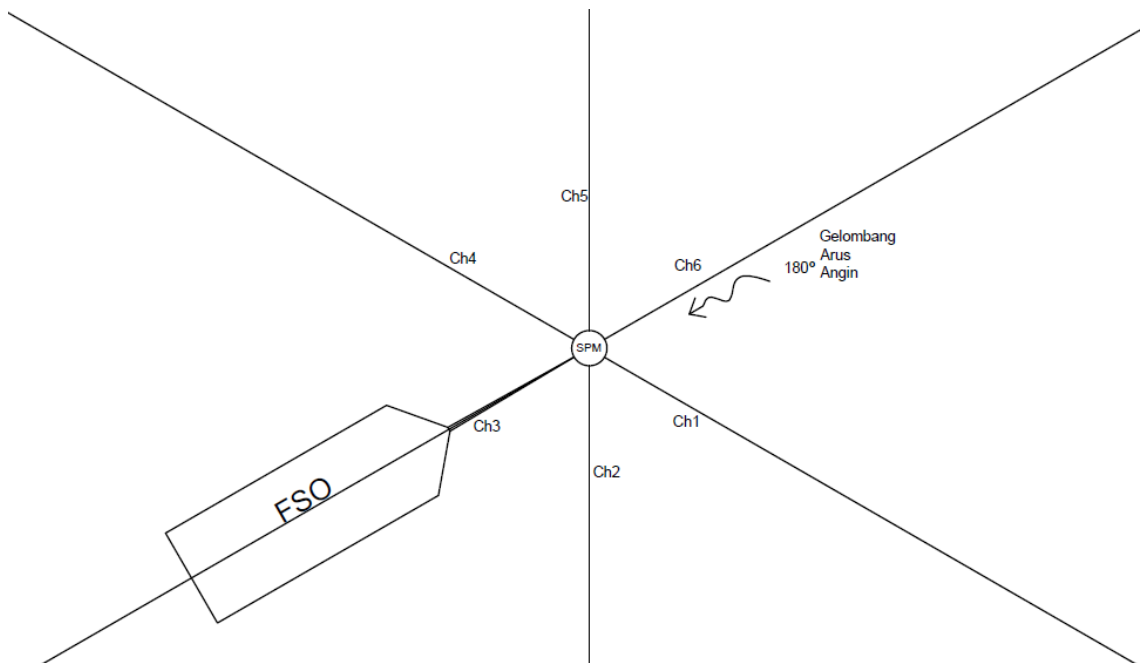
Untuk menghitung *Tension* pada Anchor Chain dan Hawser Line akan dilakukan dengan beberapa Load Case berdasarkan beberapa parameter sebagai berikut :

- Beban lingkungan yang akan digunakan untuk analisis *Tension* adalah pada kondisi 1-Tahunan (kondisi operasi) dengan kondisi tali *All Line Intact*.
- Kondisi tangki dari FSO yang akan digunakan pada analisis adalah pada kondisi *Full Load* (T = 20 m) dan *Light Load* (T = 6.91 m).
- Arah pembebanan (*heading*) yang akan digunakan adalah hanya pada arah 180 derajat (*head sea*) relatif terhadap arah dari FSO, dikarenakan FSO yang dapat berputar (*weathervane*). Untuk pengecekan arah pembebanan dapat dilihat pada lampiran.
- Untuk kombinasi arah gelombang, arus dan angin yang digunakan adalah hanya pada kondisi *colinear* (arah gelombang, arus dan angin adalah sama) dikarenakan merupakan kondisi yang paling kritis dibanding kondisi *Non-Colinear* (pengecekan dapat dilihat pada lampiran).
- Untuk posisi dari *Hawser Line* yang digunakan dalam analisis adalah pada *Hawser Line* berada sejajar dengan *Anchor Chain* (*Inline*) dan juga pada posisi diantara *Anchor Chain* (*Between Line*).
- *Pre-Tension* pada *Anchor Chain* juga diperhitungkan pada analisis yaitu sebesar 262.17 kN sesuai dengan data yang didapat pada Tabel 3.3.
- Analisis *Tension* akan dilakukan dengan melakukan simulasi berbasis *Time Domain* selama 3 jam (10800 detik)

Konfigurasi beserta variasi untuk masing-masing *Load Case* dapat dilihat pada Gambar 4.29-4.30 dan Tabel 4.10



Gambar 4.29 Konfigurasi untuk analisis *Tension* dengan kondisi *Between Line*

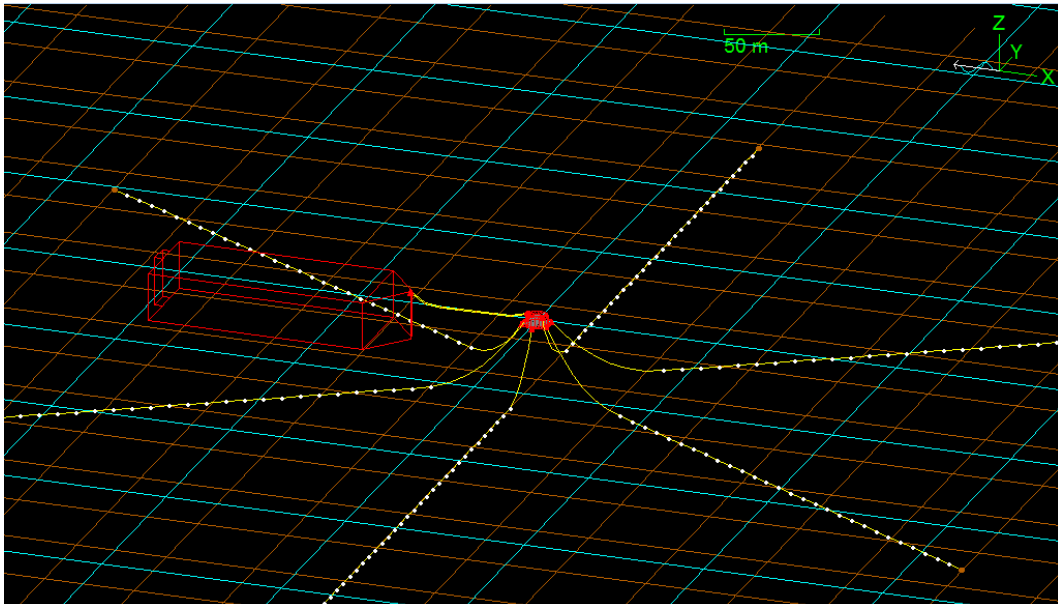


Gambar 4.30 Konfigurasi untuk analisis *Tension* dengan kondisi *InLine*

Tabel 4.10 *Load Case* untuk Analisis *Tension*

Code	Env. Condition	FSO Condition	FSO to Chain
LC-1	Collinear	Full Load	Between Line
LC-2			Inline
LC-3		Light Load	Between Line
LC-4			Inline

Pada Tugas Akhir ini, analisis *Tension* akan dilakukan dengan simulasi berbasis *Time Domain* menggunakan *software* ORCAFLEX. Hasil pemodelan pada ORCAFLEX dapat dilihat pada Gambar 4.31. Untuk hasil *Tension* yang terjadi pada masing-masing tali dapat dilihat pada Tabel 4.11. Dan untuk pengecekan SF pada masing-masing *Load Case* dapat dilihat pada tabel 4.12.



Gambar 4.31 Pemodelan pada ORCAFLEX

Tabel 4.11 Hasil *Tension* pada masing-masing tali

Code	Chain 1 (kN)	Chain 2 (kN)	Chain 3 (kN)	Chain 4 (kN)	Chain 5 (kN)	Chain 6 (kN)	Hawser 1 (kN)	Hawser 2 (kN)
LC-1	939.90	439.56	475.02	476.41	459.57	912.12	659.80	684.52
LC-2	654.14	435.35	531.67	419.69	653.27	1006.73	612.63	737.70
LC-3	797.45	405.39	445.76	439.86	385.90	881.53	386.91	492.11
LC-4	493.82	438.39	501.64	429.09	495.71	858.11	337.13	506.38

Tabel 4.12 Pengecekan SF pada masing-masing *Load Case*

Code	Max Tension on Chain (kN)	Max Tension on Hawser (kN)	MBL aft corr for Chain (kN)	MBL aft corr for Hawser (kN)	Anchor Chain SF	Hawser Line SF	API SF	Remark
LC-1	939.90	684.52	7864.76	4041.08	8.37	5.90	1.67	Pass
LC-2	1006.73	737.70	7864.76	4041.08	7.81	5.48	1.67	Pass
LC-3	881.53	492.11	7864.76	4041.08	8.92	8.21	1.67	Pass
LC-4	858.11	506.38	7864.76	4041.08	9.17	7.98	1.67	Pass

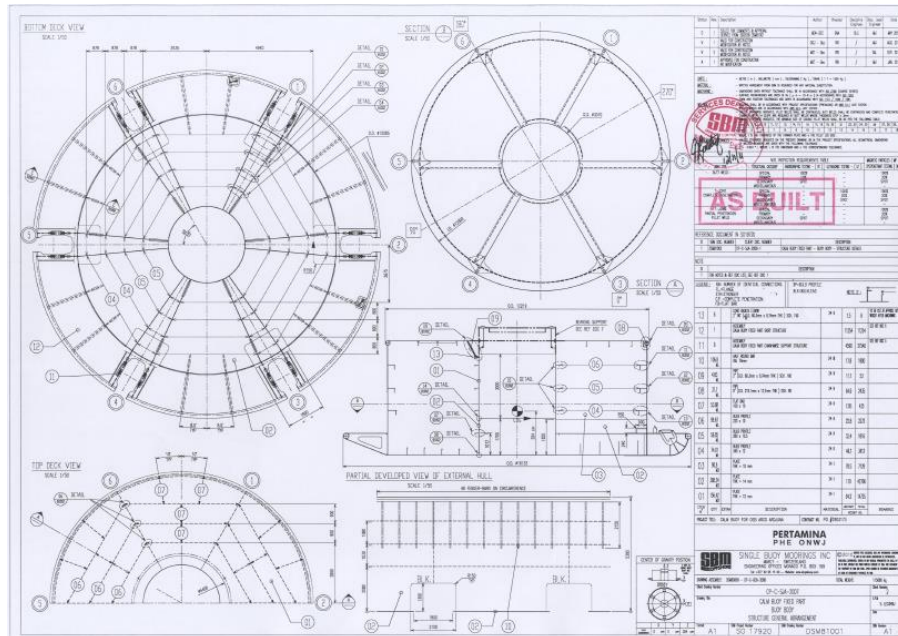
4.5 Analisis *Hotspot Stress* pada Konstruksi SPM

Setelah mengetahui *Tension* yang terjadi pada masing-masing tali tambat, maka akan dilanjutkan dengan menganalisis tegangan yang terjadi pada konstruksi SPM. Untuk menghitung tegangan, maka harus dilakukan pemodelan *Finite Element Method* (FEM) pada konstruksi SPM. Analisis ini akan dilakukan dengan menggunakan *software* ANSYS R16.2. Untuk analisis kelelahan maka tegangan yang akan digunakan adalah Tegangan *Hotspot* (*Hotspot Stress*). Analisis *Hotspot Stress* juga akan dilakukan pada 4 *Load Case* (LC) yang sama dengan pada saat analisis *Tension*.

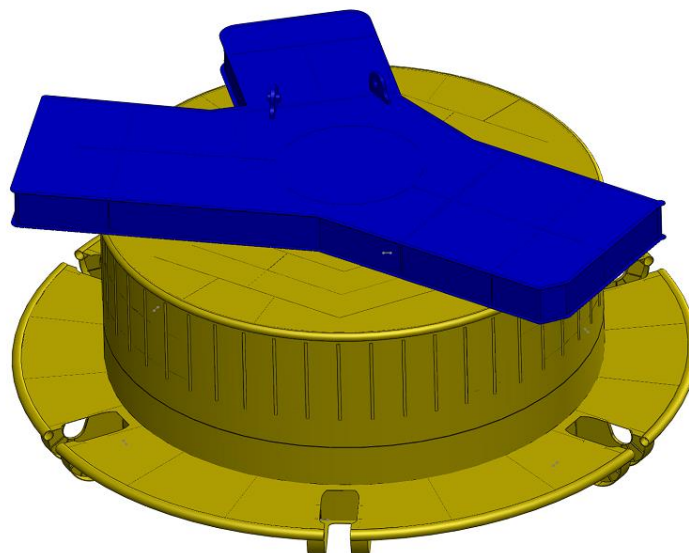
4.5.1 Pemodelan Konstruksi SPM

Pemodelan konstruksi SPM akan dilakukan dengan acuan gambar *General Arrangement* dari SPM yang didapat dari PT. Citra Mas. Pemodelan ini akan dilakukan menggunakan *software* SOLIDWORK 3D. Di dalam pemodelan juga telah mempertimbangkan efek korosi, yaitu dengan pengurangan dimensi pada

konstruksi SPM dengan pendekatan nilai *corroston rate* yang disyaratkan oleh *class* (0.2 mm / year). *General Arrangement* dari konstruksi SPM dapat dilihat pada Gambar 4.32 dan hasil Pemodelan dari SOLIDWORK 3D dapat dilihat pada gambar 4.33.

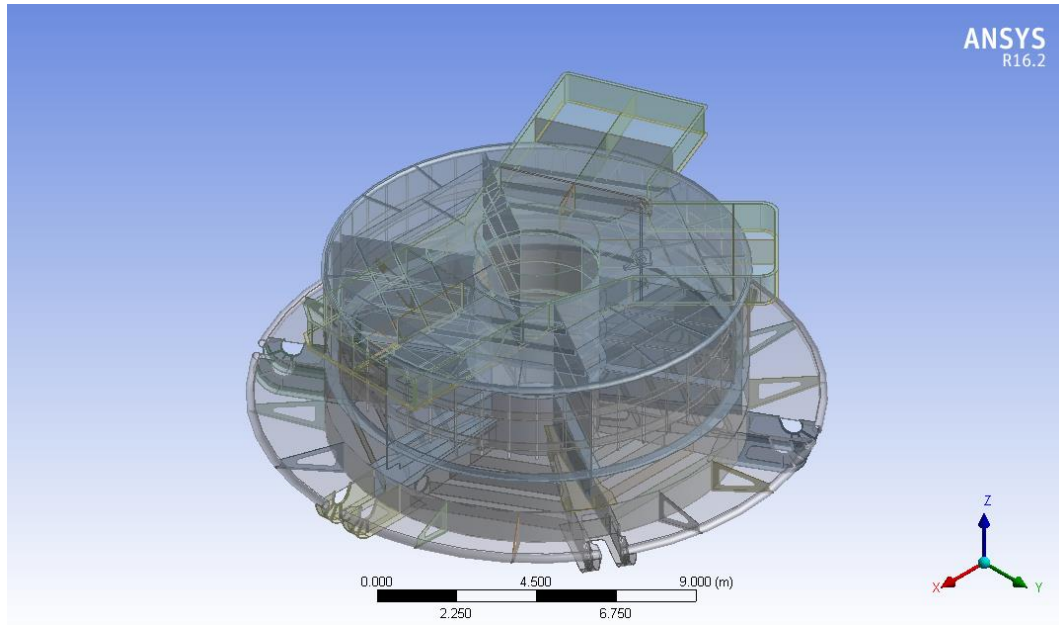


Gambar 4.32 Structure General Arrangement of SPM



Gambar 4.33 Pemodelan Konstruksi SPM pada SOLIDWORK 3D

Setelah pemodelan konstruksi 3D dari SPM telah dilakukan, maka selanjutnya model tersebut akan diinputkan pada *software* ANSYS R16.2 untuk melakukan analisis tegangan pada konstruksi SPM. Berikut pada Gambar 4.34 dapat dilihat geometri dari konstruksi SPM yang telah diinputkan pada ANSYS.



Gambar 4.34 Geometri SPM pada ANSYS *Mechanical*

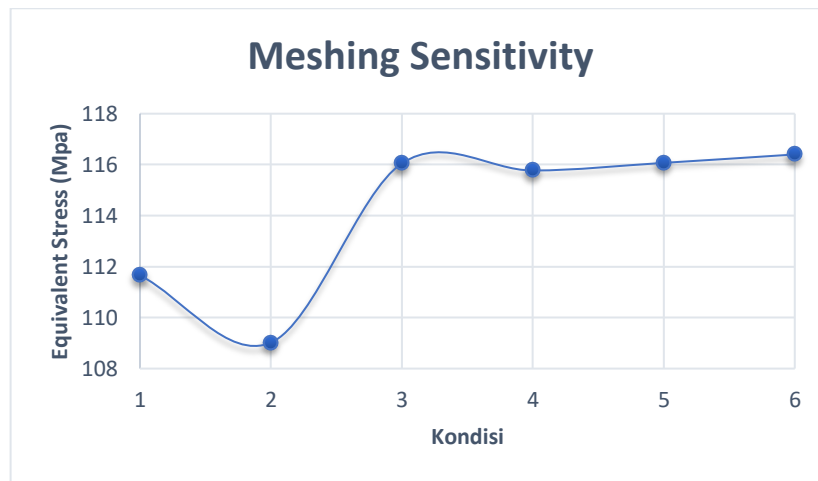
4.5.2 Meshing

Setelah pemodelan konstruksi selesai dilakukan, maka hasil model tersebut akan *meshing* untuk melakukan *Finite Element Analysis*. Namun hasil *meshing* harus terlebih dahulu diperiksa kualitasnya yaitu dengan melakukan analisis sensitifitas terhadap hasil *meshing* (*meshing sensitivity*). *Meshing sensitivity* dilakukan dengan melakukan variasi terhadap ukuran kerapatan *meshing* untuk memperoleh hasil output (*stress*) yang konstan. Hasil dari *meshing* dapat dilihat pada Tabel 4.13 dan Gambar 4.35. Dan hasil *meshing* yang akan digunakan dapat dilihat pada Gambar 4.36.

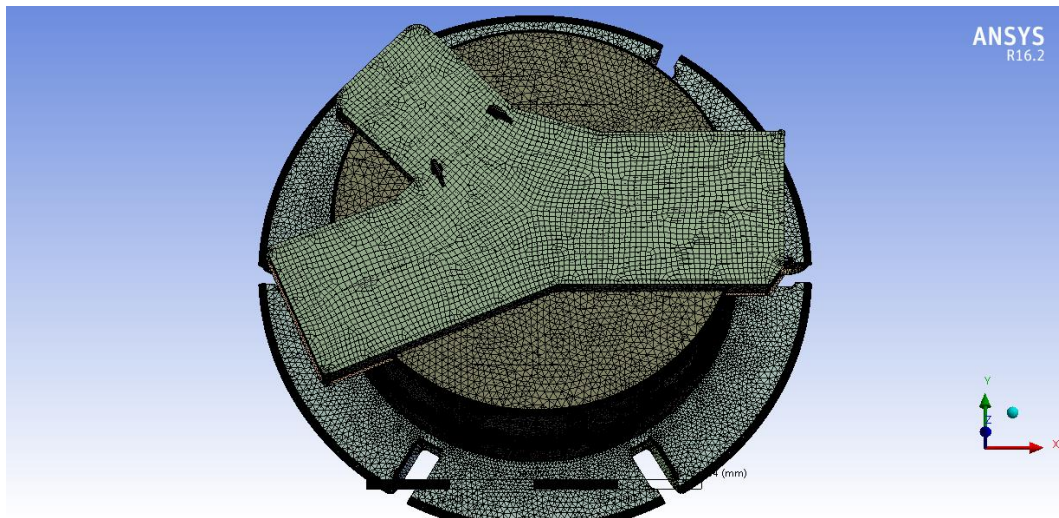
\

Tabel 4.13 Geometri SPM pada ANSYS *Mechanical*

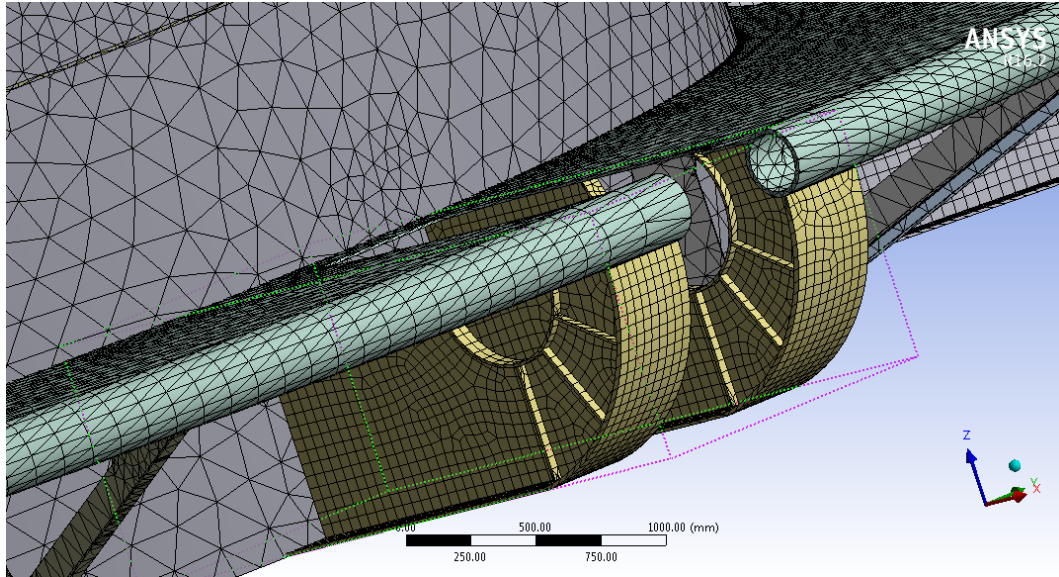
Kondisi	Node	Elemen	Stress (Mpa)	Error
1	1596843	793412	111.66	
2	1669485	832098	109.02	2.364%
3	1747752	870522	116.05	6.448%
4	1779126	886123	115.77	0.241%
5	1790486	891180	116.07	0.259%
6	1910771	959977	116.4	0.284%



Gambar 4.35 Grafik *Meshing Sensitivity*



Gambar 4.36 *Meshing* pada konstruksi SPM dengan 959977 elemen



Gambar 4.37 *Meshing* pada daerah yang dianggap kritis

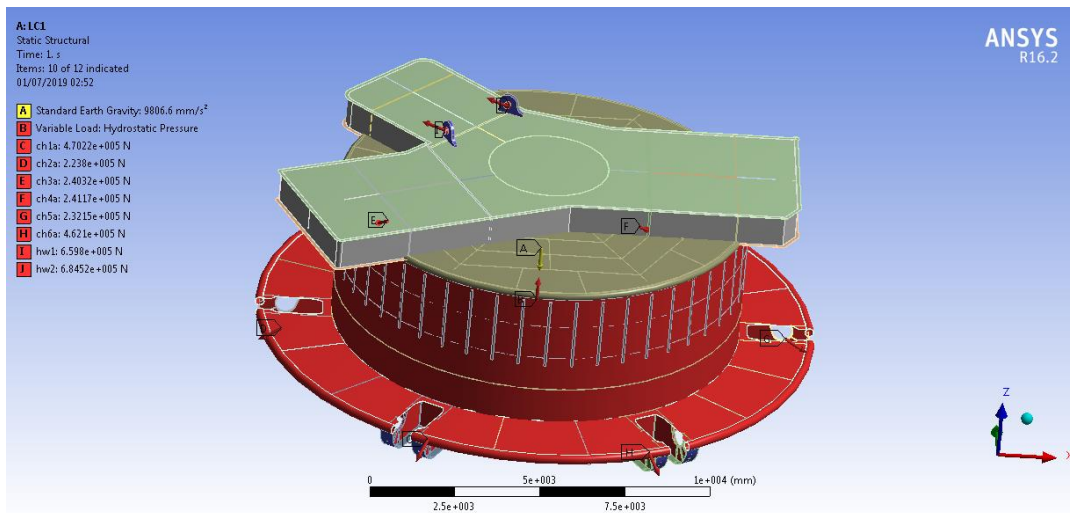
4.5.3 *Boundary Condition*

Setelah *meshing* telah dilakukan, maka selanjutnya akan ditentukan kondisi batas yang akan digunakan pada analisis. Kondisi batas yang digunakan harus sebisa mungkin merepresntasikan kondisi *real* struktur pada saat beroperasi. Kondisi batas yang digunakan pada struktur SPM adalah sebagai berikut :

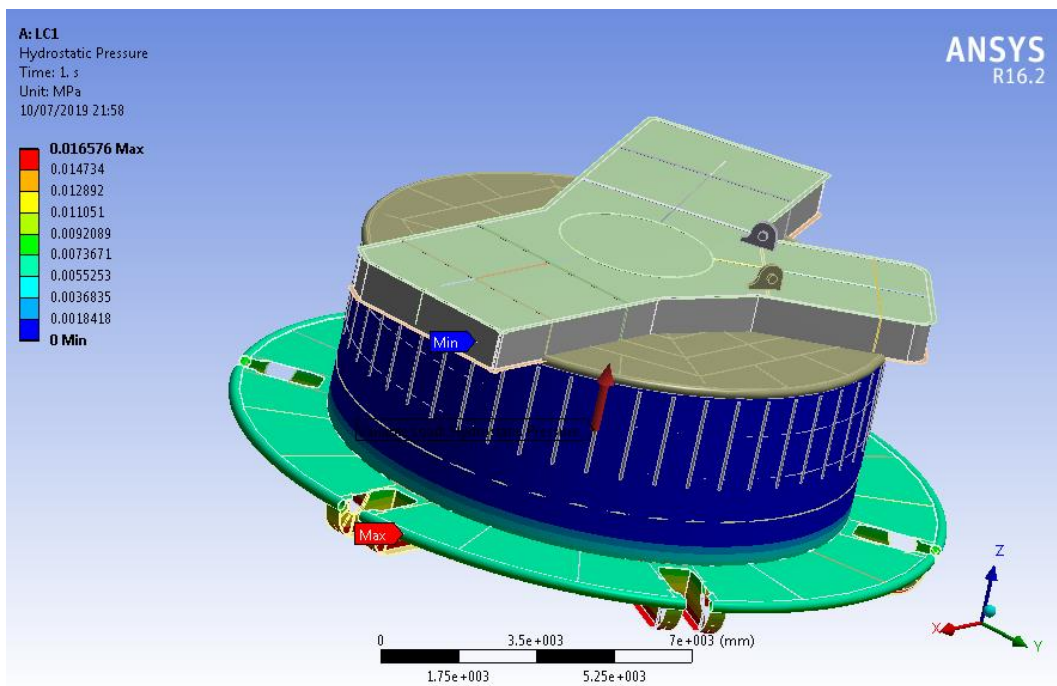
- *Selfweight* dari struktur SPM sendiri.
- *Hydrostatic Pressure* (karena struktur mengapung di air).
- *Tension* dari masing-masing *Anchor Chain* dan *Hawser Line*.
- Pada bagian dimana *Anchor Chain* dan *Hawser Line* terkonseksi dengan SPM diasumsikan sebagai *Fixed Support*. Untuk pengecekan pengambilan *Fixed Support* yang akan digunakan dapat dilihat pada lampiran.

