



Tugas Akhir (MO 184804)

Analisis Kekuatan Anchor Chain pada Single Buoy Mooring (SBM) Floating Storage and Offloading (FSO) Arco Ardjuna

M. Alfisyahr Erza Dwiatma

NRP. 04311540000039

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)

**Strength Analysis of Anchor Chain on Floating Storage and Offloading
(FSO) Arco Ardjuna's Single Buoy Mooring (SBM)**

M. Alfisyahr Erza Dwiatma

NRP. 04311540000039

Supervisors:

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

Ir. Mas Murtedjo, M.Eng.

**DEPARTMENT OF OCEAN ENGINEERING
FACULTY OF MARINE TECHNOLOGY
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA**

2019

**ANALISIS KEKUATAN ANCHOR CHAIN PADA SINGLE
BUOY MOORING (SBM) FLOATING STORAGE AND
OFFLOADING (FSO) ARCO ARDJUNA**

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada Program Studi S-1 Teknik Kelautan Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

M. ALFISYahr ERZA DWIATMA

NRP: 0431154000039

Disetujui oleh:

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



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

3. Dr. Eng. Rudi Walujo Prastianto, S.T., M.T. (Penguji 1)

4. Dr. Ir. Wisnu Wardhana, S.E., M.Sc. (Penguji 2)

SURABAYA, JULI 2019

**ANALISIS KEKUATAN ANCHOR CHAIN PADA SINGLE BUOY
MOORING (SBM) FLOATING STORAGE OFFLOADING (FSO) ARCO
ARDJUNA**

Nama Mahasiswa : M. Alfisyahr Erza Dwiatma
NRP : 0431154000039
Departemen : Teknik Kelautan – FTK ITS
Dosen Pembimbing : Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D.
Ir. Mas Murtedjo, M.Eng.

ABSTRAK

Floating Storage Offloading (FSO) merupakan struktur terapung yang memiliki kemampuan untuk penyimpanan hidrokarbon. Pada kondisi operasi, FSO membutuhkan sistem tambat untuk menjaganya agar tetap stabil pada posisinya. Salah satu yang umum digunakan adalah *Single Point Mooring* (SPM). Diperlukan analisis terhadap sistem tambat untuk mengetahui kekuatan sistem tambat tersebut sehingga operasi di lepas pantai dapat berjalan dengan aman. Dalam penelitian tugas akhir ini, dilakukan analisis kekuatan *anchor chain* pada *Single Buoy Mooring* (SBM) dengan tipe *Catenary Anchored Leg Mooring* (CALM) yang menambat FSO Arco Ardjuna. Dengan mengetahui perilaku gerak dari SPM dan FSO akibat beban lingkungan pada kondisi *free floating*, maka akan diketahui nilai *tension* dari *mooring lines* pada beberapa variasi pembebanan. Nilai RAO pada FSO dan SPM cenderung mengalami kondisi maksimal pada kondisi *full load* ketika mode gerakan *roll* saat arah datang gelombang dari *beam sea* (90°) serta frekuensi sebesar 0.57 rad/s. Hasil analisis untuk hasil *tension* sebesar 1075.78 kN pada *mooring lines* 1 (*damage*) sudah memenuhi ketentuan *safety factor* menurut *American Bureau of Shipping* (ABS) untuk kondisi *intact* (ULS) dan *damage* (ALS). Besar tegangan maksimum (*Von-Mises stress*) pada *anchor chain* sebesar 280.05 MPa dan lebih kecil terhadap 90% tegangan ijin (*yield strength*) sebesar 369 MPa sehingga memenuhi ketentuan yang ditetapkan oleh ABS.

Kata Kunci: *Anchor Chain, Single Buoy Mooring, Floating Storage and Offloading, Response Amplitude Operator, Tension, Von Mises Stress*

**Strength Analysis of Anchor Chain on Floating Storage and Offloading
(FSO) Arco Ardjuna's Single Buoy Mooring (SBM)**

Name of Student : M. Alfisyahr Erza Dwiatma
NRP : 0431154000039
Departement : Teknik Kelautan – FTK ITS
Supervisors : Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D.
Ir. Mas Murtedjo, M.Eng.

ABSTRACT

Floating Storage Offloading (FSO) is a floating structure that has ability to store hydrocarbon. During its operation, FSO requires a mooring system to keep it on its stabil position. One of which is commonly used is Single Point Mooring (SPM). Strength analysis of mooring system is required to ensure that mooring system is safe during its operation. This final project will analyze the strength of anchor chain on *Single Buoy Mooring (SBM)* with *Catenary Anchored Leg Mooring (CALM)* as its mooring system type that tie up FSO Arco Arjuna. By knowing motion characteristics of FSO dan SPM as the effect of environmental load on free floating condition, the value of its tension will be known at several variation of loading. The peak value of RAO on FSO was occurred during full load tank condition, the direction of coming wave on beam sea (90°), and wave frequency at 0.57 rad/s. The result of analysis with 1075.78 kN as its tension on 1st mooring line was already fulfilled based on American Bureau of Shipping (ABS) for intact condition (ULS) and damage condition (ALS). The maximum stress (Von-Mises stress) on anchor chain was 280.05 MPa. The result was smaller against 90% of yield strength as much as 369 MPa so that passes the rule by ABS.

Keywords: Anchor Chain, Single Buoy Mooring, Floating Storage and Offloading, Response Amplitude Operator, Tension, Von Mises Stress

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.

Alhamdulillah, puji dan syukur selalu penulis ucapkan kehadiran Allah Subhanahu wa Ta'ala karena berkat rahmat dan hidayah-Nya, penulis mampu menyelesaikan penelitian tugas akhir ini dengan lancar dan tepat waktu.

Tugas akhir ini berjudul “Analisis Kekuatan *Anhcor Chain* pada *Single Buoy Mooring (SBM) Floating Storage Offloading (FSO) Arco Ardjuna*”. Penelitian tugas akhir ini bertujuan untuk memenuhi persyaratan dalam menyelesaikan Program Studi Kesarjanaan (S-1) di Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan (FTK), Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya (ITS). Penelitian tugas akhir ini membahas bagaimana analisis kekuatan pada struktur *anchor chain* akibat menerima beban *tension*.

Pada pengerjaan dan penyusunan tugas akhir ini penulis menyadari masih terdapat banyak kekurangan, oleh karena itu penulis mengharapkan masukan baik itu kritik ataupun saran yang membangun. Penulis berharap penelitian tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi perkembangan dalam bidang teknologi kelautan serta berguna untuk pembaca pada umumnya dan penulis pada khususnya.

Wassalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.

Surabaya, 2019

M. Alfisyahr Erza Dwiatma

UCAPAN TERIMAKASIH

Pada kesempatan ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah membantu dan terlibat pada proses penyelesaian tugas akhir ini. Oleh karena itu, penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Allah Subhanahu wa Ta'ala yang telah memberikan kemudahan dan petunjuk sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini tepat pada waktunya.
2. Umi, Abi, Mas Eca, Dek Ulda, Dek Sakti, dan keluarga yang senantiasa memberikan dukungan materiil maupun moril, doa, dan menjadi motivasi terbesar bagi penulis.
3. Bapak Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D. selaku dosen pembimbing pertama dan Ir. Mas Murtedjo, M.Eng. selaku dosen pembimbing kedua yang selalu membimbing penulis dengan penuh kesabaran dalam proses penyelesaian tugas akhir ini.
4. Bapak Suntoyo, S.T., M.Eng., Ph.D. selaku dosen wali yang telah memberikan bimbingan, wawasan dan bantuan selama menjalani masa perkuliahan.
5. Bapak dan Ibu dosen juga karyawan Departemen Teknik Kelautan ITS yang telah memberikan segala bantuan, ilmu, dan fasilitas kepada penulis selama menjalani masa perkuliahan.
6. Bapak-bapak dosen penguji atas segala masukan dan kritik yang membangun sehingga tugas akhir ini dapat diselesaikan dengan baik.
7. Tritonous (L-33 P-55), khususnya sahabat perjuangan selama masa perkuliahan: Ibrahim 'Ipung' Rahmatullah, Egy 'Sulili Maling', Arief 'Kribo', Abang Riko, Tito 'Babi', Yandi, Chibby 'Welut', Danen 'Ngeres', Yudha 'Merem', Haekal 'Kopyor', Gifari 'Kambing', Rizal 'Nyomang', YoZIA 'Acong', Alif 'Ulo Mbulet', Tiyok, Ari 'Punk', Kefie 'Lontong'.
8. Cita Iftinan Talidah untuk segala dukungan serta motivasi kepada penulis selama ini dalam segala kondisi dan kesempatan kepada penulis.
9. Dan semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT	v
KATA PENGANTAR	vi
UCAPAN TERIMAKASIH	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	3
1.3. Tujuan	3
1.4. Manfaat	3
1.5. Batasan Masalah	3
1.6. Sistematika Penulisan	4
BAB II DASAR TEORI	7
2.1. Tinjauan Pustaka	7
2.2. Dasar Teori	8
2.2.1. <i>Floating Offshore and Offloading System (FSO)</i>	8
2.2.2. Sistem Tambat	9
2.2.3. Gerakan Bangunan Apung	12
2.2.4. <i>Response Amplitude Operator</i>	20
2.2.5. Spektrum Gelombang	22
2.2.6. Spektrum Respons	23
2.2.7. Analisis Respons	24
2.2.8. Konsep Pembebanan	24
2.2.9. <i>Tension</i> pada Tali Tambat	25
2.2.10. Tegangan (<i>Stress</i>)	27
2.2.11. Korosi pada <i>Anchor Chain</i>	29
2.2.12. <i>Finite Element Method</i>	30

BAB III METODOLOGI PENELITIAN	33
3.1. Skema Diagram Alir.....	33
3.2. Prosedur Penelitian.....	34
3.3. Pengumpulan Data	35
3.3.1. Data FSO Arco Ardjuna.....	35
3.3.2. Data <i>Single Point Mooring</i>	36
3.3.3. Data <i>Mooring Lines</i>	36
3.3.4. Data Konfigurasi <i>Mooring Lines</i> dan <i>Anchor System Pattern (Top View)</i> 37	
3.3.5. Data Lingkungan.....	39
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN.....	41
4.1. Pemodelan Struktur	41
4.1.1. FSO Arco Ardjuna	41
4.1.2. <i>Single Point Mooring</i>	44
4.2. Validasi Hidrostatik.....	45
4.2.1. FSO Arco Ardjuna	45
4.2.2. <i>Single Point Mooring</i>	47
4.3. <i>Lines Plan</i>	47
4.4. Analisis Olah Gerak Struktur	48
4.4.1 FSO Arco Ardjuna	48
4.4.2 <i>Single Point Mooring</i>	49
4.4.3 Konfigurasi Arah Pembebanan Gelombang	50
4.4.4 <i>Response Amplitude Operator (RAO)</i> pada Kondisi <i>Free Floating</i> 51	
4.5. Analisis <i>Tension</i> pada Tali tambat	65
4.5.1. Variasi Kondisi Pembebanan <i>Tension</i> pada Tali Tambat	67
4.5.2. Analisis <i>Tension</i> Tali Tambat pada Kondisi <i>Ultimate Limit State (ULS)</i> dan Kondisi <i>Accidental Limit State (ALS)</i>	68
4.6. Analisis Kekuatan <i>Anchor Chain</i>	75
4.6.1. Analisis <i>Meshing</i> dan <i>Sensitivity</i>	79
4.6.2. Analisis Tegangan <i>Von-Mises</i> dan Deformasi	82
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	87
5.1. Kesimpulan.....	87
5.2. Saran.....	88
DAFTAR PUSTAKA	89

LAMPIRAN
BIODATA PENULIS

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 <i>Single Point Mooring</i>	1
Gambar 1.2 (a) FSO Arco Ardjuna Tertambat SPM; (b) Ardjuna Marine Terminal.....	3
Gambar 2.1 <i>Single Point Mooring (SPM)</i>	9
Gambar 2.2 <i>Spread mooring</i>	10
Gambar 2.3 <i>Turret mooring</i>	10
Gambar 2.4 <i>Catenary Anchor Leg Mooring (CALM) buoy</i>	11
Gambar 2.5 <i>Single Anchor Leg Mooring (SALM) buoy</i>	11
Gambar 2.6 Enam derajat kebebasan struktur bangunan apung	12
Gambar 2.7 Ilustrasi arah datang gelombang terhadap heading kapal.....	14
Gambar 2.8 Ilustrasi gerakan <i>surge</i>	15
Gambar 2.9 Ilustrasi gerakan <i>sway</i>	16
Gambar 2.10 Ilustrasi gerakan <i>heave</i>	17
Gambar 2.11 Ilustrasi gerakan <i>roll</i>	18
Gambar 2.12 Ilustrasi gerakan <i>pitch</i>	19
Gambar 2.13 Ilustrasi gerakan <i>yaw</i>	20
Gambar 2.14 Grafik respons gerakan bangunan apung.....	21
Gambar 2.15 Tegangan normal pada benda dengan luasan A	27
Gambar 2.16 Konsep metode elemen hingga.....	31
Gambar 3.1 Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir	34
Gambar 3.2 <i>Anchoring system pattern</i>	37
Gambar 3.3 Konfigurasi <i>mooring lines</i>	38
Gambar 4.1 <i>General arrangement</i> FSO Arco Ardjuna.....	42
Gambar 4.2 Hasil pemodelan FSO AA pada Maxsurf (tampak atas)	42
Gambar 4.3 Hasil pemodelan FSO AA pada Maxsurf (<i>sheer plan</i>).....	43
Gambar 4.4 Hasil pemodelan FSO AA pada Maxsurf (<i>body plan</i>)	43
Gambar 4.5 Hasil pemodelan FSO AA pada Maxsurf (tampak isometrik)	44
Gambar 4.6 Hasil pemodelan struktur SPM CALM <i>Buoy</i> pada Maxsurf.....	45
Gambar 4.7 <i>Lines plan</i> FSO Arco Ardjuna	48
Gambar 4.8 Model FSO Arco Ardjuna pada Moses	49
Gambar 4.9 Model SPM pada Maxsurf.....	50

Gambar 4.10 Konfigurasi arah pembebanan gelombang pada FSO dan SPM.....	51
Gambar 4.11 Grafik gerakan RAO translasi <i>surge</i> pada <i>heading</i> 0, 45, 90, 135, 180.....	52
Gambar 4.12 Grafik gerakan RAO translasi <i>sway</i> pada <i>heading</i> 0, 45, 90, 135, 180.....	53
Gambar 4.13 Grafik gerakan RAO translasi <i>heave</i> pada <i>heading</i> 0, 45, 90, 135, 180.....	54
Gambar 4.14 Grafik gerakan RAO rotasional <i>roll</i> pada <i>heading</i> 0, 45, 90, 135, 180.....	54
Gambar 4.15 Grafik gerakan RAO rotasional <i>pitch</i> pada <i>heading</i> 0, 45, 90, 135, 180.....	55
Gambar 4.16 Grafik gerakan RAO rotasional <i>yaw</i> pada <i>heading</i> 0, 45, 90, 135, 180.....	56
Gambar 4.17 Grafik gerakan RAO translasi <i>surge</i> pada <i>heading</i> 0, 45, 90, 135, 180.....	57
Gambar 4.18 Grafik gerakan RAO translasi <i>sway</i> pada <i>heading</i> 0, 45, 90, 135, 180.....	58
Gambar 4.19 Grafik gerakan RAO translasi <i>heave</i> pada <i>heading</i> 0, 45, 90, 135, 180.....	59
Gambar 4.20 Grafik gerakan RAO rotasi <i>roll</i> pada <i>heading</i> 0, 45, 90, 135, 180.	59
Gambar 4.21 Grafik gerakan RAO rotasi <i>pitch</i> pada <i>heading</i> 0, 45, 90, 135, 180.....	60
Gambar 4.22 Grafik gerakan RAO rotasional <i>yaw</i> pada <i>heading</i> 0, 45, 90, 135, 180.....	61
Gambar 4.23 Grafik gerakan RAO translasi <i>surge</i> pada <i>heading</i> 0, 45, 90, 135, 180.....	62
Gambar 4.24 Grafik gerakan RAO translasi <i>sway</i> pada <i>heading</i> 0, 45, 90, 135, 180.....	63
Gambar 4.25 Grafik gerakan RAO translasi <i>heave</i> pada <i>heading</i> 0, 45, 90, 135, 180.....	63
Gambar 4.26 Grafik gerakan RAO rotasi <i>roll</i> pada <i>heading</i> 0, 45, 90, 135, 180.	63

Gambar 4.27 Grafik gerakan RAO rotasi <i>pitch</i> pada <i>heading</i> 0, 45, 90, 135, 180	64
Gambar 4.28 Grafik gerakan RAO rotasi <i>yaw</i> pada <i>heading</i> 0, 45, 90, 135, 180	64
Gambar 4.29 Konfigurasi <i>mooring lines</i> untuk analisis <i>tension</i>	68
Gambar 4.30 Konfigurasi <i>mooring lines</i> pada OrcaFlex	69
Gambar 4.31 Kriteria perancangan lokal berdasarkan ABS (a) <i>Joining Shackles</i> ; (b) <i>Studless Link</i>	77
Gambar 4.32 Hasil pemodelan <i>chain</i> pada SolidWorks.....	78
Gambar 4.33 Hasil pemodelan <i>chain</i> dengan <i>shackle</i> pada Solidworks	78
Gambar 4.34 <i>Boundary condition</i> yang digunakan pada model <i>chain</i> pada Ansys. Daerah A adalah daerah pembebanannya dan pada daerah B adalah tumpuan <i>fixed</i>	79
Gambar 4.35 Potongan melintang dari model struktur setelah dilakukan <i>meshing</i>	80
Gambar 4.36 Potongan memanjang dari model struktur setelah dilakukan <i>meshing</i>	80
Gambar 4.37 Contoh <i>meshing</i> yang digunakan dalam analisis pada Ansys	81
Gambar 4.38 Grafik <i>meshing sensitivity</i> struktur	82
Gambar 4.39 Hasil <i>equivalent stress</i> pada Ansys	83
Gambar 4.40 Hasil <i>equivalent stress</i> pada sambungan nomor 1	83
Gambar 4.41 Hasil <i>equivalent stress</i> pada sambungan nomor 2.....	84
Gambar 4.42 Hasil <i>equivalent stress</i> pada sambungan nomor 3.....	84
Gambar 4.43 Deformasi struktur <i>chain</i> dengan <i>joining shackle</i>	85

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Ukuran utama FSO Arco Ardjuna.....	36
Tabel 3.2 Ukuran utama CALM <i>Buoy</i>	36
Tabel 3.3 Karakteristik <i>mooring lines</i>	37
Tabel 3.4 Data lingkungan perairan Laut Jawa.....	39
Tabel 4.1 Data utama SPM CALM <i>Buoy</i>	44
Tabel 4.2 Koreksi hidrostatik data dengan model pada kondisi <i>full load</i>	46
Tabel 4.3 Koreksi hidrostatik data dengan model pada kondisi <i>light load</i>	46
Tabel 4.4 Koreksi hidrostatik data dengan model Maxsurf	47
Tabel 4.5 Data titik berat, <i>displacement</i> , dan <i>radius gyration</i> pada FSO	48
Tabel 4.6 Data titik berat, <i>displacement</i> , dan <i>radius gyration</i> pada SPM.....	50
Tabel 4.7 Nilai RAO maksimal pada kondisi <i>full load</i>	56
Tabel 4.8 Nilai RAO maksimal pada kondisi <i>light load</i>	61
Tabel 4.9 Nilai RAO maksimal pada kondisi <i>light load</i>	65
Tabel 4.10 Data lingkungan	66
Tabel 4.11 Varisi pembebanan <i>tension</i> pada tali tambat.....	67
Tabel 4.12 Hasil <i>tension</i> pada rantai jangkar dan validasi dengan <i>safety factor</i> pada <i>Load Case 1</i>	70
Tabel 4.13 Hasil <i>tension</i> pada rantai jangkar dan validasi dengan <i>safety factor</i> pada <i>Load Case 2</i>	70
Tabel 4.14 Hasil <i>tension</i> pada rantai jangkar dan validasi dengan <i>safety factor</i> pada <i>Load Case 3</i>	71
Tabel 4.15 Hasil <i>tension</i> pada rantai jangkar dan validasi dengan <i>safety factor</i> pada <i>Load Case 4</i>	72
Tabel 4.16 Hasil <i>tension</i> pada rantai jangkar dan validasi dengan <i>safety factor</i> pada <i>Load Case 5</i>	73
Tabel 4.17 Hasil <i>tension</i> pada rantai jangkar dan validasi dengan <i>safety factor</i> pada <i>Load Case 6</i>	73
Tabel 4.18 Hasil <i>tension</i> pada rantai jangkar dan validasi dengan <i>safety factor</i> pada <i>Load Case 7</i>	74
Tabel 4.19 Hasil <i>tension</i> pada rantai jangkar dan validasi dengan <i>safety factor</i> pada <i>Load Case 8</i>	75

Tabel 4.20 Data <i>anchor leg</i>	76
Tabel 4.21 <i>Meshing sensitivity</i> struktur.....	81
Tabel 4.22 Rangkuman nilai tegangan <i>von-mises</i> dan deformasi pada struktur <i>chain</i> dan <i>joning shackle</i>	86

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Selama kegiatan produksi hidrokarbon lepas pantai berlangsung, memungkinkan diperlukan penyimpanan sementara sebelum disalurkan ke suatu *site* untuk memproses hidrokarbon tersebut. *Floating Storage Offloading* (FSO) merupakan suatu struktur terapung yang memiliki kemampuan untuk penyimpanan hidrokarbon yang kemudian disalurkan oleh sebuah *shuttle tanker*.

Pergerakan struktur terapung sangat dipengaruhi oleh beban lingkungan (gelombang, arus, dan angin). Gerakan struktur tersebut dapat mempengaruhi proses *offloading* sehingga dibutuhkan sistem tambat untuk mempertahankan stabilitas FSO. FSO dan sistem tambat yang digunakan didesain untuk dapat mengikuti kondisi lingkungan (*weathervane*) sehingga pada saat operasi pergerakannya dapat mengikuti arah gelombang namun tetap tertambat pada *mooring*.

FSO Arco Ardjuna adalah sebuah FSO milik PT. Pertamina Hulu Energi *Offshore North West Java* (PT. PHE ONWJ) yang beroperasi di Ladang Ardjuna. Sistem tambat yang digunakan adalah *Single Point Mooring* (SPM) tipe *Catenary Anchored Leg Mooring* (CALM). Berikut adalah bentuk struktur SPM yang disajikan pada Gambar 1.1.



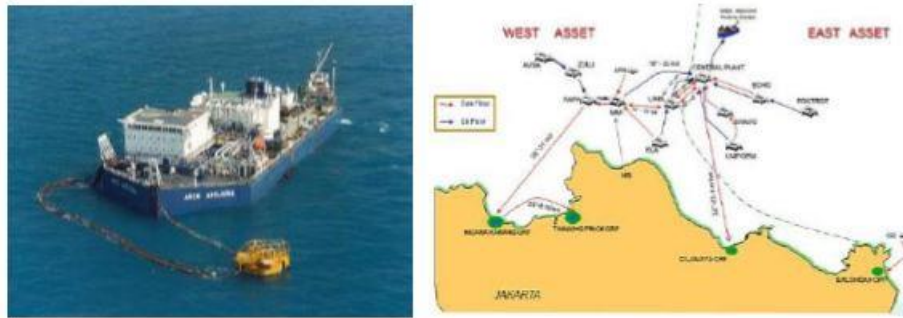
Gambar 1.1 *Single Point Mooring*
(Sumber: PT. Citra Mas, 2019)

FSO Arco Ardjuna direncanakan dilakukan sertifikasi ulang oleh Badan Klasifikasi Indonesia (BKI) karena sertifikat sebelumnya akan habis pada bulan Agustus 2019. Penerbitan sertifikat baru FSO Arco Ardjuna ini harus melalui survey fisik keseluruhan dari kapal serta dilakukan *tank cleaning* dan *dry docking*. PT. PHE ONWJ mengajukan ijin ke BKI untuk tidak dilaksanakan *tank cleaning* dan *dry docking* karena waktu yang relatif pendek dan pada tahun 2016 sudah dilaksanakan keduanya. Untuk menggantinya, dilakukan analisis numerik terhadap beberapa faktor sebagai berikut:

- Melakukan *assessment* terhadap kekuatan konstruksi keseluruhan.
- Melakukan *assessment* untuk kekuatan maupun *fatigue* pada rantai SPM.
- Semua *assessment* harus mempertimbangkan *corrosion rate* sampai tahun 2025.

Pada proses *offloading*, dibutuhkan sistem tambat untuk meningkatkan produktivitas dan distribusi. Respons gerak dari struktur terapung akan mempengaruhi *tension* pada *anchor chain*. Untuk mengetahui kekuatan pada tiap *anchor chain*, dibutuhkan pemodelan *finite element*. Analisis kekuatan pada *anchor chain* SPM dibutuhkan untuk menjaga keselamatan pada saat operasi dan tempat dimana FSO tersebut.

Penelitian ini mengambil studi kasus FSO Arco Ardjuna yang ditambat pada SPM (*Single Point Mooring*) tipe CALM (*Catenary Anchored Leg Mooring*) *buoy* yang beroperasi di Ardjuna Marine Terminal. Lokasi dan bentuk detail dari struktur FSO tersebut dapat dilihat pada Gambar 1.2. Penelitian ini akan membahas bagaimana pengaruh gerakan 6 *degree of freedom* pada FSO dan SPM yang disebabkan oleh beban lingkungan yang mengakibatkan *tension* pada *anchor chain* serta kekuatan *anchor chain* dengan mempertimbangkan *corrosion rate/year* serta aturan dan standar yang ditetapkan oleh *class* atau *codes* yang berlaku.



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

(Sumber: PT. Citra Mas, 2019)

1.2. Rumusan Masalah

Permasalahan yang dikaji dalam penelitian tugas akhir ini adalah:

1. Bagaimana perilaku gerak FSO dan SPM kondisi *free floating*?
2. Berapa *tension* maksimal yang terjadi pada *anchor chain*?
3. Bagaimana analisis kekuatan *anchor chain* pada SPM?

1.3. Tujuan

Tujuan dari penelitian tugas akhir ini adalah:

1. Menghitung perilaku gerak FSO dan SPM kondisi *free floating*.
2. Menghitung besar *tension* maksimal yang terjadi pada *anchor chain*.
3. Menghitung kekuatan *anchor chain* pada SPM.

1.4. Manfaat

Dari pengerjaan penelitian tugas akhir ini diharapkan dapat diketahui perilaku gerak FSO dan SPM pada kondisi *free floating*, nilai *tension* maksimal pada *mooring lines* SPM, dan analisis kekuatan dari *anchor chain* SPM. Hasil yang didapat mengikuti aturan dan standar yang ditetapkan oleh *codes* atau *class* yang berlaku.

1.5. Batasan Masalah

Batasan masalah yang ditetapkan pada penelitian tugas akhir ini adalah:

1. Penelitian ini merupakan studi kasus pada FSO Arco Ardjuna milik Pertamina Hulu Energi *Offshore North West Java* (PHE ONWJ).