Untuk *Tension* yang akan digunakan adalah *Tension* dari seluruh LC sesuai dengan penjelasan sebelumnya. Namun, terlebih dahulu nilai *Tension* pada masing-masing LC harus ditransfer menjadi komponen gaya X,Y dan Z dan harus menghasilkan resultan gaya yang sama dengan yang ada pada Tabel 4.11. Untuk perhitungan vector gaya dapat dilihat pada lampiran. Pada

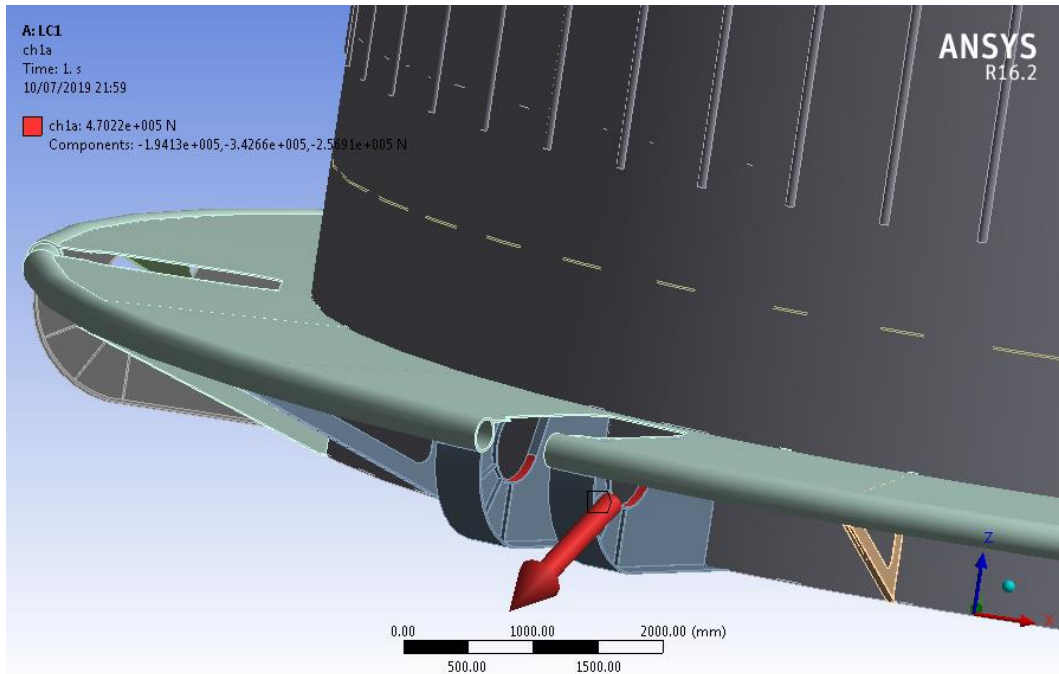
Gambar 4.37– 4.41 berikut dapat dilihat *boundary condition* yang digunakan pada analisis pada *software ANSYS*.



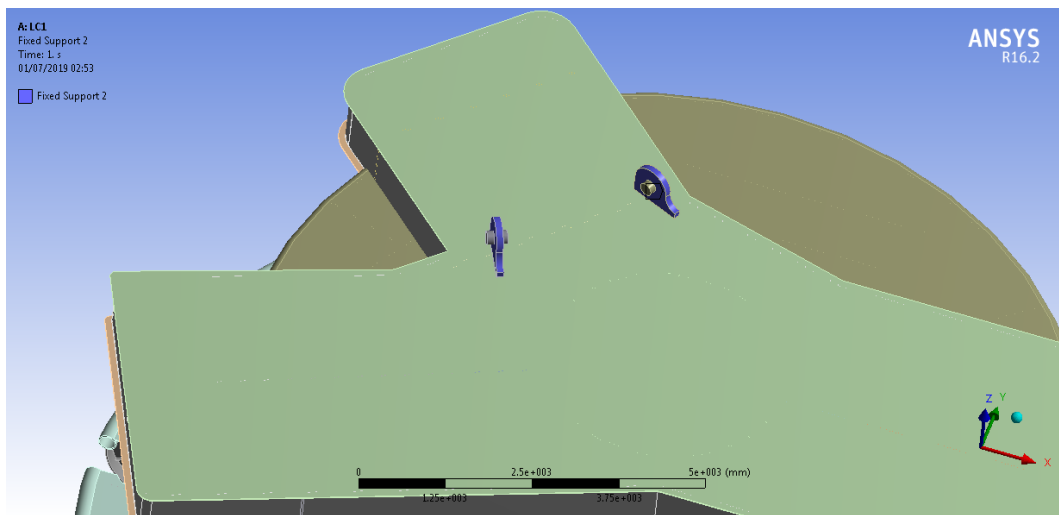
Gambar 4.38 *Boundary Condition*



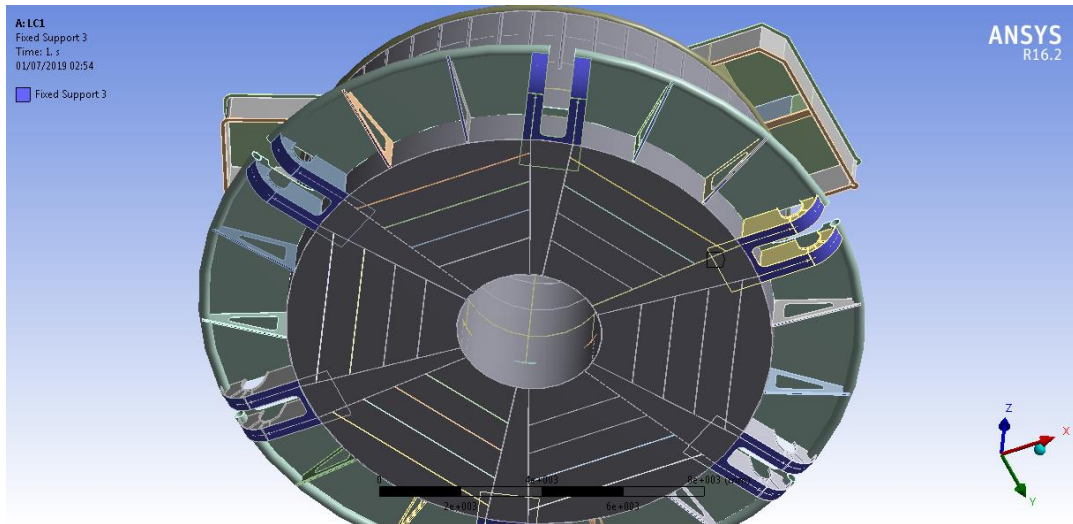
Gambar 4.39 *Hydrostatic Pressure* pada ANSYS



Gambar 4.40 Pembebean untuk *Tension* pada *Anchor Chain 1*



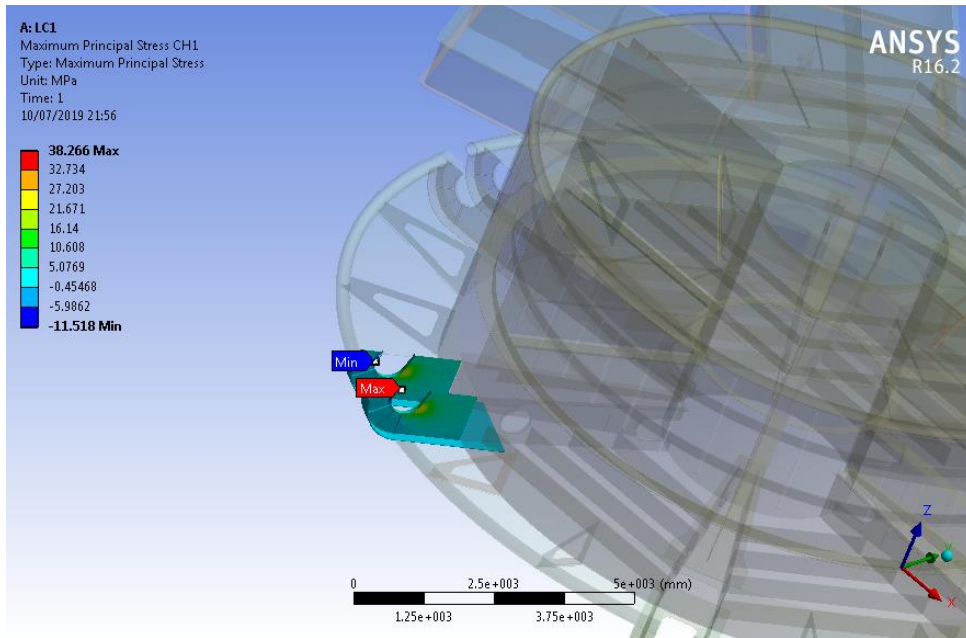
Gambar 4.41 *Fixed Support* pada *Hawser Connection*



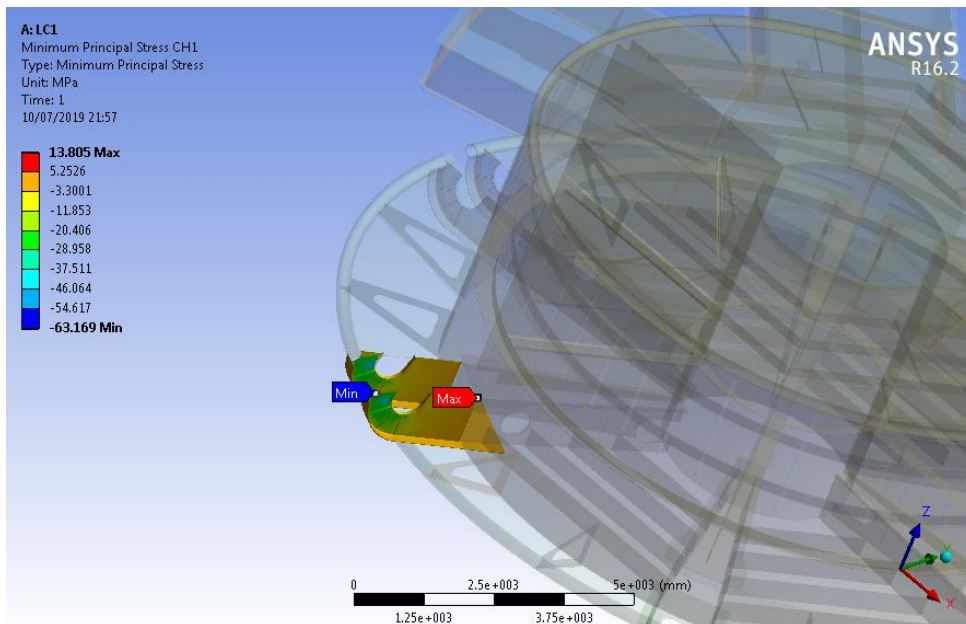
Gambar 4.42 *Fixed Support* pada *Chain Connection*

4.5.4 *Principal Stress*

Sesuai dengan yang dijelaskan sebelumnya, untuk analisis kelelahan maka tegangan yang akan digunakan adalah *Hotspot Stress*. Karena keterbatasan dari *software*, *Hotspot Stress* tidak bisa secara langsung dikeluarkan dari ANSYS. Maka, untuk memperoleh *Hotspot Stress*, akan dilakukan pendekatan melalui *Principal Stress*. Hasil dari *Principal Stress* pada ANSYS dapat dilihat pada Gambar 4.42-4.43. Pada bab ini hanya akan ditampilkan gambar hasil dari *Principal Stress* pada salah satu *Chain Connection* pada LC-1. Dan keseluruhan hasil *Principal Stress* pada masing-masing *Chain* dan *Hawser Connection* dapat dilihat pada Tabel 4.14-Tabel 4.21.



Gambar 4.43 Maximum Principal Stress pada Chain Connection 1 (LC-1)



Gambar 4.44 Minimum Principal Stress pada Chain Connection 1 (LC-1)

Tabel 4.14 Principal Stress pada Chain Connection 1

LC Code	Max of Max Principal (Mpa)	Min of Max Principal (Mpa)	Max of Min Principal (Mpa)	Min of Min Principal (Mpa)
LC-1	38.266	-11.518	13.805	-63.169
LC-2	25.706	-8.1456	9.8204	-43.723
LC-3	31.923	-9.9373	11.817	-53.596
LC-4	18.736	-6.1403	7.6022	-32.847

Tabel 4.15 *Principal Stress pada Chain Connection 2*

LC Code	Max of Max Principal (Mpa)	Min of Max Principal (Mpa)	Max of Min Principal (Mpa)	Min of Min Principal (Mpa)
LC-1	19.375	-4.4314	7.8657	-30.856
LC-2	18.908	-4.8616	7.6745	-29.901
LC-3	18.067	-3.9995	7.3379	-27.922
LC-4	18.986	-4.3203	7.7058	-30.123

Tabel 4.16 *Principal Stress pada Chain Connection 3*

LC Code	Max of Max Principal (Mpa)	Min of Max Principal (Mpa)	Max of Min Principal (Mpa)	Min of Min Principal (Mpa)
LC-1	20.563	-5.8258	7.8896	-32.895
LC-2	21.982	-6.3837	8.5047	-36.331
LC-3	19.583	-5.3778	7.4766	-30.404
LC-4	21.129	-6.0326	8.1431	-34.257

Tabel 4.17 *Principal Stress pada Chain Connection 4*

LC Code	Max of Max Principal (Mpa)	Min of Max Principal (Mpa)	Max of Min Principal (Mpa)	Min of Min Principal (Mpa)
LC-1	20.411	-5.571	8.5094	-31.305
LC-2	18.669	-4.8951	7.7905	-27.109
LC-3	19.249	-5.1248	8.0235	-28.503
LC-4	18.935	-5.0015	7.8961	-27.752

Tabel 4.18 *Principal Stress pada Chain Connection 5*

LC Code	Max of Max Principal (Mpa)	Min of Max Principal (Mpa)	Max of Min Principal (Mpa)	Min of Min Principal (Mpa)
LC-1	26.231	-4.7123	9.6344	-21.484
LC-2	29.807	-6.5861	11.119	-30.21
LC-3	24.683	-3.9148	8.9873	-17.964
LC-4	26.786	-5.0114	9.8649	-22.916

Tabel 4.19 *Principal Stress pada Chain Connection 6*

LC Code	Max of Max Principal (Mpa)	Min of Max Principal (Mpa)	Max of Min Principal (Mpa)	Min of Min Principal (Mpa)
LC-1	29.586	-11.526	8.9914	-56.383
LC-2	32.301	-12.74	9.7609	-61.531
LC-3	28.304	-11.145	8.7163	-53.946
LC-4	27.549	-10.834	8.5029	-52.447

Tabel 4.20 *Principal Stress pada Hawser Connection 1*

LC Code	Max of Max Principal (Mpa)	Min of Max Principal (Mpa)	Max of Min Principal (Mpa)	Min of Min Principal (Mpa)
LC-1	18.61	-4.003	3.7168	-18.373
LC-2	17.239	-3.7052	3.4379	-17.017
LC-3	10.887	-2.3402	2.1715	-10.745
LC-4	9.4866	-2.0392	1.8922	-9.3618

Tabel 4.21 *Principal Stress pada Hawser Connection 2*

LC Code	Max of Max Principal (Mpa)	Min of Max Principal (Mpa)	Max of Min Principal (Mpa)	Min of Min Principal (Mpa)
LC-1	17.684	-6.0972	6.1789	-21.054
LC-2	18.69	-6.4467	6.5577	-22.363
LC-3	12.468	-4.2981	4.3741	-14.916
LC-4	12.83	-4.423	4.5009	-15.348

4.5.5 Effective Hotspot Stress

Sesuai dengan yang dijelaskan sebelumnya bahwa *Hotspot Stress* akan dihitung dengan menggunakan pendekatan *Principal Stress*. Pendekatan yang akan digunakan ini mengacu pada DNV-RP-C203 (2011) dengan persamaan di bawah ini :

$$\Delta\sigma_{eff} = 1.12 \Delta\sigma_{principal} \quad (4.1)$$

Dimana :

$$\Delta\sigma_{eff} = \text{Effective Hotspot Stress Range}$$

$\Delta\sigma_{principal}$ = *Principal Stress Range* (nilai termaksimum dari *Max Principal Stress Range* dan *Min. Principal Stress Range*)

Hasil dari *Effective Hotspot Stress* dapat dilihat pada Tabel 4.21-Tabel 4.29 berikut ini.

Tabel 4.22 *Effective Hotspot Stress* pada *Chain Connection 1*

LC Code	Maximum Principal Stress Range(MPa)	Minimum Principal Stress Range (MPa)	Effective Hotspot Stress Range(MPa)
LC-1	49.78	76.97	86.21
LC-2	33.85	53.54	59.97
LC-3	41.86	65.41	73.26
LC-4	24.88	40.45	45.30

Tabel 4.23 *Effective Hotspot Stress* pada *Chain Connection 2*

LC Code	Maximum Principal Stress Range(MPa)	Minimum Principal Stress Range (MPa)	Effective Hotspot Stress Range(MPa)
LC-1	23.81	38.72	43.37
LC-2	23.77	37.58	42.08
LC-3	22.07	35.26	39.49
LC-4	23.31	37.83	42.37

Tabel 4.24 *Effective Hotspot Stress* pada *Chain Connection 3*

LC Code	Maximum Principal Stress Range(MPa)	Minimum Principal Stress Range (MPa)	Effective Hotspot Stress Range(Mpa)
LC-1	26.39	40.78	45.68
LC-2	28.37	44.84	50.22
LC-3	24.96	37.88	42.43
LC-4	27.16	42.40	47.49

Tabel 4.25 *Effective Hotspot Stress pada Chain Connection 4*

LC Code	Maximum Principal Stress Range(MPa)	Minimum Principal Stress Range (MPa)	Effective Hotspot Stress Range(Mpa)
LC-1	25.98	39.81	44.59
LC-2	23.56	34.90	39.09
LC-3	24.37	36.53	40.91
LC-4	23.94	35.65	39.93

Tabel 4.26 *Effective Hotspot Stress pada Chain Connection 5*

LC Code	Maximum Principal Stress Range(MPa)	Minimum Principal Stress Range (MPa)	Effective Hotspot Stress Range(Mpa)
LC-1	30.94	31.12	34.85
LC-2	36.39	41.33	46.29
LC-3	28.60	26.95	32.03
LC-4	31.80	32.78	36.71

Tabel 4.27 *Effective Hotspot Stress pada Chain Connection 6*

LC Code	Maximum Principal Stress Range(MPa)	Minimum Principal Stress Range (MPa)	Effective Hotspot Stress Range(Mpa)
LC-1	41.11	65.37	73.22
LC-2	45.04	71.29	79.85
LC-3	39.45	62.66	70.18
LC-4	38.38	60.95	68.26

Tabel 4.28 *Effective Hotspot Stress pada Hawser Connection 1*

LC Code	Maximum Principal Stress Range(MPa)	Minimum Principal Stress Range (MPa)	Effective Hotspot Stress Range(Mpa)
LC-1	22.61	22.09	25.33
LC-2	20.94	20.45	23.46
LC-3	13.23	12.92	14.81
LC-4	11.53	11.25	12.91

Tabel 4.29 *Effective Hotspot Stress* pada *Hawser Connection 2*

LC Code	Maximum Principal Stress Range(MPa)	Minimum Principal Stress Range (MPa)	Effective Hotspot Stress Range(Mpa)
LC-1	23.78	27.23	30.50
LC-2	25.14	28.92	32.39
LC-3	16.77	19.29	21.60
LC-4	17.25	19.85	22.23

4.6 Analisis Umur Kelelahan (*Fatigue Life*) pada Konstruksi SPM

Pada Tugas Akhir ini, analisis kelelahan akan dilakukan dengan metode *Simplified*. Dengan metode ini umur kelelahan akan dihitung menggunakan persamaan *Closed-Form* yang merupakan penyederhanaan dari metode spektral. Analisis akan dilakukan pada lokasi kritis pada konstruksi SPM, yaitu pada 6 *Chain Connection* dan 2 *Hawser Connection*. Berdasarkan studi kasus yang diambil, bahwa berdasarkan *requirement* dari *owner* konstruksi SPM harus mampu tetap beroperasi hingga minimum tahun 2025, maka pada analisis ini *Design life* yang digunakan adalah 11 tahun (2014-2025). Dengan mengacu pada BKI (2013), maka persamaan *Cumulative Fatigue Damage* adalah sebagai berikut :

$$DM = \sum_1^i f_{oi} \cdot DM_i \quad (4.2)$$

Dimana :

DM_i = *Cumulative Fatigue Damage* pada LC ke i

f_{oi} = Faktor operasi masing-masing LC (0.3 untuk kondisi *Full Load* dan 0.2 untuk kondisi *Light Load*)

$$DM_i = \frac{N_L (0.01 \cdot \sigma_{Ri})^m}{K_2 (\ln N_R)^{m/\gamma}} \mu_i \cdot \Gamma \left(1 + \frac{m}{\gamma} \right) \quad (4.3)$$

Dimana :

N_L = Jumlah siklus untuk *Design Life* yang digunakan (diperoleh dari *wave scatter*)

m = Parameter Kurva S-N (diperoleh dari Tabel 2.3)

K_2 = Parameter Kurva S-N (diperoleh dari Tabel 2.3)

$$\begin{aligned}
\sigma_{Ri} &= \text{Stress Range Ekstrim pada LC ke } i \text{ [N/cm}^2\text{]} \\
N_R &= 10.000, \text{ Jumlah siklus pada Kurva S-N pada tingkat} \\
&\text{probabilitas } 10^{-4} \\
\gamma &= \text{Long Term Stress Distribution Parameter} \\
&= 1.4 - 0.2 \cdot \alpha \cdot L^{0.2} \text{ (dengan nilai } \alpha = 0.93 \text{ dan } L \text{ yang} \\
&\text{digunakan adalah yang paling minimum yaitu 150 m)} \\
&= 0.89 \\
\Gamma &= \text{Fungsi Gamma} \\
\mu_i &= \text{Stress Coefficient} \\
&= 1 - \frac{\left\{ \Gamma_0\left(1 + \frac{m}{\gamma}, v_i\right) - v_i^{-\frac{\Delta m}{\gamma}} \Gamma_0\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\gamma}, v_i\right) \right\}}{\Gamma\left(1 + \frac{m}{\gamma}\right)} \\
v_i &= \left(\frac{\sigma_q}{0.01 \cdot \sigma_{Ri}} \right)^\gamma \ln N_R \\
\sigma_q &= \text{Stress Range pada perpotongan segmen pada Kurva S-N} \\
&\text{[N/mm}^2\text{] (menggunakan material class E)} \\
\Delta m &= \text{Perubahan kemiringan pada segmen kurva S-N} \\
&= 2
\end{aligned}$$

$$\Gamma_{0(a,x)} = \text{Incomplete Gamma Function}$$

Dengan dikeatahuinya persamaan untuk *cumulative fatigue damage*, maka umur kelelahan akan dihitung dengan persamaan (2.26). Pada Tabel 4.30 akan ditunjukkan perhitungan umur kelelahan pada salah satu *Chain Connection* pada SPM. Dan untuk perhitungan pada *Chain Connection* yang lain dapat dilihat pada lampiran. Untuk rekapitulasi dari hasil perhitungan umur kelelahan dapat dilihat pada Tabel 4.31 dan Tabel 4.32

Tabel 4.30 Perhitungan Umur Kelelahan pada *Chain Connection 1*

LC Code	f_0	Eff. HotSpot (MPa)	v_i	$\Gamma_0(1+(m/\gamma), v_i)$	$\Gamma_0(1+(m+\Delta m/\gamma), v_i)$	μ_i	DM
LC-1	0.3	86.21	5.37	2.66	232.70	1.26	1.E-01
LC-2	0.3	59.97	7.41	0.84	119.96	1.05	4.E-02
LC-3	0.2	73.26	6.20	1.71	183.86	1.13	5.E-02
LC-4	0.2	45.30	9.52	0.21	46.89	1.01	1.E-02
DM Total							2.E-01
Fatigue Life (Years)							46.68

Tabel 4.31 Rekapitulasi Hasil Perhitungan *Fatigue Life* pada *Hawser Connection*

Load Case Code	f_0	Damage Ratio	
		Hw. Conn 1	Hw. Conn 2
LC-1	0.3	2.73E-03	4.74E-03
LC-2	0.3	2.17E-03	5.69E-03
LC-3	0.2	3.66E-04	1.14E-03
LC-4	0.2	2.42E-04	1.24E-03
Total Damage Ratio		5.51E-03	1.28E-02
Fatigue Life (Years)		1996.58	859.71

Tabel 4.32 Rekapitulasi Hasil Perhitungan *Fatigue Life* pada *Chain Connection*

Load Case Code	f_0	Damage Ratio					
		Ch. Conn 1	Ch. Conn 2	Ch. Conn 3	Ch. Conn 4	Ch. Conn 5	Ch. Conn 6
LC-1	0.3	1.37E-01	1.37E-02	1.60E-02	1.49E-02	7.02E-03	7.50E-02
LC-2	0.3	3.82E-02	1.25E-02	2.13E-02	9.96E-03	1.63E-02	1.03E-01
LC-3	0.2	5.01E-02	6.90E-03	8.54E-03	7.69E-03	3.66E-03	4.31E-02
LC-4	0.2	1.06E-02	8.52E-03	1.20E-02	7.09E-03	5.46E-03	3.92E-02
Total Damage Ratio		2.36E-01	4.16E-02	5.79E-02	3.97E-02	3.25E-02	2.60E-01
Fatigue Life (Years)		46.68	264.19	190.06	277.21	338.71	42.33

Berdasarkan hasil perhitungan umur kelelahan pada Tabel 4.29 dan 4.30, maka bisa dilihat bahwa pada *Chain Connection 6* memiliki *Fatigue Life* yang paling minimum yaitu 42.33 tahun. Sesuai dengan ketentuan dari BKI (2013), demi keamanan, nilai *Fatigue Life* juga perlu mempertimbangkan *Safety Factor* (SF). Nilai SF untuk *Mooring Equipment* pada *Inspectable Area* adalah 3.0. Maka dengan pertimbangan SF nilai dari *Fatigue Life* pada *Chain Connection 6* adalah sebagai berikut :

Construction	Damage	Fatigue Life (Years)	BKI SF	Fatigue Life with SF (Years)
Ch. Conn 6	0.25985	42.33	3	14.11

Dengan hasil tersebut, maka nilai *Fatigue Life* terminimum dari konstruksi SPM dengan pertimbangan SF adalah 14.11 tahun dan sudah melewati *Design Life* yang ditentukan. Maka konstruksi SPM masih aman beroperasi hingga tahun 2028 dan sudah memenuhi permintaan dari *owner*.

(Halaman Sengaja Dikосongkan)

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisis dan pembahasan pada bab sebelumnya, maka dari Tugas Akhir ini dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Respon gerakan pada FSO dan SPM pada kondisi *free floating* adalah sebagai berikut :
 - RAO FSO untuk gerakan *Surge* memiliki nilai maksimum sebesar 0.888 m/m terjadi pada kondisi *Light Load* dengan *heading* 180°. Untuk gerakan *Sway* memiliki nilai maksimum sebesar 0.96 m/m terjadi pada kondisi *Light Load* dengan *heading* 90°. Untuk gerakan *Heave* memiliki nilai maksimum sebesar 1.81 m/m terjadi pada kondisi *Full Load* dengan *heading* 90°. Lalu, untuk gerakan *Roll* memiliki nilai maksimum sebesar 4.12 deg/m terjadi pada kondisi *Light Load* dengan *heading* 90°. Untuk gerakan *Pitch* memiliki nilai maksimum sebesar 4.19 deg/m terjadi pada kondisi *Full Load* dengan *heading* 180°. Dan untuk gerakan *Yaw* memiliki nilai maksimum sebesar 0.66 deg/m terjadi pada kondisi *Light Load* dengan *heading* 135°.
 - RAO SPM untuk gerakan *Surge* memiliki nilai maksimum sebesar 1.28 m/m terjadi pada *heading* 180°. Untuk gerakan *Sway* memiliki nilai maksimum sebesar 1.19 m/m terjadi pada *heading* 90°. Untuk gerakan *Heave* memiliki nilai maksimum sebesar 0.98 m/m terjadi pada semua arah. Lalu, untuk gerakan *Roll* memiliki nilai maksimum sebesar 1.13 deg/m terjadi pada *heading* 90°. Untuk gerakan *Pitch* memiliki nilai maksimum sebesar 1.09 deg/m terjadi pada *heading* 180°. Dan untuk gerakan *Yaw* memiliki nilai maksimum sebesar 0.02 deg/m terjadi pada *heading* 90°. Dikarenakan bentuk dari SPM yang berupa silinder, maka RAO pada gerakan *Surge* dan *Sway* memiliki bentuk grafik dan nilai maksimum yang identik, begitu juga untuk gerakan *Roll* dan *Pitch*. Dan pada gerakan *Heave* nilai dari RAO juga memiliki nilai yang identik pada semua arah.

2. Hasil *Tension* pada *Anchor Chain* bernilai maksimum pada LC-2 (*Full Load – Inline*) dengan nilai sebesar 1006 kN pada *Chain* 6. Dan untuk *Hawser Line* bernilai maksimum pada LC-2 dengan nilai sebesar 737.70 kN pada *Hawser* 2. Sehingga dengan berdasarkan hasil *Tension* tersebut untuk masing-masing *Anchor Chain* dan *Hawser Line* memiliki *Safety Factor* (SF) sebesar 7.41 dan 5.48. Dengan mengacu pada API RP2SK, nilai SF dari *Tension* pada *Mooring Line* harus lebih dari 1.67. Sehingga dapat disimpulkan bahwa *Anchor Chain* dan *Hawser Line* dalam kondisi aman terhadap beban lingkungan *ultimate* selama kondisi operasi (1-tahunan). Hasil *Tension* maksimum pada masing-masing tali pada masing-masing LC akan digunakan untuk perhitungan *Fatigue*.
3. Hasil Umur Kelelahan (*Fatigue Life*) pada konstruksi SPM menunjukkan nilai paling kritis (minimum) pada *Chain Connection* 6 yaitu selama 42.33 tahun. Dengan mempertimbangkan *Safety Factor* (SF) dari BKI yaitu sebesar 3.0, maka konstruksi SPM masih mampu beroperasi dengan aman hingga 14.11 tahun. Dengan nilai *Design Life* yang ditentukan adalah selama 11 tahun (2014-2025) sesuai dengan permintaan *owner*, maka konstruksi SPM masih mampu beroperasi dengan aman hingga tahun 2028 dan sudah bisa memenuhi *requirement* dari *owner*.

5.2 Saran

Untuk tujuan perbaikan dan pengembangan pada penelitian selanjutnya ada beberapa hal yang masih perlu diperbaiki sebagai berikut :

1. Untuk penelitian lebih lanjut, *Riser* dan *Floating Hose* perlu ikut dimodelkan dalam simulasi *Time-Domain* untuk memperoleh hasil yang lebih merepresentasikan kondisi operasi yang sebenarnya.
2. Untuk penelitian lebih lanjut, pada simulasi *Time-Domain* juga perlu untuk mempertimbangkan kondisi lingkungan dengan system *Non-Collinear*.

3. Melihat kompleksitas dari model konstruksi SPM, maka untuk analisis *meshing sensitivity* perlu diperhatikan lebih detail. Terutama untuk *node* dan *element* pada bagian konstruksi dengan bentuk yang rumit agar hasil dari komputasi bisa lebih akurat.
4. Dalam analisis sejenis, untuk ukuran struktur yang termasuk kecil maka perlu dipertimbangkan lagi pengambilan nilai dari parameter-parameter yang akan digunakan untuk perhitungan *fatigue*.
5. Untuk kasus sejenis, perlu adanya analisis Umur Kelelahan dengan menggunakan metode-metode yang lain, semisal dengan metode *Full Spectral* atau sebagainya untuk memperoleh hasil yang lebih akurat.

(Halaman Sengaja Dikосongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- Afriyansyah, R. dan Aryawan, W.D. 2013. Perancangan Buoy Mooring System Untuk Loading – Unloading Aframax Tanker Di Terminal Kilang Minyak Balongan. *JURNAL TEKNIK POMITS* Vol. 2, No. 1, (2013) ISSN: 2337-3539
- Almar-Naess, A. 1985. *Fatigue Handbook : Offshore Steel Structures*. Tapir Publisher. Trondheim. Norway
- American Petroleum Institute. 2005. *Design and Analysis of Stationkeeping for Floating Structures* (RP-2SK ed.). Washington: API Publishing Services..
- ABS. 2012. *Mobile Offshore Drilling Units*. USA: American Bureau Shipping
- Ayyub, B., White, G.J., Bell-Wright, T.F. dan Purcell, E.S. 1990. *Reliability-Based Comparative Life Expectancy Assesment of Patrol Boat Hull Structure*. National Technical Service, Virginia.
- Barltrop, N.D.P. 1998. *Floating Structures: A Guide for Design and Analysis, Vol. 1 and 2*. Oilfield Publications Ltd.
- Bhattacharyya. R. 1978. *Dynamic of Marine Vehicles*. New York: John Wiley & Sons Inc.
- Biro Klasifikasi Indonesia. 2013. *Guidelines for Floating Production Installations* (Vol. 3). Jakarta
- Chakrabarti, S.K. 1987. *Hydrodynamics of Offshore Structures*, USA: Computational Mechanics Publications Southampton.
- Djarmiko, E.B. 2012. *Perilaku dan Operabilitas Bangunan Laut Di Atas Gelombang Acak*. ITS Press. Surabaya.
- Det Norske Veritas. 2004. *Position Mooring* (OS-E301 ed.).
- Det Norske Veritas. 2014. *Fatigue Assessment of Ship Structures* (CN-No.30.7 ed.).
- Det Norske Veritas. 2011. *Fatigue Design of Offshore Steel Structures* (RP-C203 ed.).

- Faltinsen, O.M.. 1990. *Sea Loads On Ships And Offshore Structures*, United Kingdom: Cambridge University Press.
- Hamzah, M. 2016. *Analisis Fatigue Pada Konstruksi Crane Pedestal Floating Storage And Offloading (FSO) Arco Ardjuna Pertamina Hulu Energi, ONWJ*. Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan ITS.
- Helmidadang. Single Point Mooring, (Online), (<https://www.helmidadang.wordpress.com>), diakses pada 4 Februari 2019).
- Jiao, J., Chen, C. and Ren, H. 2018. A Comprehensive Study on Ship Motion and Load Responses in Short Crested Irregular Waves. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, Vol. 11, pp 364-379, Elsevier.
- Murtedjo, Mas. 1999. *Handout Teori Bangunan Apung*. ITS Press. Surabaya.
- Paik, J. K. and Thayamballi, A.K. 2007. *Ship-Shaped Offshore Installation*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Popov, E. P., 1996. *Mekanika Teknik*, Jakarta: Erlangga
- Qiau, D., Yan, J., & Qu, J. (2014). Fatigue Analysis of Deepwater Hybrid Mooring Line Under Corrosion Effect. *Polish Maritime Research*, 21.
- Rohith, T., & Jayalekshmi, R. (2017). Deterministic and Spectral Fatigue Analysis of Tubular Joints of a Jacket Platform. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 8 (11)
- Saidee, Mohammad Hasan. 2015. *Fatigue Analysis and Design of Mooring Systems. Assessment and Comparison of Different Analysis Methods*. Master Thesis. Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Trondheim, Norway.
- Saidee, Mohammad Hasan. 2017. A Simplified Method for Analyzing the Fatigue life of a FPSO. *Procedia Engineering* 194 (2017) 502 – 508.
- Shimamura, Yoshihide. 2002. FPSO/FSO: State of the art. *Journal of Marine Science and Technology* Vol. 7, 59–70.

Sumardiono. 2015. *Perkiraan Umur Kelelahan (Fatigue Life) Konstruksi FSO (Floating Storage And Offloading) Dengan Metode Spectral-Based Fatigue Analysis*. Tesis Program Magister Bidang Keahlian Teknik Perancangan Bangunan Laut FTK ITS.

Syahroni, Nur. 2014. *Fatigue Assesment of Welded Joints Taking into Account Effects of Residual Stresses*. Doctoral Thesis. Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Trondheim, Norway.

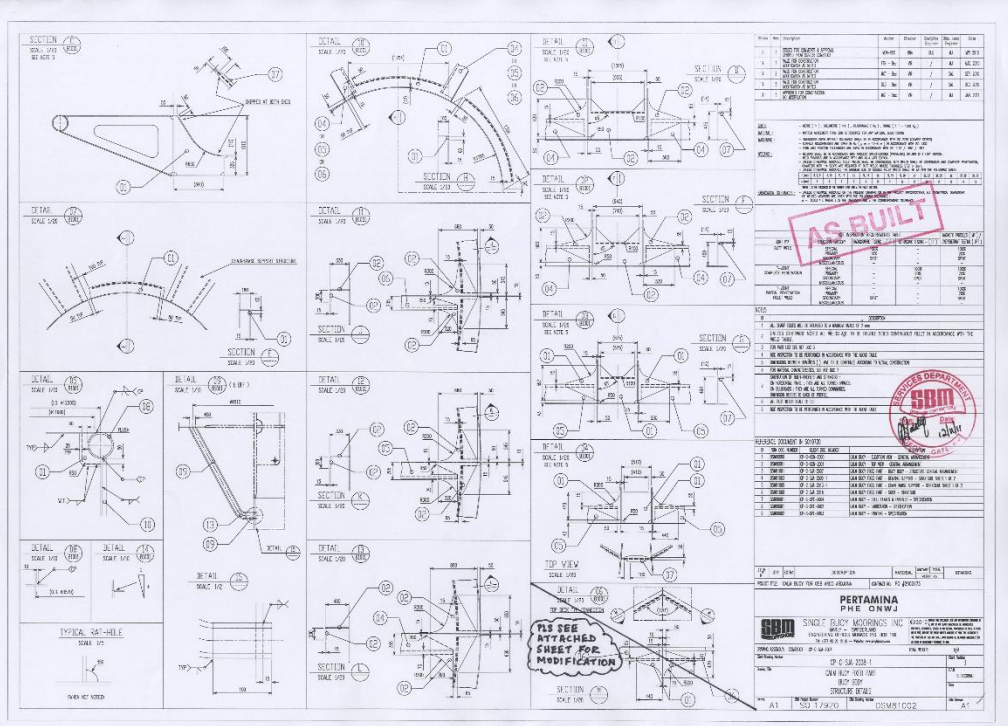
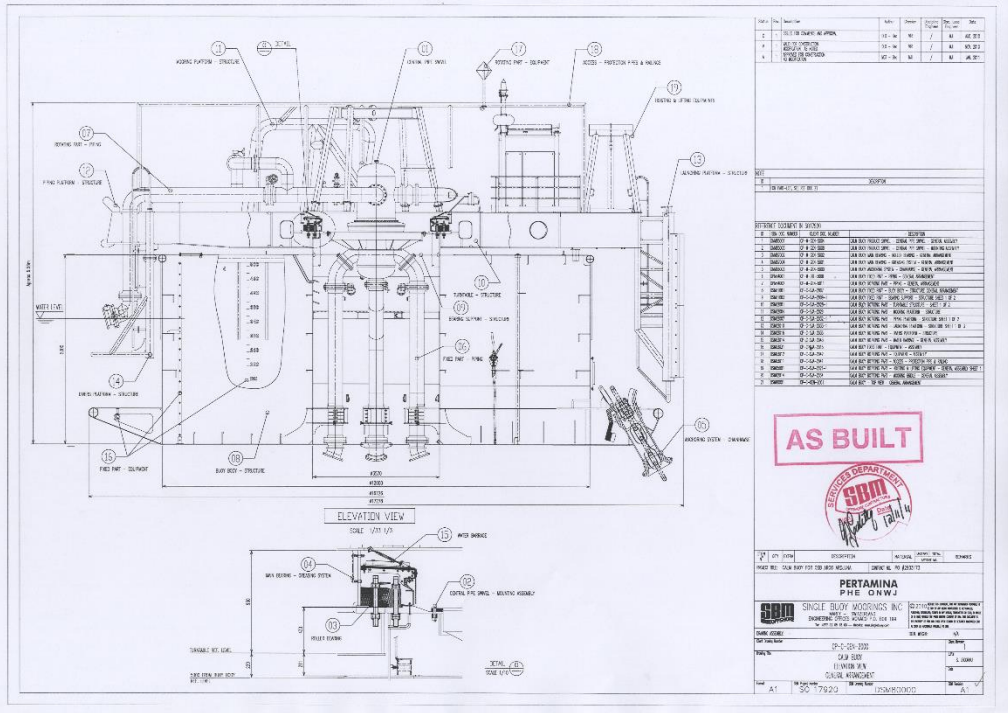
Yokohama. Standard hose configuration. (Online),(<https://www.y-yokohama.com>), diakses pada 4 Februari 2019).

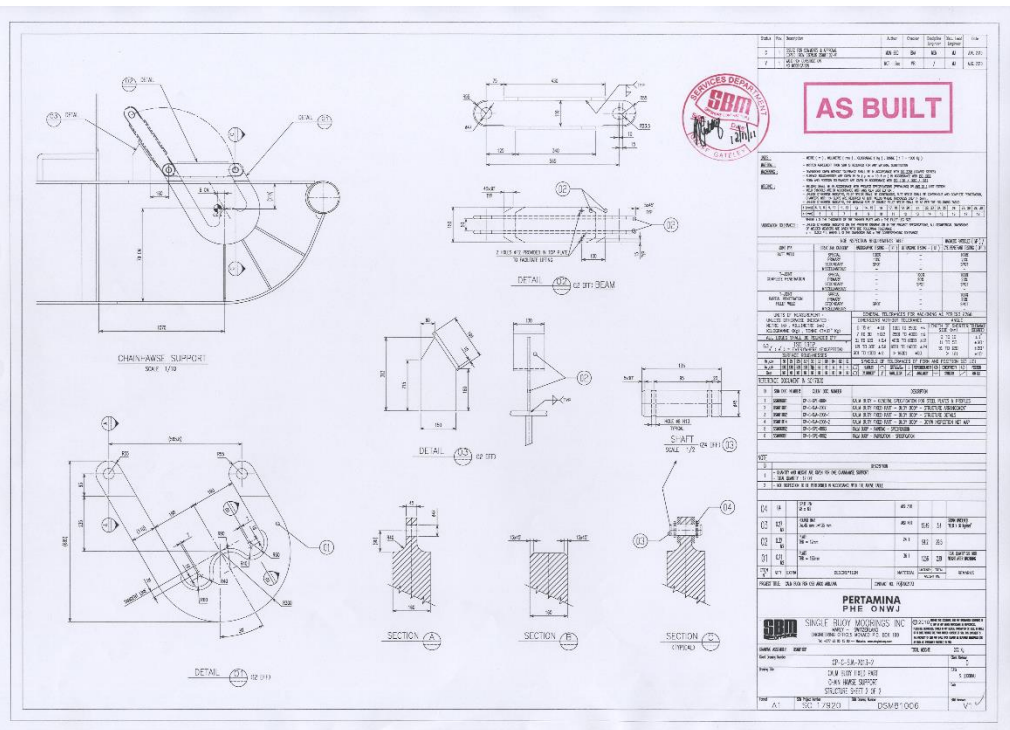
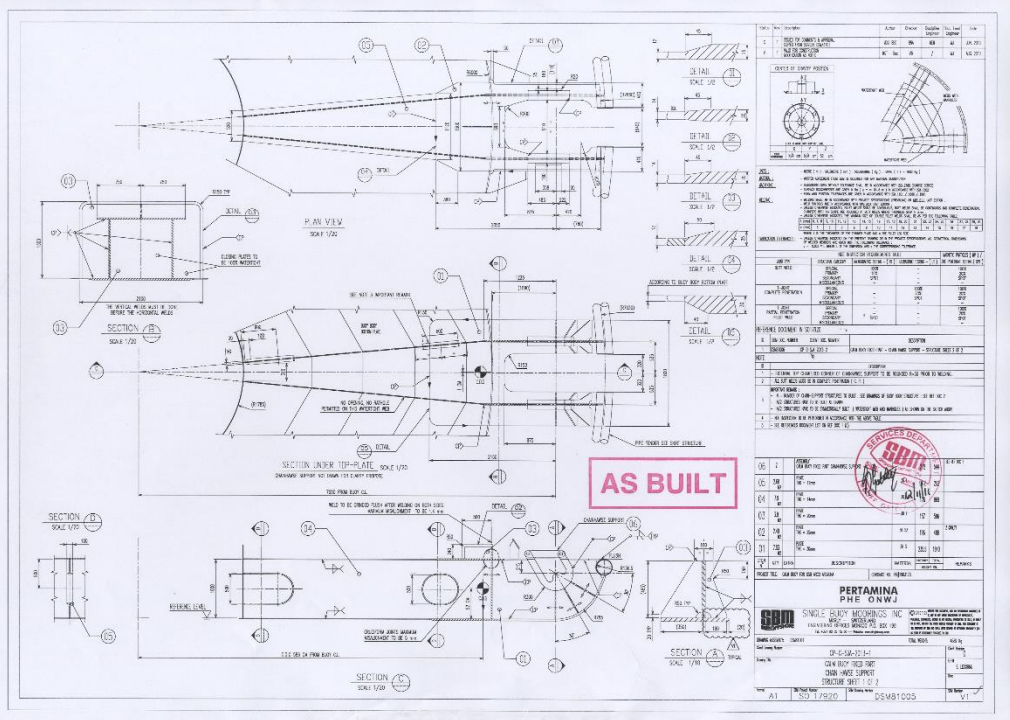
(Halaman Sengaja Dikосongkan)

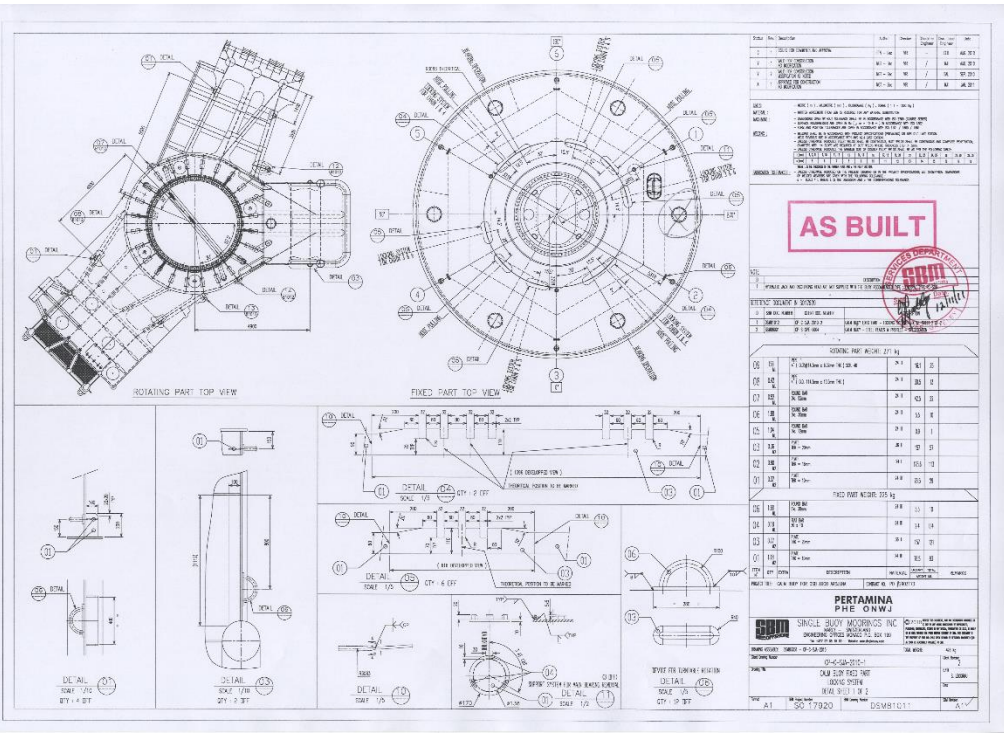
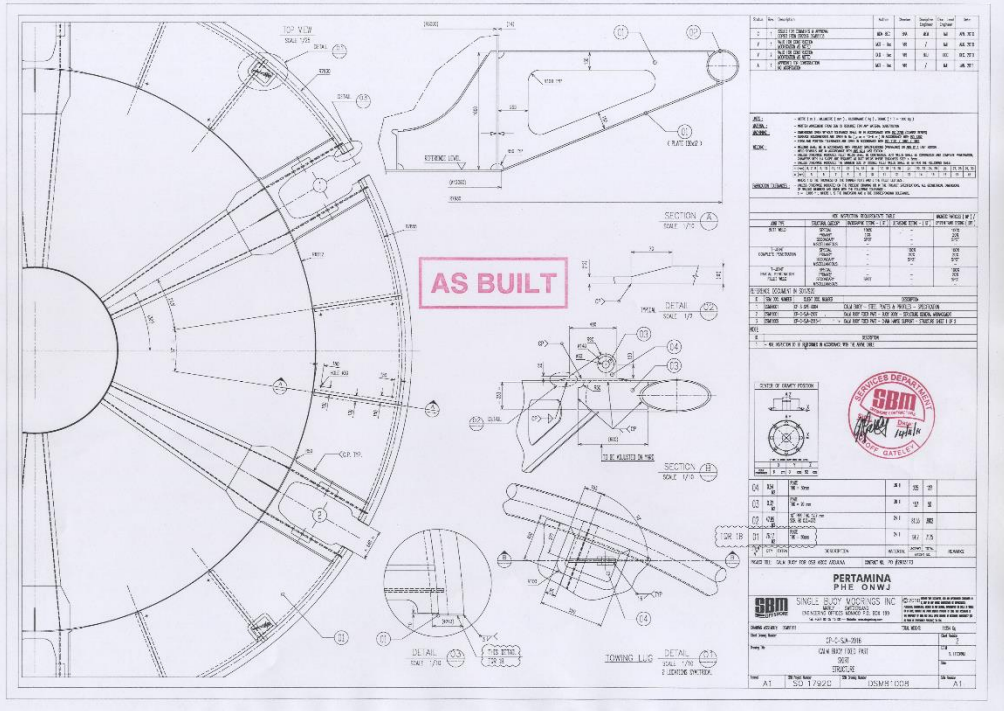
LAMPIRAN A
GAMBAR DETAIL KONSTRUKSI *SINGLE*
POINT MOORING (SPM)