2. Beban lingkungan yang ditinjau adalah beban arus, beban angin dan beban gelombang dengan periode ulang 100 tahun.
3. Skema *heading* yang dianalisis hanya pada 0°, 45°, 90°, 135°, dan 180°.
4. Jenis dan penyambungan pada *mooring lines* diasumsikan tersambung dengan baik dan tanpa cacat.
5. Jangkar dianggap *fixed* sehingga tidak dilakukan analisis terhadap *holding capacity*.
6. Gesekan antar *chain* diabaikan.
7. Validasi Maxsurf FSO Arco Adjuna pada kondisi *light load condition* dan *full load condition*.
8. Analisis *anchor chain* dilakukan pada kondisi *intact* dan *damage*.
9. Analisis *mooring* yang dilakukan dalam dua kondisi *offloading* yaitu kondisi FSO *full load* dan kondisi FSO *light load*.
10. *Riser* dan *floating hose* tidak dimodelkan.
11. Analisis kekuatan pada *anchor chain* akan mempertimbangkan *corrosion rate/year* sampai tahun 2025 pada kondisi *Ultimate Limit State (ULS)* dan *Accidental Limit State (ALS)*.

1.6. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan laporan penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Bab I Pendahuluan

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

2. Bab II Tinjauan Pustaka dan Dasar Teori

Bab II berisi tinjauan pustaka dan dasar teori yang menjadi acuan dari penelitian tugas akhir ini. Penelitian dan tugas akhir sebelumnya yang pernah membahas topik yang berkesinambungan dengan penelitian yang akan dilakukan, dijelaskan terangkum untuk menjadi dasar pengembangan penelitian.

3. Bab III Metodologi Penelitian

Bab III menjelaskan mengenai langkah-langkah pelaksanaan penelitian dan data-data yang telah didapatkan penulis untuk memulai penelitian.

4. Bab IV Analisis Hasil dan Pembahasan

Bab ini membahas seluruh hasil penelitian yang dilaksanakan dan pencapaian hasil dari pelaksanaan prosedur penelitian. Penulis membahas mengenai permodelan yang dilakukan.

5. Bab V Kesimpulan dan Saran

Bab ini berisi kesimpulan yang berupa uraian singkat dari keseluruhan hasil analisis. Uraian singkat ini diharapkan bisa menjawab rumusan masalah yang ada. Bab ini juga berisikan saran yang bermanfaat guna keberlanjutan penelitian.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

Pada tahap eksploitasi dan distribusi minyak dan gas di lepas pantai, dibutuhkan struktur bangunan apung beserta sistem tambat yang efektif dan efisien serta optimal. Salah satu yang secara umum digunakan adalah anjungan terapung yang memiliki karakter dapat bergerak mengikuti gerakan gelombang. Struktur anjungan terapung yang utama adalah mobilitas dan kemampuannya mengantisipasi gerakan akibat gelombang dan arus laut (Djarmiko, 2003).

Floating Storage Offloading (FSO) adalah salah satu jenis struktur bangunan apung yang secara umum berbentuk seperti kapal beserta sistem tambatnya (Chakrabarti, 2005). Secara umum, FSO pada saat kondisi operasi akan didukung oleh *shuttle tanker* untuk *offloading*. Sebuah struktur FSO menyimpan minyak atau gas pada tangki yang terletak pada lambung *vessel*, dan garis aliran pada *riser* yang menghubungkan sumur minyak atau gas dengan FSO (Paik dkk., 2007).

FSO membutuhkan sistem tambat yang memadai untuk mengakomodasi gerakan *vessel* dan keselamatan sekitar daerah operasi. *Single Point Mooring (SPM)* adalah salah satu metode dari sistem tambat yang biasa digunakan untuk mendukung FSO. Menurut Annisa (2016), SPM sering kali digunakan pada eksplorasi dan eksploitasi minyak dan gas untuk menahan tegangan yang terjadi pada FSO akibat adanya beban lingkungan.

Beberapa penelitian sebelumnya mengenai analisis sistem tambat pada anjungan terapung pernah dilakukan sebelumnya. Seperti penelitian yang dilakukan oleh Ghafari dan Dardel (2018) mengenai dampak respons dinamis dari *semi-submersible* terhadap sistem tambat dengan tipe *catenary*. *Semi-submersible* memiliki respons dinamis akibat beban lingkungan yang berdampak pada tali tambatnya. Oleh karena itu diperlukan untuk mengetahui *tension* yang terjadi akibat gerakan dari *semi-submersible* dan pengaruh ukuran dari *buoy* terhadap *tension*.

Analisis mengenai kekuatan dari *anchor chain* juga perlu dilakukan untuk mengetahui performa dari sistem tambat. Seperti penelitian yang dilakukan oleh Annisa (2016) mengenai analisis kekuatan *anchor chain* pada *single point mooring*. Penelitian oleh Patria (2017) juga membahas mengenai analisis kekuatan *chain connector* pada sistem *external turret mooring*.

Anjungan terapung yang berada di lepas pantai akan berpotensi terpapar korosi. Air laut adalah salah satu faktor utama terjadinya korosi pada struktur lepas pantai. Hal ini terjadi karena pengikatan elektron oleh oksigen akan lebih mudah terjadi pada media asam atau garam. Korosi akan berpengaruh pada kekuatan dari *anchor chain* dikarenakan terjadi reduksi dari dimensi *anchor chain* itu sendiri. Penelitian oleh Nevshupa dkk. (2018) mengenai efek lingkungan terhadap perilaku korosi dari rantai jangkar yang tenggelam di perairan membuktikan argumentasi tersebut.

Berdasarkan penelitian-penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, diperlukan analisis lebih lanjut mengenai kekuatan dari *anchor chain* pada *Single Buoy Mooring* (SBM) FSO Arco Ardjuna dengan memperhitungkan *corrosion rate/year* sehingga memenuhi aturan yang berlaku. Dengan analisis yang dilakukan, diharapkan *anchor chain* pada SBM dapat aman untuk beroperasi di Ladang Ardjuna.

2.2. Dasar Teori

2.2.1. *Floating Offshore and Offloading System* (FSO)

Floating Offshore and Offloading (FSO) adalah struktur terapung yang berfungsi sebagai fasilitas pendukung untuk menyimpan dan menyalurkan minyak dan gas sebelum dilakukan proses produksi di *site*. Menurut Chakrabarti, kebanyakan struktur terapung yang digunakan untuk fasilitas penyimpanan maupun produksi didesain dan dibangun maupun dikonversi (dari sebuah *tanker*) untuk laut dalam dan lingkungan yang ekstrem. Jadi, FSO dapat dimengerti sebagai struktur yang memiliki fungsi sebagai berikut:

- Menerima hasil minyak mentah
- Menyimpan hasil minyak mentah

- Menyalurkan minyak mentah ke *shuttle tanker*

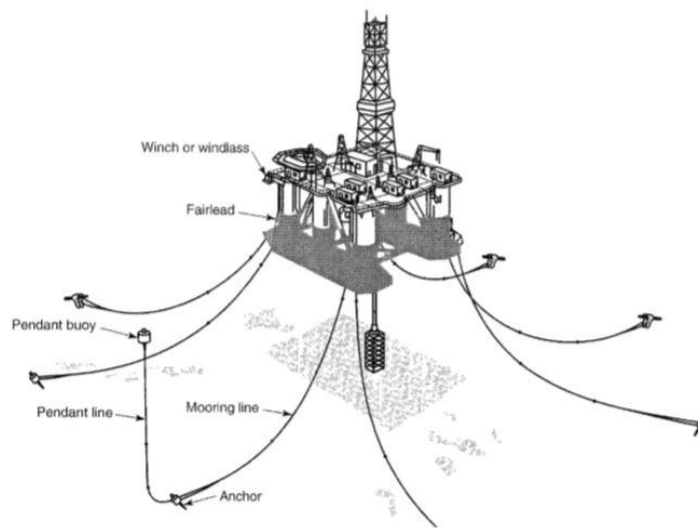
2.2.2. Sistem Tambat

Stationkeeping sistem atau sistem tambat pada prinsipnya berfungsi untuk mengamankan kapal agar posisinya tetap pada tempatnya. Sistem tambat dikategorikan menjadi dua jenis yaitu *weathervaning* dan *non-weathervaning*. Sistem tambat untuk kondisi *weathervaning* didalamnya termasuk *single point mooring* (SPM), *turret mooring system*, dan *turret mooring system*. Untuk sistem tambat dengan kondisi *non-weathervaning* adalah *spread mooring* dan *jetty mooring system*. Biasanya untuk bangunan terapung, sistem tambat yang digunakan menggunakan *single point mooring* ataupun *spread mooring*. *Single point mooring* secara umum cenderung digunakan untuk *vessel* berbentuk kapal, sedangkan *spread mooring* banyak digunakan untuk *semi-submersible* dan *spar* (API, 2005). Pada Gambar 2.1 dan 2.2 disajikan sistem tambat dengan bentuk *single point mooring* dan *spread mooring*.



Gambar 2.1 *Single Point Mooring* (SPM)

(Sumber: Helmidadang, 2012)



Gambar 2.2 *Spread mooring*

(Sumber: API, 2005)

Sistem tambat *single point mooring* memiliki keunggulan dapat digunakan untuk perairan yang lebih besar bebannya sehingga lebih mudah untuk menstabilkan badan kapal untuk dapat kembali pada posisi normal. Berikut terdapat beberapa jenis sistem tambat untuk *single point mooring*:

a. *Turret Mooring*

Sistem *turret mooring* merupakan sistem tambat dengan beberapa *catenary mooring* yang terpasang pada *turret*. Terdapat *bearing* yang membuat *vessel* dapat berotasi pada sekitar kakinya.



Gambar 2.3 *Turret mooring*

(Sumber: Helmidadang, 2012)

b. *Catenary Anchor Leg Mooring (CALM)*

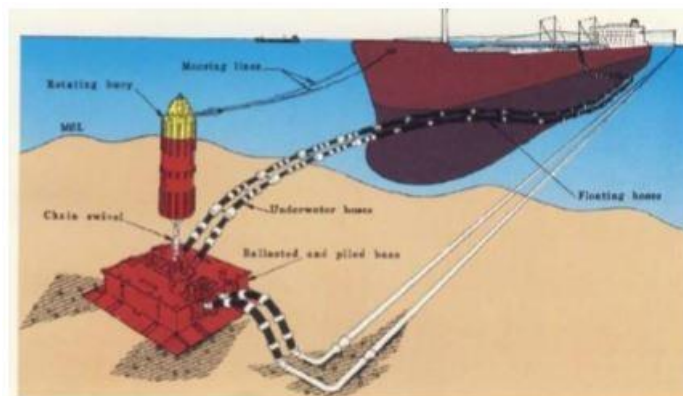
Sistem tambat CALM terdiri dari *buoy* yang didukung oleh rantai *catenary* yang tertambat di dasar laut. Sistem *riser* dari dasar laut menempel pada bagian bawah dari *buoy*. Beberapa CALM menggunakan *hawser* yang terbuat dari tali sintetis antara *vessel* dan *buoy*.



Gambar 2.4 *Catenary Anchor Leg Mooring (CALM) buoy*
(Sumber: PT. PHE ONWJ, 2013)

c. *Single Anchor Leg Mooring (SALM)*

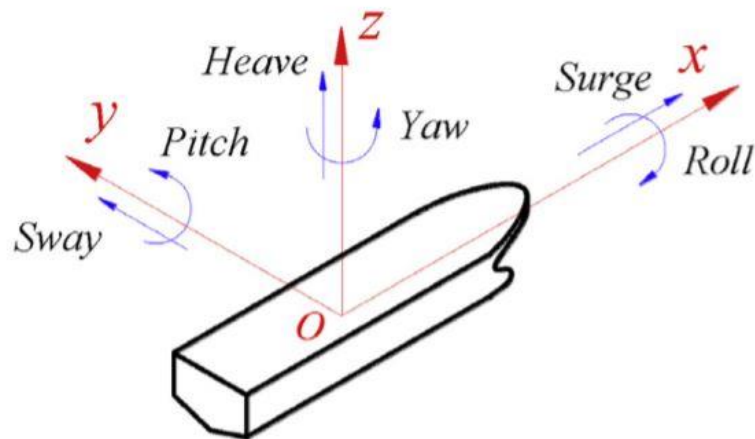
Sistem tambat jenis ini menggunakan sebuah sistem *riser* vertikal yang mempunyai *buoyancy* yang besar di dekat permukaan, dan terkadang di permukaan, yang ditahan oleh *pre-tensioned riser*.



Gambar 2.5 *Single Anchor Leg Mooring (SALM) buoy*
(Sumber: Helmidadang, 2012)

2.2.3. Gerakan Bangunan Apung

Gerakan bangunan apung di perairan bergelombang pada dasarnya mempunyai 6 mode gerakan bebas yang terdiri atas 3 gerakan translasi dan 3 gerakan rotasi. Sebuah kapal memiliki 6 derajat kebebasan yaitu *surge*, *sway*, *heave*, *roll*, *pitch*, dan *yaw*. Terdapat 3 gerakan yang memungkinkan ada dari kapal yaitu *heave*, *roll*, dan *pitch*. 3 gerakan tersebut merupakan gerakan osilasi murni yang dipengaruhi *restoring force* (gaya pengembali) atau momen saat struktur terapung dipengaruhi dari posisi setimbangnya (Bhattacharya, 1978).



Gambar 2.6 Enam derajat kebebasan struktur bangunan apung

(Sumber: J. Jiao dkk, 2019)

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

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

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

dengan:

M_{jk} = komponen matriks massa kapal

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

C = koefisien-koefisien gaya hidrostatis pengembali

F_{jk} = amplitudo gaya eksitasi dalam besaran kompleks

2.2.3.1. Heading Kapal terhadap Arah Gelombang

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

$$T_\theta = \frac{L_w}{V_w - V \cos \mu} \dots \dots \dots (2.2)$$

$$V_w = \omega_\theta \left(1 - \frac{V}{V_w} \cos \mu \right) \dots \dots \dots (2.3)$$

dengan:

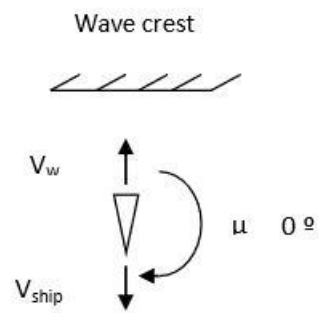
T_θ = periode *encountering* (s)

V_w = kecepatan gelombang (m/s)

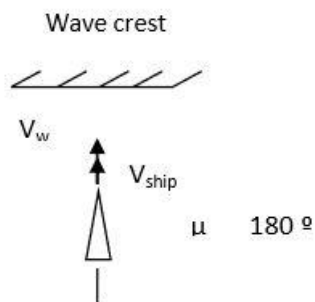
V = kecepatan kapal (*knot*)

μ = sudut datang gelombang

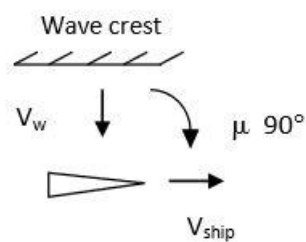
Sebagai gambaran arah kapal terhadap arah gelombang untuk kondisi *head sea*, *following sea*, *beam sea* dapat dilihat pada Gambar 2.7:



a. Head Sea



b. Following Sea



c. Beam Sea

Gambar 2.7 Ilustrasi arah datang gelombang terhadap *heading* kapal
(Sumber: Bhattacharyya, 1978)

2.2.3.2. Gerakan Surge Murni

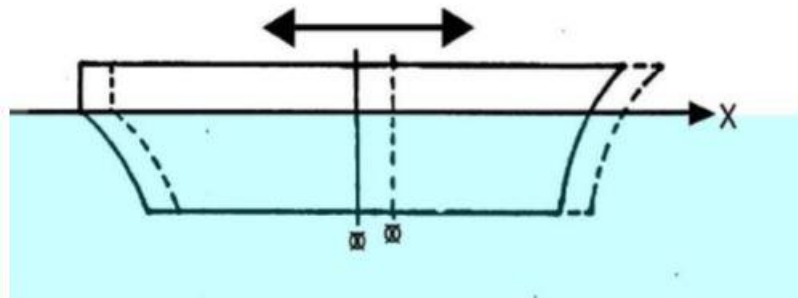
Surge merupakan gerak osilasi translasi kapal dengan sumbu X sebagai pusat gerak. Persamaan umum untuk kapal pada kondisi *surgin* adalah:

$$a\ddot{x} + b\dot{x} + cx = F_0 \cos \omega_e t \dots \dots \dots (2.4)$$

dengan:

- $a\ddot{x}$ = inertial force (N)
- $b\dot{x}$ = damping force (N)
- cx = restoring force (N)
- a = inertial coefficient
- b = damping coefficient
- c = restoring coefficient
- $F_o \cos \omega_e t$ = exciting force (N)
- ω_e = frekuensi gelombang encounter (rad/s)
- t = periode gelombang (s)
- x = lintasan pada sumbu-x

Berikut Gambar 2.8 sebagai ilustrasi gerakan surge:



Gambar 2.8 Ilustrasi gerakan surge

(Sumber: Murtedjo, 1999)

2.2.3.3. Gerakan Sway Murni

Sway adalah gerak osilasi translasi kapal dengan sumbu Y sebagai pusat geraknya. Persamaan umum untuk kapal pada kondisi *swaying* adalah:

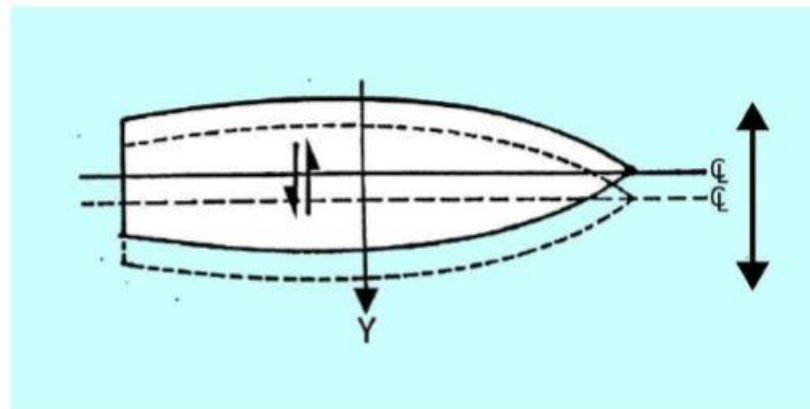
$$a\ddot{y} + b\dot{y} + cy = F_o \cos \omega_e t \dots \dots \dots (2.5)$$

dengan:

- $a\ddot{y}$ = inertial force (N)
- $b\dot{y}$ = damping force (N)
- cy = restoring force (N)
- a = inertial coefficient

- b = damping coefficient
- c = restoring coefficient
- $F_o \cos \omega_e t$ = exciting force (N)
- ω_e = frekuensi gelombang encounter (rad/s)
- t = periode gelombang (s)
- y = lintasan pada sumbu-y

Berikut Gambar 2.9 sebagai ilustrasi gerakan *sway*:



Gambar 2.9 Ilustrasi gerakan *sway*
(Sumber: Murtedjo, 1999)

2.2.3.4. Gerakan *Heave* Murni

Heave adalah gerak osilasi translasi kapal dengan sumbu Z sebagai pusat gerakannya. Pada gerak *heave*, terdapat gaya ke bawah akibat dari berat kapal sehingga membuat kapal tercelup air dan kembali ke awal hingga diperoleh posisi kesetimbangan kapal. Persamaan umum untuk kapal pada kondisi *heaving* adalah:

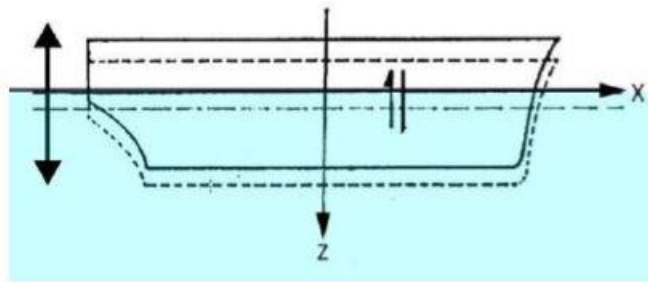
$$a\ddot{z} + b\dot{z} + cz = F_o \cos \omega_e t \dots \dots \dots (2.6)$$

dengan:

- $a\ddot{z}$ = inertial force (N)
- $b\dot{z}$ = damping force (N)
- cz = restoring force (N)
- a = inertial coefficient
- b = damping coefficient

- c = restoring coefficient
- $F_o \cos \omega_e t$ = exciting force (N)
- ω_e = frekuensi gelombang encounter (rad/s)
- t = periode gelombang (s)
- z = lintasan pada sumbu-z

Berikut Gambar 2.10 sebagai ilustrasi gerakan surge:



Gambar 2.10 Ilustrasi gerakan *heave*
(Sumber: Murtedjo, 1999)

2.2.3.5. Gerakan Roll Murni

Roll adalah gerak osilasi rotasi kapal dengan sumbu X sebagai pusat geraknya. Gerakan *rolling* akan berpengaruh terhadap *initial velocity* sehingga perlu dilakukan perhitungan terhadap momen gaya. Persamaan umum untuk kapal pada kondisi *rolling* adalah:

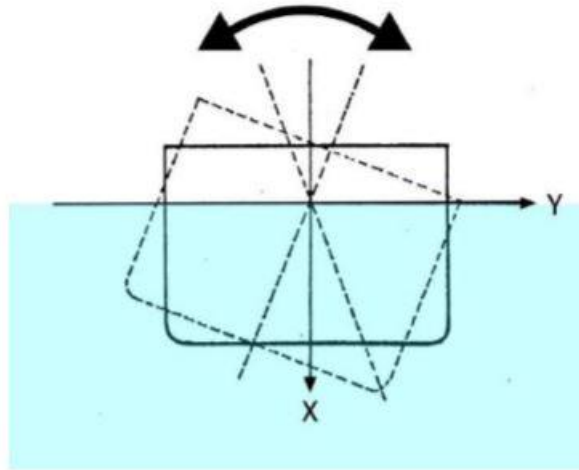
$$a\ddot{\phi} + b\dot{\phi} + c\phi = M_o \cos \omega_e t \dots \dots \dots (2.7)$$

dengan:

- $a\ddot{\phi}$ = inertial moment (N.m)
- $b\dot{\phi}$ = damping moment (N.m)
- $c\phi$ = restoring moment (N.m)
- a = inertial coefficient
- b = damping coefficient
- c = restoring coefficient
- $M_o \cos \omega_e t$ = exciting moment (N.m)
- ω_e = frekuensi gelombang encounter (rad/s)

- t = periode gelombang (s)
- ϕ = sudut *rolling*

Berikut Gambar 2.11 sebagai ilustrasi gerakan *roll*:



Gambar 2.11 Ilustrasi gerakan *roll*
(Sumber: Murtedjo, 1999)

2.2.3.6. Gerakan *Pitch* Murni

Pitch adalah gerak osilasi rotasi kapal dengan sumbu Y sebagai pusat gerakannya. Gerak *pitching* akan berpengaruh terhadap kesetimbangan posisi, sehingga momen yang terjadi akibat *pitching* perlu diperhitungkan. Persamaan umum untuk kapal pada kondisi *pitching* adalah:

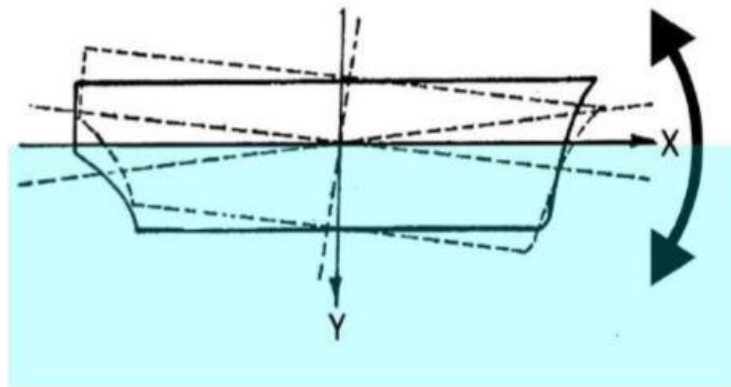
$$a\ddot{\phi} + b\dot{\phi} + c\phi = M_o \cos \omega_e t \dots \dots \dots (2.8)$$

dengan:

- $a\ddot{\phi}$ = inertial moment (N.m)
- $b\dot{\phi}$ = damping moment (N.m)
- $c\phi$ = restoring moment (N.m)
- a = inertial coefficient
- b = damping coefficient
- c = restoring coefficient
- $M_o \cos \omega_e t$ = exciting moment (N.m)

- ω_e = frekuensi gelombang *encounter* (rad/s)
- t = periode gelombang (s)
- ϕ = sudut *pitching*

Berikut Gambar 2.12 sebagai ilustrasi gerakan *pitch*:



Gambar 2.12 Ilustrasi gerakan *pitch*

(Sumber: Murtedjo, 1999)

2.2.3.7. Gerakan *Yaw* Murni

Yaw adalah gerak osilasi rotasi kapal dengan sumbu Z sebagai pusat gerakannya. Seperti pada gerak *rolling* dan *pitching*, gerak *yawing* juga akan berpengaruh terhadap kesetimbangan posisi kapal, sehingga perlu memperhitungkan momen gaya.

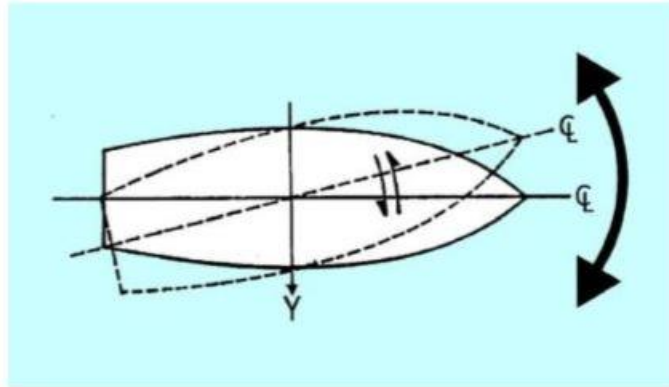
$$a\ddot{\phi} + b\dot{\phi} + c\phi = M_o \cos \omega_e t \dots \dots \dots (2.9)$$

dengan:

- $a\ddot{\phi}$ = *inertial moment* (N.m)
- $b\dot{\phi}$ = *damping moment* (N.m)
- $c\phi$ = *restoring moment* (N.m)
- a = *inertial coefficient*
- b = *damping coefficient*
- c = *restoring coefficient*
- $M_o \cos \omega_e t$ = *exciting moment* (N.m)
- ω_e = frekuensi gelombang *encounter* (rad/s)

- t = periode gelombang (s)
- ϕ = sudut yawing

Berikut Gambar 2.13 sebagai ilustrasi gerakan yaw:



Gambar 2.13 Ilustrasi gerakan yaw
(Sumber: Murtedjo, 1999)

2.2.4. Response Amplitude Operator

Fungsi respons gerakan dinamis suatu struktur yang disebabkan oleh gelombang dengan suatu rentang frekuensi tertentu disebut dengan *Response Amplitude Operator* (RAO) atau dapat disebut juga *Transfer Function* (Chakrabarti, 1987). Selain itu RAO juga bisa diartikan sebagai hubungan antara amplitudo respons terhadap amplitudo gelombang. Amplitudo bisa berupa gerakan, tegangan, maupun getaran. RAO yang terjadi pada struktur terapung merupakan RAO gerakan, berfungsi untuk mengetahui bagaimana perilaku pada struktur tersebut. Dari RAO, akan diketahui respons amplitudo akibat pengaruh eksitasi gelombang reguler yang mengenai struktur.