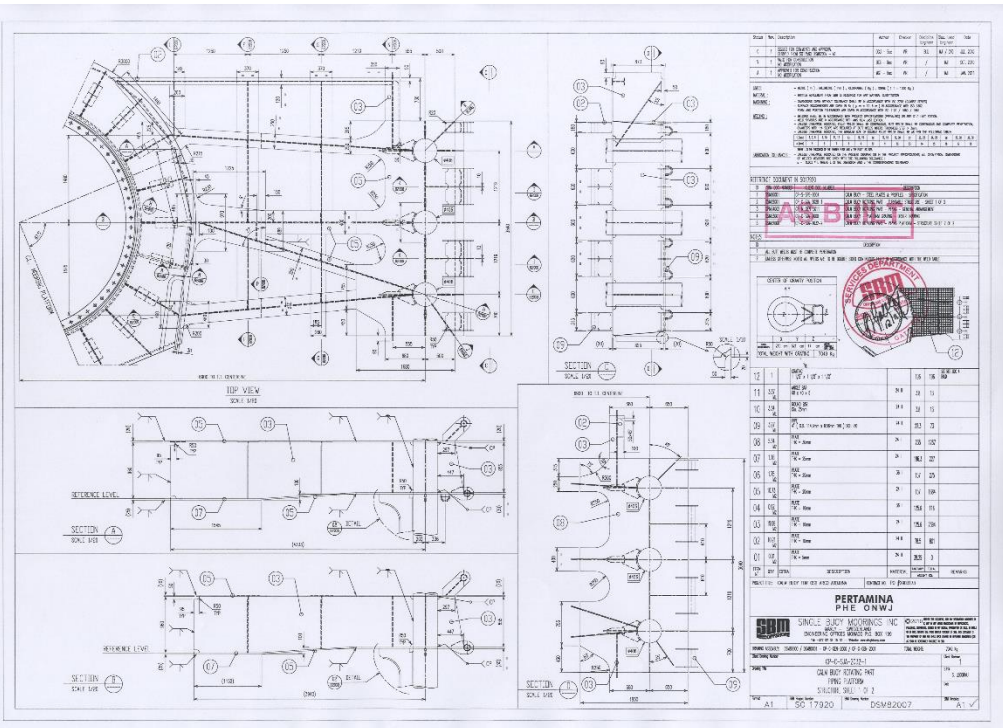
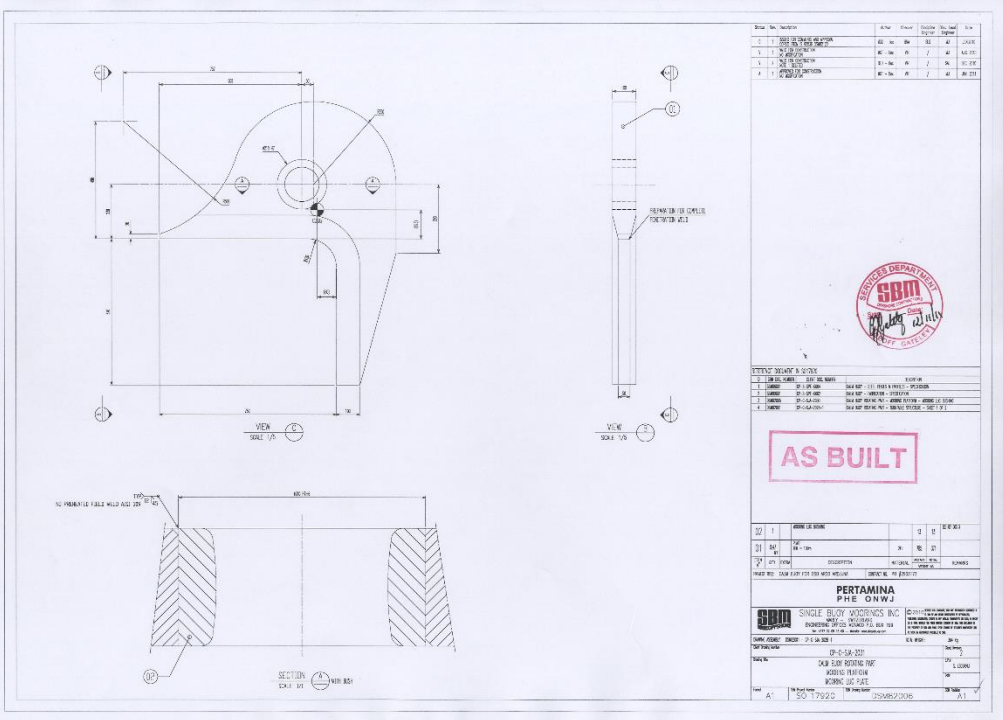
(Halaman Sengaja Dikосongkan)

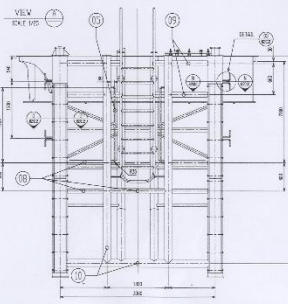
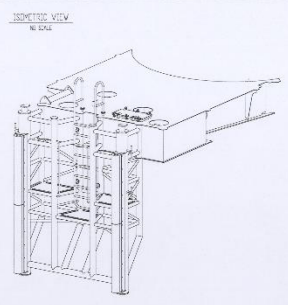
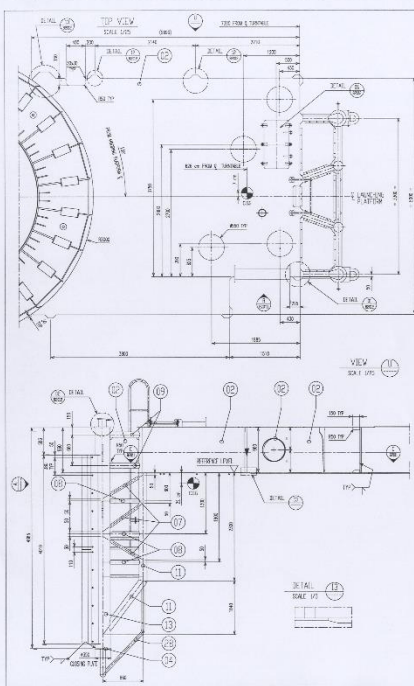
LAMPIRAN GAMBAR DETAIL KONSTRUKSI SPM DIDAPAT DARI PT. CITRA MAS :











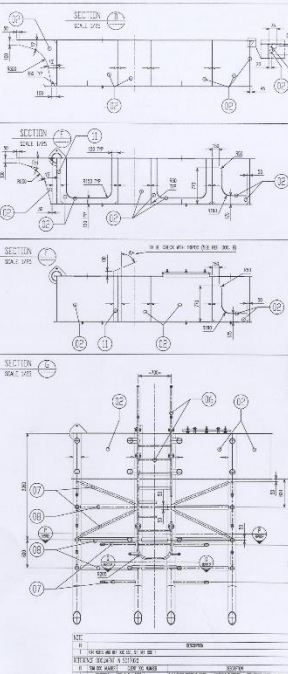
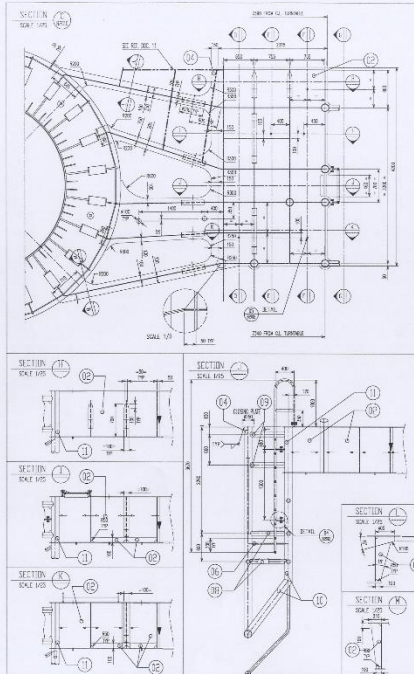
NO	REV	DESCRIPTION	DATE	BY	CHECKED	SCALE	STATUS
1		ISSUED FOR CONSTRUCTION	10/20/03
2	
3	
4	

NO	REV	DESCRIPTION	DATE	BY	CHECKED	SCALE	STATUS
1	
2	
3	
4	

PERTAMINA
PHE ONWJ

SINGLE COPY WORKS INC
INDONESIA

DATE: 10/20/03
SCALE: 1:100
PROJECT: ...



NO	REV	DESCRIPTION	DATE	BY	CHECKED	SCALE	STATUS
1	
2	
3	
4	

NO	REV	DESCRIPTION	DATE	BY	CHECKED	SCALE	STATUS
1	
2	
3	
4	

AS BUILT

PERTAMINA
PHE ONWJ

SINGLE COPY WORKS INC
INDONESIA

DATE: 10/20/03
SCALE: 1:100
PROJECT: ...

(Halaman Sengaja Dikосongkan)

LAMPIRAN B
PENGECEKAN HASIL TENSION PADA
KONDISI NON-COLINEAR DAN PADA
ARAH PEMBEBANAN 120° DAN 150°

(Halaman Sengaja Dikосongkan)

PENGECEKAN NILAI TENSION PADA KONDISI COLINEAR DAN NON-COLINEAR

Tabel Hasil Tension pada Kondisi *Colinear* dengan *Non-Colinear*

Code	Chain 1 (kN)	Chain 2 (kN)	Chain 3 (kN)	Chain 4 (kN)	Chain 5 (kN)	Chain 6 (kN)	Max Tension (kN)
Full Load - Inline - Colinear	654.14	435.35	531.67	419.69	653.27	1006.73	1006.73
Full Load - Inline - Non-Colinear	965.51	561.49	537.40	431.34	460.23	928.99	965.51

Dari hasil tabel di atas dapat dilihat bahwa pada kondisi sistem lingkungan yang *Colinear* menunjukkan nilai yang lebih ekstrim daripada sistem *Non-Colinear*

PENGECEKAN NILAI TENSION PADA KONDISI AWAL DENGAN ARAH PEMBEBANAN 150° DAN 120°

Tabel Hasil Tension untuk Pengecekan Perubahan Arah Pembebanan

Code	Chain 1 (kN)	Chain 2 (kN)	Chain 3 (kN)	Chain 4 (kN)	Chain 5 (kN)	Chain 6 (kN)	Max Tension (kN)
Full Load - Inline - 180°	654.14	435.35	531.67	419.69	653.27	1006.73	1006.73
Full Load - Between Line - 180°	939.90	439.56	475.02	476.41	459.57	912.12	939.90
Full Load - Between Line - 150°	951.12	617.40	427.87	512.28	435.71	691.36	951.12
Full Load - Between Line - 120°	870.24	945.54	434.81	484.71	474.83	468.88	945.54

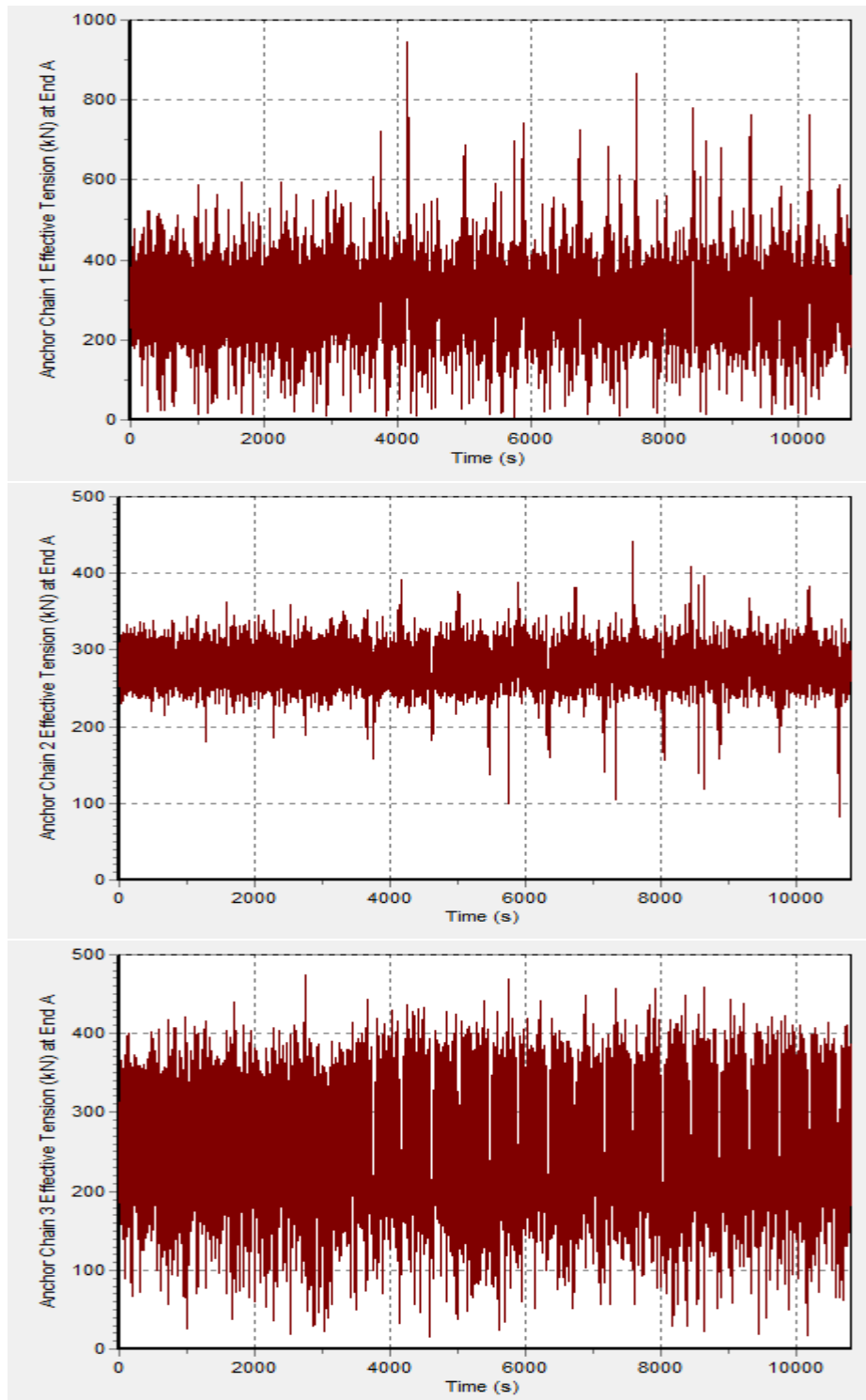
Dari hasil pengecekan nilai Tension pada tabel di atas, menunjukkan bahwa pada arah pembebanan 150 dan 120 derajat memiliki nilai yang lebih kecil daripada kondisi awal (*Inline-180*). Sehingga pengambilan konfigurasi *Inline* dan *Between Line* pada analisis *Tension Mooring Line* dapat dikatakan sudah representatif untuk merepresentasikan kondisi ekstrim saat simulasi.

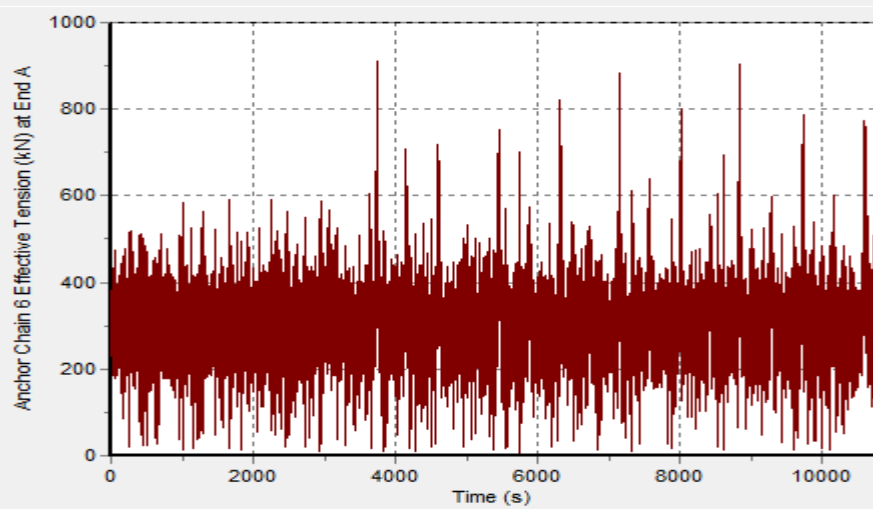
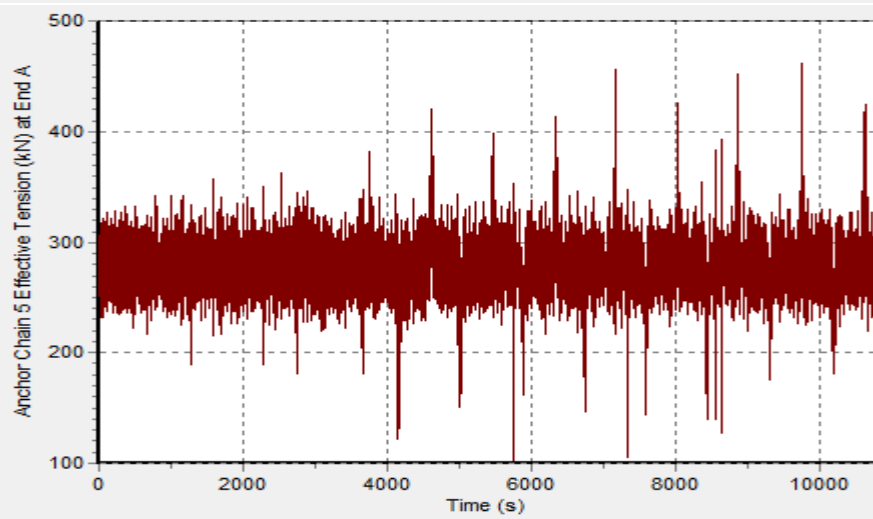
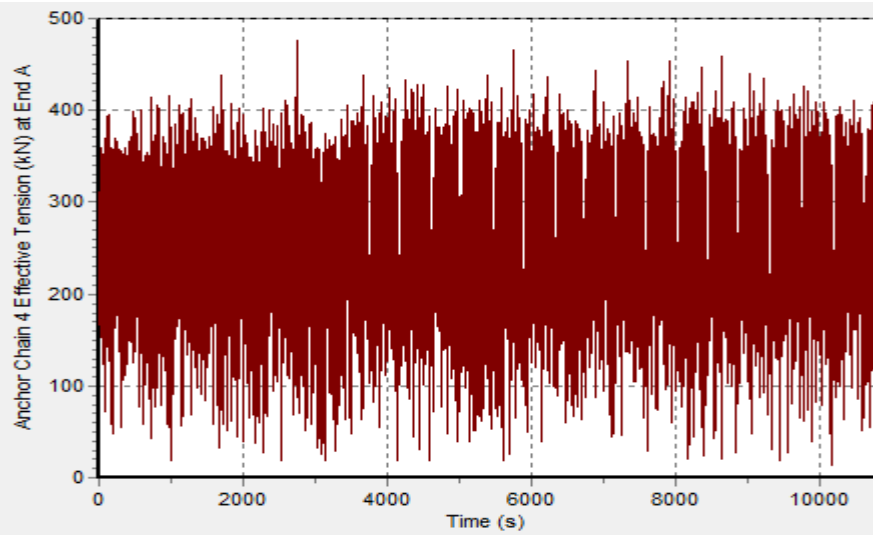
(Halaman Sengaja Dikосongkan)

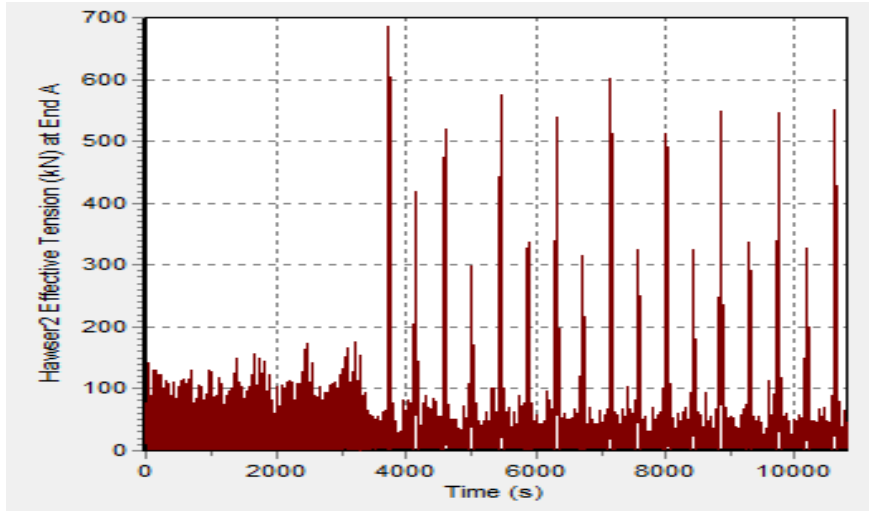
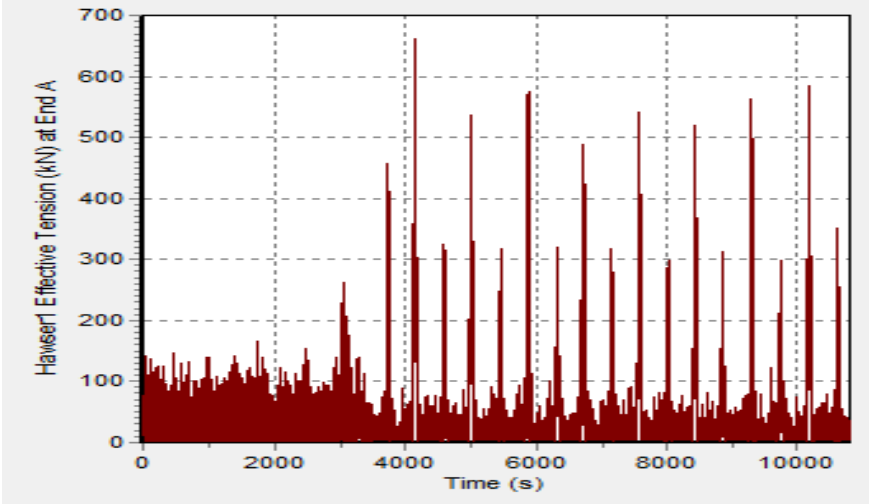
LAMPIRAN C
GRAFIK TIME HISTORY UNTUK
TENSION PADA MOORING LINE

(Halaman Sengaja Dikосongkan)

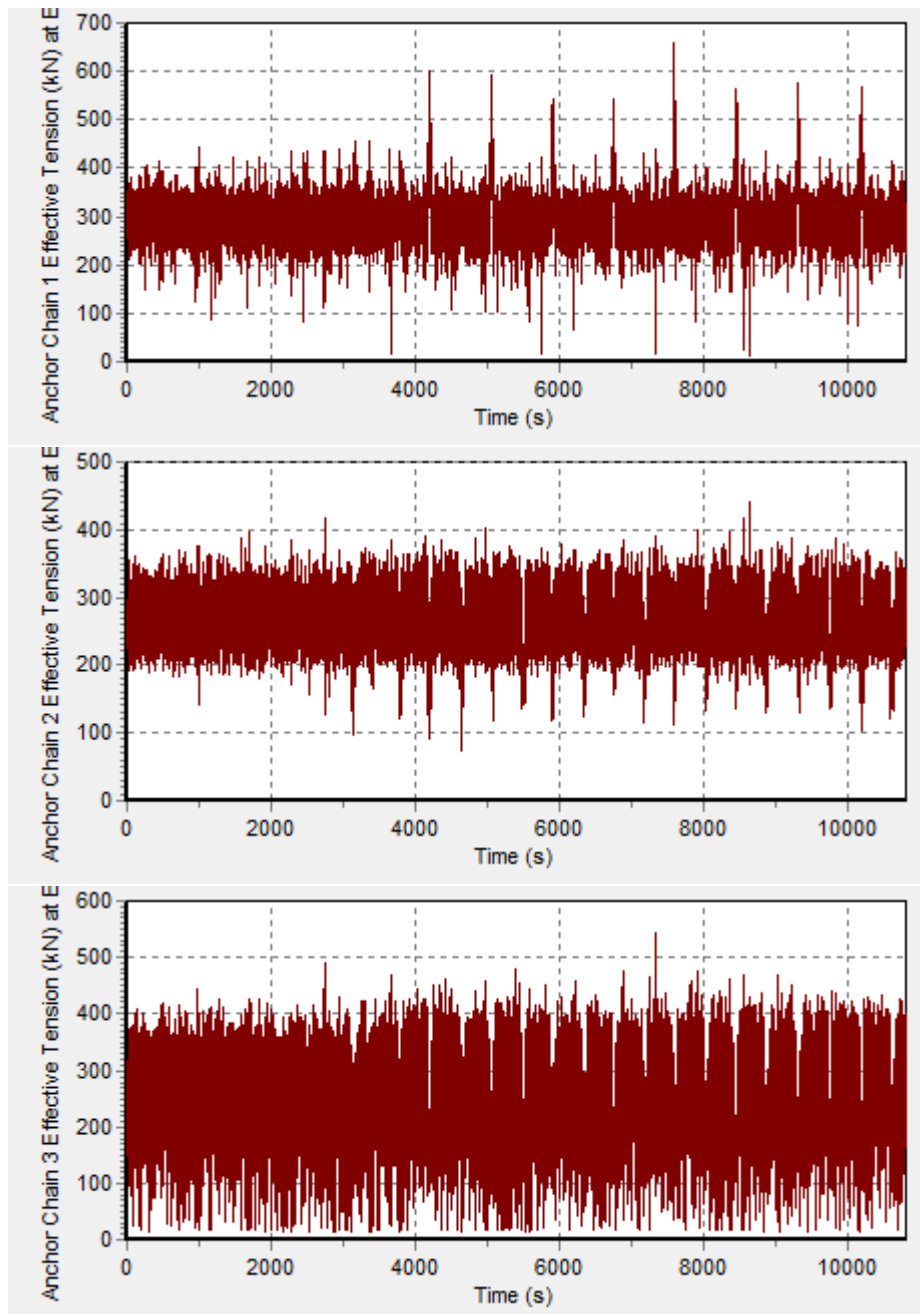
GRAFIK TIME HISTORY UNTUK TENSION PADA LC-1 :