Respons gerakan RAO untuk gerakan translasi (*surge, sway, heave*) merupakan perbandingan langsung antara amplitudo gerakan dibanding dengan amplitudo gelombang insiden (keduanya dalam satuan panjang) (Djarmiko, 2012). Berikut ini adalah bentuk umum dari persamaan RAO untuk gerakan translasi (*surge, sway, heave*) (Chakrabarti, 1987):

$$RAO_{(\omega)} = \frac{X_p(\omega)}{\eta(\omega)} \left(\frac{m}{m} \right) \dots \dots \dots (2.10)$$

Keterangan:

$X_{p(\omega)}$ = amplitudo gerakan suatu struktur bangunan apung (m)

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

Sedangkan respons gerakan RAO untuk gerakan rotasi (*roll, pitch, yaw*) merupakan perbandingan antara amplitudo gerakan rotasi (dalam radian) dengan kemiringan gelombang, yaitu merupakan perkalian antara gelombang ($k_w = \omega^2/g$) dengan amplitudo gelombang insiden (Djarmiko, 2012). Berikut ini adalah persamaannya:

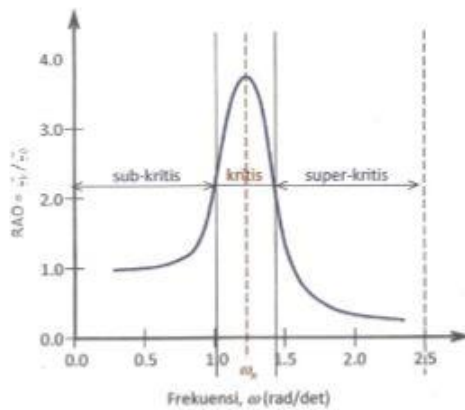
$$RAO_{(\omega)} = \frac{\zeta_{k0(\omega)}}{\zeta_0(\omega)} = \frac{\zeta_{k0}}{\left(\frac{\omega^2}{g}\right) \zeta_0} \text{rad/rad} \dots \dots \dots (2.11)$$

Keterangan:

$\zeta_{k0(\omega)}$ = amplitudo gerakan rotasi suatu struktur bangunan apung (m)

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

Bentuk umum grafik respons gerakan bangunan apung dapat dilihat pada Gambar 2.14:



Gambar 2.14 Grafik respons gerakan bangunan apung
(Sumber: Djarmiko, 2012)

Dilihat pada Gambar 2.14, kurva respons gerakan bangunan apung didefinisikan menjadi tiga bagian:

- a. Bagian frekuensi rendah, atau gelombang dengan periode panjang disebut daerah sub-kritis. Pada daerah ini bangunan laut akan bergerak mengikuti pola atau kontur elevasi gelombang yang panjang sehingga amplitudo gerakan kurang lebih akan ekuivalen dengan amplitudo gelombang, atau disebut sebagai *countouring*. Dalam korelasi persamaan hidrodinamis, di daerah frekuensi rendah, atau ω^2 kurang dari $k/(m+a)$, gerakan akan didominasi oleh faktor kekakuan.
- b. Daerah kritis, meliputi pertengahan lengan kurva di sisi frekuensi rendah sampai dengan puncak kurva dan diteruskan ke pertengahan lengan kurva di sisi frekuensi tinggi. Puncak kurva berada pada frekuensi alami, yang merupakan daerah resonansi, sehingga respons gerakan mengalami magnifikasi, atau amplitudo gerakan beberapa kali lebih besar daripada amplitudo gelombang, gerakan akan didominasi oleh faktor redaman.
- c. Daerah super kritis, yaitu daerah frekuensi tinggi, atau gelombang-gelombang dengan periode pendek. Pada daerah ini respons gerakan akan mengecil. Semakin tinggi frekuensi, atau semakin rapat antara puncak-puncak gelombang yang berurutan, maka akan memberikan efek seperti bangunan laut bergerak di atas air yang relatif datar. Dalam hal korelasi hidrodinamis, gerakan di daerah frekuensi tinggi ini, dimana ω^2 kurang k/a , gerakan akan didominasi oleh faktor massa (Djutmiko, 2012).

2.2.5. Spektrum Gelombang

Pemilihan spektrum gelombang untuk memperoleh respons spektra dari suatu struktur terapung didasarkan pada kondisi *real* lingkungan laut yang ditinjau. Bila tidak ada, maka dapat digunakan model spektrum yang dikeluarkan oleh berbagai institusi dengan mempertimbangkan kesamaan fisik lingkungan.

Persamaan spektrum JONSWAP merupakan modifikasi dari persamaan spektrum Pierson-Morkowitz untuk keadaan perairan tertutup di laut

utara. Selain itu, spektrum JONSWAP juga dapat diaplikasikan di lingkungan perairan yang kondisi *fetch*-nya terbatas dan *shallow water*.

Dari penjelasan di atas, maka spektrum JONSWAP cocok diaplikasikan di Indonesia karena karakteristik perairan Indonesia yang tertutup/kepulauan, namun harus menyesuaikan kondisi lingkungan perairan tempat dimana struktur terapung tersebut beroperasi.

Pada DNV RP C205 juga dijelaskan bahwa spektrum JONSWAP diaplikasikan pada perairan dengan:

$$3.6 < T_p / (H_s)^{1/2} < 5 \dots \dots \dots (2.12)$$

dimana:

T_p = periode puncak gelombang (s)

H_s = tinggi gelombang signifikan (s)

Sedangkan untuk persamaan umum pada spektrum gelombang JONSWAP sebagai berikut:

$$S_{(\omega)} = ag^2 \omega^{-5} EXP \left[-1.25 \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^{-4} \right] \gamma EXP \left[\frac{-\omega - \omega_0^2}{2\tau^2\tau - \omega_0^2} \right] \dots \dots \dots (2.13)$$

Keterangan:

$S_{(\omega)}$ = spektrum gelombang

γ = parameter puncak

τ = parameter bentuk

A = $0.0076(X_o) - 0.22$, untuk X_o tidak diketahui $a = 0.0081$

2.2.6. Spektrum Respons

Spektrum respons diartikan sebagai respons energi dari struktur akibat energi gelombang. Pada sistem linier, respons spektra didapat dengan mengkuadratkan RAO lalu dikalikan dengan spektra gelombang, yang secara persamaan matematis dapat ditulis dengan:

$$S_R(\omega) = [RAO(\omega)]^2 \times S(\omega) \dots \dots \dots (2.14)$$

dimana:

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

2.2.7. Analisis Respons

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

a. Analisis Kuasi-statis

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

b. Analisis Dinamis

Analisis dinamis memperhitungkan respons dinamis dari tali tambat. Efek variasi waktu akibat massa tali tambat, redaman, dan percepatan relatif fluida disertakan. Dalam pendekatan ini, gerakan *fairlead* variasi waktu dihitung dari gerakan *surge*, *sway*, *heave*, *pitch*, *roll* dan *yaw* dari bangunan apung. Menurut DNV E301 OS, terdapat 2 metode untuk analisis simulasi domain, yaitu *time domain analysis* dan *frequency domain analysis*. *Time domain analysis* adalah penyelesaian untuk gerakan dinamis berdasarkan fungsi waktu sedangkan *frequency domain analysis* adalah simulasi kejadian pada saat tertentu dengan interval frekuensi yang telah ditentukan.

2.2.8. Konsep Pembebanan

Menurut DNV OS E301, analisis kekuatan sistem tambat dilakukan dalam dua kondisi pembebanan, yaitu kondisi *Ultimate Limit State* (ULS) dan *Accidental Limit State* (ALS).

2.2.8.1. ULS (*Ultimate Limit State*)

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

2.2.8.2. ALS (*Accidental Limit State*)

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

2.2.9. Tension pada Tali Tambat

Tarikan (*tension*) pada *mooring line* terjadi akibat struktur yang mengalami *offset* yang disebabkan oleh spektrum respons. Persamaan untuk *offset* yang terjadi pada kapal secara matematis mengacu pada API RP 2P sebagai berikut:

$$X_{rms} = \sqrt{\Delta\omega \times S_{R(\omega)rata-rata}} \dots \dots \dots (2.15)$$

$$X_{1/3} = 2 \times X_{rms} \dots \dots \dots (2.16)$$

$$X_{max} = 1.86 \times (X_{1/3}) \dots \dots \dots (2.17)$$

dimana:

$\Delta\omega$ = selisih frekuensi gelombang (rad/s)

$S_R(\omega)$ = spektrum respons rata-rata (m²-s)

X_{rms} = *mean offset* (m)

$X_{1/3}$ = *offset signifikan* (m)

X_{max} = *offset maksimum* (m)

Secara matematis gaya tarik atau *tension* dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$T = k \times x \dots \dots \dots (2.18)$$

dimana:

T = *tension* (N)

K = kekakuan (N/m)

X = *offset* (m)

Tarikan (*tension*) yang terjadi pada *mooring line* dapat dibedakan menjadi 2, yaitu:

a. *Mean Tension*

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

b. *Maximum Tension*

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

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

$$T_{max} = T_H + w \cdot h \dots \dots \dots (2.19)$$

dengan:

T_{max} = *tension* maksimum tali tambat (ton)

T_H = horizontal *pre-tension* (ton)

w = berat *chain* di air (ton/m)

h = kedalaman perairan (m)

Menurut API RP 2SK, *maximum tension* dapat ditentukan dengan prosedur sebagai berikut:

$$T_{max} = T_{mean} + T_{lfmax} + T_{wfsig} \dots \dots \dots (2.20)$$

$$T_{max} = T_{mean} + T_{wfm} + T_{lfsig} \dots \dots \dots (2.21)$$

dimana:

T_{max} = maximum tension

T_{mean} = mean tension

T_{wfmax} = maximum wave frequency tension

T_{wfsig} = significant wave frequency tension

T_{lfmax} = maximum low frequency tension

T_{lfsig} = significant low frequency tension

2.2.10. Tegangan (Stress)

2.2.10.1. Tegangan Normal (Aksial)

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

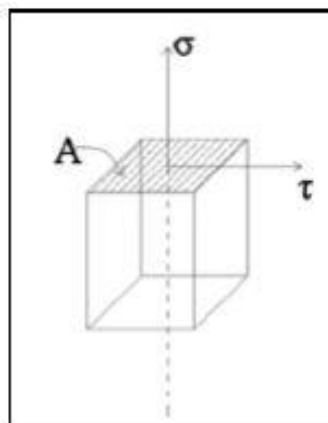
$$\sigma = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} \dots \dots \dots (2.22)$$

dengan:

σ = tegangan normal (N/m²)

F = gaya yang bekerja tegak lurus atau normal terhadap penampang (N)

A = luas penampang (m²)



Gambar 2.15 Tegangan normal pada benda dengan luasan A

(Sumber: Ardhyan. 2015)

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

2.2.10.2. Tegangan Geser

Tegangan geser adalah intensitas gaya pada suatu titik yang sejajar terhadap penampang, yang didefinisikan sebagai berikut:

$$\tau = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{\Delta A} \dots \dots \dots (2.23)$$

dengan:

- τ = tegangan geser (N/m²)
- V = gaya yang bekerja sejajar terhadap penampang (N)
- A = luas penampang (m²)

2.2.10.3. Tegangan *Von-Mises*

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

$$\begin{bmatrix} \sigma_x - \sigma_0 & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} & \sigma_y - \sigma_0 & \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_z - \sigma_0 \end{bmatrix} = Q \dots \dots \dots (2.24)$$

dengan:

- σ_0 = tegangan yang bekerja pada sumbu utama
- σ_x = tegangan arah sumbu x
- σ_y = tegangan arah sumbu y
- σ_z = tegangan arah sumbu z
- σ_{xy} = tegangan arah sumbu xy
- σ_{xz} = tegangan arah sumbu xz

σ_{yz} = tegangan arah sumbu yz

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

$$\sigma_{VM} = \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)} \dots \dots \dots (2.25)$$

dengan:

σ_{VM} = tegangan *Von Mises*

σ_x = tegangan arah sumbu x

σ_y = tegangan arah sumbu y

σ_z = tegangan arah sumbu z

τ_{xy} = tegangan geser arah sumbu xy

τ_{xz} = tegangan geser arah sumbu xz

τ_{yz} = tegangan geser arah sumbu yz

2.2.11. Korosi pada *Anchor Chain*

Salah satu faktor penting yang berpengaruh dalam keselamatan dan integritas dari suatu struktur lepas pantai disebabkan oleh korosi. Dibutuhkan biaya yang mahal untuk menangani struktur yang sudah terkorosi sehingga dibutuhkan perhitungan penentuan margin korosi sebelumnya. Prediksi berkaitan dengan korosi yang akan terjadi menjadi penting untuk mengetahui margin yang dibutuhkan serta penentuan umur struktur.

Menurut DNV OS 301 (2004), *allowance* untuk korosi pada rantai, termasuk keausan dari rantai dan elemen penyambungannya dimasukkan pada tahap desain. *Minimum allowance* untuk korosi dapat dilihat pada Tabel 2.1:

Tabel 2.1 Corrosion allowance for chain

Part of mooring line	Corrosion allowance referred to the chain diameter		
	No inspection (mm/year)	Regular inspection (mm/year)	Requirements for the Norwegian continental shelf
Splash zone	0.4	0.2	0.8
Catenary	0.3	0.2	0.2
Bottom	0.4	0.3	0.2

(Sumber: DNV, 2004)

Pada kenyataan yang terjadi, ketika korosi terjadi, geometri dari sambungan rantai tidak berubah. Untuk menentukan karakteristik dari sambungan rantai yang terkorosi, menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$S_{mbs-corr} = S_{mbs} \times \left(\frac{D_{corr}}{D_{new}} \right)^2 \dots \dots \dots (2.26)$$

dimana:

$S_{mbs-corr}$ = minimum breaking load sesudah korosi

S_{mbs} = minimum breaking load awal

D_{corr} = diameter rantai yang terkorosi

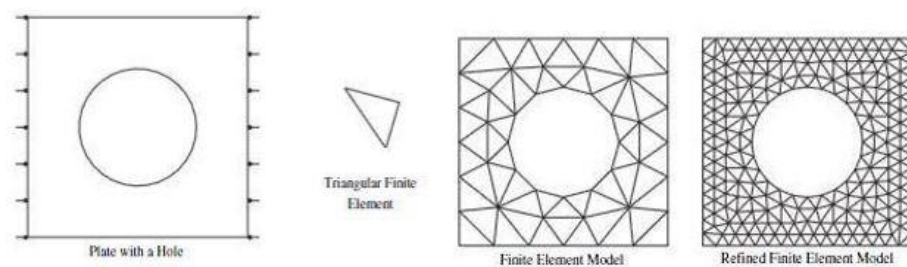
D_{new} = diameter chain diameter

2.2.12. Finite Element Method

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 2.16. 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 2.16 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)

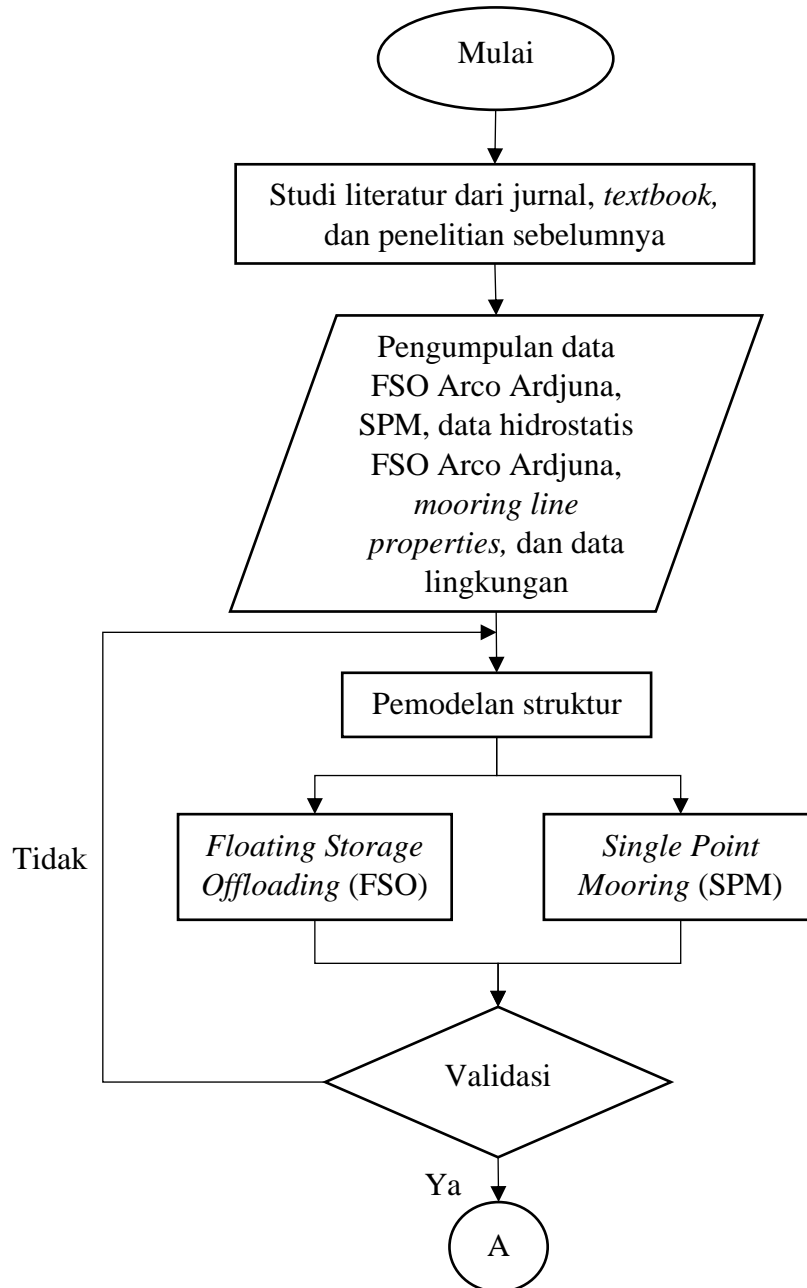
[K] = matriks pada benda struktur (N/m)

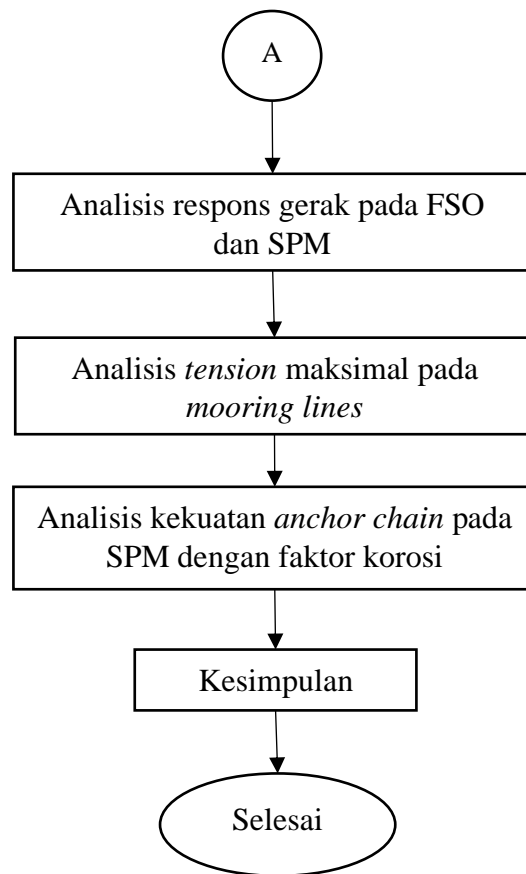
{d} = matriks *displacement* pada struktur FEM (mm)

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Skema Diagram Alir

Langkah kerja penelitian yang digunakan pada Tugas Akhir ini dapat dilihat berdasarkan skema diagram alir sebagai berikut:





Gambar 3.1 Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir

3.2. Prosedur Penelitian

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

1. Studi Literatur

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

2. Pengumpulan Data

Pada tahap ini, dilakukan pengumpulan data struktur FSO, SPM, data lingkungan dan *mooring line properties* yang didapat dari PT. Pertamina Hulu Energi ONWJ dan PT. Citra Mas.

3. Permodelan Struktur

Permodelan struktur FSO dan SPM saat kondisi terapung bebas dalam tugas akhir ini dilakukan dengan bantuan *software* Maxsurf, Moses, dan Orcaflex. FSO dan SPM beserta sistem tambatnya dimodelkan dengan data-data yang didapat.

4. Validasi Model

Pada tahap ini dilakukan validasi dengan membandingkan data hidrostatis keluaran Maxsurf dari struktur yang dimodelkan dengan data hidrostatis yang ada.

5. Analisis Respons Gerak FSO dan SPM pada Kondisi *Free Floating*

Analisis respons gerakan dari struktur FSO dan SPM dilakukan untuk mengetahui karakteristik gerakan pada masing-masing struktur dalam kondisi terapung bebas ditunjukkan dengan data RAO dari masing-masing struktur dengan bantuan *software* Maxsurf dan Moses.

6. Analisis *Tension* Maksimal pada *Mooring Lines*

Analisis *tension mooring lines* dilakukan dengan bantuan *software* ANSYS AQWA/Orcaflex. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui *tension* maksimal pada rantai jangkar dengan *safety factor* mengacu pada *class* serta mempertimbangkan *corrosion rate/year*.

7. Analisis Kekuatan *Anchor Chain*

Analisis kekuatan *anchor chain* dilakukan dengan bantuan *software* ANSYS. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui kekuatan tiap-tiap *anchor chain* pada SPM tipe CALM dengan metode *Ultimate Limit State* (ULS) dan *Accidental Limit State* (ALS).

8. Pengambilan Kesimpulan dari Hasil Penelitian.

3.3. Pengumpulan Data

3.3.1. Data FSO Arco Ardjuna

Berikut ini adalah data FSO Arco Ardjuna yang disajikan 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, 2019)

3.3.2. Data Single Point Mooring

Berikut ini adalah data ukuran utama SPM yang disajikan pada Tabel 3.2:

Tabel 3.2 Ukuran utama CALM Buoy

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, 2019)

3.3.3. Data Mooring Lines

Berikut ini adalah data karakteristik *mooring lines* yang disajikan pada Tabel 3.3:

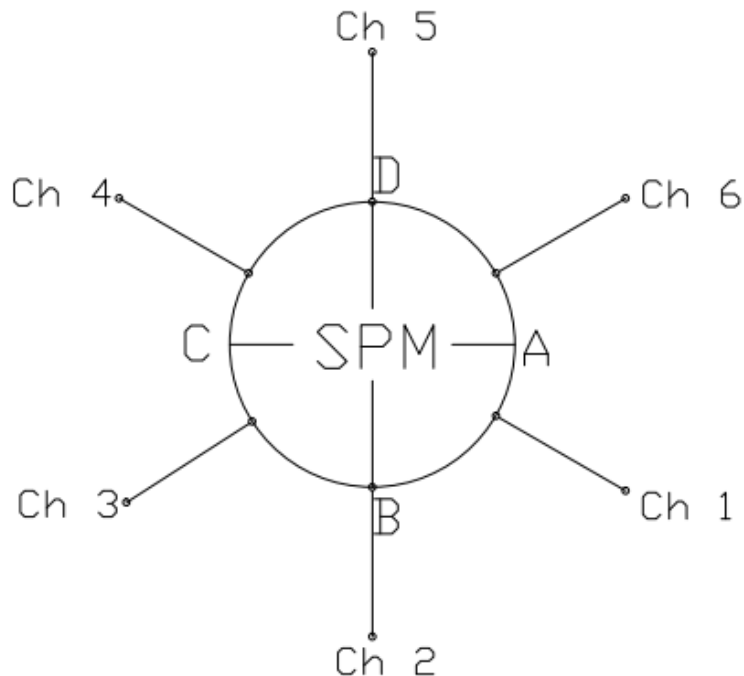
Tabel 3.3 Karakteristik *mooring lines*

<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

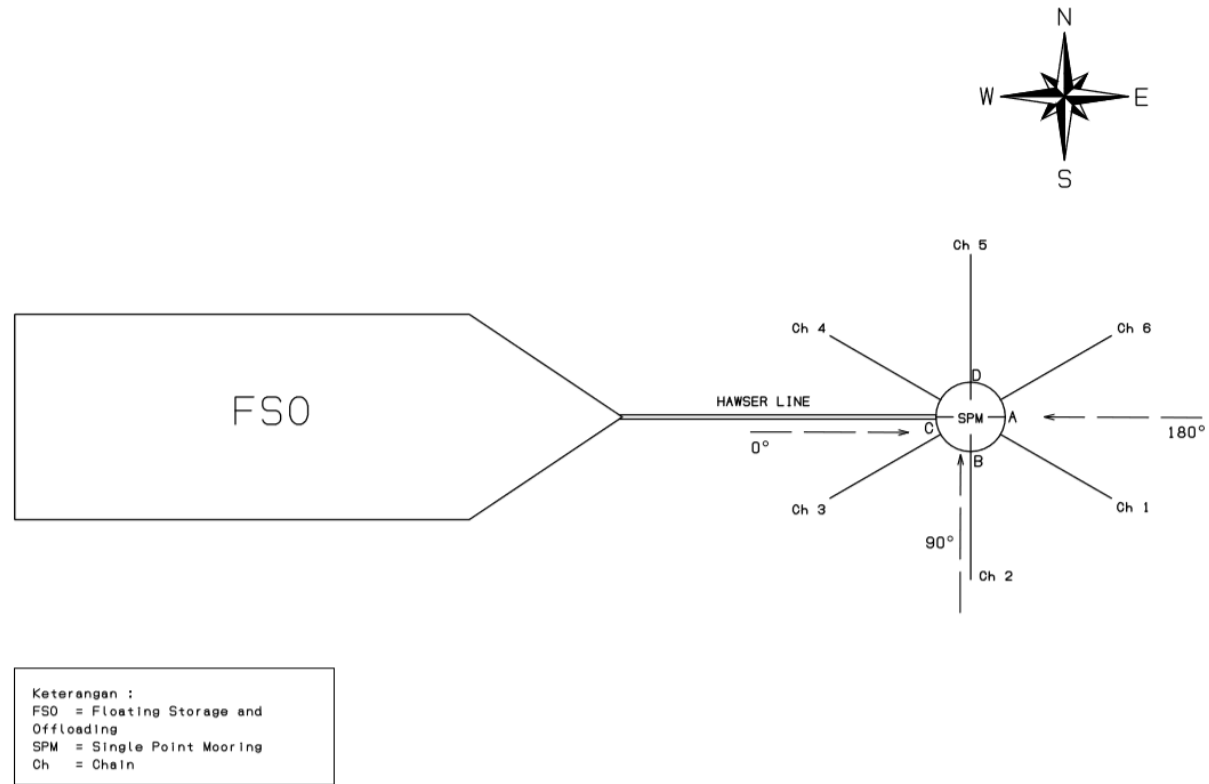
(Sumber: PT. Citra Mas, 2019)

3.3.4. Data Konfigurasi *Mooring Lines* dan *Anchor System Pattern* (Top View)

Berikut ini adalah konfigurasi *mooring lines* dan gambar detail *anchor system* yang disajikan pada Gambar 3.1 dan 3.2:



Gambar 3.2 *Anchoring system pattern*



Gambar 3.3 Konfigurasi *mooring lines*

3.3.5. Data Lingkungan

Berikut ini adalah data lingkungan yang disajikan pada Tabel 3.4:

Tabel 3.4 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	34	34	34
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, 2019)

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1. Pemodelan Struktur

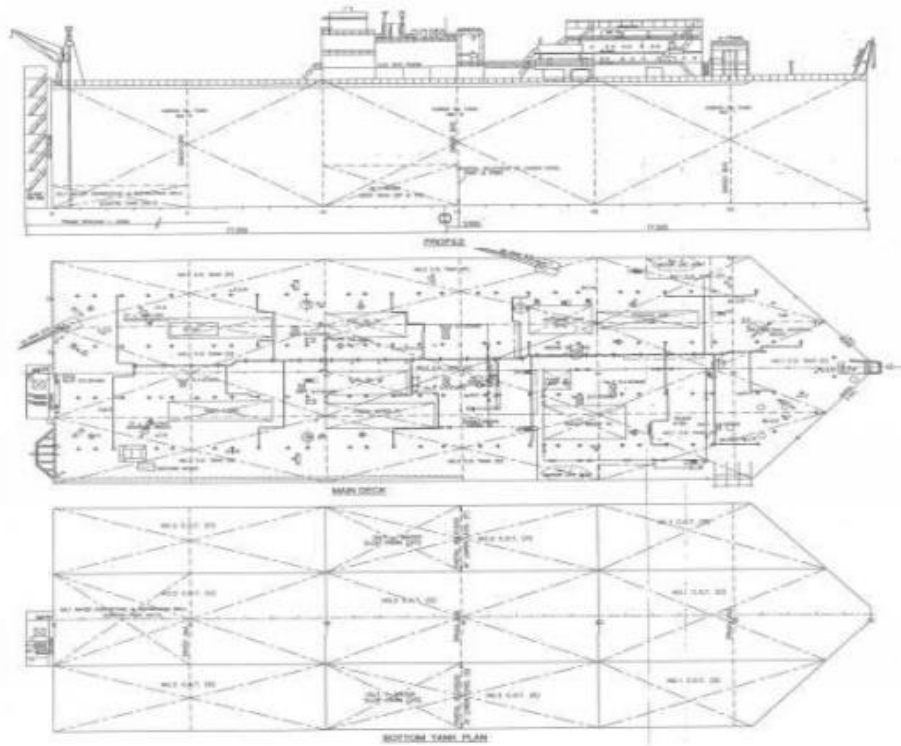
4.1.1. FSO Arco Ardjuna

Dalam penelitian tugas akhir ini diperlukan pemodelan kapal FSO Arco Ardjuna yang beroperasi di Laut Jawa menggunakan *software* Maxsurf. Pemodelan dilakukan untuk mendapatkan *linesplan* kapal, bentuk geometri serta nilai-nilai hidrostatis kapal sesuai dengan data *principal dimension* dan *general arrangement* yang ada. Berikut merupakan data *general arrangement* dan *principal dimension* dari FSO Arco Ardjuna:

Principal Dimension :

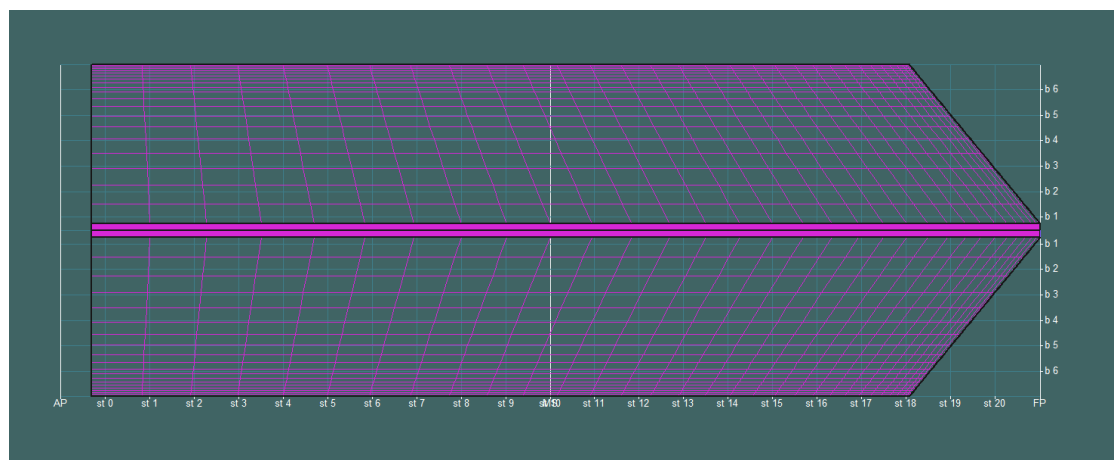
- *Length* (Loa) : 142.6 m
- *Breadth* (B) : 48.2 m
- *Depth* (H) : 26.5 m
- *Draft* (T) : 20 m
- *Displacement* (Δ) : 127,645 ton

(Sumber: PT. Pertamina PHE ONWJ)

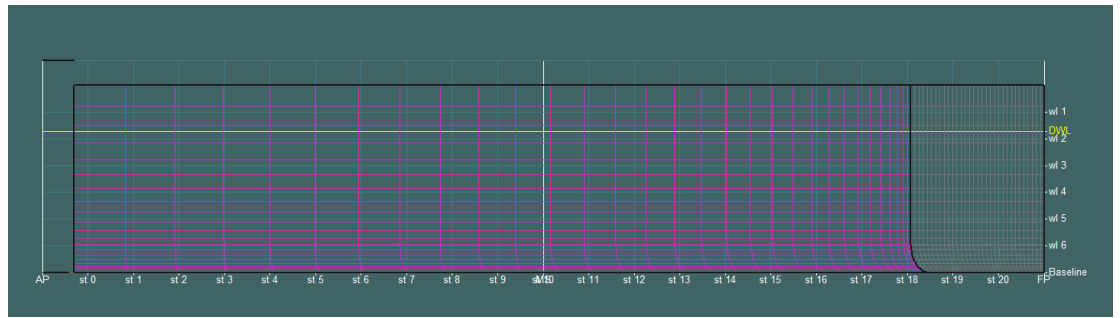


Gambar 4.1 *General arrangement* FSO Arco Ardjuna
 (Sumber: PT. Pertamina PHE ONWJ)

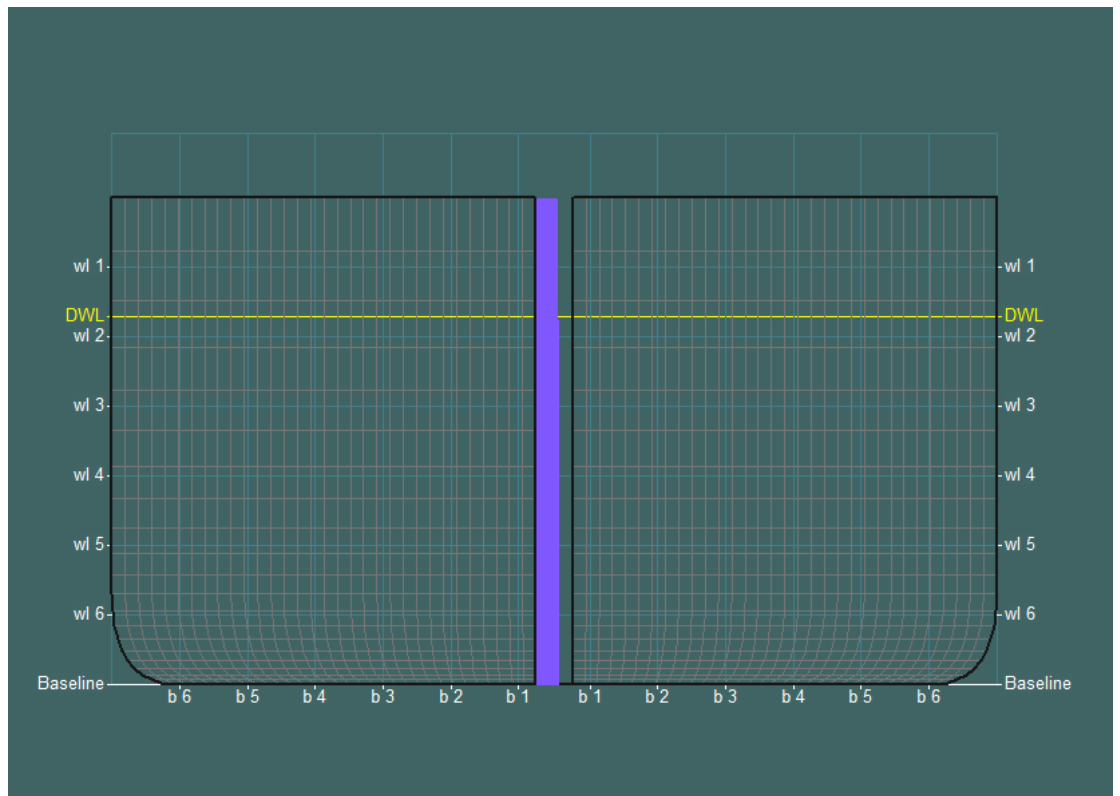
Berikut adalah hasil pemodelan struktur FSO menggunakan *software* Maxsurf Modeler dapat dilihat pada Gambar 4.2 sampai Gambar 4.5



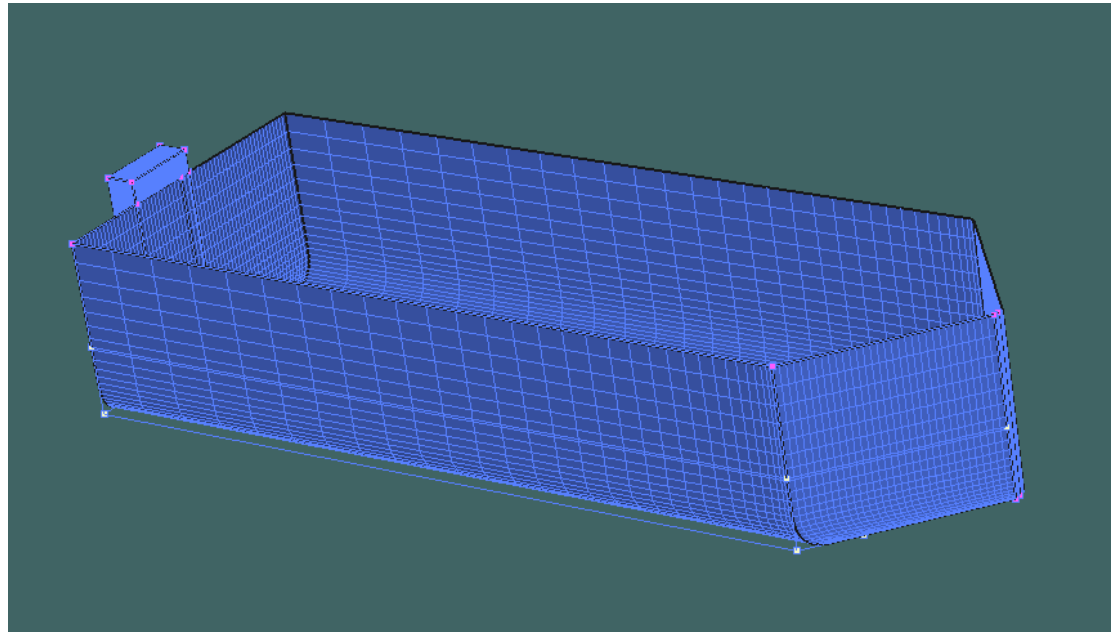
Gambar 4.2 Hasil pemodelan FSO AA pada Maxsurf (tampak atas)



Gambar 4.3 Hasil pemodelan FSO AA pada Maxsurf (*sheer plan*)



Gambar 4.4 Hasil pemodelan FSO AA pada Maxsurf (*body plan*)



Gambar 4.5 Hasil pemodelan FSO AA pada Maxsurf (tampak isometrik)

4.1.2. *Single Point Mooring*

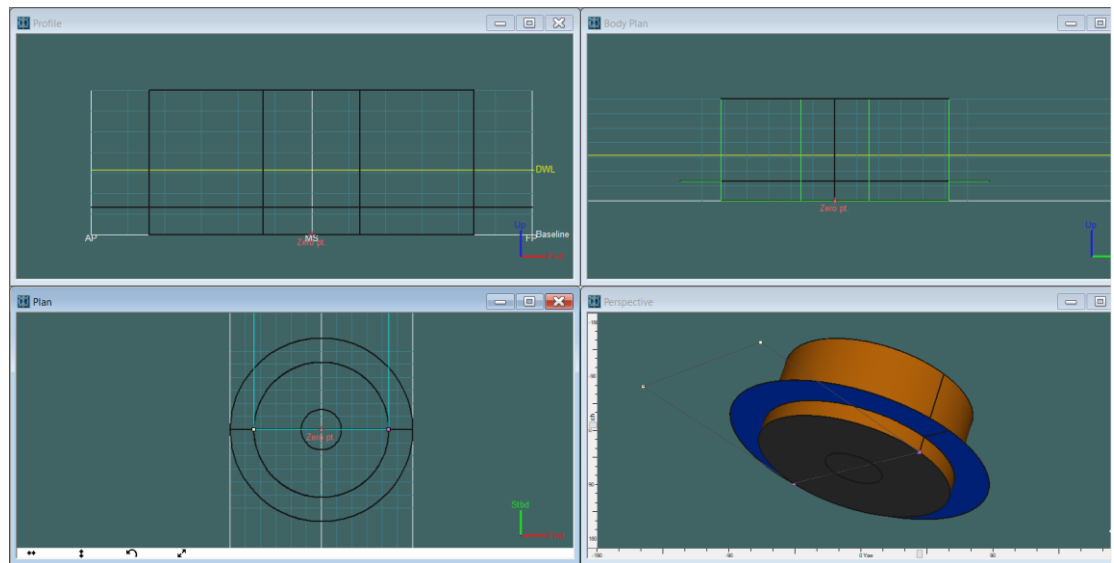
Single Point Mooring (SPM) yang digunakan adalah tipe CALM *buoy* dengan jumlah tali tambat sebanyak 6 pada sudut 60° . Berikut adalah *principal dimension* dari SPM CALM *Buoy*:

Tabel 4.1 Data utama SPM CALM *Buoy*

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. Pertamina PHE ONWJ)

Selanjutnya adalah hasil pemodelan struktur SPM CALM *buoy* dengan menggunakan *software* Maxsurf Modeler.



Gambar 4.6 Hasil pemodelan struktur SPM CALM *Buoy* pada Maxsurf

4.2. Validasi Hidrostatik

Setelah pemodelan selesai, maka perlu dilakukan validasi terhadap struktur model tersebut untuk mengetahui apakah FSO sudah layak dan sesuai dengan kondisi yang sebenarnya. Pada validasi hidrostatik dilakukan perbandingan data hidrostatik struktur terapung yang dikeluarkan Maxsurf dengan data hidrostatik yang didapatkan. Validasi hidrostatik bertujuan untuk mendapatkan hasil pemodelan struktur terapung yang akurat, sehingga olah gerak dari struktur tersebut bisa mendekati kondisi sesungguhnya.

4.2.1. FSO Arco Ardjuna

Untuk FSO Arco Ardjuna, dilakukan validasi model pada kondisi *full load* dan *light load*. Data hidrostatik FSO keluaran dari Maxsurf dibandingkan data hidrostatik struktur yang sebenarnya dengan toleransi atau faktor *error* kurang dari 2%, berdasarkan pada ketentuan ABS MODU (2012). Validasi model dapat dilihat pada Tabel 4.2 dan Tabel 4.3.

Tabel 4.2 Koreksi hidrostatik data dengan model pada kondisi *full load*

	Unit	FSO	Model Maxsurf	Koreksi (< 2%)	Status
Displacement	tonne	153202	153404	0.13%	Memenuhi
Draft to Baseline	m	24			
WSA	m ²	12813	13057.948	1.91%	Memenuhi
Max. Cross Sect. Area	m ²	1150.63	1150.448	0.02%	Memenuhi
Waterplane area	m ²	6239	6265.944	0.43%	Memenuhi
Cp		0.91	0.913	0.33%	Memenuhi
Cb		0.9	0.908	0.89%	Memenuhi
Cm		0.99	0.995	0.51%	Memenuhi
Cwp		0.91	0.912	0.22%	Memenuhi
LCB from zero pt.	m	-2.78	-2.822	1.51%	Memenuhi
LCF from zero pt.	m	-2.79	-2.845	1.97%	Memenuhi
KB	m	12.02	12.053	0.27%	Memenuhi
KMt	m	19.73	19.792	0.31%	Memenuhi
KMI	m	71.3	71.793	0.69%	Memenuhi

Tabel 4.3 Koreksi hidrostatik data dengan model pada kondisi *light load*

	Unit	FSO	Model Maxsurf	Koreksi (<2%)	Status
Displacement	tonne	15529	15379	0.97%	Memenuhi
Draft to Baseline	m	2.5			
WSA	m ²	6681	6628.162	0.79%	Memenuhi
Max. Cross Sect. Area	m ²	114.34	115.889	1.35%	Memenuhi
Waterplane area	m ²	6239	6191.452	0.76%	Memenuhi
Cp		0.91	0.916	0.66%	Memenuhi
Cb		0.87	0.878	0.92%	Memenuhi
Cm		0.959	0.958	0.10%	Memenuhi
Cwp		0.91	0.913	0.33%	Memenuhi
LCB from zero pt.	m	-2.69	-2.659	1.15%	Memenuhi
LCF from zero pt.	m	-2.79	-2.794	0.14%	Memenuhi
KB	m	1.26	1.275	1.19%	Memenuhi
KMt	m	78	75.617	1.98%	Memenuhi
KMI	m	590.8	591.155	0.06%	Memenuhi

4.2.2. *Single Point Mooring*

Untuk model SPM juga dilakukan hal serupa yaitu dengan melakukan validasi hidrostatik antara pemodelan pada Maxsurf dengan data sebenarnya.

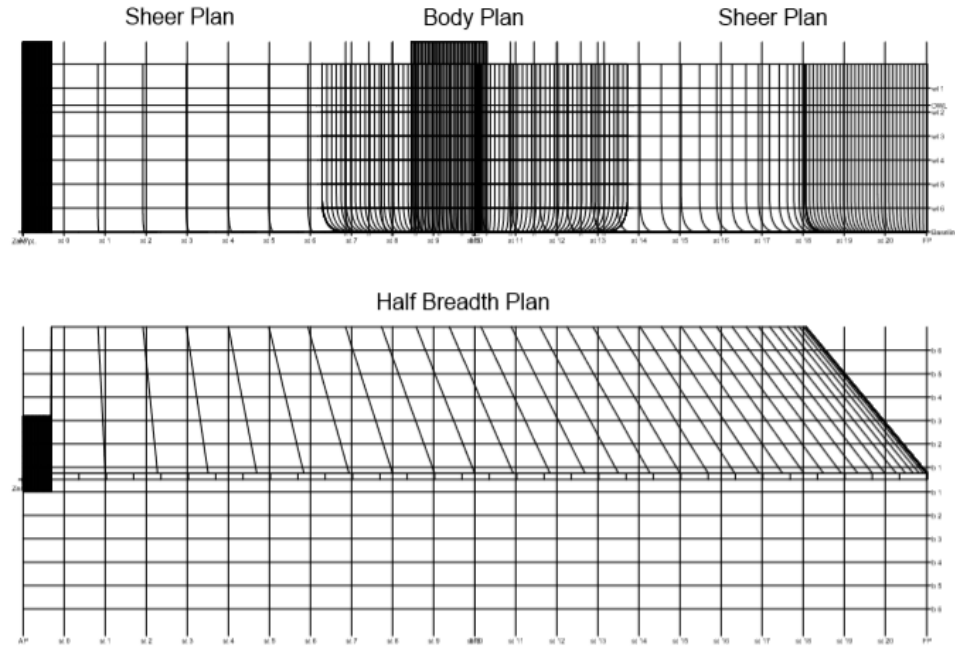
Untuk validasi model SPM dapat dilihat pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Koreksi hidrostatik data dengan model Maxsurf

Designation	Unit	Data	Maxsurf	Koreksi	Status
<i>Shell Outer Diameter</i>	m	12	12		Memenuhi
<i>Centre Wall Diameter</i>	m	3.57	3.57		Memenuhi
<i>Skirt Outer Diameter</i>	m	16.26	16.26		Memenuhi
<i>Buoy Body Height</i>	m	5.3	5.3		Memenuhi
<i>Skirt Thickness</i>	mm	12	12		Memenuhi
<i>Skirt Heigh Baseline</i>	m	1	1		Memenuhi
<i>Buoy Installed Draft</i>	m	2.38	2.38		Memenuhi
<i>Centre of Gravity (KG)</i>	m	3.42	3.42		Memenuhi
<i>Displacement</i>	ton	255.34	252.8	0.01%	Memenuhi

4.3. *Lines Plan*

Setelah validasi model dilakukan dan memenuhi, analisis selanjutnya yang harus dilakukan adalah membuat perancangan rencana garis atau *lines plan*. *Lines plan* dibuat dengan menggunakan data *offset model* yang sudah valid pada Maxsurf. *lines plan* dari FSO Arco Ardjuna dapat dilihat pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7 Lines plan FSO Arco Ardjuna

4.4. Analisis Olah Gerak Struktur

4.4.1 FSO Arco Ardjuna

Pada analisis olah gerak dari struktur dilakukan dengan menggunakan *software* Moses. Data-data yang diperlukan dalam analisis olah gerak struktur adalah data hidrostatis yang sudah valid dan juga menggunakan data besar titik berat dan *radius gyration* seperti pada Tabel 4.5.

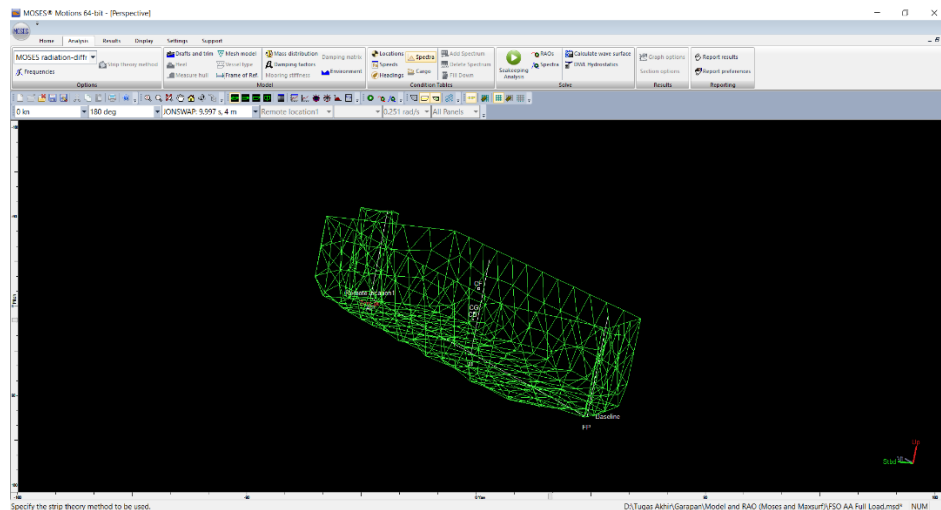
Tabel 4.5 Data titik berat, *displacement*, dan *radius gyration* pada FSO

<i>Designation</i>	<i>Unit</i>	<i>FSO Full Load</i>	<i>FSO Light Load</i>
Draft	m	20	6.91
Disp.	ton	127645	43725
VCG	m	12.275	11.819
Kxx	m	12.055	13.208
Kyy	m	35.092	28.334
Kzz	m	36.999	30.05

(Sumber: PT. Pertamina PHE ONWJ)

Pada analisis olah gerak FSO, terdapat perbedaan sarat air dari data yang disajikan sebelumnya. Perbedaan sarat air untuk kondisi *full load* dan *light load* terjadi karena umur FSO dan kapasitas muat yang mengalami reduksi. Digunakan data *input* yang baru pada Moses untuk analisis olah gerak FSO agar menyesuaikan dengan kondisi yang sesungguhnya.

Pada Gambar 4.8 dapat dilihat model FSO pada Moses berdasarkan data yang dimasukkan.



Gambar 4.8 Model FSO Arco Ardjuna pada Moses

4.4.2 *Single Point Mooring*

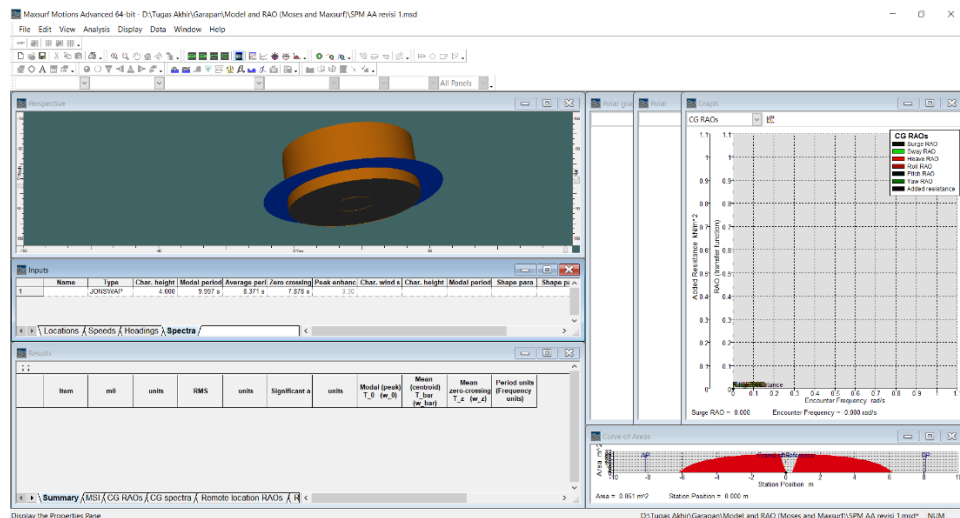
Untuk analisis olah gerak SPM dilakukan dengan menggunakan *software* Maxsurf. Data-data yang dibutuhkan untuk masukan pada Maxsurf adalah data titik berat, *displacement* dan *radius gyration*. Besar titik berat dan *radius gyration* dapat dilihat pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Data titik berat, *displacement*, dan *radius gyration* pada SPM

<i>Designation</i>	<i>Unit</i>	<i>SPM</i>
Draft	m	2.38
Disp.	ton	252.6
VCG	m	3.42
Kxx	m	7.63
Kyy	m	7.63
Kzz	m	10.61

(Sumber: PT. Pertamina PHE ONWJ, 2019)

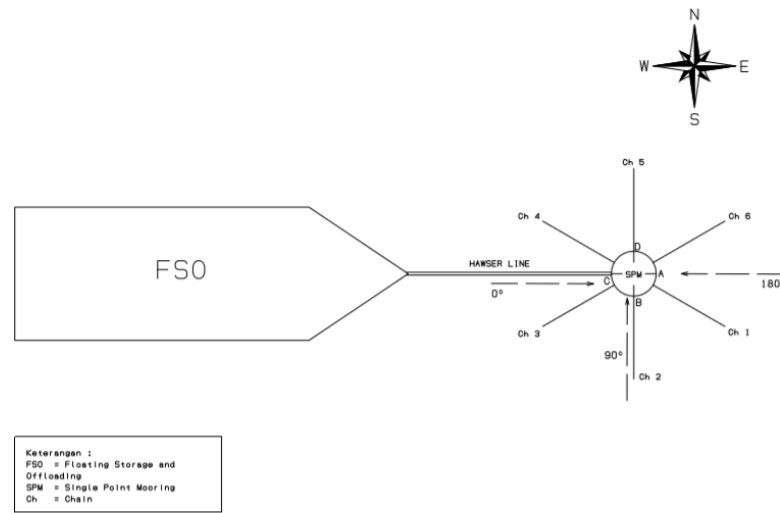
Pada Gambar 4.9 dapat dilihat model SPM pada Maxsurf berdasarkan data yang dimasukkan.