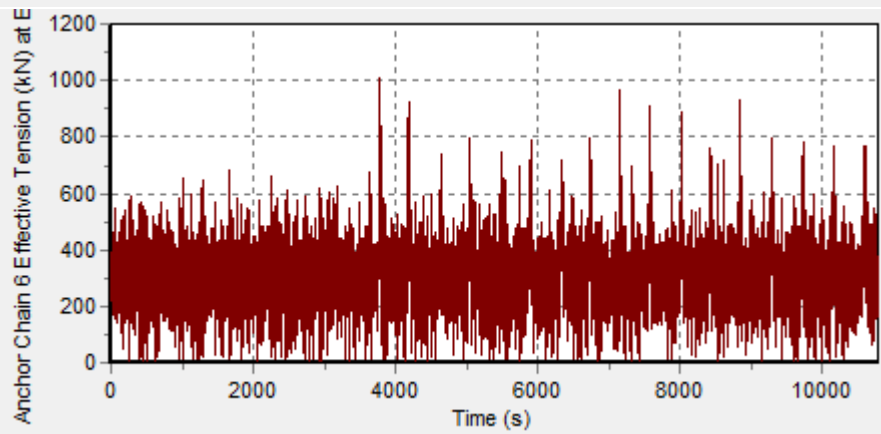
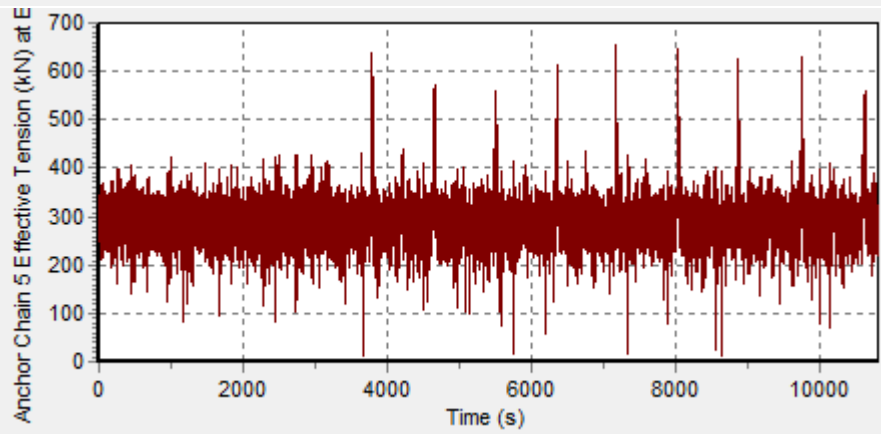
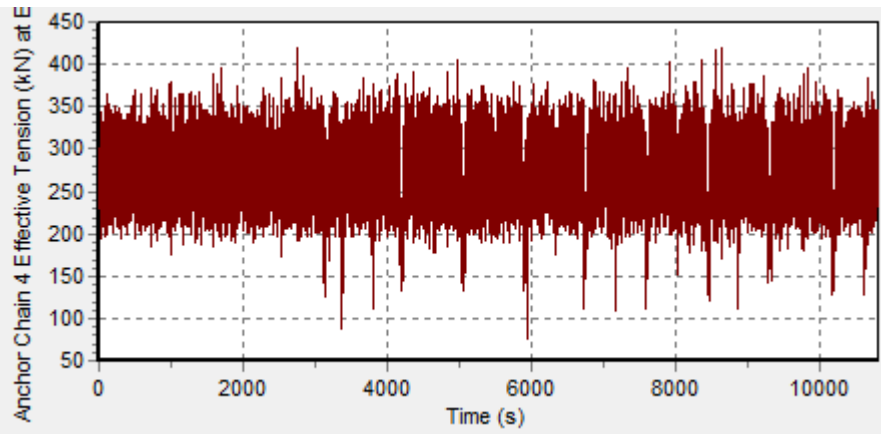


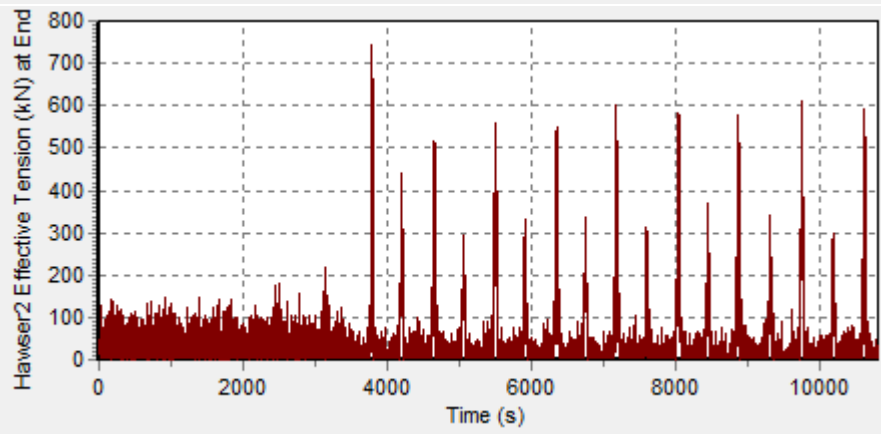
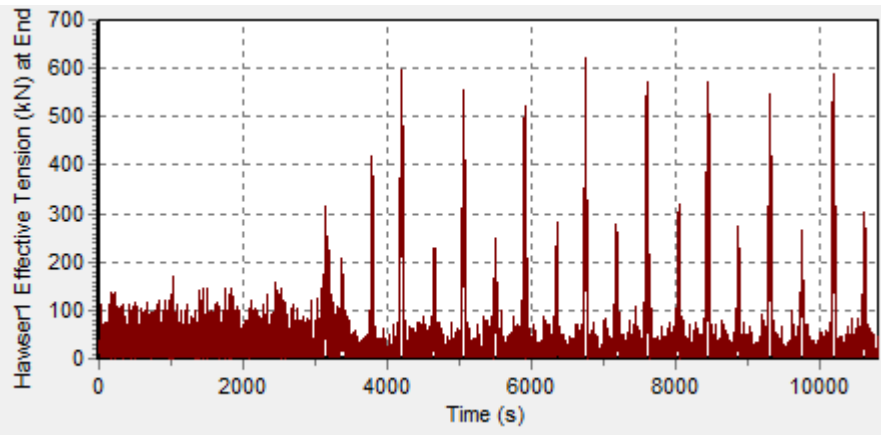




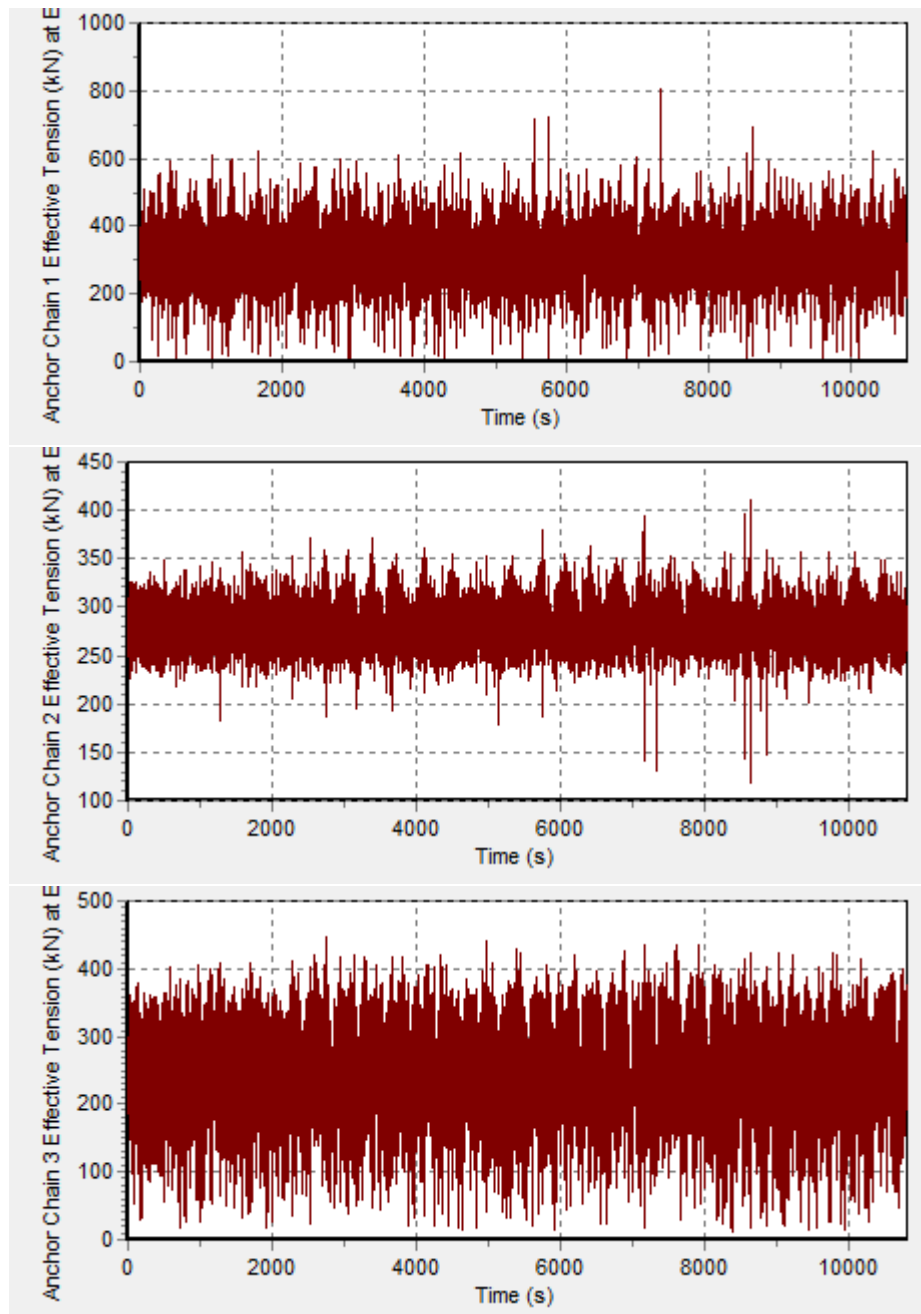
GRAFIK TIME HISTORY UNTUK TENSION PADA LC-2

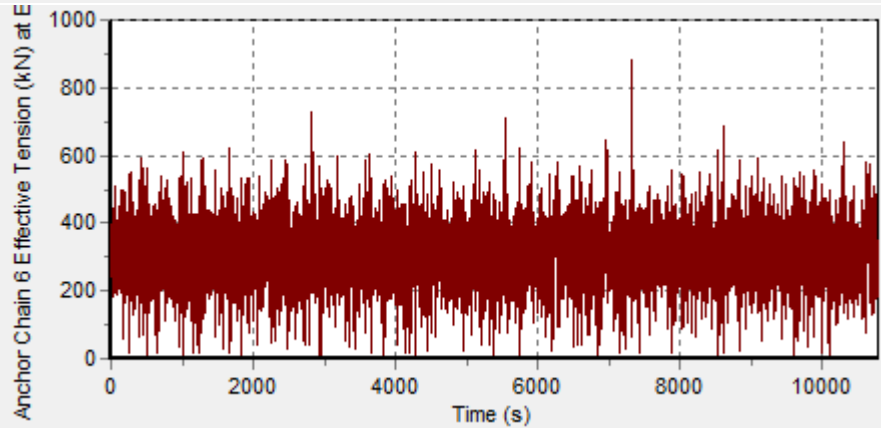
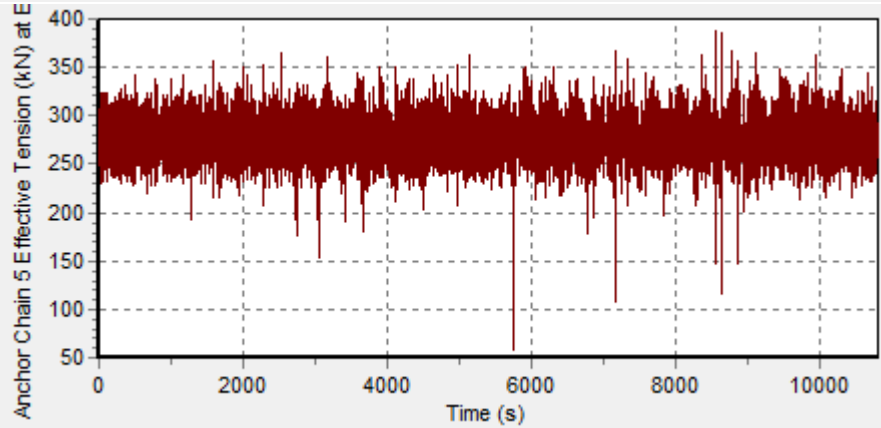
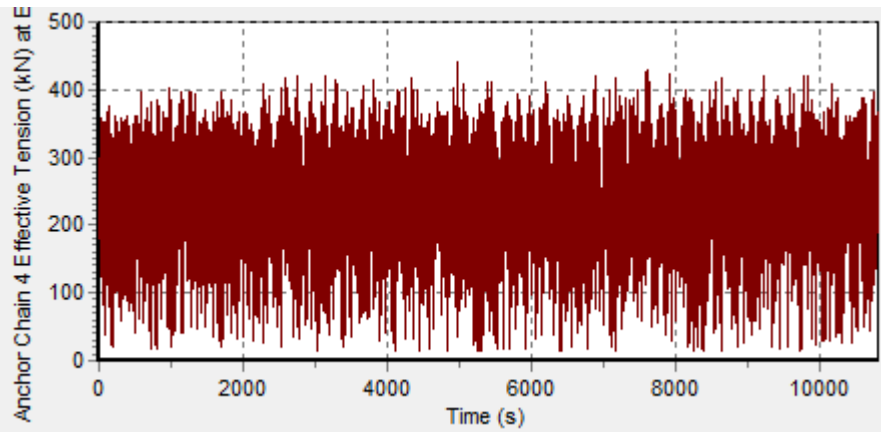


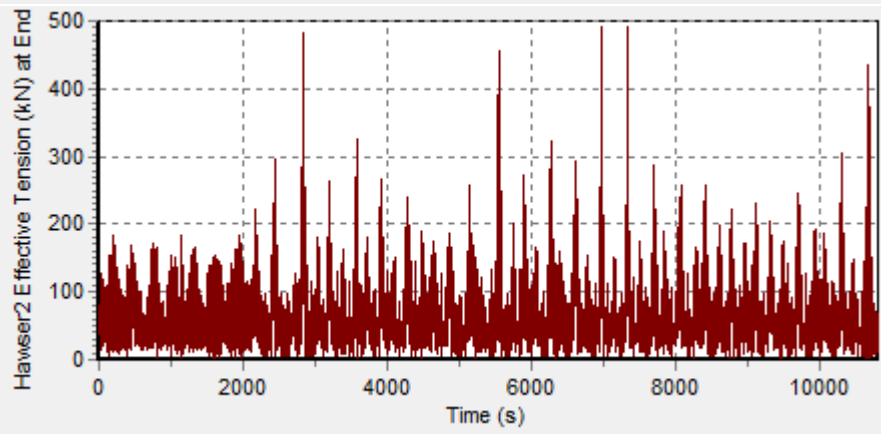
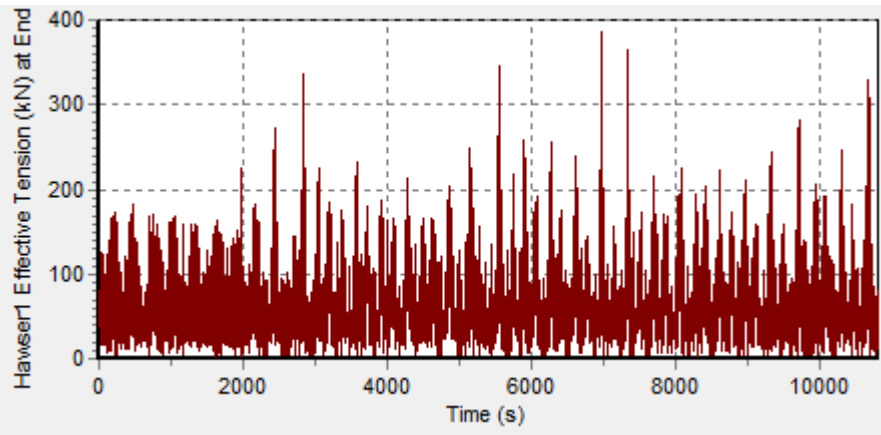




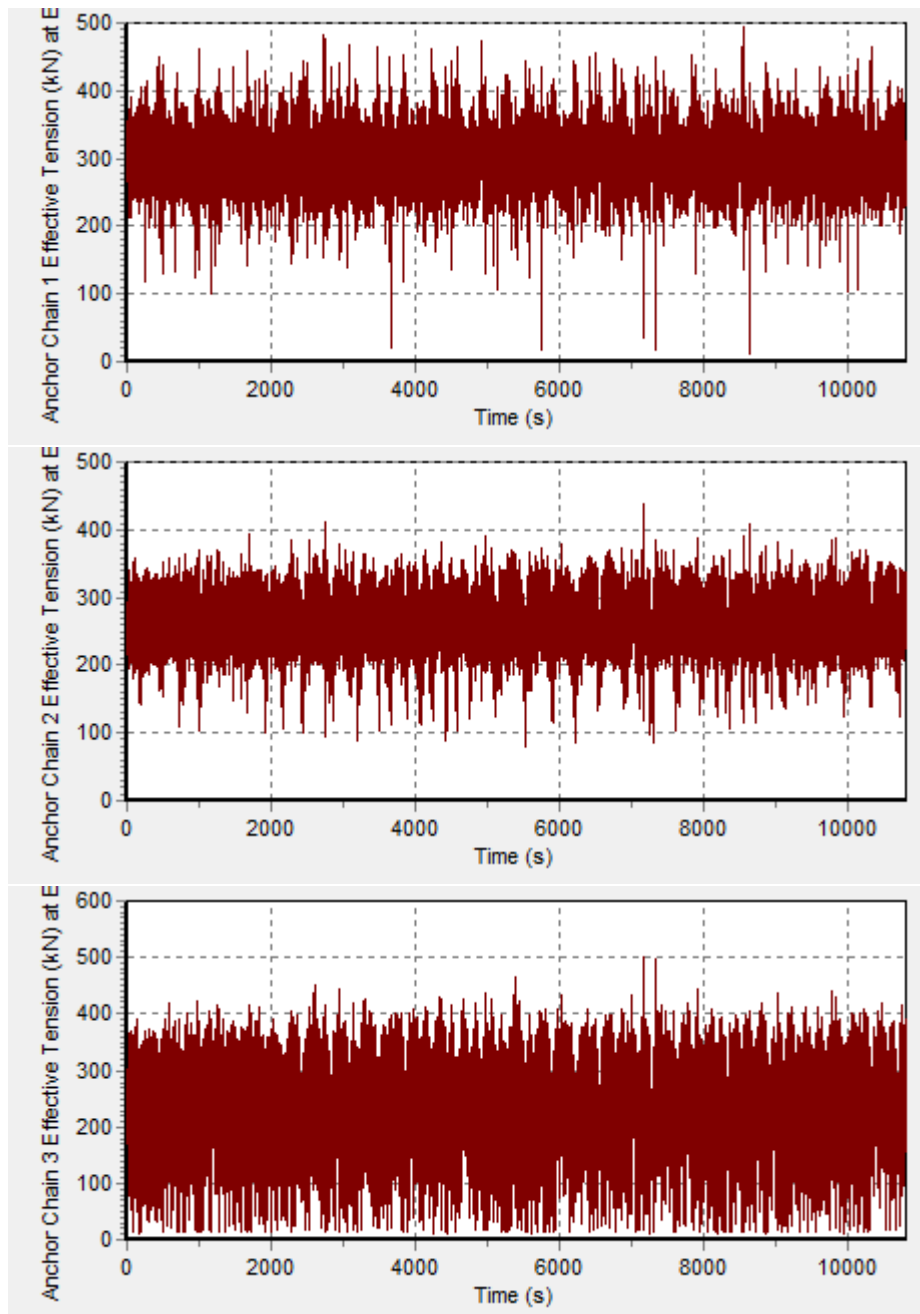
GRAFIK TIME HISTORY UNTUK TENSION PADA LC-3

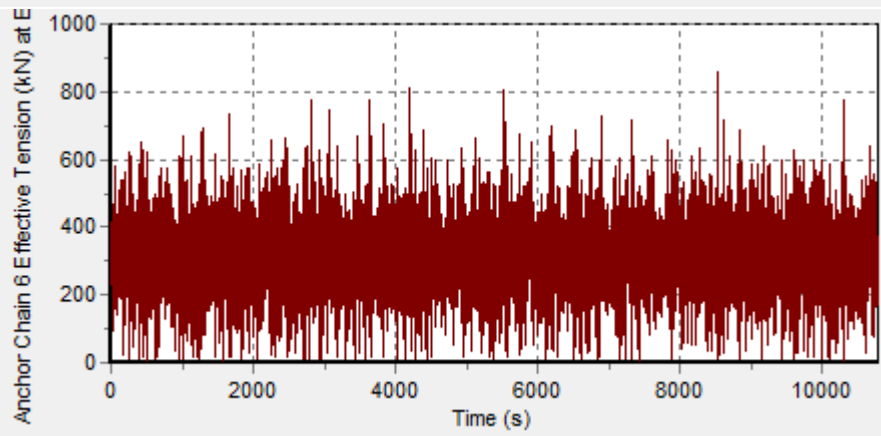
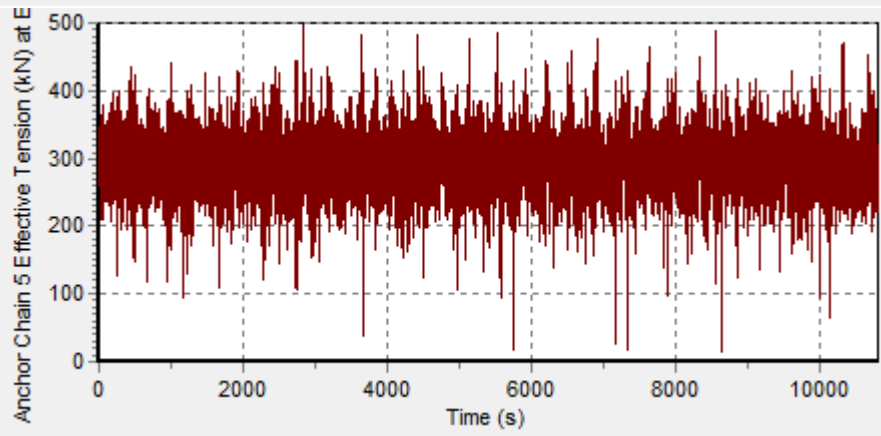
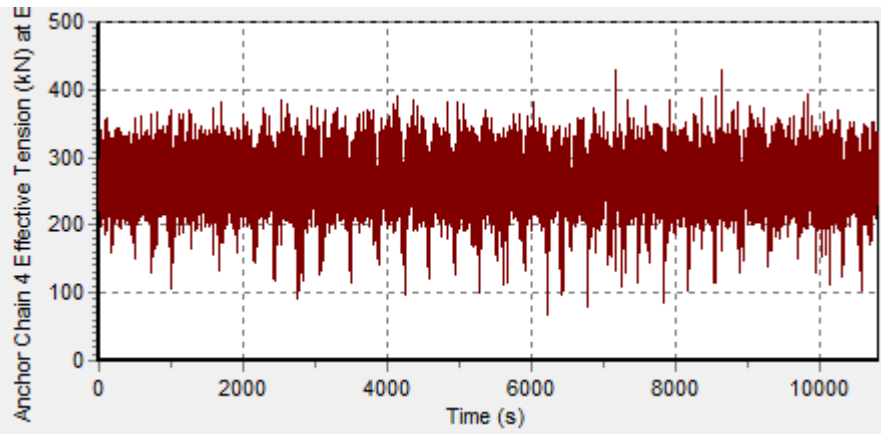