Gambar 4.9 Model SPM pada Maxsurf

4.4.3 Konfigurasi Arah Pembebanan Gelombang

FSO dan SPM dirancang dengan tali tambat sejumlah 6 buah yang dipasang secara menyebar dan simetris terhubung dengan *sea bed* beserta 2 *hawser line* yang terhubung dari FSO ke SPM. Untuk detail arah pembebanan gelombang dan konfigurasi *mooring lines* untuk analisis olah gerak struktur FSO dan SPM dapat dilihat pada Gambar 4.10 dengan *heading* 0°, 45°, 90°, 135°, dan 180°.



Gambar 4.10 Konfigurasi arah pembebanan gelombang pada FSO dan SPM

4.4.4 *Response Amplitude Operator (RAO) pada Kondisi Free Floating*

Untuk melakukan analisis respons gerak pada FSO dan SPM dengan menghitung *Response Amplitude Operator (RAO)* dengan menggunakan *software* Moses dan Maxsurf. Perhitungan RAO dilakukan dengan *heading* pembebanan 0° , 45° , 90° , 135° , dan 180° dalam gerak *surge*, *sway*, *heave*, *roll*, *pitch*, dan *yaw* yang tergabung dalam gerakan enam derajat kebebasan (*six degrees of freedom*). Analisis respons pada FSO dan SPM dilakukan pada saat kondisi terapung.

Skenario muatan FSO *free floating* terdiri dari:

- Kondisi 1 : FSO *full load*
- Kondisi 2 : FSO *light load*

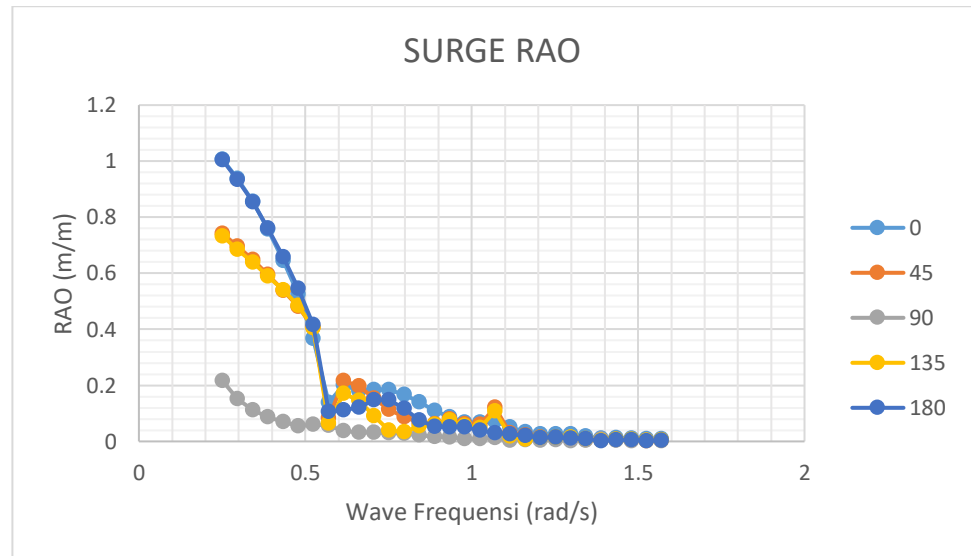
Skenario pembebanan pada FSO dan SPM *free floating* terdiri dari:

- FSO dan SPM dikenai beban arah 0°
- FSO dan SPM dikenai beban arah 45°
- FSO dan SPM dikenai beban arah 90°

- FSO dan SPM dikenai beban arah 135°
- FSO dan SPM dikenai beban arah 180°

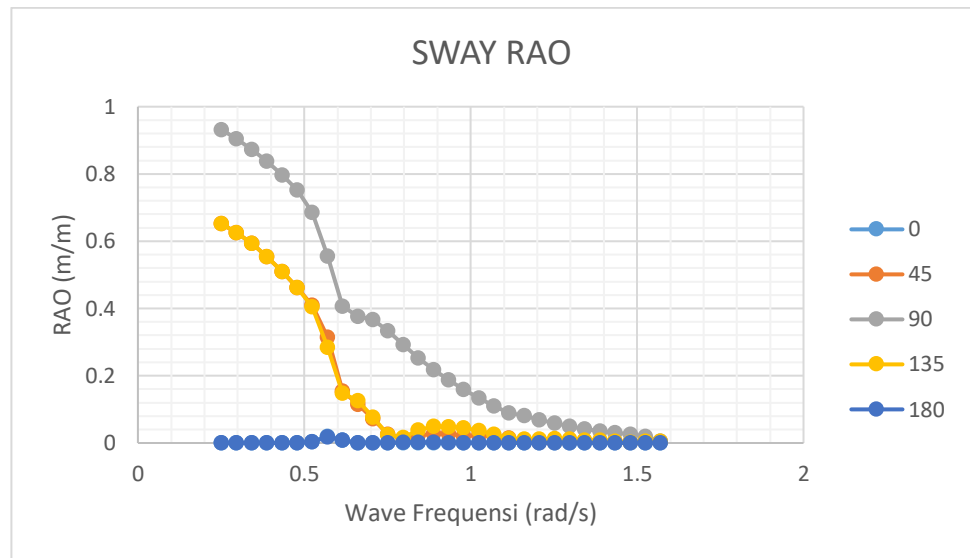
4.4.4.1 RAO FSO Arco Ardjuna Kondisi *Full Load*

Perhitungan RAO FSO Arco Ardjuna pada saat kondisi *full load* dilakukan pada sarat 20 m. Grafik gerakan struktur RAO disajikan dengan sumbu-x yang merupakan *wave frequency* (rad/s) sedangkan pada sumbu-y merupakan besar RAO (m/m untuk gerakan translasi dan deg/m untuk gerakan rotasi). Berikut adalah grafik RAO gerak translasi dan rotasi dari FSO Arco Ardjuna pada kondisi *full load*.



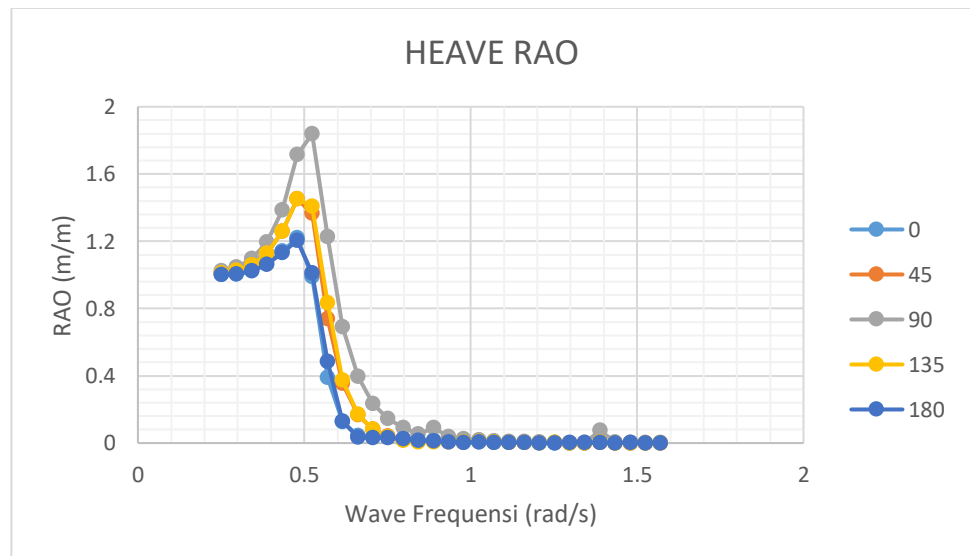
Gambar 4.11 Grafik gerakan RAO translasi *surge* pada *heading* 0, 45, 90, 135, 180

Pada gerakan *surge*, FSO akan secara horizontal dari kedudukan awalnya. Dari grafik RAO pada Gambar 4.11 dapat diketahui nilai RAO pada gerakan *surge* didominasi oleh gelombang pada arah pembebanan 0° sebesar 1.006 m/m pada frekuensi 0.251 rad/s dan pada arah pembebanan 180° sebesar 1.004 m/m pada frekuensi 0.251 rad/s. Hal ini disebabkan karena gerakan *surge* akan merespons gelombang dominan pada arah buritan dan haluan.



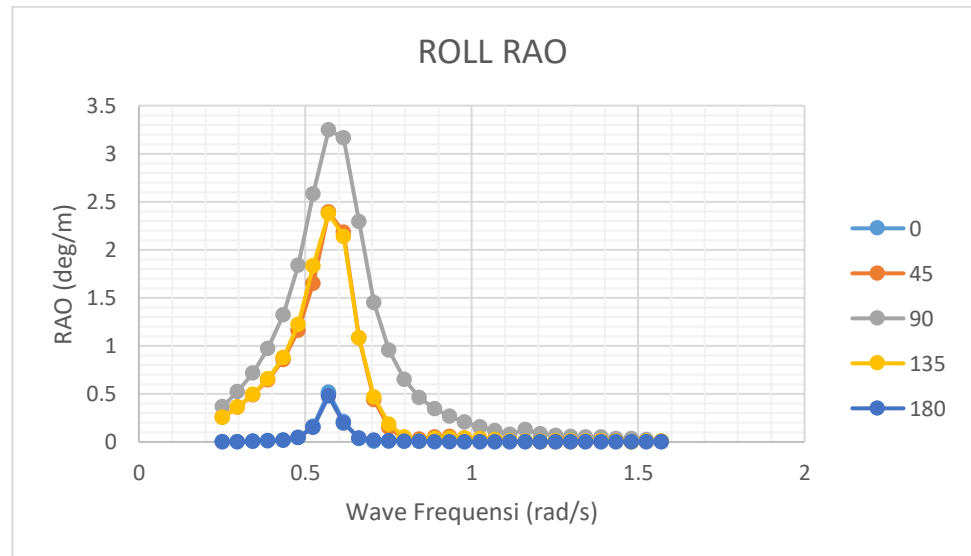
Gambar 4.12 Grafik gerakan RAO translasi *sway* pada heading 0, 45, 90, 135, 180

Dari grafik RAO pada Gambar 4.12 dapat diketahui nilai RAO pada gerakan *sway* didominasi oleh gelombang pada arah pembebanan 90° sebesar 0.932 m/m pada frekuensi 0.251 rad/s. Hal ini disebabkan karena gerakan *sway* akan merespons gelombang dominan dari arah *beam sea* struktur.



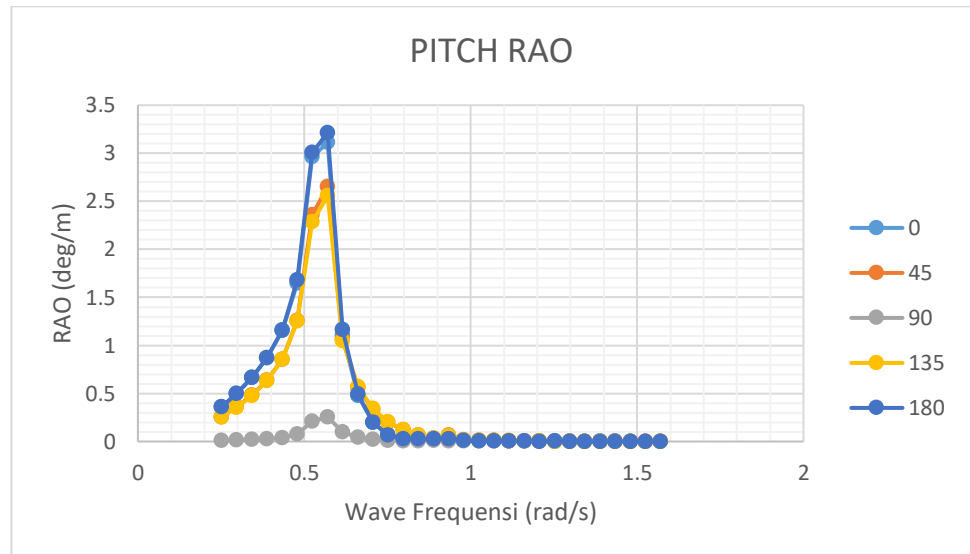
Gambar 4.13 Grafik gerakan RAO translasi *heave* pada *heading* 0, 45, 90, 135, 180

Gerakan *heave* merupakan gerakan translasi dengan pola gerakan vertikal. Dapat dianalisis dari grafik RAO pada Gambar 4.13 nilai RAO dominan berada pada arah pembebanan gelombang 90° sebesar 1.838 m/m pada frekuensi 0.524 rad/s. Pada arah pembebanan gelombang 45° dan 135° nilai RAO yang dihasilkan adalah sebesar 1.45 m/m pada frekuensi 0.479 rad/s. Selanjutnya pada arah pembebanan gelombang buritan dan haluan nilai RAO yang dihasilkan adalah sebesar 1.2 m/m pada frekuensi 0.479 rad/s.



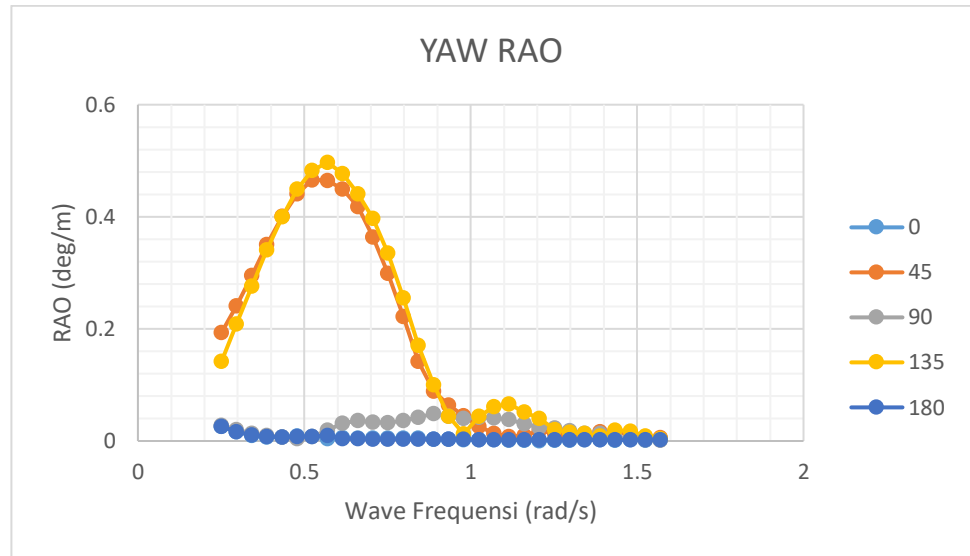
Gambar 4.14 Grafik gerakan RAO rotasional *roll* pada *heading* 0, 45, 90, 135, 180

Dari grafik RAO pada Gambar 4.14 dapat diketahui nilai RAO pada gerakan *roll* didominasi pada arah pembebanan gelombang 90° sebesar 3.247 deg/m pada frekuensi 0.57 rad/s. Hal ini disebabkan secara teoritis, gerakan *roll* bergerak secara rotasi pada sumbu memanjang (sumbu-x) dari struktur sehingga akan dominan merespons gelombang pada arah *beam sea* dibandingkan dengan buritan dan haluan.



Gambar 4.15 Grafik gerakan RAO rotasional *pitch* pada heading 0, 45, 90, 135, 180

Dari grafik RAO pada Gambar 4.15 dapat diketahui nilai RAO pada gerakan *pitch* didominasi pada arah pembebanan gelombang 0° sebesar 3.112 deg/m pada frekuensi 0.57 rad/s dan arah pembebanan gelombang 180° sebesar 3.212 deg/m pada frekuensi yang sama. Hal ini disebabkan secara teoritis, gerakan *roll* bergerak secara rotasi pada sumbu melintang (sumbu-y) dari struktur sehingga akan dominan merespons gelombang pada arah buritan dan haluan dibandingkan dengan *beam sea*.



Gambar 4.16 Grafik gerakan RAO rotasional yaw pada heading 0, 45, 90, 135, 180

Dari grafik RAO pada Gambar 4.16 dapat diketahui nilai RAO pada gerakan yaw didominasi pada arah pembebanan gelombang 45° sebesar 0.466 deg/m pada frekuensi 0.524 rad/s dan arah 135° sebesar 0.497 deg/m pada frekuensi 0.57 rad/s. Hasil dari dua arah tersebut memiliki hasil yang hampir serupa. Sedangkan pada arah pembebanan lain memiliki nilai yang sangat kecil.

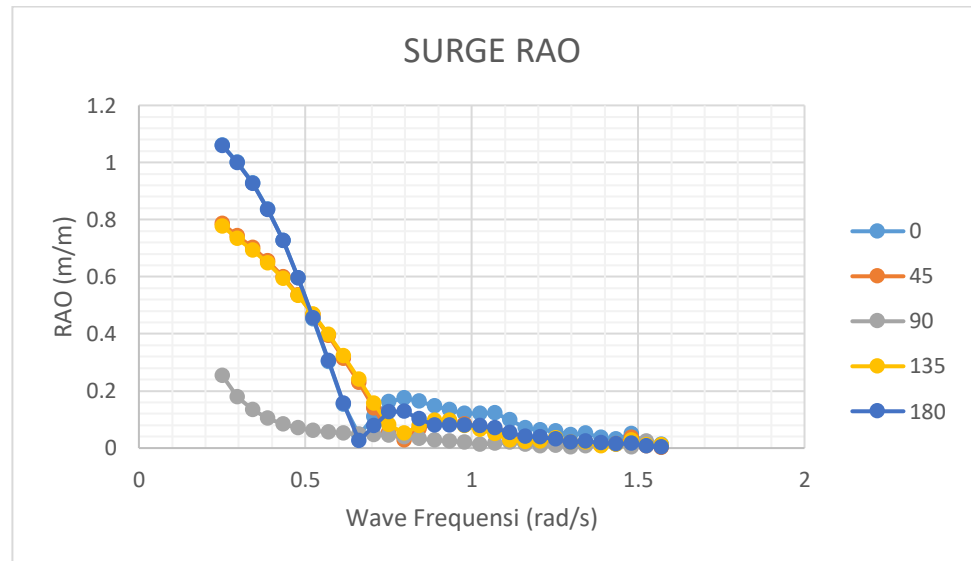
Berikut pada Tabel 4.7 merupakan rangkuman nilai RAO terbesar pada setiap mode gerakan dan setiap arah pembebanan.

Tabel 4.7 Nilai RAO maksimal pada kondisi *full load*

Arah (deg)	Gerak Translasional			Gerak Rotasional		
	Surge (m/m)	Sway (m/m)	Heave (m/m)	Roll (deg/m)	Pitch (deg/m)	Yaw (deg/m)
0	1.006	0.02	1.219	0.519	3.112	0.026
45	0.742	0.652	1.451	2.393	2.654	0.466
90	0.216	0.932	1.838	3.247	0.256	0.049
135	0.733	0.652	1.453	2.379	2.555	0.497
180	1.004	0.018	1.205	0.476	3.212	0.026

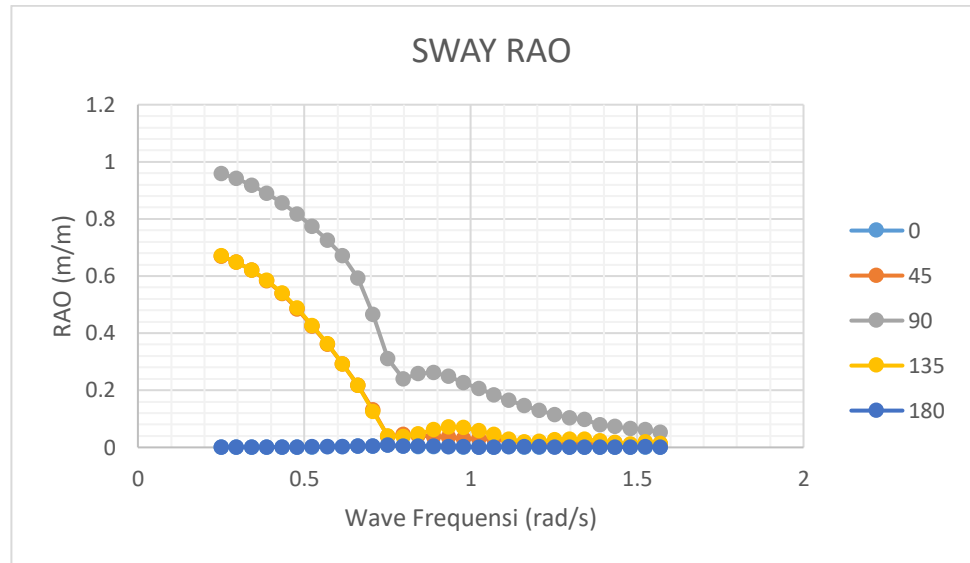
4.4.4.2 RAO FSO Arco Ardjuna Kondisi *Light Load*

Perhitungan RAO FSO Arco Ardjuna pada saat kondisi *light load* dilakukan pada sarat 6.91 m. Grafik gerakan struktur RAO disajikan dengan sumbu-x yang merupakan *wave frequency* (rad/s) sedangkan pada sumbu-y merupakan besar RAO (m/m untuk gerakan translasi dan deg/m untuk gerakan rotasi). Berikut adalah grafik RAO gerak translasi dan rotasi dari FSO Arco Ardjuna pada kondisi *light load*.



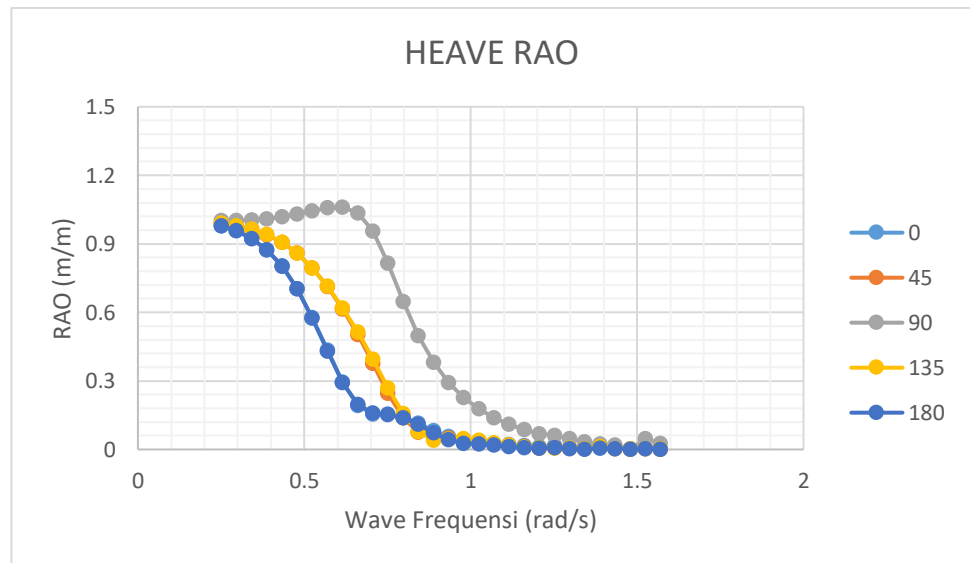
Gambar 4.17 Grafik gerakan RAO translasi *surge* pada heading 0, 45, 90, 135, 180

Pada gerakan *surge*, FSO akan secara horizontal dari kedudukan awalnya. Dari grafik RAO pada Gambar 4.17 dapat diketahui nilai RAO pada gerakan *surge* didominasi oleh gelombang pada arah pembebanan pada arah pembebanan 0° sebesar 1.06 m/m pada frekuensi 0.251 rad/s dan pada arah pembebanan 180° sebesar 1.06 m/m pada frekuensi 0.251 rad/s. Hal ini disebabkan karena gerakan *surge* akan merespons gelombang dominan pada arah buritan dan haluan.



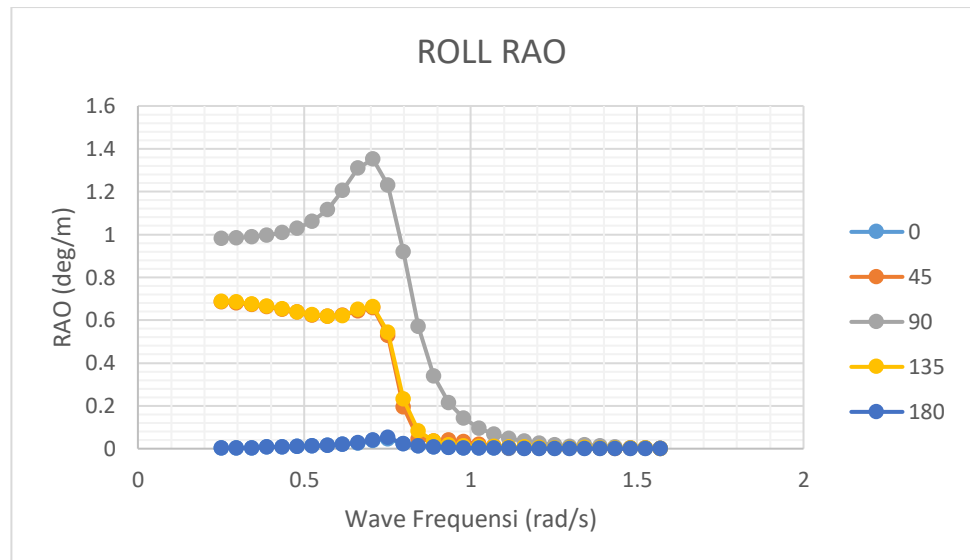
Gambar 4.18 Grafik gerakan RAO translasi *sway* pada heading 0, 45, 90, 135, 180

Dari grafik RAO pada Gambar 4.18 dapat diketahui nilai RAO pada gerakan *sway* didominasi oleh gelombang pada arah pembebanan 90° sebesar 0.959 m/m pada frekuensi 0.251 rad/s. Hal ini disebabkan karena gerakan *sway* akan merespons gelombang dominan dari arah *beam sea* struktur.