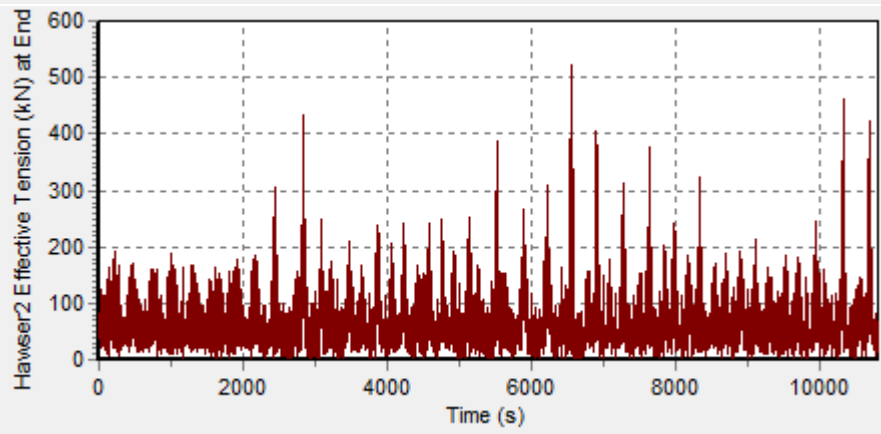
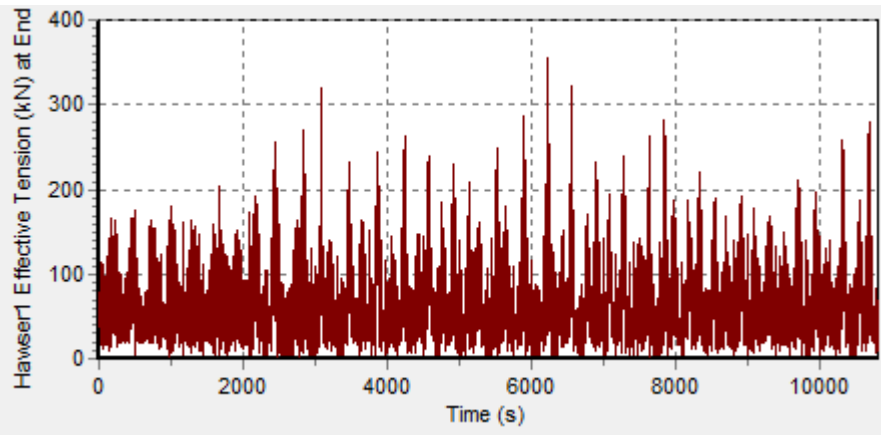




GRAFIK TIME HISTORY UNTUK TENSION PADA LC-4



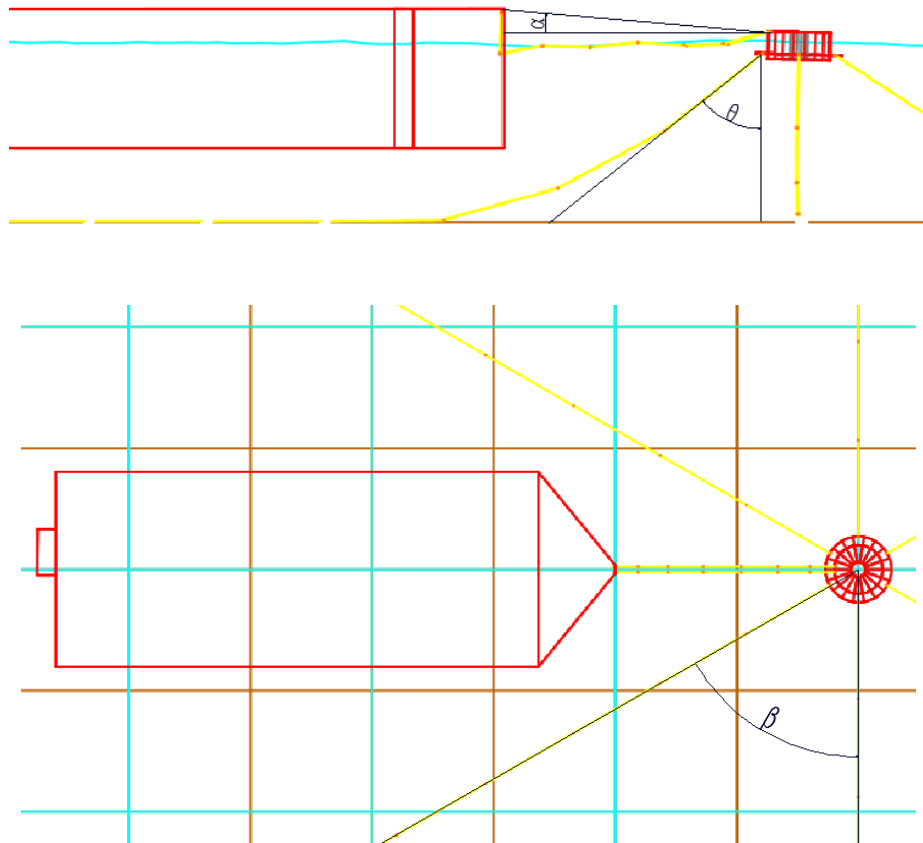




LAMPIRAN D
PERHITUNGAN KOMPONEN GAYA X,Y,Z
PADA HASIL TENSION

(Halaman Sengaja Dikосongkan)

PERHITUNGAN KOMPONEN GAYA X Y Z



Gambar Ilustrasi Sudut untuk masing-masing Tali

Untuk mengubah *Tension* pada *Mooring Line* menjadi komponen gaya 3 dimensi maka akan digunakan persamaan berikut ini :

Untuk *Anchor Chain* :

$$F_x = T \cdot \sin\theta \cdot \sin\beta$$

$$F_y = T \cdot \sin\theta \cdot \cos\beta$$

$$F_z = T \cdot \cos\theta$$

Untuk *Hawser Line* :

$$F_x = T \cdot \cos\alpha \cdot \cos\beta$$

$$F_y = T \cdot \cos\alpha \cdot \sin\beta$$

$$F_z = T \cdot \sin\alpha$$

Hasil Perhitungan Komponen Gaya untuk masing-masing LC :

Hasil Perhitungan LC-1

Line Code	Fx (kN)	Fy (kN)	Fz (kN)	Tension (kN)
ch1	-394.13	-682.66	511.91	939.90
ch2	-368.65	0.00	239.40	439.56
ch3	-199.19	345.01	258.72	475.02
ch4	199.77	346.02	259.47	476.41
ch5	385.43	0.00	250.30	459.57
ch6	382.49	-662.49	496.78	912.12
hw1	570.62	-329.45	34.53	659.80
hw2	592.00	-341.79	35.83	684.52

Hasil Perhitungan LC-2

Line Code	Fx (kN)	Fy (kN)	Fz (kN)	Tension (kN)
ch1	-274.30	-475.11	356.27	654.14
ch2	-365.11	0.00	237.11	435.35
ch3	-222.95	386.15	289.57	531.67
ch4	175.99	304.82	228.58	419.69
ch5	547.88	0.00	355.80	653.27
ch6	422.16	-731.20	548.31	1006.73
hw1	529.83	-305.90	32.06	612.63
hw2	637.99	-368.34	38.61	737.70

Hasil Perhitungan LC-3

Line Code	Fx (kN)	Fy (kN)	Fz (kN)	Tension (kN)
ch1	-334.40	-579.20	434.32	797.45
ch2	-339.99	0.00	220.79	405.39
ch3	-186.92	323.76	242.78	445.76
ch4	184.45	319.47	239.56	439.86
ch5	323.64	0.00	210.17	385.90
ch6	369.66	-640.26	480.12	881.53
hw1	334.62	-193.19	20.25	386.91
hw2	425.59	-245.72	25.75	492.11

Hasil Perhitungan LC-4

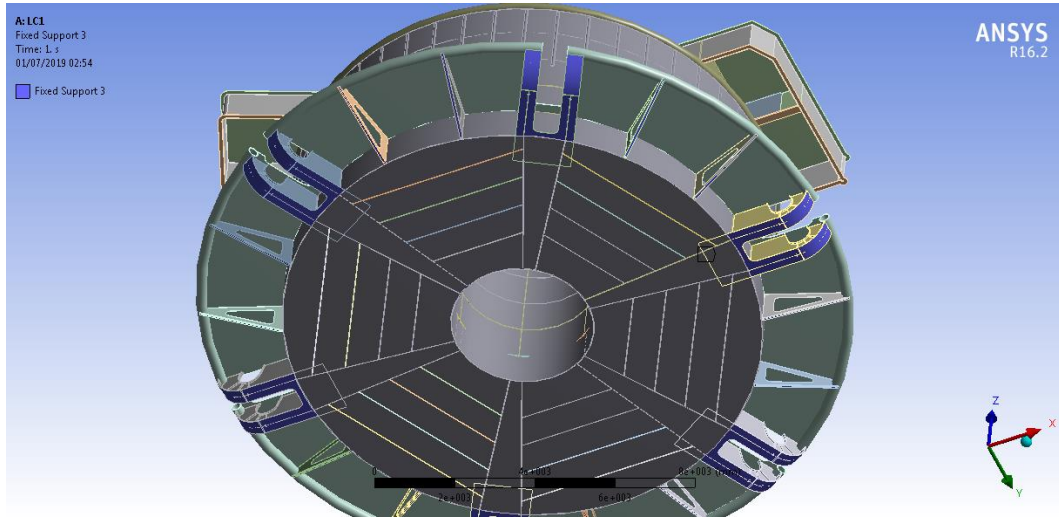
Line Code	Fx (kN)	Fy (kN)	Fz (kN)	Tension (kN)
ch1	-207.08	-358.67	268.96	493.82
ch2	-367.66	0.00	238.76	438.39
ch3	-210.35	364.34	273.21	501.64
ch4	179.93	311.65	233.70	429.09
ch5	415.74	0.00	269.98	495.71
ch6	359.83	-623.25	467.36	858.11
hw1	291.56	-168.34	17.64	337.13
hw2	437.94	-252.84	26.50	506.38

(Halaman Sengaja Dikосongkan)

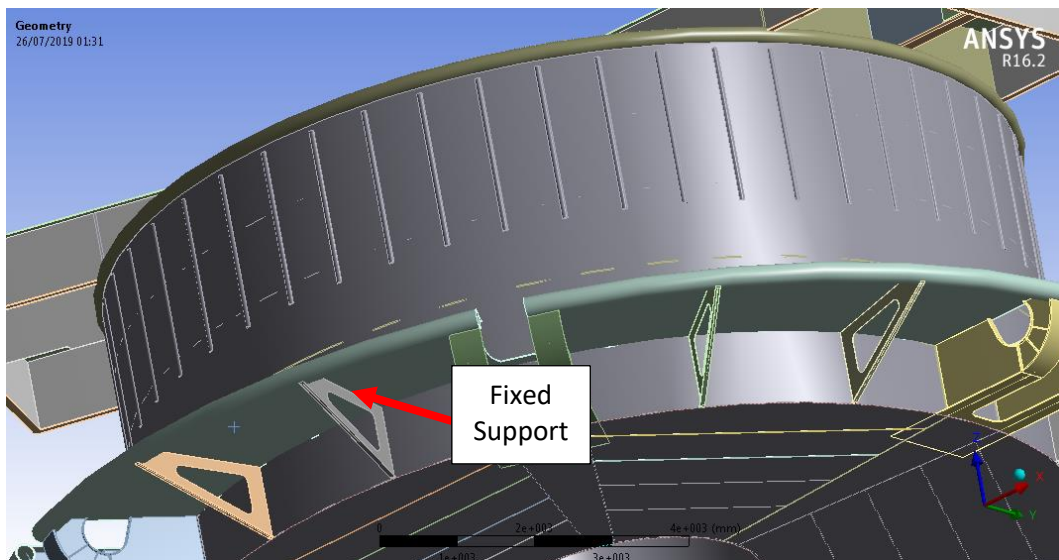
LAMPIRAN E
PENGECEKAN *BOUNDARY CONDITION*
PADA *FINITE ELEMENT ANALYSIS*

(Halaman Sengaja Dikосongkan)

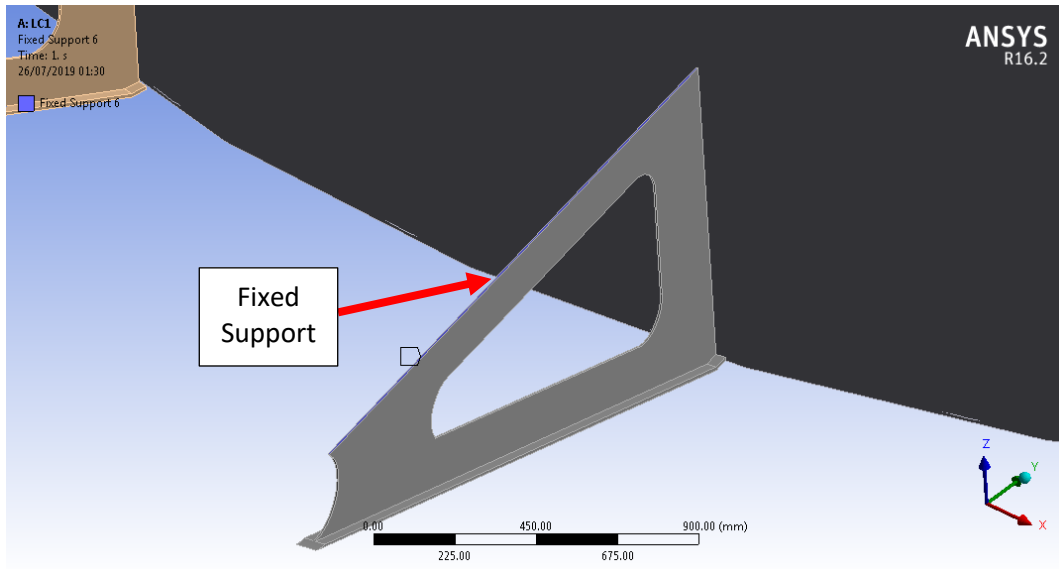
PENGECEKAN HASIL DARI PERUBAHAN *BOUNDARY CONDITION* PADA KONSTRUKSI SPM PADA *FINITE ELEMENT ANALYSIS*



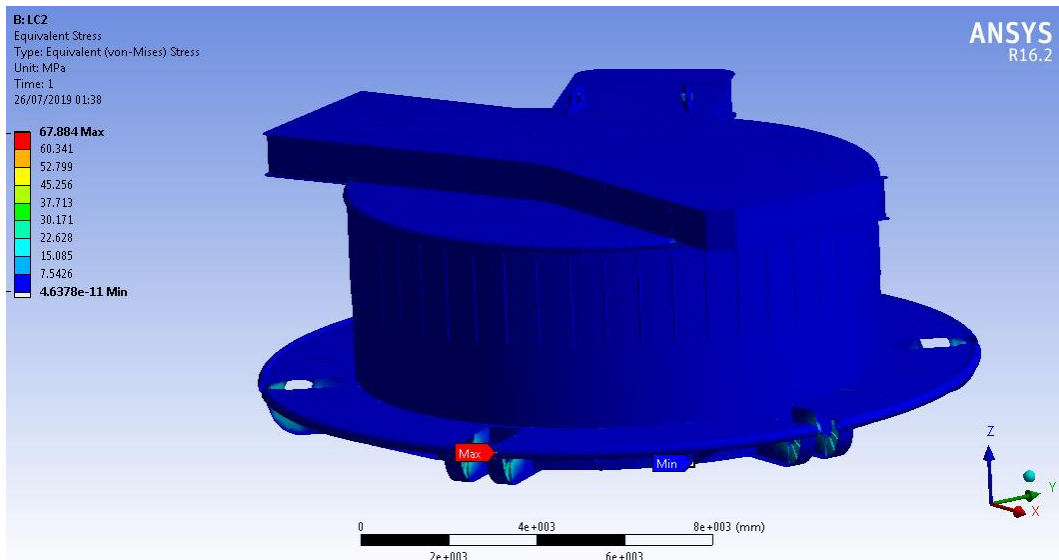
Gambar *Fixed Support* pada *Chain Connection*



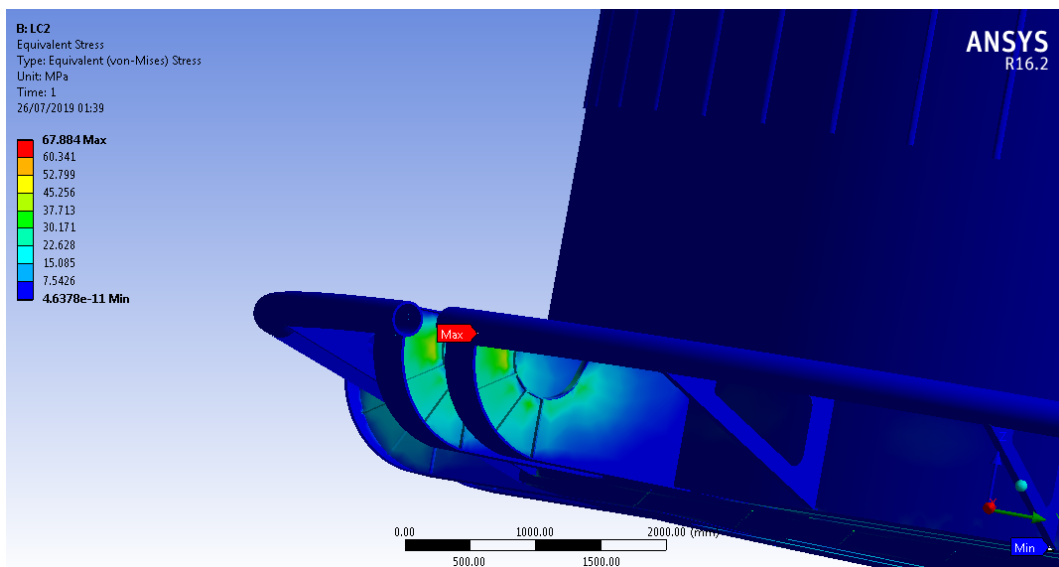
Gambar *Fixed Support* pada *Skirt Stiffener*



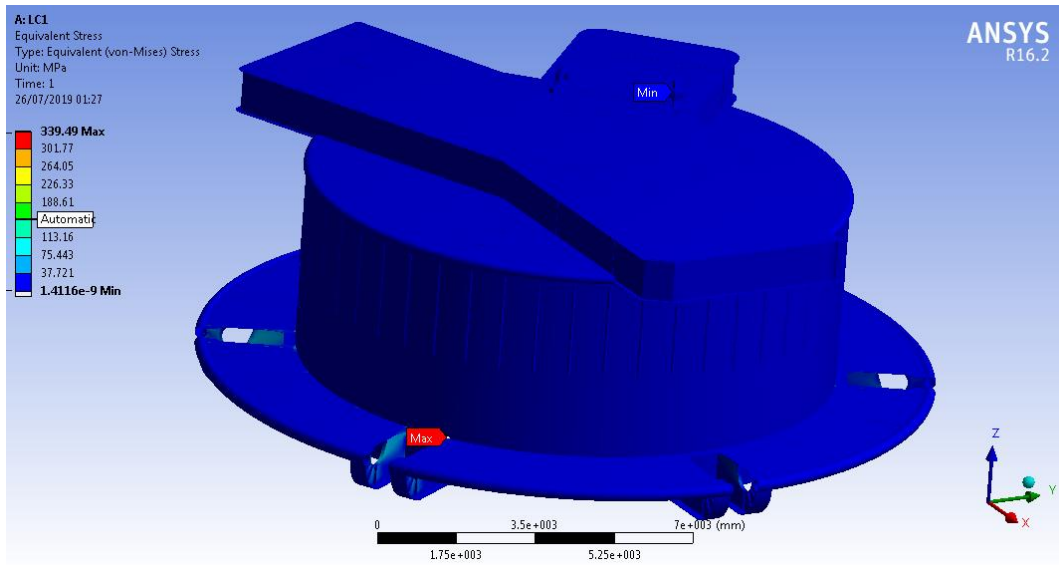
Gambar *Fixed Support* pada *Skirt Stiffener* (Lanj.)



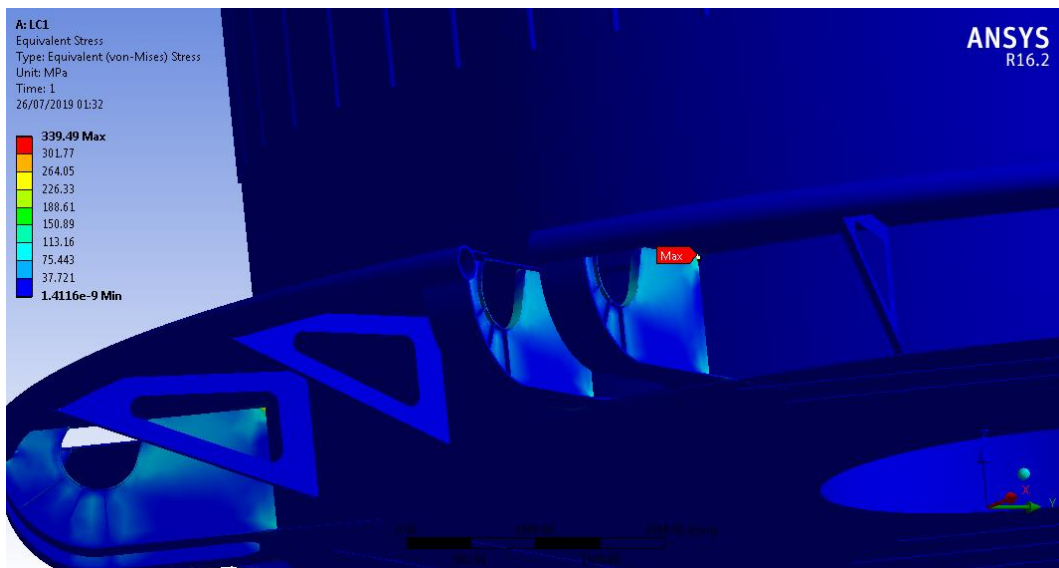
Gambar Equivalent Stress dengan Fixed Support pada Chain Connection



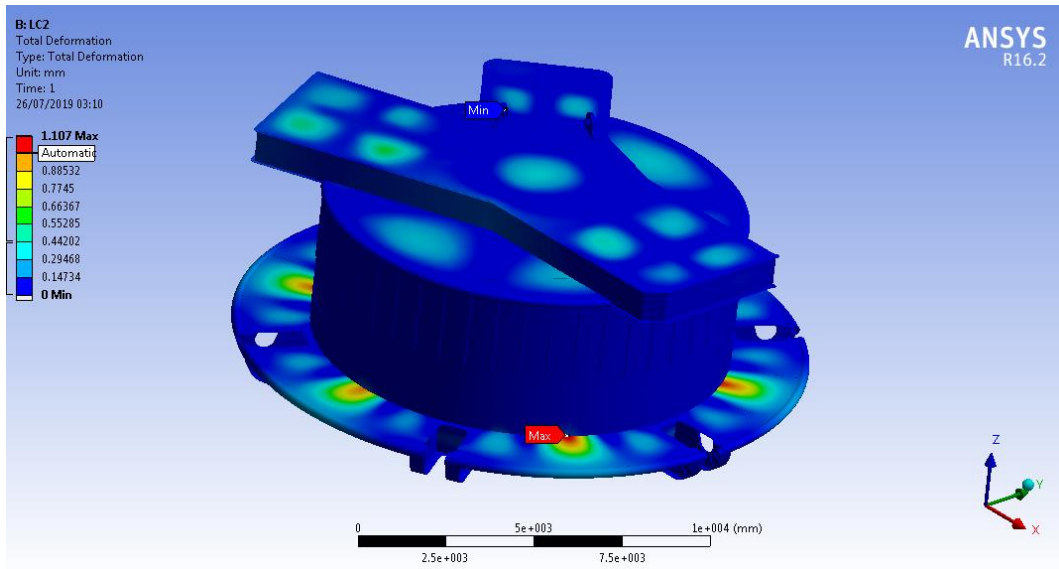
Gambar Equivalent Stress dengan Fixed Support pada Chain Connection (Lanj.)



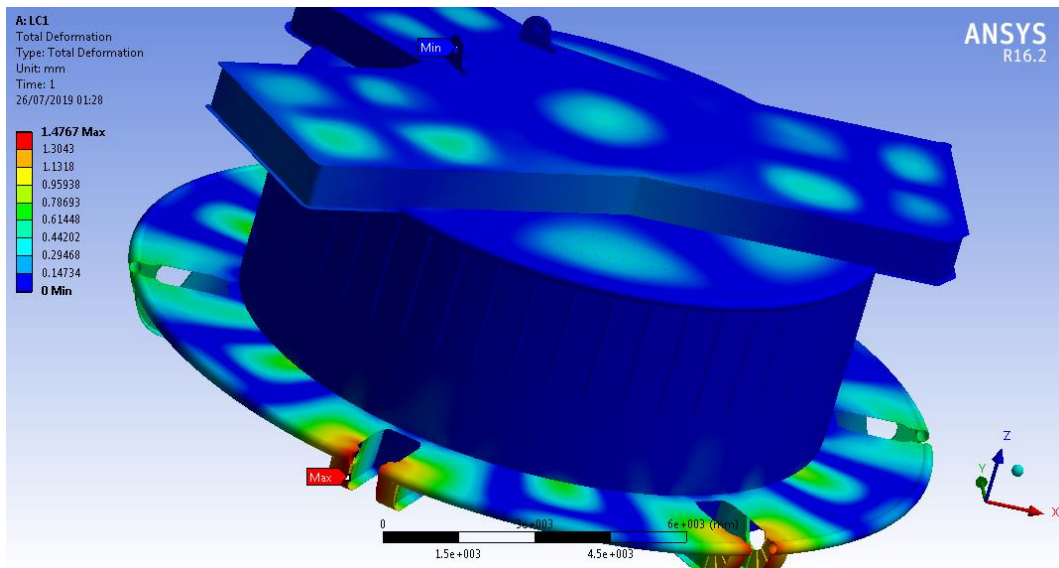
Gambar Equivalent Stress dengan Fixed Support pada Skirt Stiffener



Gambar Equivalent Stress dengan Fixed Support pada Skirt Stiffener (Lanj.)