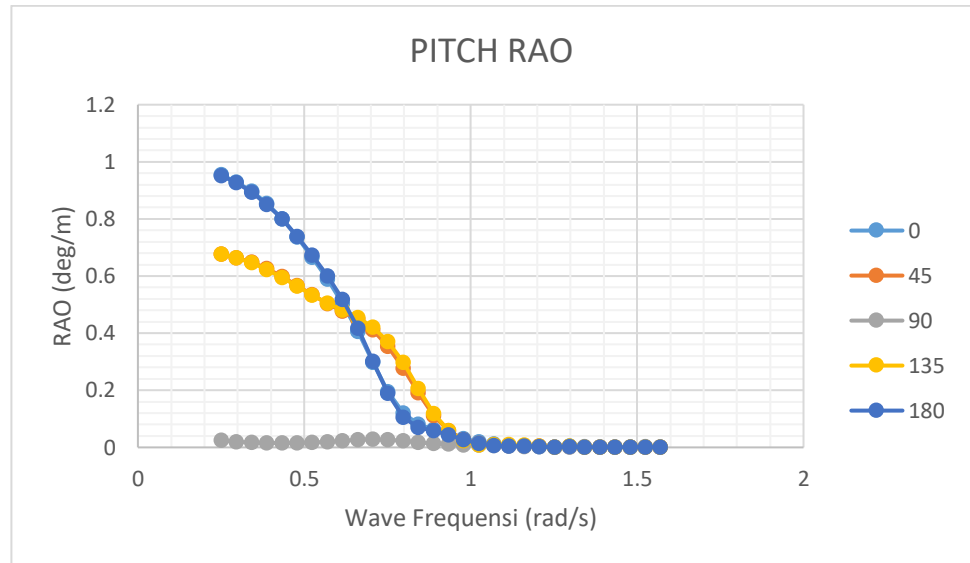
Gambar 4.19 Grafik gerakan RAO translasi *heave* pada *heading* 0, 45, 90, 135, 180

Gerakan *heave* merupakan gerakan translasi dengan pola gerakan vertikal. Dapat dianalisis dari grafik RAO pada Gambar 4.19 nilai RAO dominan berada pada arah pembebanan gelombang 90° sebesar 1.061 m/m pada frekuensi 0.62 rad/s. Pada arah pembebanan gelombang 45° dan 135° nilai RAO yang dihasilkan adalah sebesar 0.99 m/m pada frekuensi 0.251 rad/s. Selanjutnya pada arah pembebanan gelombang buritan dan haluan nilai RAO yang dihasilkan adalah sebesar 0.978 m/m pada frekuensi 0.251 rad/s.



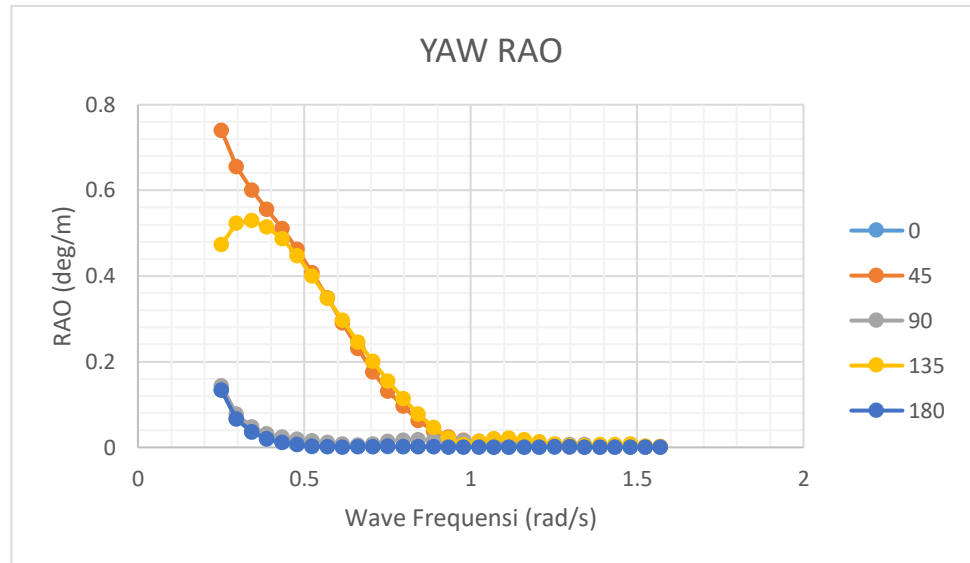
Gambar 4.20 Grafik gerakan RAO rotasi *roll* pada *heading* 0, 45, 90, 135, 180

Dari grafik RAO pada Gambar 4.20 dapat diketahui nilai RAO pada gerakan *roll* didominasi pada arah pembebanan gelombang 90° sebesar 1.352 deg/m pada frekuensi 0.71 rad/s. Hal ini disebabkan secara teoritis, gerakan *roll* bergerak secara rotasi pada sumbu memanjang (sumbu-x) dari struktur sehingga akan dominan merespons gelombang pada arah *beam sea* dibandingkan dengan buritan dan haluan.



Gambar 4.21 Grafik gerakan RAO rotasi *pitch* pada *heading* 0, 45, 90, 135, 180

Dari grafik RAO pada Gambar 4.21 dapat diketahui nilai RAO pada gerakan *pitch* didominasi pada arah pembebanan gelombang 0° sebesar 0.954 deg/m pada frekuensi 0.251 rad/s dan arah pembebanan gelombang 180° sebesar 0.951 deg/m pada frekuensi yang sama. Hal ini disebabkan secara teoritis, gerakan *roll* bergerak secara rotasi pada sumbu melintang (sumbu-y) dari struktur sehingga akan dominan merespons gelombang pada arah buritan dan haluan dibandingkan dengan *beam sea*.



Gambar 4.22 Grafik gerakan RAO rotasional yaw pada heading 0, 45, 90, 135, 180

Dari grafik RAO pada Gambar 4.22 dapat diketahui nilai RAO pada gerakan yaw didominasi pada arah pembebanan gelombang 45° sebesar 0.74 deg/m pada frekuensi 0.251 rad/s dan arah 135° sebesar 0.529 deg/m pada frekuensi 0.34 rad/s. Hasil dari dua arah tersebut memiliki hasil yang hampir serupa. Sedangkan pada arah pembebanan lain memiliki nilai yang sangat kecil.

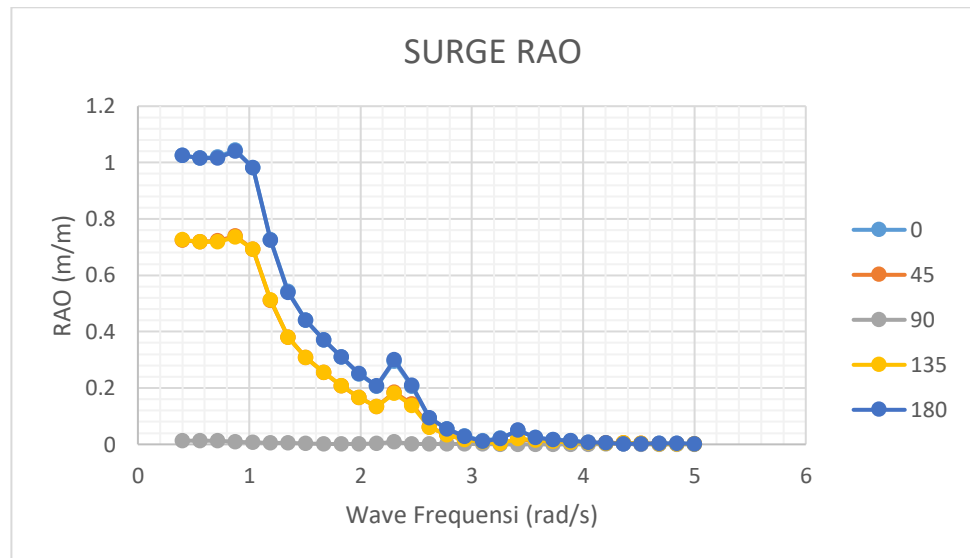
Berikut pada Tabel 4.8 merupakan rangkuman nilai RAO terbesar pada setiap mode gerakan dan setiap arah pembebanan.

Tabel 4.8 Nilai RAO maksimal pada kondisi *light load*

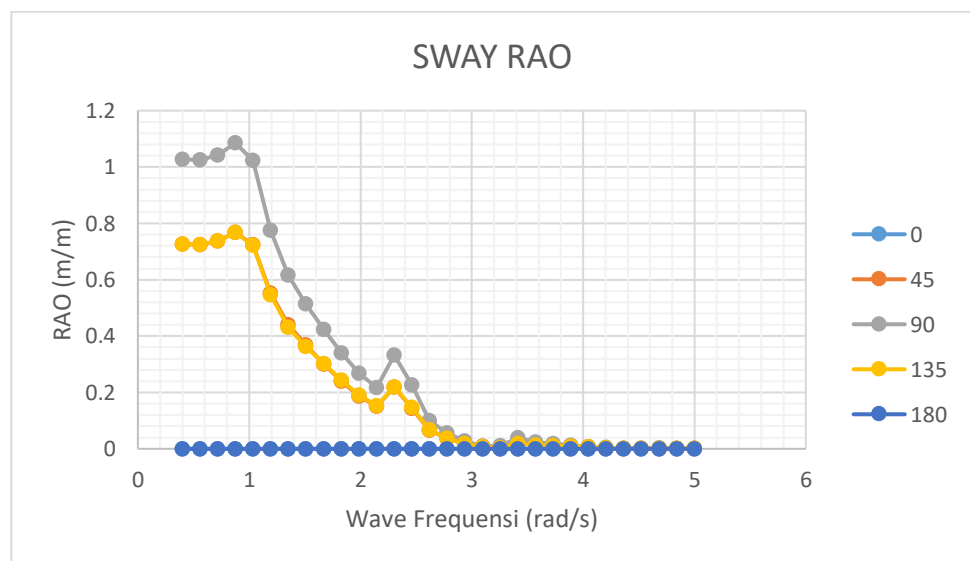
Arah (deg)	Gerak Translasional			Gerak Rotasional		
	Surge (m/m)	Sway (m/m)	Heave (m/m)	Roll (deg/m)	Pitch (deg/m)	Yaw (deg/m)
0	1.06	0.007	0.978	0.046	0.954	0.133
45	0.785	0.669	0.99	0.686	0.677	0.74
90	0.253	0.959	1.061	1.352	0.028	0.144
135	0.777	0.67	0.99	0.688	0.677	0.529
180	1.06	0.007	0.978	0.053	0.951	0.133

4.4.4.3 Single Point Mooring CALM Buoy

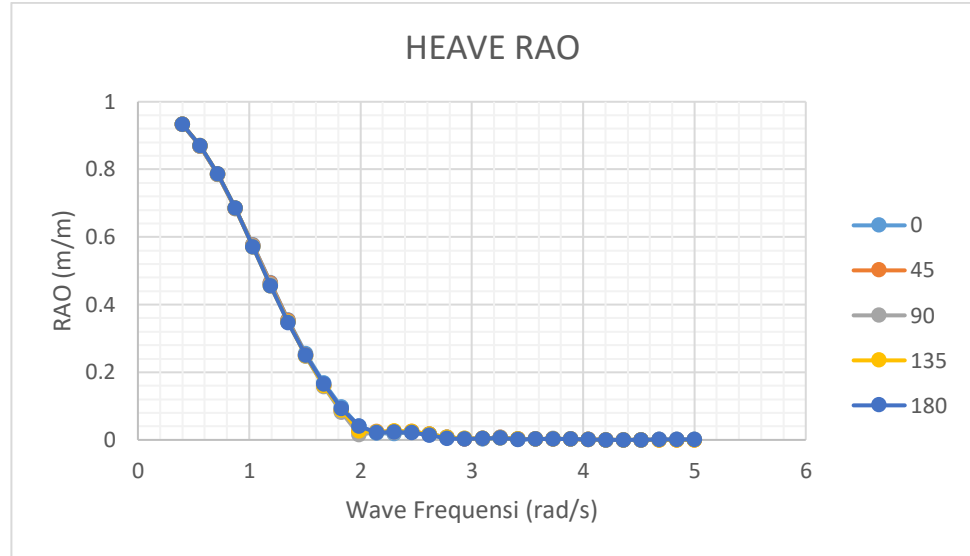
Perhitungan RAO SPM dilakukan pada sarat 2.38 m, dengan kedalaman laut 34 m. Grafik gerakan struktur RAO disajikan dengan sumbu-x yang merupakan *wave frequency* (rad/s) sedangkan pada sumbu-y merupakan besar RAO (m/m untuk gerakan translasi dan deg/m untuk gerakan rotasi). Berikut adalah grafik RAO gerak translasi dan rotasi dari SPM.



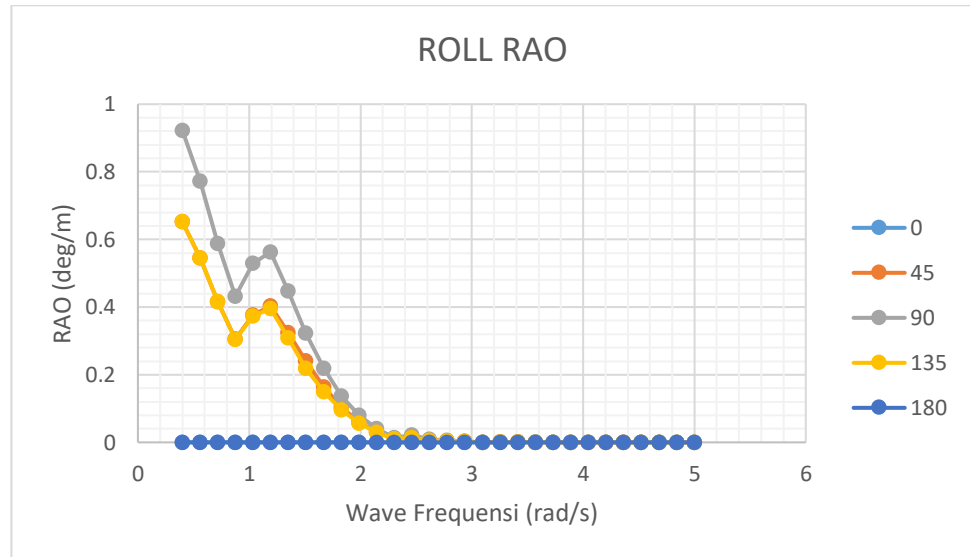
Gambar 4.23 Grafik gerakan RAO translasi *surge* pada heading 0, 45, 90, 135, 180



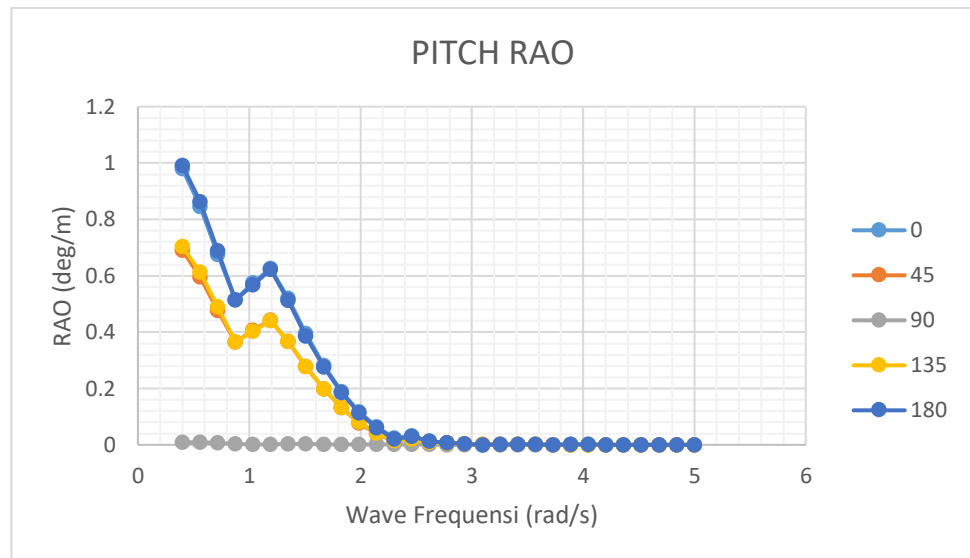
Gambar 4.24 Grafik gerakan RAO translasi *sway* pada *heading* 0, 45, 90, 135, 180



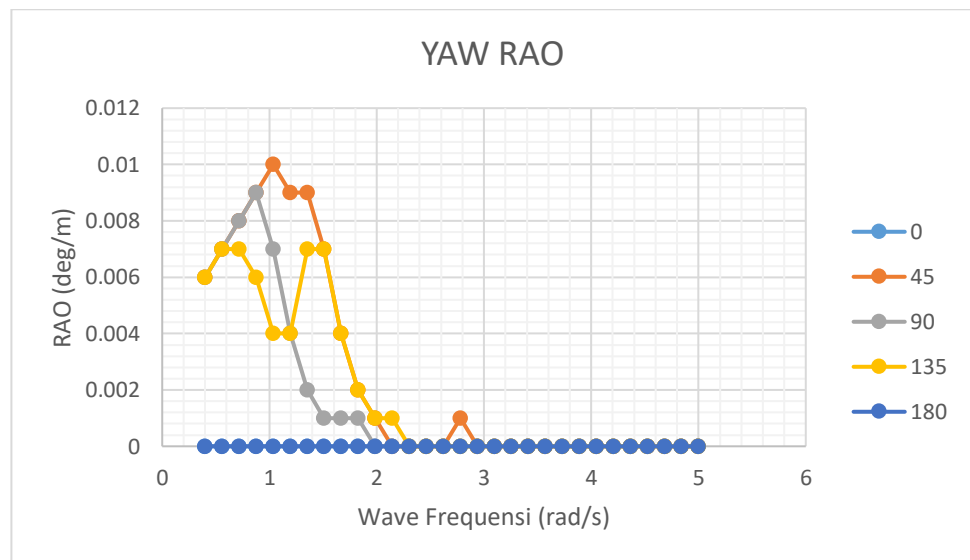
Gambar 4.25 Grafik gerakan RAO translasi *heave* pada *heading* 0, 45, 90, 135, 180



Gambar 4.26 Grafik gerakan RAO rotasi *roll* pada *heading* 0, 45, 90, 135, 180



Gambar 4.27 Grafik gerakan RAO rotasi *pitch* pada *heading* 0, 45, 90, 135, 180



Gambar 4.28 Grafik gerakan RAO rotasi *yaw* pada *heading* 0, 45, 90, 135, 180

Berikut pada Tabel 4.9 merupakan rangkuman nilai RAO dari SPM. Karena bentuk struktur dari SPM yang simetris, terdapat beberapa besaran nilai RAO maksimum yang hampir sama pada beberapa mode gerak yang berbeda. Pada gerak translasi, *surge* dan *sway* memiliki nilai RAO

maksimum yang hampir sama untuk arah pembebanan gelombang 0° dan 180° pada *surge*, serta arah 90° pada *sway*. Sedangkan pada gerak rotasi, *roll* pada arah pembebanan gelombang 90° memiliki nilai yang hampir sama dengan *pitch* pada arah 0° dan 180°.

Tabel 4.9 Nilai RAO maksimal pada kondisi *light load*

Arah (deg)	Gerak Translasi			Gerak Rotasi		
	<i>Surge</i> (m/m)	<i>Sway</i> (m/m)	<i>Heave</i> (m/m)	<i>Roll</i> (deg/m)	<i>Pitch</i> (deg/m)	<i>Yaw</i> (deg/m)
0	1.045	0	0.933	0	0.979	0
45	0.739	0.768	0.933	0.652	0.69	0.01
90	0.013	1.085	0.933	0.922	0.009	0.009
135	0.735	0.767	0.933	0.652	0.703	0.007
180	1.041	0	0.933	0	0.992	0

4.5. Analisis *Tension* pada Tali tambat

Tension yang terjadi pada tali tambat FSO dan SPM dan dihitung dianalisis menggunakan *software* OrcaFlex. Besar *tension* yang dihitung pada analisis ini akan dikoreksi dengan kriteria *safety factor* berdasarkan *American Bureau of Shipping* (ABS).

Besarnya nilai *tension* yang terjadi dibandingkan dengan nilai batas kapasitas tegangan (*breaking strength*) tali tambat akan saling berpengaruh. Semakin besar besar nilai *tension* maka akan semakin rentan tali tambat tersebut putus. Oleh sebab itu sebelum menganalisis *tension* pada tali tambat terlebih dahulu dilakukan perhitungan mengenai nilai *tension* maksimum yang diijinkan berdasarkan *safety factor* dan juga desain panjang tali tambat.

Analisis dilakukan berbasis *time domain* selama 3 jam (10,800 detik). Kondisi pembebanan yang digunakan adalah kondisi *Ultimate Limit State* (ULS) dan kondisi *Accidental Limit State* (ALS). Kondisi ULS adalah pembebanan yang terjadi pada kondisi operasi dimana tali tambat yang bekerja sebagai *mooring*

system pada SPM bekerja optimal, utuh tanpa ada tali tambat yang terputus. Sedangkan kondisi ALS adalah struktur mampu untuk menahan beban pada dengan kondisi tali tambat mengalami kegagalan. Untuk ALS, kondisi kegagalan diasumsikan terdapat tali tambat yang terputus bebas. Data lingkungan yang digunakan adalah kondisi ekstrem 100 tahun-an serta kondisi muatan *full load* dan *light load*. Data lingkungan diambil berdasarkan jalur pelayaran FSO Arco Ardjuna di Laut Jawa pada kondisi ekstrem 100 tahun-an seperti disajikan pada Tabel 4.10.

Tabel 4.10 Data lingkungan

Parameter		100-years return period
Kedalaman	m	34
Tinggi Gelombang Signifikan/Hs	m	3.6
Periode Gelombang Signifikan/Ts	s	8.3
Kecepatan Arus pada 0% Kedalaman	m/s	1.15
Kecepatan Arus pada 10% Kedalaman	m/s	0.93
Kecepatan Arus pada 20% Kedalaman	m/s	0.77
Kecepatan Arus pada 30% Kedalaman	m/s	0.65
Kecepatan Arus pada 40% Kedalaman	m/s	0.56
Kecepatan Arus pada 50% Kedalaman	m/s	0.5
Kecepatan Arus pada 60% Kedalaman	m/s	0.45
Kecepatan Arus pada 70% Kedalaman	m/s	0.42
Kecepatan Arus pada 80% Kedalaman	m/s	0.39
Kecepatan Arus pada 90% Kedalaman	m/s	0.38
Kecepatan Arus pada 100% Kedalaman	m/s	0.36

(Sumber: PT. Pertamina PHE ONWJ)

Korosi pada tali tambat juga diperhitungkan dalam analisis tension. Korosi yang terjadi akan mereduksi nilai *minimum breaking load* dari data yang sebelumnya. Pada kenyataannya, ketika korosi terjadi, geometri dari rantai tidak mengalami perubahan. Untuk menentukan karakteristik dari rantai yang terkorosi, menggunakan persamaan dari DNV OS E301 (2004) sebagai berikut:

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

dimana:

$S_{mbs-corr}$ = *minimum breaking load* sesudah korosi

S_{mbs} = *minimum breaking load* awal = 8315 kN

D_{new} = diameter chain diameter

Diameter rantai sebelum terjadi korosi pada 2011 = 102 mm

Diameter *corroton rate* dari rantai per tahun = 0.20 mm

Diameter korosi pada 2025 = 14×0.20 mm = 2.80 mm (dari 2011)

D_{corr} = diameter rantai yang terkorosi = 102 mm – 2.8 mm = 99.2 mm

Sehingga, kapasitas karakteristik dari rantai yang terkorosi adalah sebagai berikut:

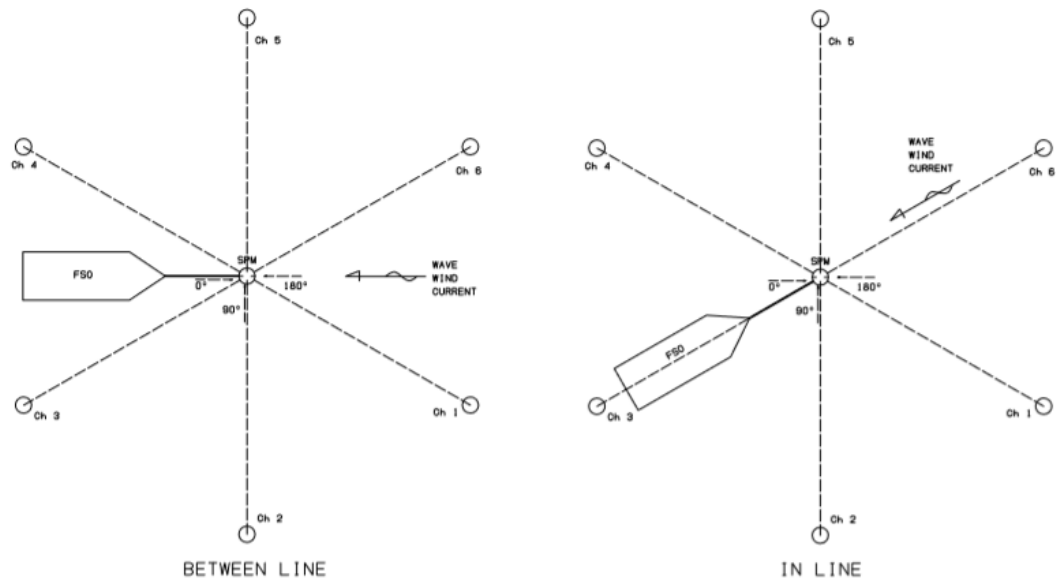
$$S_{mbs-corr} = 8315 \times \left(\frac{99.2}{102}\right)^2 = 7864.756 \text{ kN}$$

4.5.1. Variasi Kondisi Pembebanan *Tension* pada Tali Tambat

Variasi kondisi pembebanan dan konfigurasi *mooring lines* yang digunakan untuk analisis *tension* pada tali tambat dapat dilihat pada Tabel 4.11 dan Gambar 4.29.