Gambar Deformasi Struktur dengan *Fixed Support* pada *Chain Connection*



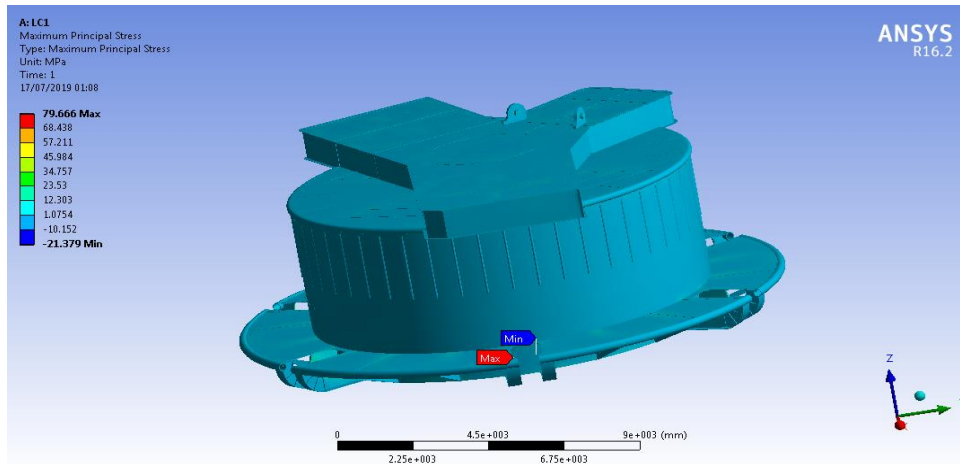
Gambar Deformasi Struktur dengan *Fixed Support* pada *Chain Connection*

Dari Hasil *Equivalent Stress* dengan *Fixed Support* pada *Chain Connection* dan pada *Skirt Stiffener*, memiliki nilai yang maksimum yang berbeda. Pada *fixed support* pada *Chain Connection* menghasilkan nilai maksimum *Equivalent Stress* sebesar 67.88 MPa. Sedangkan pada *fixed support* pada *Skirt Stiffener* menghasilkan nilai maksimum sebesar 339.5 MPa. Dengan *Yield Strength* untuk material konstruksi SPM adalah sebesar 250 MPa, maka pada *fixed support* pada *Skirt Stiffener* dengan hasil maksimum *Equivalent Stress* yang sebesar 339.5 MPa, maka nilai tersebut sudah melebihi *Yield Strength* dari material pada konstruksi SPM.

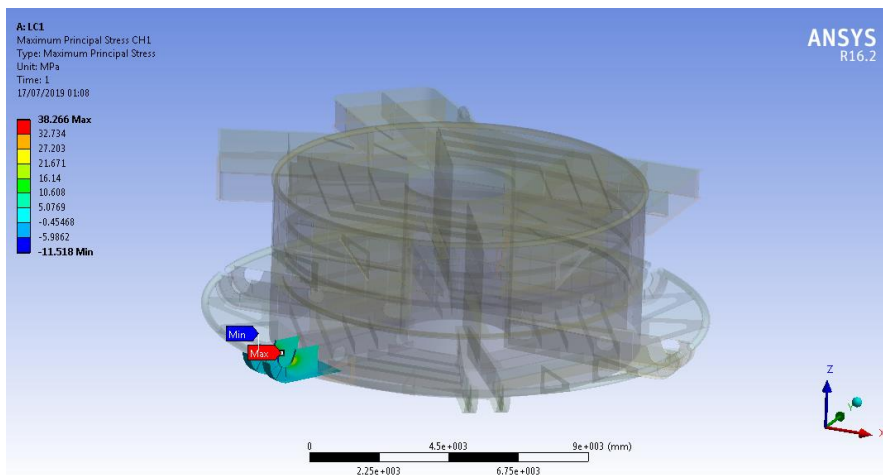
Lalu, pada Hasil pada *fixed support* pada *Chain Connection* dan *Skirt Stiffener* juga menunjukkan nilai yang berbeda yaitu 1.1 mm dan 1.4 mm atau memiliki perbedaan sebesar 0.3 mm.

LAMPIRAN F
HASIL FINITE ELEMENT ANALYSIS
PADA ANSYS

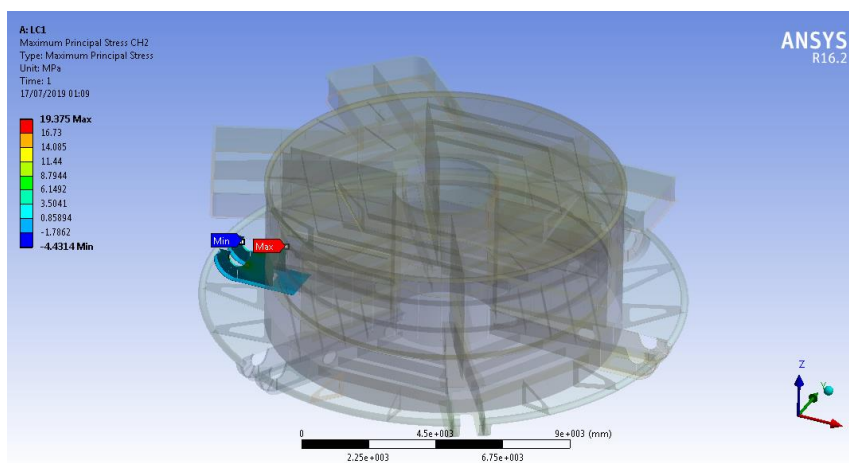
(Halaman Sengaja Dikосongkan)



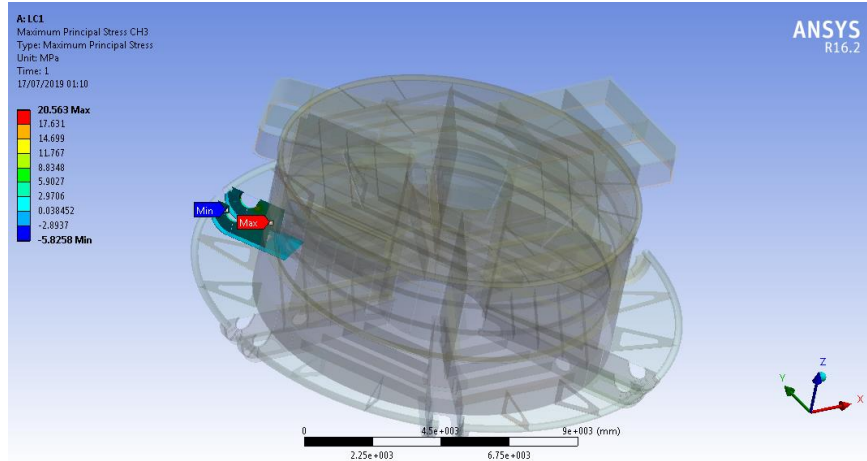
Maximum Principal Stress pada LC-1



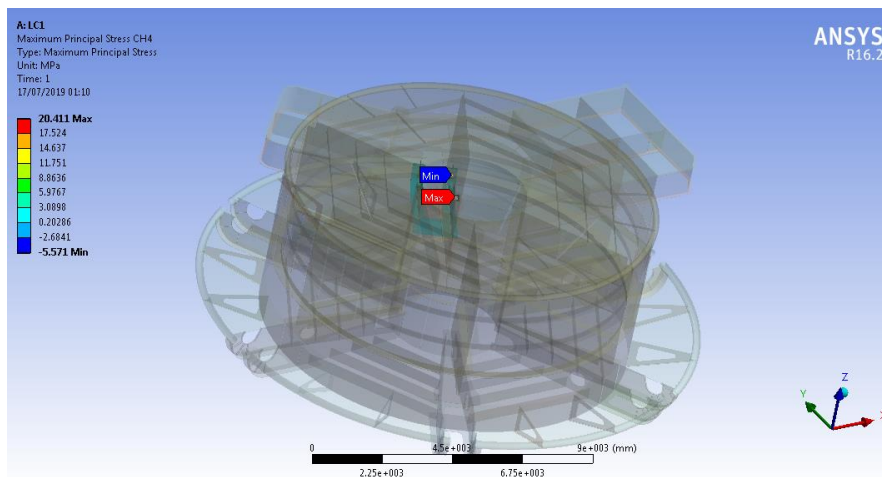
Maximum Principal Stress pada Chain Connection 1 (LC-1)



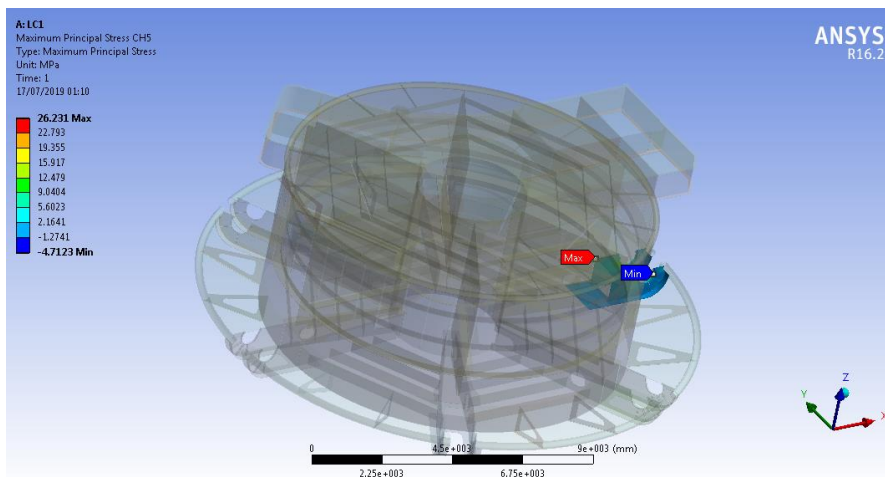
Maximum Principal Stress pada Chain Connection 2 (LC-1)



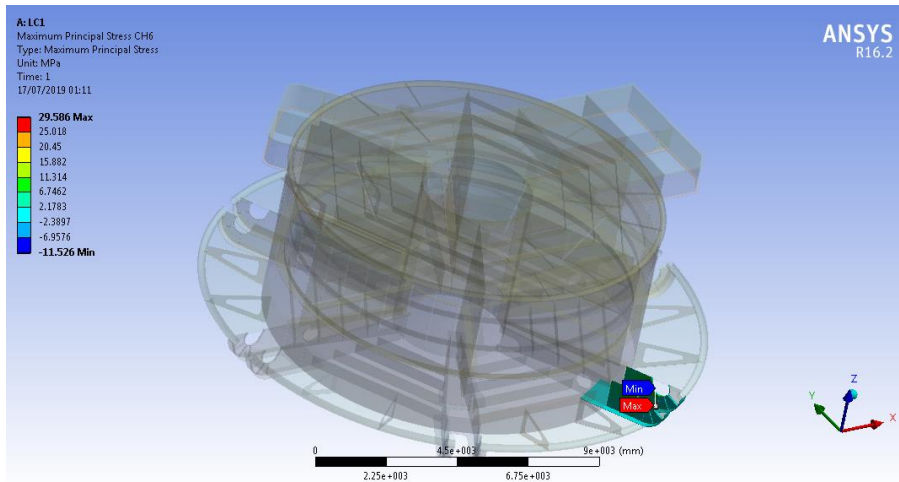
Maximum Principal Stress pada Chain Connection 3 (LC-1)



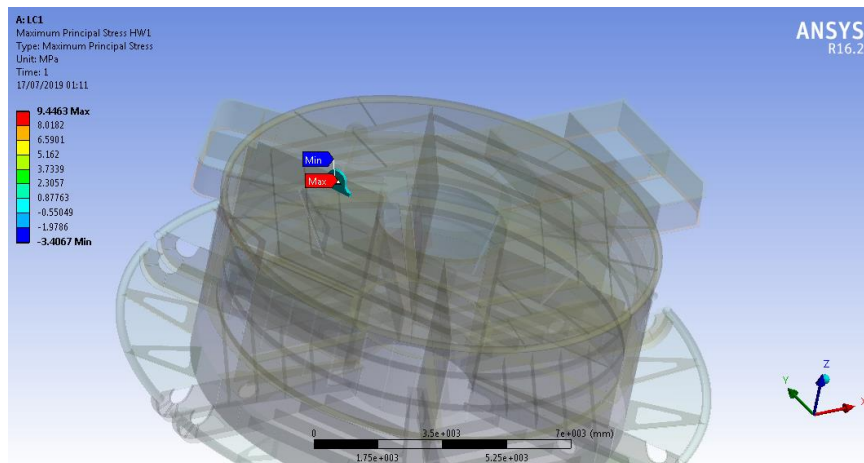
Maximum Principal Stress pada Chain Connection 4 (LC-1)



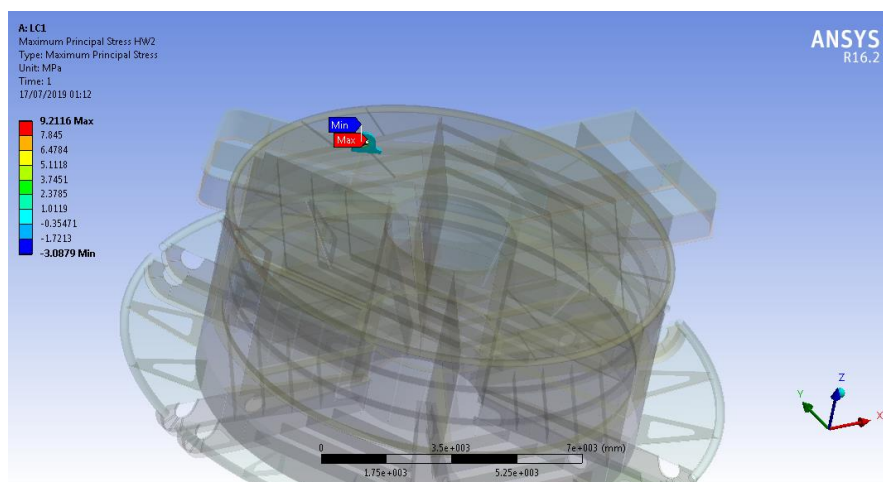
Maximum Principal Stress pada Chain Connection 5 (LC-1)



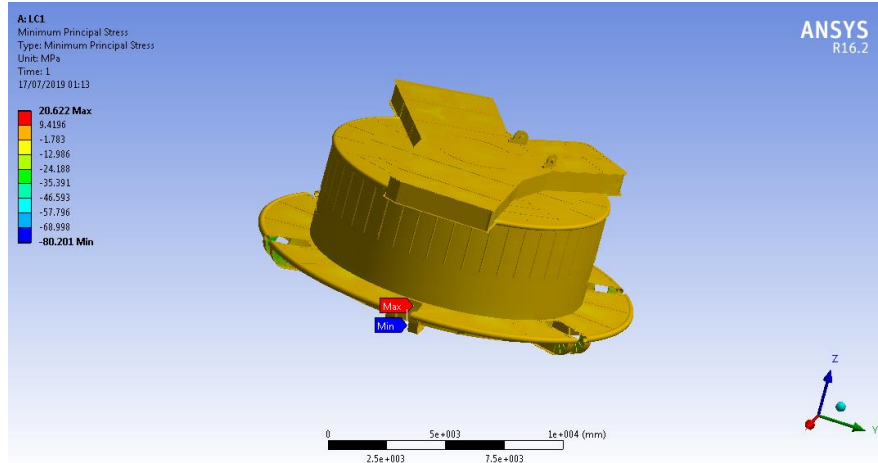
Maximum Principal Stress pada Chain Connection 6 (LC-1)



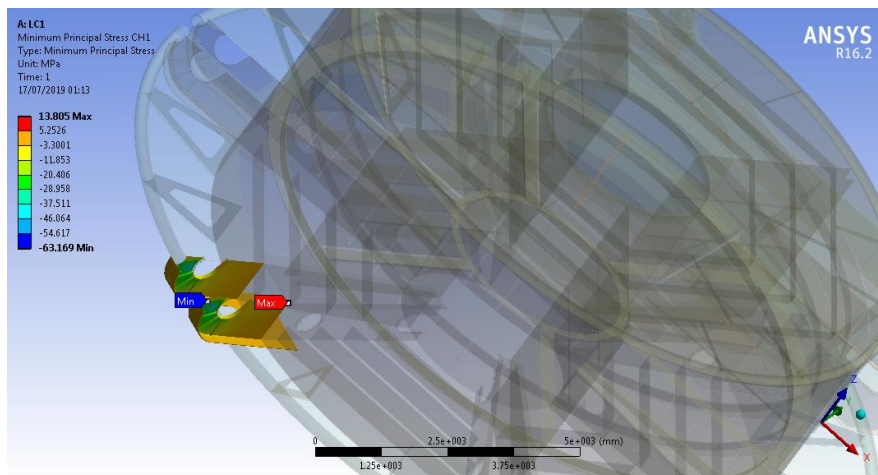
Maximum Principal Stress pada Hawser Connection 1 (LC-1)



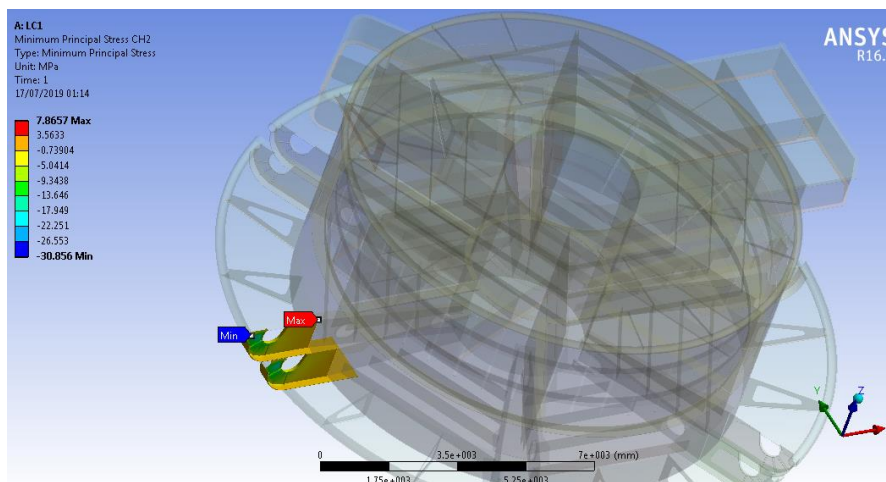
Maximum Principal Stress pada Hawser Connection 2 (LC-1)



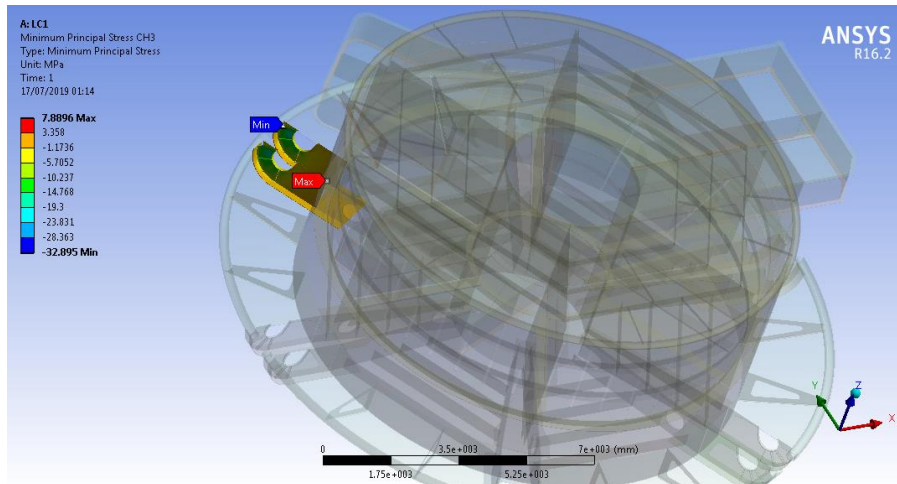
Minimum Principal Stress pada LC-1



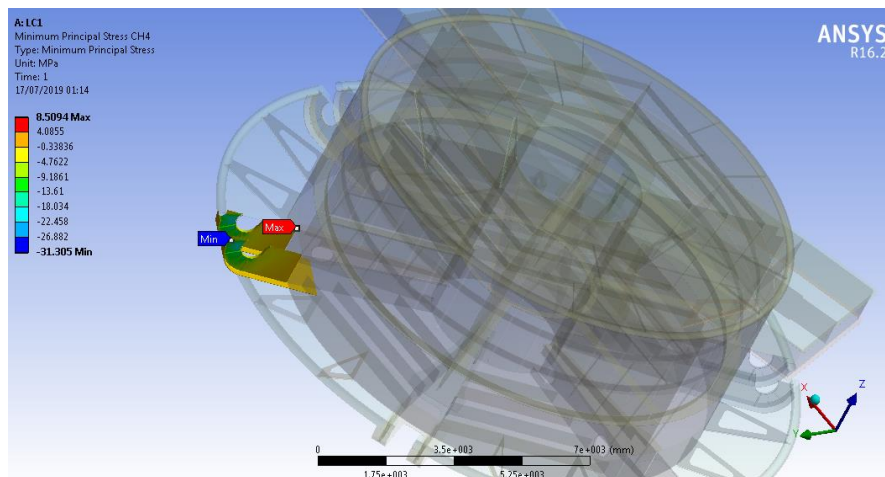
Minimum Principal Stress pada Chain Connection 1 (LC-1)



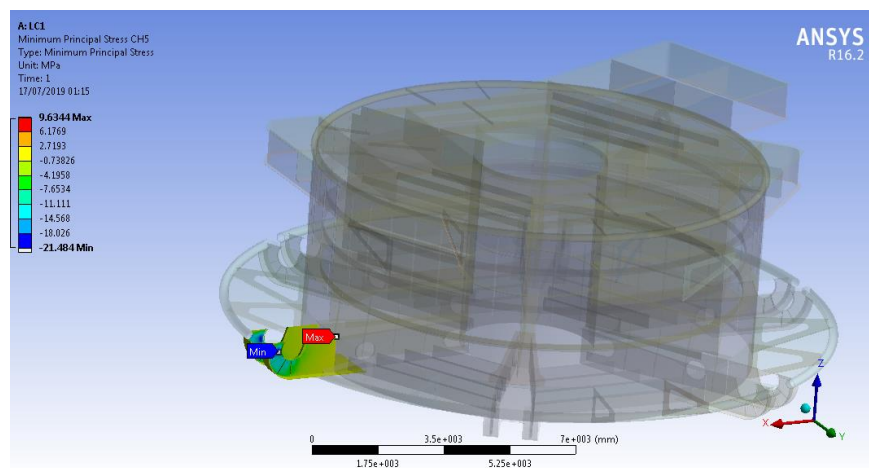
Minimum Principal Stress pada Chain Connection 2 (LC-1)



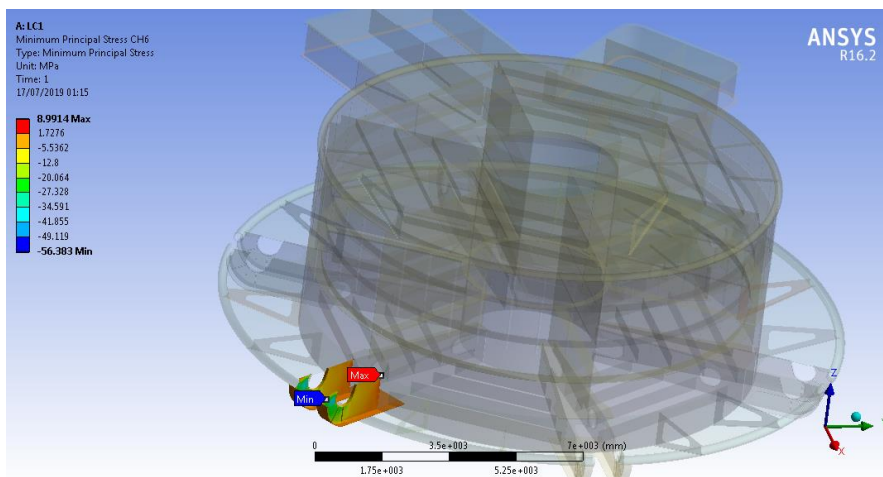
Minimum Principal Stress pada Chain Connection 3(LC-1)



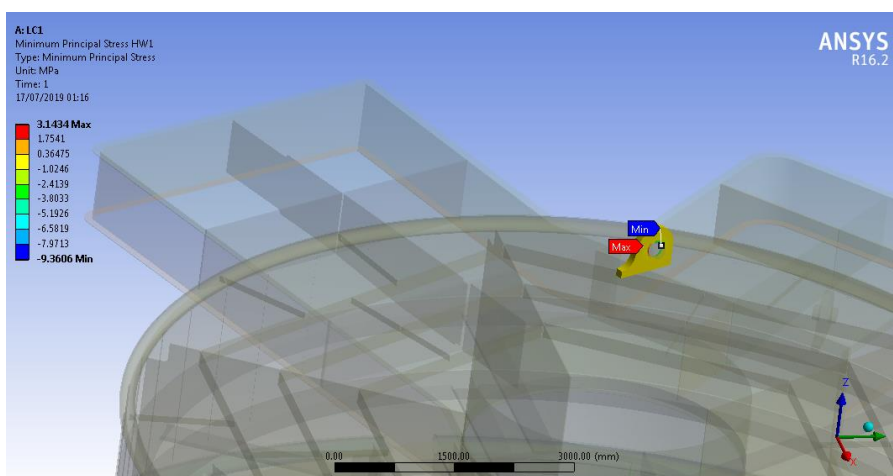
Minimum Principal Stress pada Chain Connection 4 (LC-1)