Tabel 4.11 Varisi pembebanan *tension* pada tali tambat

<i>Chain Condition</i>	<i>FSO Tank Condition</i>	<i>Environment System</i>	<i>FSO to Chain</i>	<i>Loadcase Code</i>
<i>Intact</i>	<i>Full Load</i>	<i>Collinear</i>	<i>In Line</i>	LC-1
			<i>Between Line</i>	LC-2
	<i>Light Load</i>		<i>In Line</i>	LC-3
			<i>Between Line</i>	LC-4
<i>Damage</i>	<i>Full Load</i>	<i>Collinear</i>	<i>In Line</i>	LC-5
			<i>Between Line</i>	LC-6
	<i>Light Load</i>		<i>In Line</i>	LC-7
			<i>Between Line</i>	LC-8



Gambar 4.29 Konfigurasi *mooring lines* untuk analisis *tension*

4.5.2. Analisis *Tension Tali Tambat* pada Kondisi *Ultimate Limit State (ULS)* dan Kondisi *Accidental Limit State (ALS)*

Sebelumnya perlu dihitung terlebih dahulu berapa nilai *tension* maksimum pada rantai yang diijinkan oleh *American Bureau of Shipping (ABS)*. Perhitungannya adalah sebagai berikut:

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

$$1.67 = \frac{7864756 \text{ N}}{\text{Maximum Tension}}$$

$$\text{Maximum Tension} = 4709434.731 \text{ N}$$

Dari perhitungan kriteria tersebut maka dapat disimpulkan bahwa nilai *tension* maksimum tali tambat yang dihasilkan pada kondisi ULS untuk material *chain* tidak boleh melebihi 4709434.731 N.

Sedangkan pada kondisi ALS, digunakan nilai *tension* maksimum yang diijinkan oleh DNV OS E301 dengan perhitungan sebagai berikut:

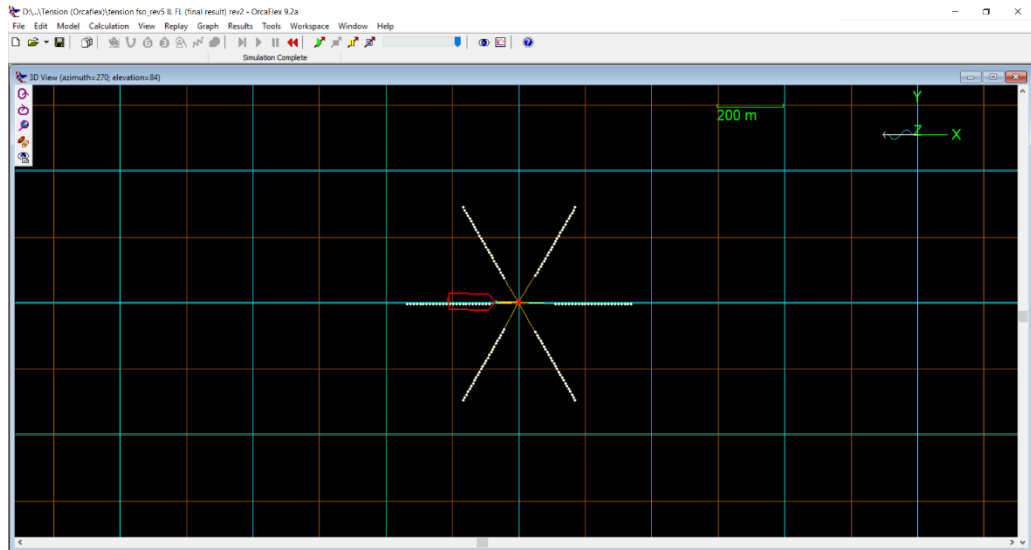
$$\text{Safety Factor} = \frac{\text{Minimum Breaking Load}}{\text{Maximum Tension}}$$

$$1.25 = \frac{7864756 \text{ N}}{\text{Maximum Tension}}$$

$$\text{Maximum Tension} = 6291804.8 \text{ N}$$

Dapat disimpulkan bahwa nilai *tension* maksimum tali tambat yang dihasilkan pada kondisi ALS untuk material *chain* tidak boleh melebihi 6291804.8 N.

Pemodelan dari konfigurasi tali tambat FSO dan SPM pada OrcaFlex dapat dilihat pada Gambar 4.30.



Gambar 4.30 Konfigurasi *mooring lines* pada OrcaFlex

Selanjutnya dilakukan analisis berbasis waktu pada OrcaFlex untuk mengetahui *tension* pada setiap tali tambat. Nilai *tension* terbesar pada setiap tali tambat dengan beberapa *load case* dapat dilihat pada Tabel 4.12-4.19. Untuk mengetahui apakah *mooring line* tersebut memenuhi dan aman ketika beroperasi adalah dengan membandingkan dengan batas nilai *tension* maksimal menurut ketentuan ABS pada kondisi ULS dan ALS.

Tabel 4.12 Hasil *tension* pada rantai jangkar dan validasi dengan *safety factor* pada *Load Case 1*

Konfigurasi Mooring	Mooring Lines	Tension Maksimal (kN)	Safety Factor
	1	398.70	Memenuhi
	2	310.16	Memenuhi
	3	329.88	Memenuhi
	4	310.32	Memenuhi
	5	397.72	Memenuhi
	6	579.00	Memenuhi
	Kondisi <i>Intact</i> dan <i>Full Load</i>		

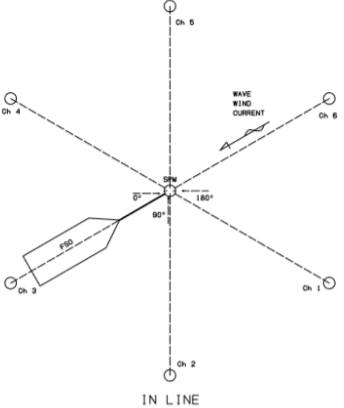
Tabel 4.13 Hasil *tension* pada rantai jangkar dan validasi dengan *safety factor* pada *Load Case 2*

Konfigurasi Mooring	Mooring Lines	Tension Maksimal (kN)	Safety Factor
	1	510.64	Memenuhi
	2	305.55	Memenuhi
	3	320.53	Memenuhi
	4	320.78	Memenuhi
	5	305.44	Memenuhi
	6	509.99	Memenuhi
	Kondisi <i>Intact</i> dan <i>Full Load</i>		

Pada Tabel 4.12 dan 4.13, dapat dianalisis bahwa ketika pada kondisi *full load* hasil *tension* dengan konfigurasi penambatan *in line* memiliki hasil maksimum pada *mooring line* nomor 6 sebesar 579 kN. Hal ini disebabkan karena tali tambat tersebut berada sejajar dengan FSO dan menumpu beban

yang dihasilkan pada *load case* 1. Sedangkan dengan konfigurasi penambatan *between line* memiliki hasil maksimum yang hampir serupa pada *mooring line* nomor 1 sebesar 510.64 kN dan *mooring line* nomor 6 sebesar 509.99 kN. Hal ini disebabkan karena terdapat dua tali tambat yang menumpu beban pada *load case* 2 dengan sudut yang hampir sama terhadap arah penambatan dari FSO.

Tabel 4.14 Hasil *tension* pada rantai jangkar dan validasi dengan *safety factor* pada *Load Case* 3

Konfigurasi Mooring	Mooring Lines	Tension Maksimal (kN)	Safety Factor
	1	440.25	Memenuhi
	2	265.63	Memenuhi
	3	243.52	Memenuhi
	4	265.66	Memenuhi
	5	439.29	Memenuhi
	6	816.27	Memenuhi
	<i>Kondisi Intact dan Light Load</i>		

Tabel 4.15 Hasil *tension* pada rantai jangkar dan validasi dengan *safety factor* pada *Load Case 4*

Konfigurasi <i>Mooring</i>	<i>Mooring Lines</i>	<i>Tension</i> Maksimal (kN)	<i>Safety Factor</i>
	1	675.29	Memenuhi
	2	298.23	Memenuhi
	3	250.40	Memenuhi
	4	250.42	Memenuhi
	5	298.24	Memenuhi
	6	674.15	Memenuhi
	Kondisi <i>Intact</i> dan <i>Light Load</i>		

Pada Tabel 4.14 dan 4.15, dapat dianalisis bahwa ketika pada kondisi *intact* dan *light load* hasil *tension* dengan konfigurasi penambatan *in line* memiliki hasil maksimum pada *mooring line* nomor 6 sebesar 816.27 kN. Hal ini disebabkan karena tali tambat tersebut berada sejajar dengan FSO dan menumpu beban yang dihasilkan pada *load case 3*. Sedangkan dengan konfigurasi penambatan *between line* memiliki hasil maksimum yang hampir serupa pada *mooring line* nomor 1 sebesar 675.29 kN dan *mooring line* nomor 6 sebesar 674.15 kN. Hal ini disebabkan karena terdapat dua tali tambat yang menumpu beban pada *load case 4* dengan sudut yang hampir sama terhadap arah penambatan dari FSO.

Tabel 4.16 Hasil *tension* pada rantai jangkar dan validasi dengan *safety factor* pada *Load Case 5*

Konfigurasi <i>Mooring</i>	<i>Mooring Lines</i>	<i>Tension</i> Maksimal (kN)	<i>Safety Factor</i>
	1	659.53	Memenuhi
	2	256.62	Memenuhi
	3	231.11	Memenuhi
	4	256.62	Memenuhi
	5	646.36	Memenuhi
	6	-	-
	Kondisi <i>Damage</i> dan <i>Full Load</i>		

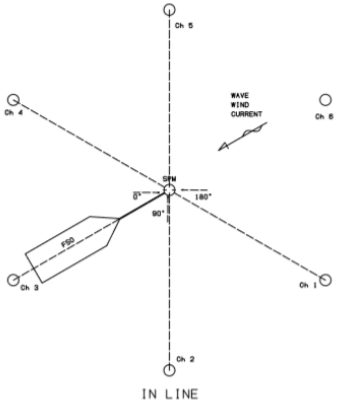
Tabel 4.17 Hasil *tension* pada rantai jangkar dan validasi dengan *safety factor* pada *Load Case 6*

Konfigurasi <i>Mooring</i>	<i>Mooring Lines</i>	<i>Tension</i> Maksimal (kN)	<i>Safety Factor</i>
	1	838.16	Memenuhi
	2	258.37	Memenuhi
	3	229.15	Memenuhi
	4	263.79	Memenuhi
	5	566.68	Memenuhi
	6	-	-
	Kondisi <i>Damage</i> dan <i>Full Load</i>		

Pada Tabel 4.16 dan 4.17, dapat dianalisis bahwa ketika pada kondisi *damage* dan *full load* hasil *tension* dengan konfigurasi penambatan *in line* memiliki hasil maksimum yang hampir sama pada *mooring line* nomor 1 sebesar 659.53 kN dan *mooring line* nomor 5 sebesar 646.36 kN. Hal ini disebabkan

ketika tali tambat nomor 6 diasumsikan putus, beban yang ada kemudian didistribusikan ke *mooring lines* nomor 1 dan 5. Dua *mooring lines* tersebut memiliki sudut yang sama terhadap arah penambatan dari FSO. Sedangkan dengan konfigurasi penambatan *between line* memiliki nilai maksimum pada *mooring lines* nomor 1 sebesar 838.16 kN. Hal ini disebabkan ketika tali tambat nomor 6 diasumsikan putus, beban yang dihasilkan akan didistribusikan pada *mooring line* nomor 1 jika dianalisis terhadap arah datang dari beban lingkungan yang mengenai struktur FSO.

Tabel 4.18 Hasil *tension* pada rantai jangkar dan validasi dengan *safety factor* pada *Load Case 7*

Konfigurasi <i>Mooring</i>	<i>Mooring Lines</i>	<i>Tension</i> Maksimal (kN)	<i>Safety Factor</i>
	1	934.92	Memenuhi
	2	220.20	Memenuhi
	3	169.04	Memenuhi
	4	220.24	Memenuhi
	5	932.30	Memenuhi
	6	-	-
Kondisi <i>Damage</i> dan <i>Light Load</i>			

Tabel 4.19 Hasil *tension* pada rantai jangkar dan validasi dengan *safety factor* pada *Load Case 8*

Konfigurasi <i>Mooring</i>	<i>Mooring Lines</i>	<i>Tension</i> Maksimal (kN)	<i>Safety Factor</i>
	1	1075.78	Memenuhi
	2	242.89	Memenuhi
	3	169.54	Memenuhi
	4	200.58	Memenuhi
	5	660.32	Memenuhi
	6	-	-
Kondisi <i>Damage</i> dan <i>Light Load</i>			

Pada Tabel 4.18 dan 4.19, dapat dianalisis bahwa ketika pada kondisi *damage* dan *light load* hasil *tension* dengan konfigurasi penambatan *in line* memiliki hasil maksimum yang hampir sama pada *mooring line* nomor 1 sebesar 934.92 kN dan *mooring line* nomor 5 sebesar 932.20 kN. Hal ini disebabkan ketika tali tambat nomor 6 diasumsikan putus, beban yang ada kemudian didistribusikan ke *mooring lines* nomor 1 dan 5. Dua *mooring lines* tersebut memiliki sudut yang sama terhadap arah penambatan dari FSO. Sedangkan dengan konfigurasi penambatan *between line* memiliki nilai maksimum pada *mooring lines* nomor 1 sebesar 1075.78 kN. Hal ini disebabkan ketika tali tambat nomor 6 diasumsikan putus, beban yang dihasilkan akan didistribusikan pada *mooring line* nomor 1 jika dianalisis terhadap arah datang dari beban lingkungan yang mengenai struktur FSO.

4.6. Analisis Kekuatan *Anchor Chain*

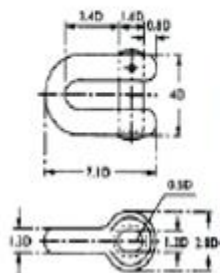
Tahap awal dalam analisis kekuatan adalah melakukan pemodelan struktur yang sebisa mungkin mewakili dari struktur yang sesungguhnya. Berikut adalah data dimensi *anchor leg* yang didapatkan dari ukuran sesungguhnya CALM *buoy*.

Tabel 4.20 Data *anchor leg*

<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

Data tersebut kemudian digunakan untuk melakukan pemodelan konstruksi lokal *anchor chain* mengacu kepada kriteria perancangan ABS *Certification of Mooring Chain*. Selanjutnya adalah hasil dari pemodelan struktur dari *anchor chain* dengan menggunakan *software* SolidWorks.

Joining Shackles

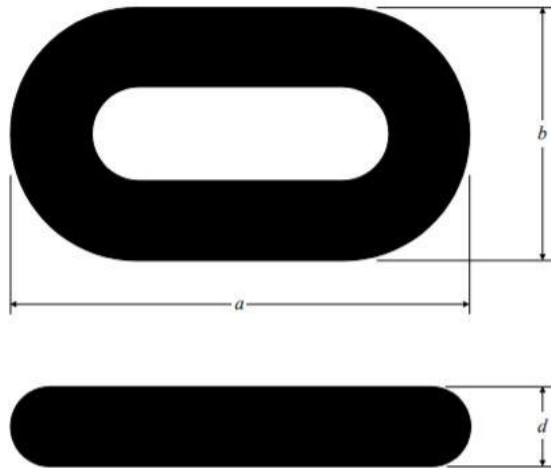


Joining shackles have an oval pin and are available in a wide range of sizes. They are generally supplied in a "black/self colour" finish.

Please check with Wesco Industries for sizes available.



(a)



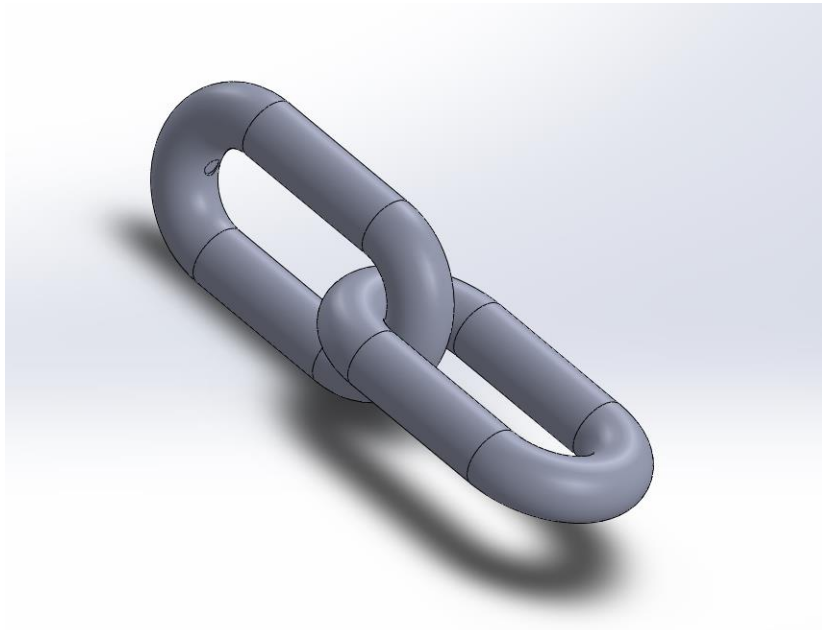
<i>Designation ⁽¹⁾</i>	<i>Description</i>	<i>Nominal Dimension of the Link</i>	<i>Minus Tolerance</i>	<i>Plus Tolerance</i>
<i>a</i>	Link Length	$6d$	$0.15d$	$0.15d$
<i>b</i>	Link Width	$3.35d$	$0.09d$	$0.09d$
<i>R</i>	Inner Radius	$0.60d$	0	----

Notes:

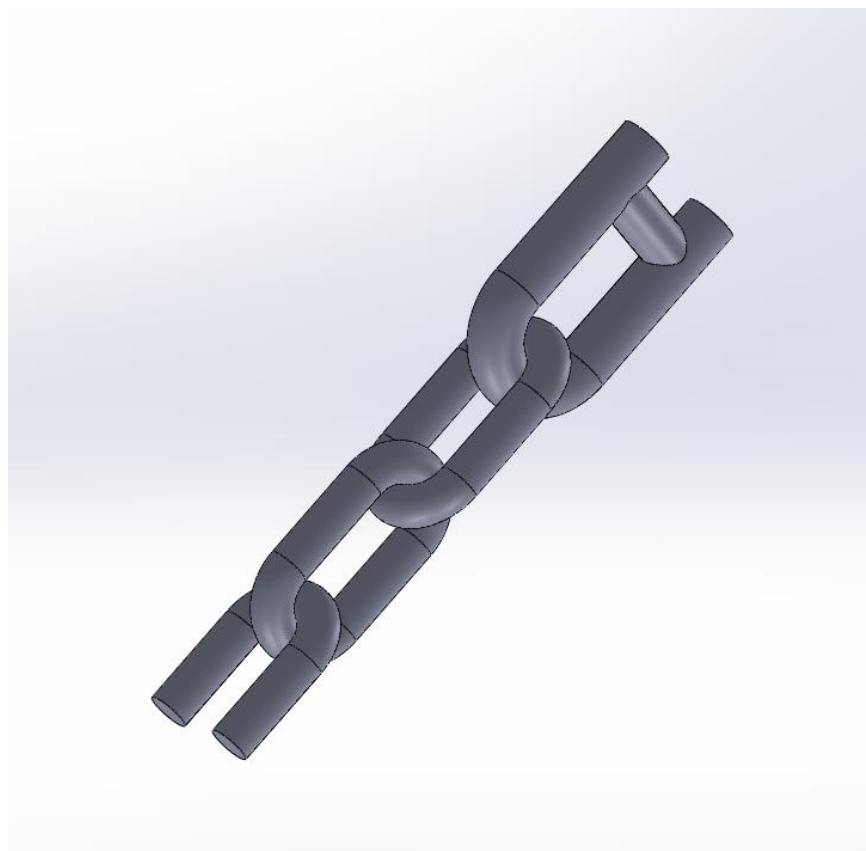
- 1 Dimension designation is shown in above figure.
 d = nominal diameter of chain
- 2 Other dimension ratios are subject to special approval.

(b)

Gambar 4.31 Kriteria perancangan lokal berdasarkan ABS (a) *Joining Shackles*; (b) *Studless Link*



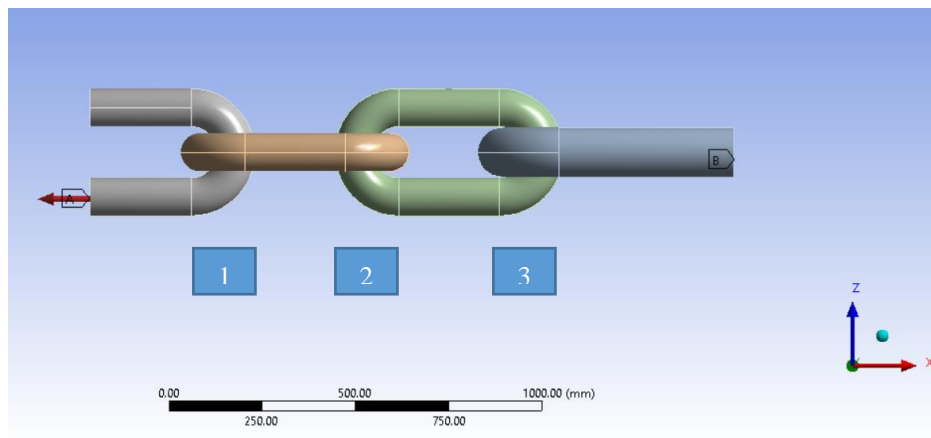
Gambar 4.32 Hasil pemodelan *chain* pada SolidWorks



Gambar 4.33 Hasil pemodelan *chain* dengan *shackle* pada Solidworks

Analisis kekuatan pada *anchor chain* dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui tegangan yang terjadi pada model struktur yang dapat mewakili keadaan sesungguhnya akibat menerima *tension* dari *mooring lines* pada saat kondisi operasi. Analisis ini dilakukan dengan bantuan *software* Ansys dengan langkah awal yaitu mengimpor bentuk geometri yang sebelumnya sudah dimodelkan pada *SolidWorks*. Kemudian penentuan properti material yang digunakan pada struktur. Penentuan properti material perlu diperhatikan karena jenis material yang berbeda akan memberikan hasil yang berbeda pula pada kekuatan struktur.

Langkah selanjutnya adalah analisis *boundary condition* pada struktur yang dimodelkan. Pada Gambar 4.34, daerah A diberikan tumpuan *fixed* dan pada daerah B diberikan arah serta besar pembebanan yang dikenakan yaitu sebesar 1075.775 kN. Dapat dilihat juga terdapat 3 sambungan antar *chain* maupun *chain* dengan *joining shackle*.

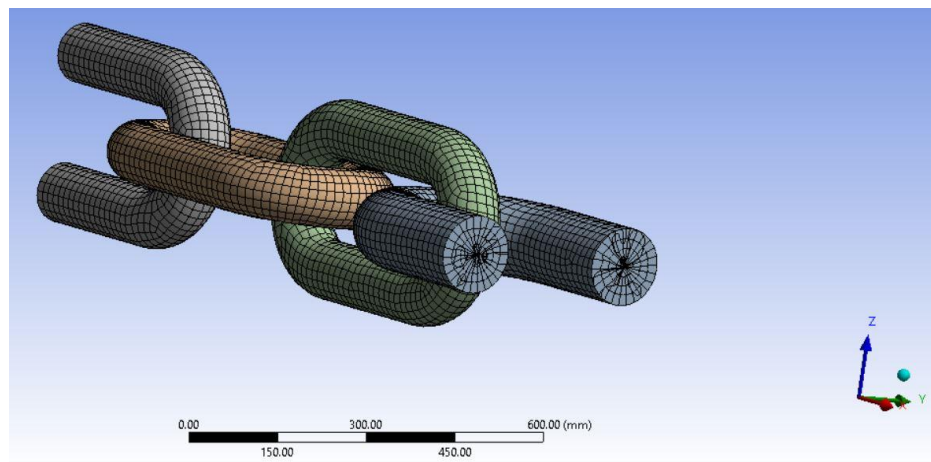


Gambar 4.34 *Boundary condition* yang digunakan pada model *chain* pada Ansys. Daerah A adalah tumpuan *fixed* dan daerah B adalah daerah pembebanannya

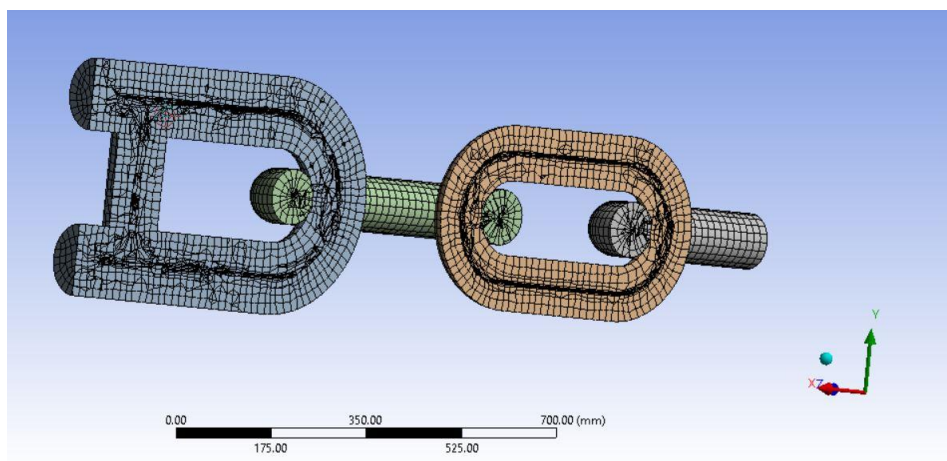
4.6.1. Analisis *Meshing* dan *Sensitivity*

Proses pembagian sebuah benda ke dalam beberapa bagian kecil untuk dianalisis disebut *meshing*. *Meshing* adalah bagian dari analisis *Finite*

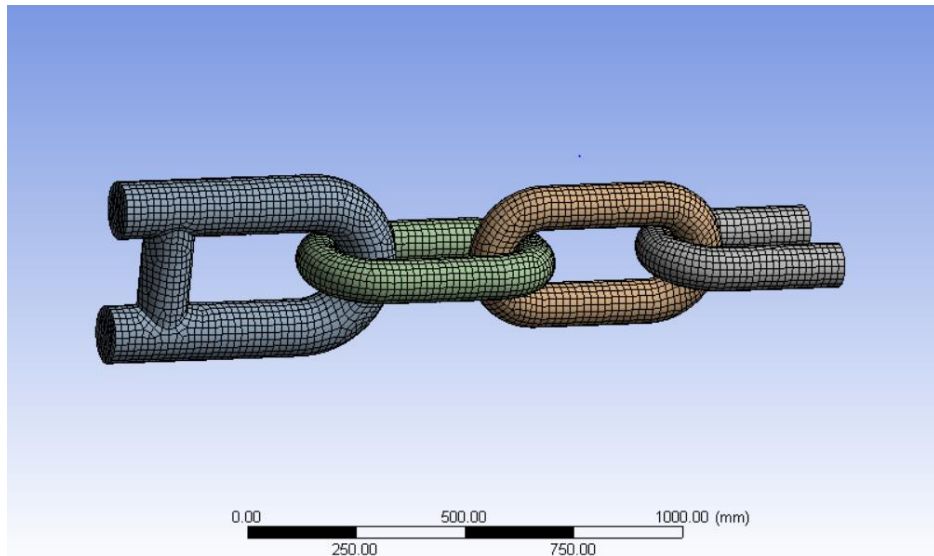
Element Method (FEM) yang merupakan prosedur numerik yang dipakai untuk menyelesaikan permasalahan dalam bidang rekayasa teknik. Analisis *sensitivity* digunakan untuk mengetahui apakah tegangan yang dihasilkan pada pemodelan sudah mendekati nilai yang benar. Analisis *sensitivity* dilakukan dengan melakukan variasi kerapatan *meshing* yang dibandingkan dengan nilai tegangan *equivalent* atau disebut juga *Von-Mises Stress* setelah model dikenai gaya. Jenis elemen yang digunakan pada model struktur adalah solid elemen, dapat dilihat pada Gambar 4.35 dan Gambar 4.36.