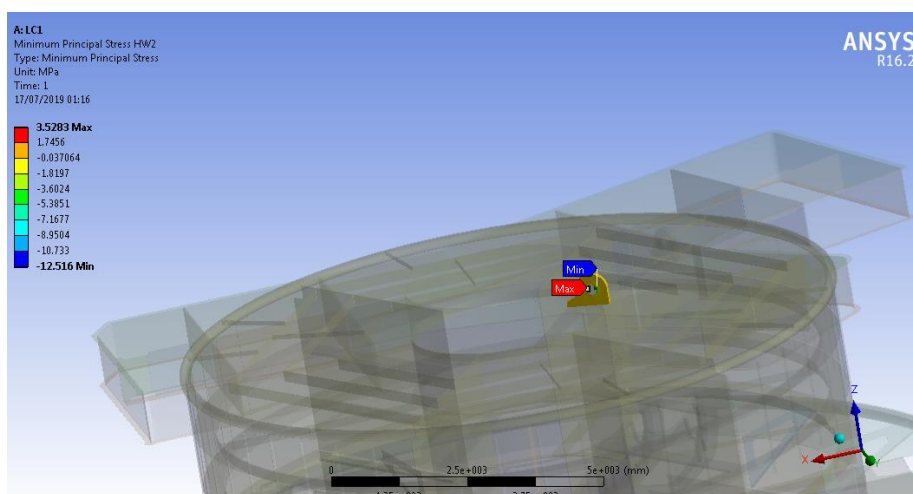
Minimum Principal Stress pada Chain Connection 5 (LC-1)



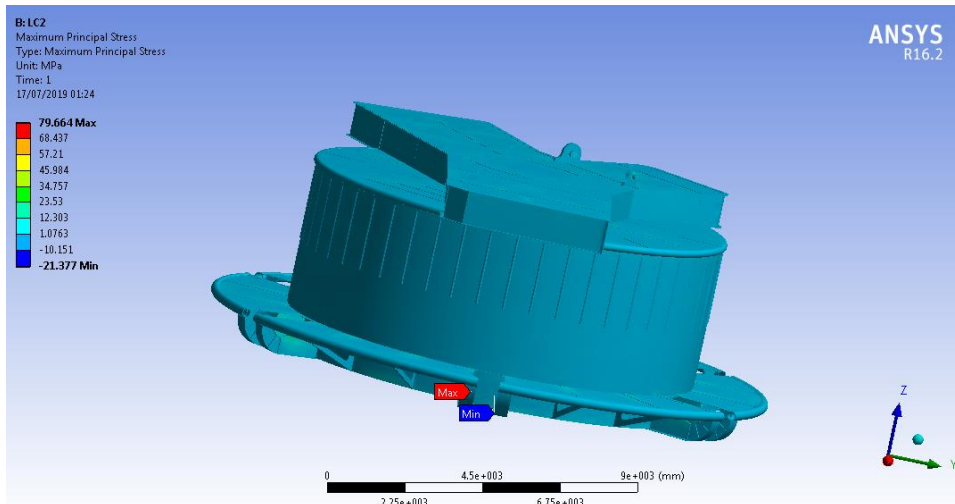
Minimum Principal Stress pada Chain Connection 6 (LC-1)



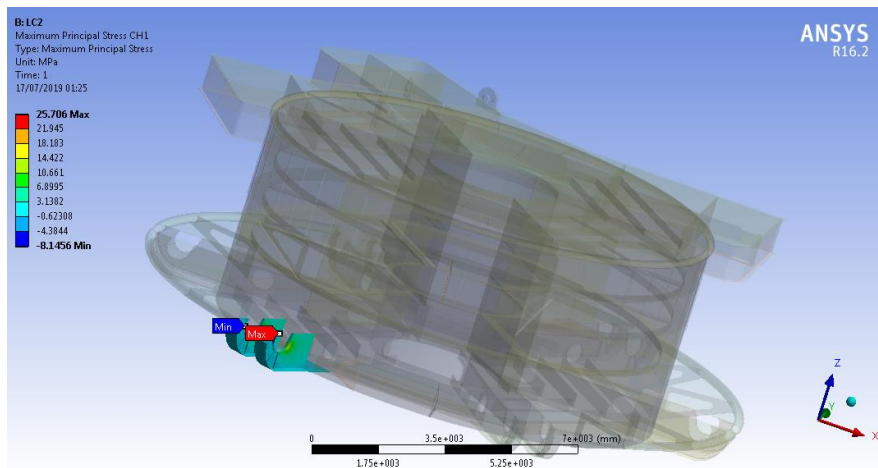
Minimum Principal Stress pada Hawser Connection 1 (LC-1)



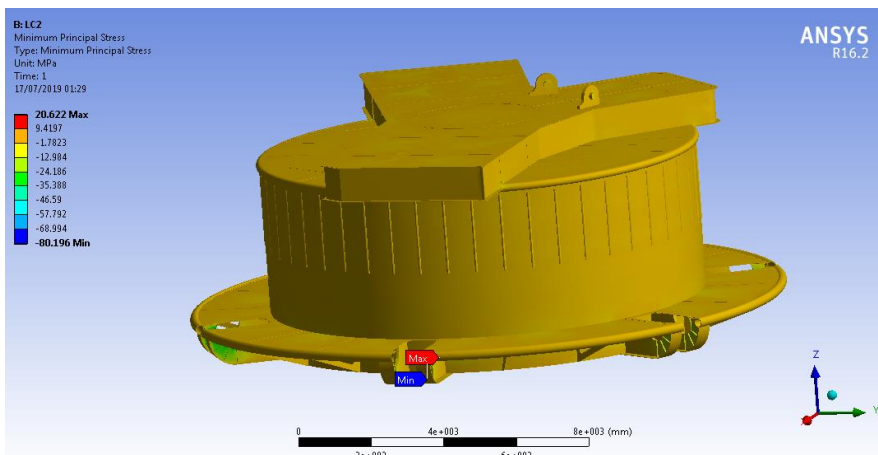
Minimum Principal Stress pada Hawser Connection 2 (LC-1)



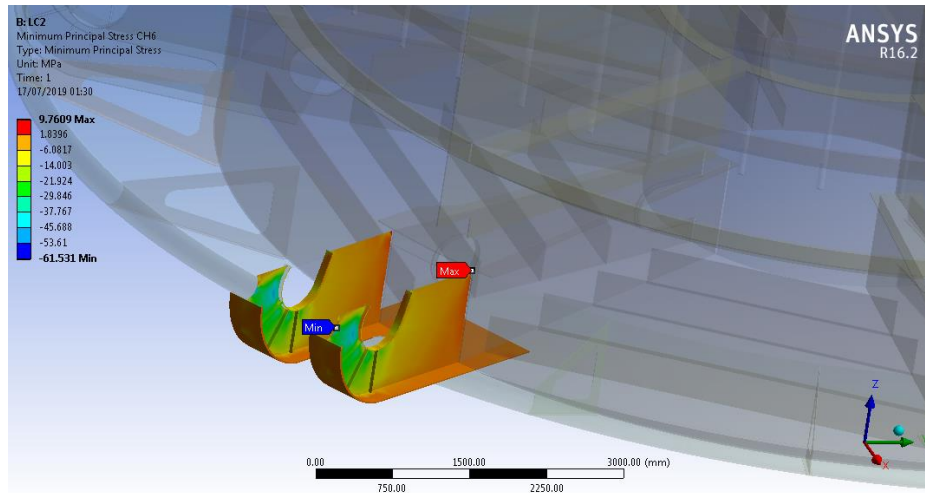
Maximum Principal Stress pada LC-2



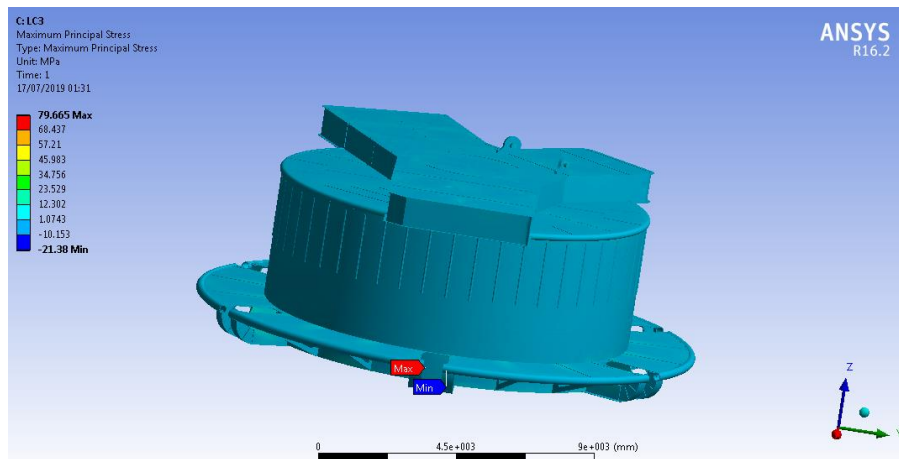
Maximum Principal Stress pada Chain Connection 1 (LC-2)



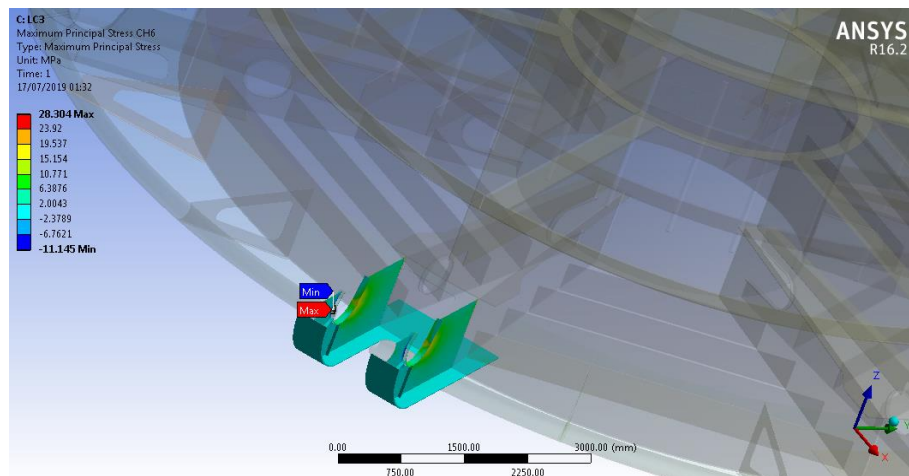
Minimum Principal Stress pada LC-2



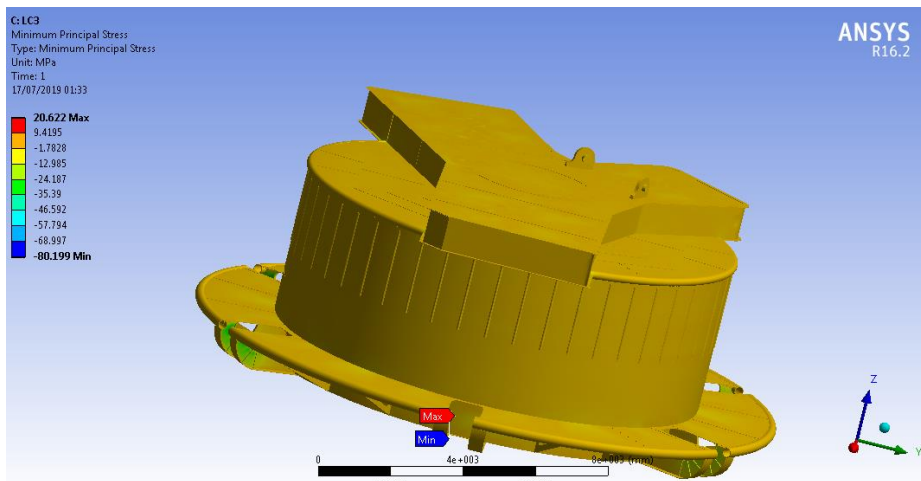
Minimum Principal Stress pada Chain Connection 6 (LC-2)



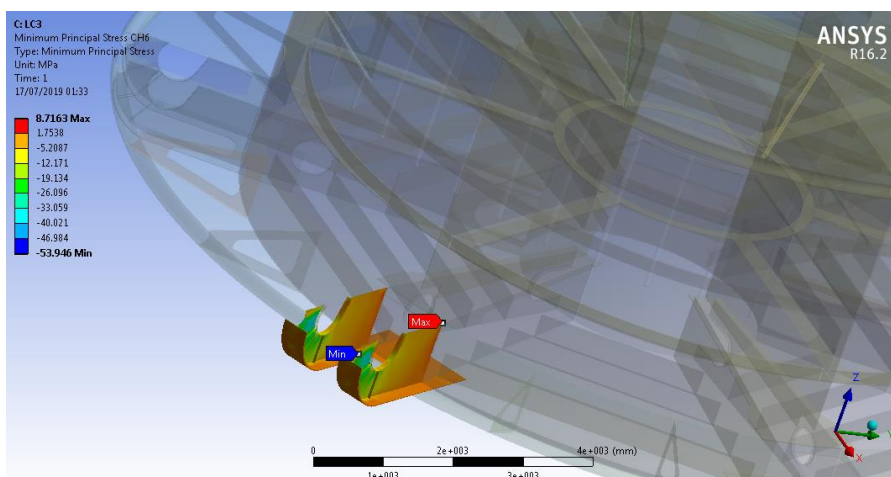
Maximum Principal Stress pada LC-3



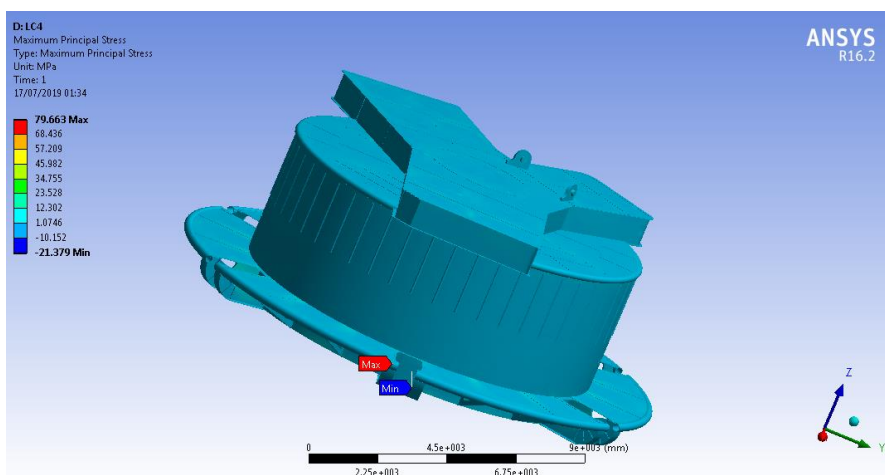
Maximum Principal Stress pada Chain Connection 6 (LC-3)



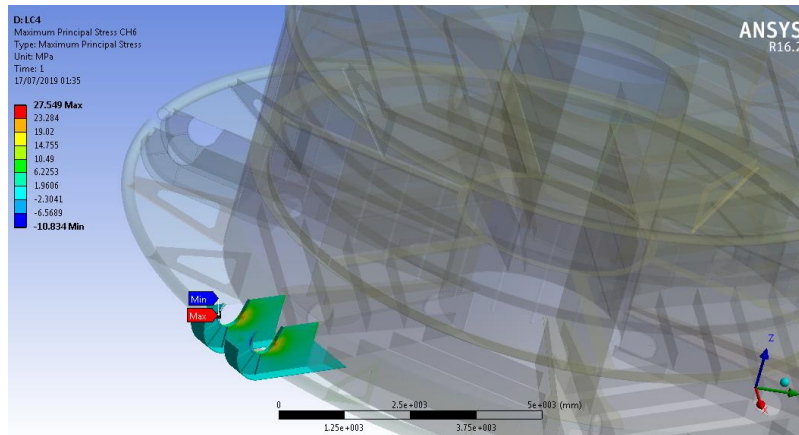
Minimum Principal Stress pada LC-3



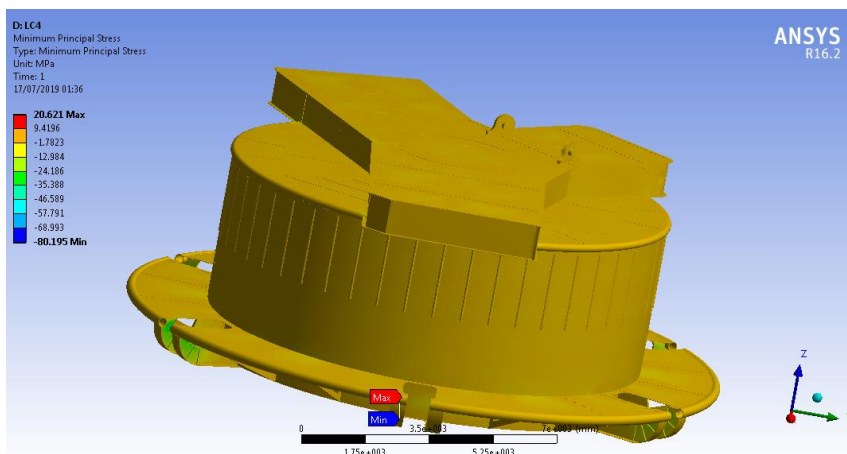
Minimum Principal Stress pada Chain Connection 6 (LC-3)



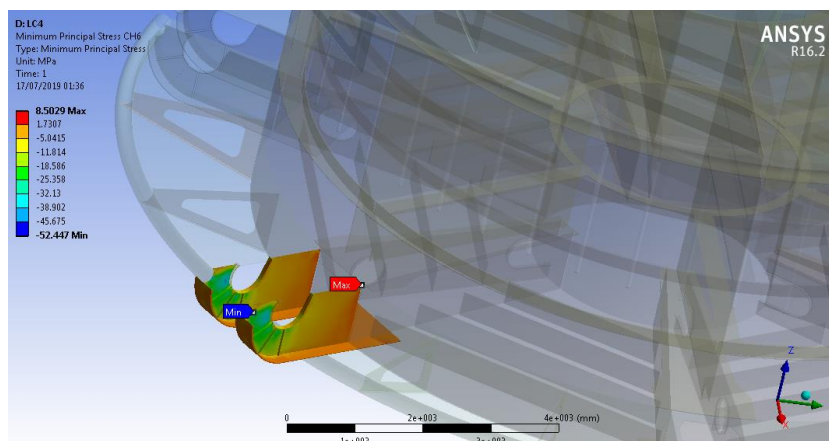
Maximum Principal Stress pada LC-4



Maximum Principal Stress pada Chain Connection 6 (LC-4)



Minimum Principal Stress pada LC-4



Minimum Principal Stress pada Chain Connection 6 (LC-4)

LAMPIRAN G
PERHITUNGAN FATIGUE LIFE PADA
MASING-MASING CONNECTION

(Halaman Sengaja Dikосongkan)

Perhitungan Fatigue Life pada Chain Connection 1

LC Code	f_o	Eff. HotSpot (MPa)	v_i	$\Gamma_0(1+(m/y), v_i)$	$\Gamma_0(1+(m+\Delta m/y), v_i)$	μ_i	DM
LC-1	0.3	86.21	5.37	2.66	232.70	1.26	1.E-01
LC-2	0.3	59.97	7.41	0.84	119.96	1.05	4.E-02
LC-3	0.2	73.26	6.20	1.71	183.86	1.13	5.E-02
LC-4	0.2	45.30	9.52	0.21	46.89	1.01	1.E-02
DM Total							2.E-01
Fatigue Life (Years)							46.67924

Perhitungan Fatigue Life pada Chain Connection 2

LC Code	f_o	Eff. HotSpot (MPa)	v_i	$\Gamma_0(1+(m/y), v_i)$	$\Gamma_0(1+(m+\Delta m/y), v_i)$	μ_i	DM
LC-1	0.3	43.368304	9.893713	0.640213167	100.5616058	0.994358	0.013703
LC-2	0.3	42.08456	10.16187	0.562639461	92.3332589	0.994225	0.01252
LC-3	0.2	39.491088	10.75372	0.423727199	76.25636418	0.994364	0.006898
LC-4	0.2	42.368256	10.10129	0.57859826	94.06524994	0.994268	0.008517
DM Total							0.041637
Fatigue Life (Years)							264.1908

Perhitungan Fatigue Life pada Chain Connection 3

LC Code	f_o	Eff. HotSpot (MPa)	v_i	$\Gamma_0(1+(m/y), v_i)$	$\Gamma_0(1+(m+\Delta m/y), v_i)$	μ_i	DM
LC-1	0.3	45.678752	9.447069	0.833434261	119.2549299	0.993449	0.015997
LC-2	0.3	50.215984	8.683472	1.162915771	146.6909027	0.997759	0.021345
LC-3	0.2	42.426272	10.08899	0.626558304	99.14697806	0.99246	0.008536
LC-4	0.2	47.488112	9.126037	0.959207014	130.2988916	0.994727	0.011998
DM Total							0.057876
Fatigue Life (Years)							190.0621

Perhitungan Fatigue Life pada Chain Connection 4

LC Code	f_o	Eff. HotSpot (MPa)	v_i	$\Gamma_0(1+(m/y), v_i)$	$\Gamma_0(1+(m+\Delta m/y), v_i)$	μ_i	DM
LC-1	0.3	44.592128	9.651681	0.640213167	100.5616058	0.997649	0.014945
LC-2	0.3	39.08744	10.8525	0.562639461	92.3332589	0.987396	0.009962
LC-3	0.2	40.90968	10.4212	0.423727199	76.25636418	0.997008	0.007688
LC-4	0.2	39.925872	10.64943	0.57859826	94.06524994	0.988521	0.007086
DM Total							0.039681
Fatigue Life (Years)							277.21

Perhitungan Fatigue Life pada Chain Connection 5

LC Code	f_o	Eff. HotSpot (MPa)	v_i	$\Gamma_0(1+(m/y), v_i)$	$\Gamma_0(1+(m+\Delta m/y), v_i)$	μ_i	DM
LC-1	0.3	34.852608	12.01859	0.506336844	86.04523012	0.981838	0.007022
LC-2	0.3	46.28848	9.336237	1.287659692	155.9574471	0.974591	0.01633
LC-3	0.2	32.029536	12.95695	0.286316855	58.07631783	0.989875	0.003663
LC-4	0.2	36.714608	11.47456	0.61078756	97.49574152	0.979715	0.005461
DM Total							0.032477
Fatigue Life (Years)							338.7052

Perhitungan Fatigue Life pada Chain Connection 6

LC Code	f_o	Eff. HotSpot (MPa)	v_i	$\Gamma_0(1+(m/y), v_i)$	$\Gamma_0(1+(m+\Delta m/y), v_i)$	μ_i	DM
LC-1	0.3	73.22	6.207631	1.702567879	183.4215681	1.131015	0.075004
LC-2	0.3	79.85	5.746891	2.18645465	210.3937389	1.192133	0.102528
LC-3	0.2	70.18	6.44619	1.488767596	169.8565722	1.107502	0.043119
LC-4	0.2	68.26	6.607129	1.357623272	160.930122	1.09408	0.039199
DM Total							0.25985
Fatigue Life (Years)							42.33215

Perhitungan Fatigue Life pada Hawser Connection 1

LC Code	f_o	Eff. HotSpot (MPa)	v_i	$\Gamma_0(1+(m/y), v_i)$	$\Gamma_0(1+(m+\Delta m/y), v_i)$	μ_i	DM
LC-1	0.3	25.32656	15.96835	0.122483228	31.37517749	0.994039	0.002728
LC-2	0.3	23.457504	17.0959	0.072741454	21.19882633	0.996372	0.002173
LC-3	0.2	14.814464	25.73548	0	0.642376405	1.000043	0.000366
LC-4	0.2	12.908896	29.09052	0	0.139823823	1.000007	0.000242
DM Total							0.005509
Fatigue Life (Years)							1996.582

Perhitungan Fatigue Life pada Hawser Connection 2

LC Code	f_o	Eff. HotSpot (MPa)	v_i	$\Gamma_0(1+(m/y), v_i)$	$\Gamma_0(1+(m+\Delta m/y), v_i)$	μ_i	DM
LC-1	0.3	30.500848	13.53335	0.286316855	58.07631783	0.988188	0.004737
LC-2	0.3	32.391184	12.82812	0.286316855	58.07631783	0.990286	0.005686
LC-3	0.2	21.604912	18.39463	0.01176556	5.058443958	0.999557	0.001135
LC-4	0.2	22.230768	17.93301	0.01176556	5.058443958	0.9996	0.001237
DM Total							0.012795
Fatigue Life (Years)							859.7068

BIODATA PENULIS



Ibrahim Rahnatullah dilahirkan di Kabupaten Lumajang pada 2 Juli 1997. Penulis menempuh pendidikan di SDN Kepuharjo 2 Lumajang , SMPN 1 Sukodono Lumajang, SMAN 1 Lumajang, pada tahun 2015 penulis melanjutkan pendidikan di Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Selama kuliah penulis sempat aktif dalam beberapa organisasi dan kepanitiaan, diantaranya : Ketua Departemen KESMA HIMATEKLA FTK-ITS 17/18, Staff ahli OCEANO 17/18. Penulis pernah menjalani Kerja Praktek selama 2 bulan di Balai Penelitian dan Pengembangan Pantai, Kementerian PUPR di Buleleng, Bali. Bidang yang diambil oleh penulis adalah Hidrodinamika dan Struktur Bangunan Lepas Pantai sehingga Tugas Akhir yang diambil oleh penulis berhubungan dengan Hidrodinamika (Analisis Perilaku Gerak Bangunan Lepas Pantai) dan Struktur Bangunan Lepas Pantai (Analisis Umur Kelelahan Struktur).

Contact Person :

Email : ibbi.bonek27@gmail.com