Gambar 4.35 Potongan melintang dari model struktur setelah dilakukan *meshing*



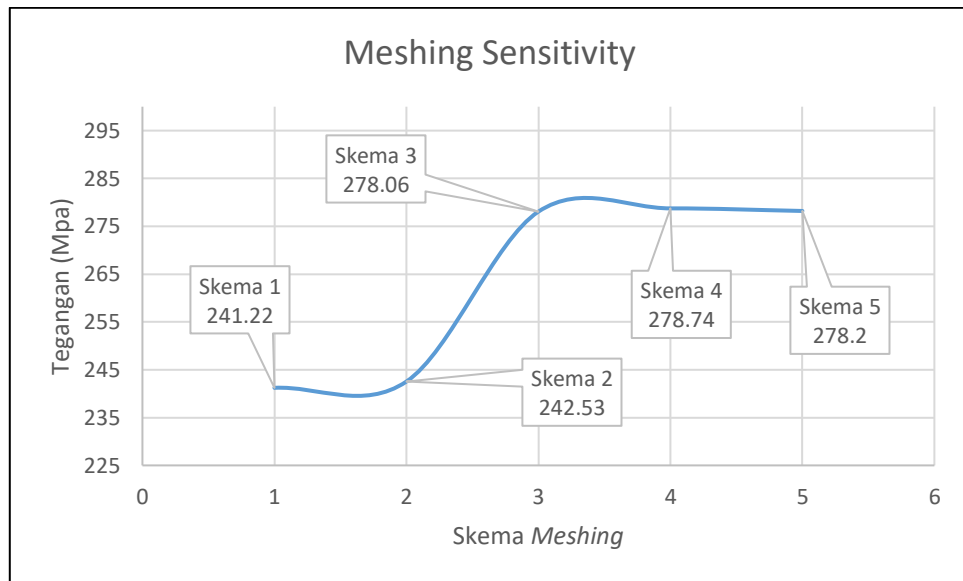
Gambar 4.36 Potongan memanjang dari model struktur setelah dilakukan *meshing*



Gambar 4.37 Contoh *meshing* yang digunakan dalam analisis pada Ansys

Tabel 4.21 *Meshing sensitivity* struktur

Skema <i>Meshing</i>	Jumlah Elemen	Tegangan (Mpa)
1	20152	241.22
2	22752	242.53
3	29215	278.06
4	30988	278.74
5	37509	278.2



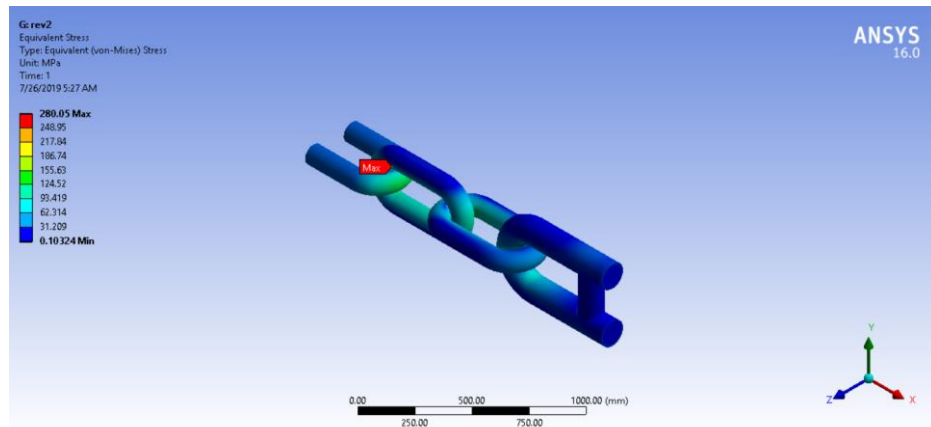
Gambar 4.38 Grafik *meshing sensitivity* struktur

4.6.2. Analisis Tegangan *Von-Mises* dan Deformasi

Setelah dilakukan analisis *meshing* dan *sensitivity*, tahapan selanjutnya pada analisis *Finite Element Method* (FEM) adalah melakukan *running* tegangan *von-mises* pada Ansys. Dari hasil tegangan *von-mises* keluaran dari Ansys, dapat diketahui letak tegangan *von-mises* maksimum terjadi. Tegangan *von-mises* inilah dapat diketahui apakah struktur *chain* beserta *joining shackle* kuat atau tidak menerima beban *tension*. Selain tegangan *von-mises*, juga dapat diketahui nilai deformasi. Deformasi adalah bentuk transformasi atau perubahan sebuah benda dari kondisi semula ke kondisi terkini yang disebabkan oleh gaya internal dan eksternal, maupun perubahan suhu dalam benda.

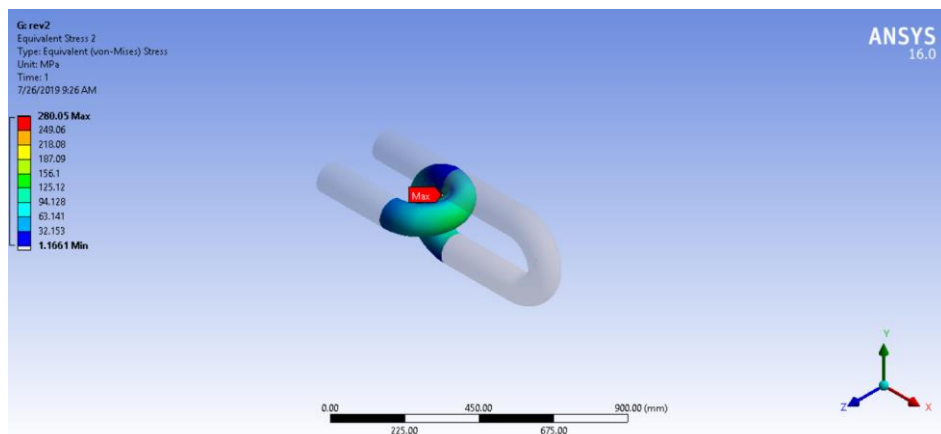
Analisis dilakukan dengan memodelkan struktur *chain* dan *joining shackle* yang kemudian diberikan beban berupa nilai *tension* terbesar dari hasil analisis *tension* sebelumnya yakni sebesar 1075.775 kN. Gambar 4.39 merupakan gambaran tegangan *von-mises* yang dihasilkan setelah diberikan beban *tension* maksimal. Tegangan terbesar terjadi pada bagian sambungan

antar *chain*. Besarnya tegangan *von-mises* maksimum yang dihasilkan adalah sebesar 280.05 MPa.



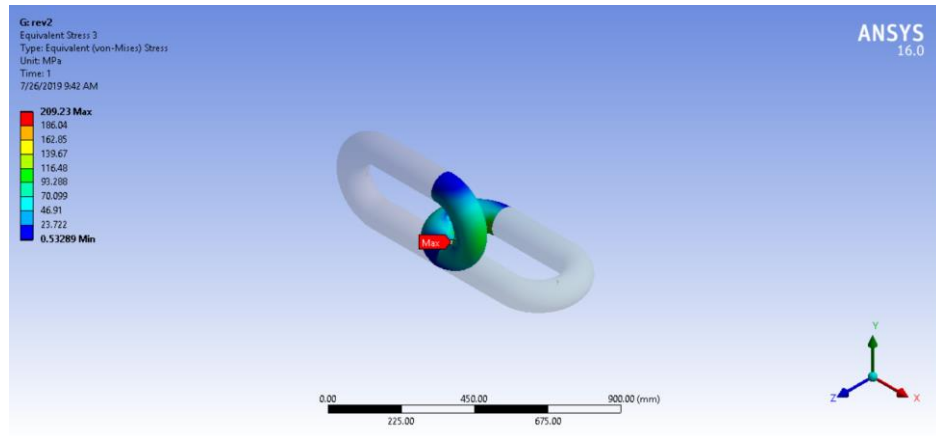
Gambar 4.39 Hasil *equivalent stress* pada Ansys

Kemudian pada sambungan nomor 1, besar tegangan *von-mises* yang terjadi adalah sebesar 280.05 MPa, dapat dilihat pada Gambar 4.40.



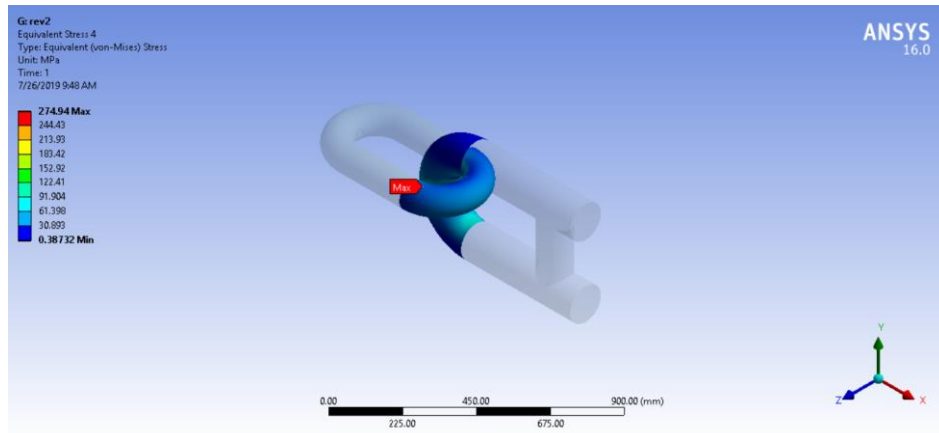
Gambar 4.40 Hasil *equivalent stress* pada sambungan nomor 1

Pada sambungan nomor 2, besar tegangan *von-mises* yang terjadi adalah sebesar 209.93 MPa, dapat dilihat pada Gambar 4.41.



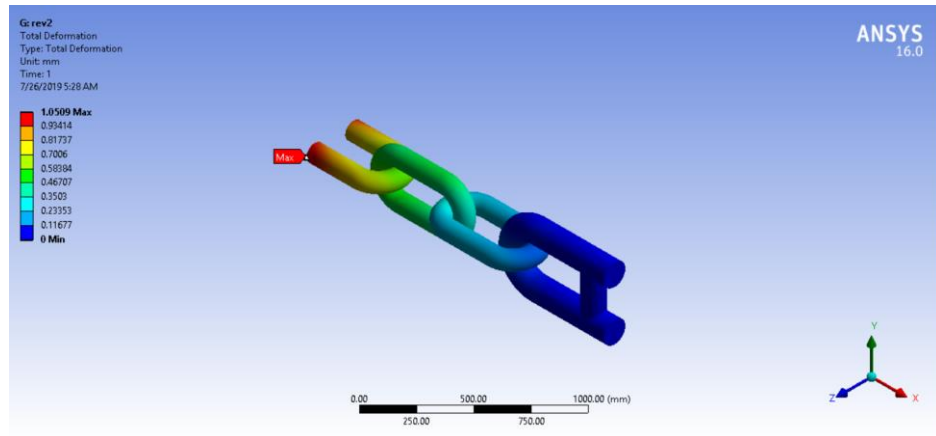
Gambar 4.41 Hasil *equivalent stress* pada sambungan nomor 2

Pada sambungan nomor 3, besar tegangan *von-mises* yang terjadi adalah sebesar 274.94 MPa, dapat dilihat pada Gambar 4.42.



Gambar 4.42 Hasil *equivalent stress* pada sambungan nomor 3

Gambar 4.43 menjelaskan deformasi global dan deformasi maksimum yang terjadi pada stuktur *chain* dan *joining shackle* sebesar 1.0509 mm yang terletak pada ujung struktur *chain*. Nilai deformasi minimum yang terjadi adalah sebesar 0.11677 mm.



Gambar 4.43 Deformasi struktur *chain* dengan *joining shackle*

Pada Tabel 4.22 terdapat rangkuman hasil *output* dari Ansys sehingga dapat diketahui bahwa model struktur *chain* dan *joining shackle* yang dianalisis menggunakan Ansys telah memenuhi ketentuan dari ABS “*Safehul-Dynamic Loading Approach for FPSO System*” (2001) berkaitan tentang tegangan *von-mises* pada suatu struktur memiliki batas dibawah 90% *yield strength material*. *Yield strength material* yang digunakan pada analisis kali ini bernilai 410 MPa dan 90% nilainya adalah sebesar 369 MPa sehingga nilai tegangan *von-mises* maksimal yang terjadi masih berada dibawah nilai yang diijinkan yaitu sebesar 280.05 MPa. Sedangkan untuk nilai deformasi, sesuai dengan ketentuan DNV-OS-E302 “*Offshore Mooring Chain*” (2008), toleransi deformasi yang diijinkan pada struktur tidak boleh melebihi 5% dari nominal diameter yaitu sebesar 5.1 mm. Untuk deformasi maksimum yang terjadi masih berada dibawah nilai yang diijinkan yaitu sebesar 1.0509 mm. Dapat disimpulkan berdasarkan ketentuan tersebut, *chain* dan *joining shackle* dinyatakan aman dan kuat untuk beroperasi.

Tabel 4.22 Rangkuman nilai tegangan *von-mises* dan deformasi pada struktur *chain* dan *joning shackle*

<i>Output</i>	Nilai	
<i>Von-Mises Stress</i> (MPa)	Maks.	280.05
	Min.	0.10324
<i>Deformation</i> (mm)	Maks.	1.0509
	Min	0.11677

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil berdasarkan penelitian tugas akhir ini adalah:

1. Hasil analisis perilaku gerak dari FSO pada kondisi *free floating* dengan kondisi muatan penuh (*full load*) adalah sebagai berikut.
 - RAO dengan nilai terbesar pada gerak translasi pada mode gerak *surge* sebesar 1.006 m/m pada arah pembebanan gelombang 0°, mode gerak *sway* sebesar 0.932 m/m pada arah pembebanan gelombang 90°, dan mode gerak *heave* sebesar 1.838 m/m pada arah pembebanan gelombang 90°.
 - RAO dengan nilai terbesar pada gerak rotasi pada mode gerak *roll* sebesar 3.247 deg/m pada arah pembebanan gelombang 90°, mode gerak *pitch* sebesar 3.212 deg/m pada arah pembebanan gelombang 180°, dan mode gerak *yaw* sebesar 0.497 deg/m pada arah pembebanan gelombang 135°.
2. Hasil analisis perilaku gerak dari FSO pada kondisi *free floating* dengan kondisi muatan 25% terisi (*light load*) adalah sebagai berikut:
 - RAO dengan nilai terbesar pada gerak translasi pada mode gerak *surge* sebesar 1.06 m/m pada arah pembebanan gelombang 0° dan 180°, mode gerak *sway* sebesar 0.959 m/m pada arah pembebanan gelombang 90°, dan mode gerak *heave* sebesar 1.061 m/m pada arah pembebanan gelombang 90°.
 - RAO dengan nilai terbesar pada gerak rotasi pada mode gerak *roll* sebesar 1.352 deg/m pada arah pembebanan gelombang 90°, mode gerak *pitch* sebesar 0.954 deg/m pada arah pembebanan gelombang 0°, dan mode gerak *yaw* sebesar 0.74 deg/m pada arah pembebanan gelombang 45°.
3. Hasil analisis perilaku gerak dari SPM adalah sebagai berikut:
 - RAO dengan nilai terbesar pada gerak translasi pada mode gerak *surge* sebesar 1.045 m/m pada arah pembebanan gelombang 0°, mode gerak

sway sebesar 1.085 m/m pada arah pembebanan gelombang 90°, dan mode gerak *heave* sebesar 0.933 m/m sama pada semua arah pembebanan gelombang.

- RAO dengan nilai terbesar pada gerak rotasi pada mode gerak *roll* sebesar 0.922 deg/m pada arah pembebanan gelombang 90°, mode gerak *pitch* sebesar 0.979 deg/m pada arah pembebanan gelombang 0°, dan mode gerak *yaw* memiliki nilai yang sangat kecil karena SPM bersifat *weathervane* atau dapat berputar terhadap porosnya.
4. Analisis *tension* menggunakan simulasi *time domain* selama 10,800 detik (3 jam) pada setiap *mooring lines* menghasilkan nilai *tension* terbesar pada *mooring lines* nomor 1 sebesar 1075.78 kN dengan kondisi *damage* atau *mooring line* nomor 6 terputus serta kondisi *light load*. Hasil tersebut memenuhi ketentuan dari *American Bureau of Shipping* (ABS) untuk kondisi *damage* (ALS) tidak boleh melebihi *tension* maksimal sebesar 6291804.8 N atau 6291.805 kN dengan *safety factor* sebesar 1.25. Pertimbangan berkaitan dengan korosi yang terjadi juga sudah dimasukkan mengikuti ketentuan umum dari DNV.
 5. Hasil analisis menggunakan *finite element method* pada *chain* dan *joining shackle* menghasilkan tegangan *von-mises* maksimum sebesar 280.05 MPa yang berada pada sambungan antar *chain*. Sedangkan untuk deformasi maksimum yang terjadi memiliki nilai sebesar 1.0509 mm yang terletak pada ujung struktur *joining shackle*.

5.2. Saran

Adapun saran yang dapat diberikan untuk melengkapi penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Dapat dilakukan analisis kekuatan struktur *anchor chain* dengan variasi terhadap jumlah *chain*.
2. Dapat dianalisis mengenai *tension* pada SPM dengan memodelkan *riser* dan *umbilicals system*.

DAFTAR PUSTAKA

- ABS. 2001. *Safehull-Dynamic Loading Approach for Floating Production, Storage and Offloading (FPSO) Installations*. USA: American Bureau of Shipping.
- ABS. 2004. *Floating Production Installations*. USA: American Bureau Shipping.
- ABS. 2009. *Certification of Offshore Mooring Chain*. USA: American Bureau Shipping.
- ABS. 2012. *Mobile Offshore Drilling Units*. USA: American Bureau Shipping.
- API RP 2 SK 2nd Edition. 1996. *Recommended Practice for Design and Analysis of Station Keeping Systems for Floating Structures*. Washington, DC.
- Bhattacharyya, R. 1978. *Dynamic of Marine Vehicles*. New York: John Wiley & Sons Inc.
- Chakrabarti, S.K. 1987. *Hydrodynamic of Offshore Structure, Computational Mechanics Publication Shouthampton*. Boston, USA.
- Chakrabarti, S.K. 2005. *Handbook of Offshore Engineering*. Boston, USA.
- Djarmiko, E.B. 2012. *Perilaku dan Operabilitas Bangunan Laut Di Atas Gelombang Acak*. ITS Press. Surabaya.
- DNV OS E301. 2004. *Positioning Mooring*. Norway: Det Norske Veritas.
- DNV RP C205. 2010. *Environmental Conditions and Environmental Loads*. Norway: Det Norske Veritas.
- Faltinsen, O.M.. 1990. *Sea Loads On Ships And Offshore Structures*. United Kingdom: Cambridge University Press.
- Ghafari, H. dan Dardel, M. 2018. Parametric Study of Catenary Mooring System on The Dynamic Response of The Semi-submersible Platform. *Ocean Engineering Journal*. Volume 153: 319-332.

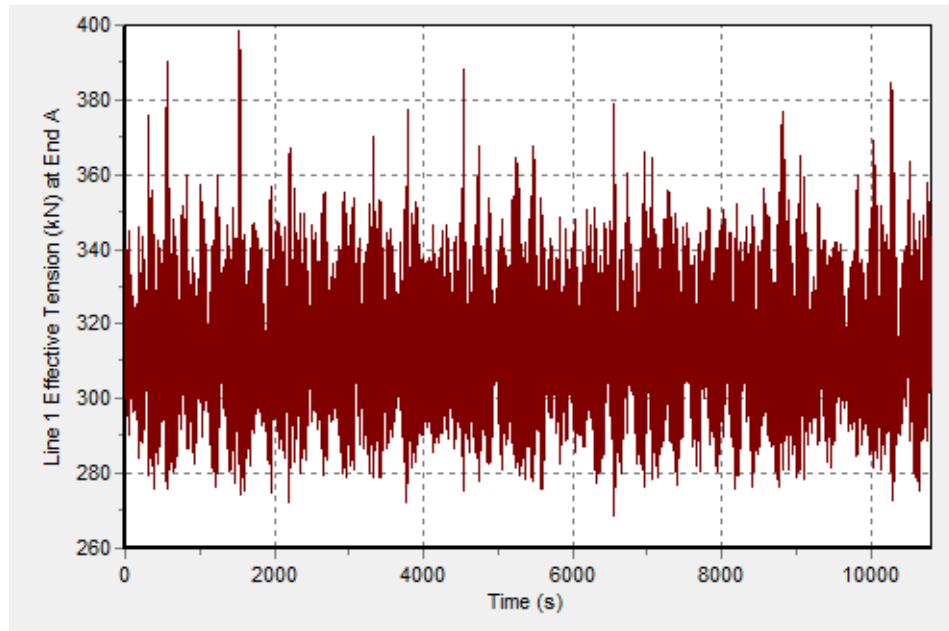
- Kwan, C. T. dan Bruen, F. J. 1991. Mooring Line Dynamics: Comparison of Time Domain, Frequency Domain, and Quasi-Static Analyses. *Offshore Technology Conference*: 6-9 Mei 1991.
- Liu, Haiyang dkk. 2018. Evaluation of The Structural Strength and Failure for Floating Collar of a Single-Point Mooring Fish Cage Based on Finite Element Method. *Aquacultural Engineering Journal*. Volume 85: 32-48.
- Murtedjo, Mas. 1999. *Handout Teori Bangunan Apung*. ITS Press. Surabaya.
- Nevshupa, R. dkk. 2018. The Effect of Environmental Variables on Early Corrosion of High-strength Low-alloy Mooring Steel Immersed in Seawater. *Marine Structures Journal*. Volume 60: 226-240.
- Paik J.K., Thayamballi A. K. 2007. *Ship-Shaped Offshore Installations*. Cambridge University Press.
- Popov, EP. 1996. *Mekanika Teknik*. Erlangga. Jakarta.
- Pradhana, A. W. 2015. *Analisa Kekuatan Struktur Global Single Point Mooring Akibat Beban Gelombang Ekstrim*. Tugas Akhir Departemen Teknik Kelautan. ITS Surabaya.
- Ramialis, A. F. 2016. *Analisa Kekuatan Anchor Chain pada Single Point Mooring FSO Arco Ardjuna*. Tugas Akhir Departemen Teknik Kelautan. ITS Surabaya.
- Rahmadhani, Patria. 2017. *Analisis Lokal Kekuatan Chain Connector pada External Turret Mooring System FLNG Masela dengan Konfigurasi Chain Line*. Tugas Akhir Departemen Teknik Kelautan. ITS Surabaya.

LAMPIRAN

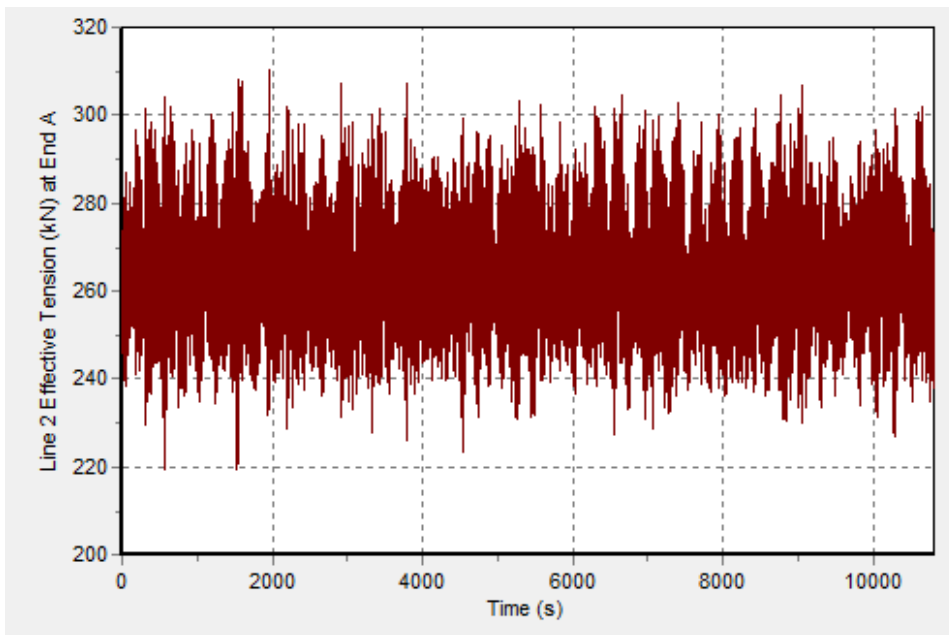
*TIME HISTORY EFFECTIVE TENSION PADA MASING-
MASING LOAD CASE*

1. *LOAD CASE 1 (Intact, Full Load, In Line)*

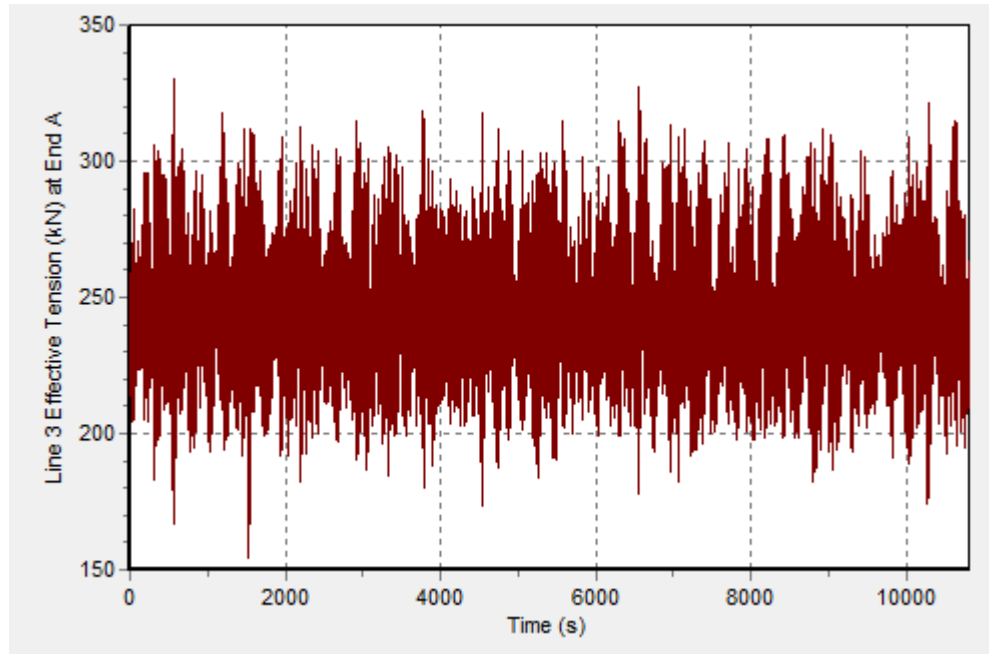
- *Line 1*



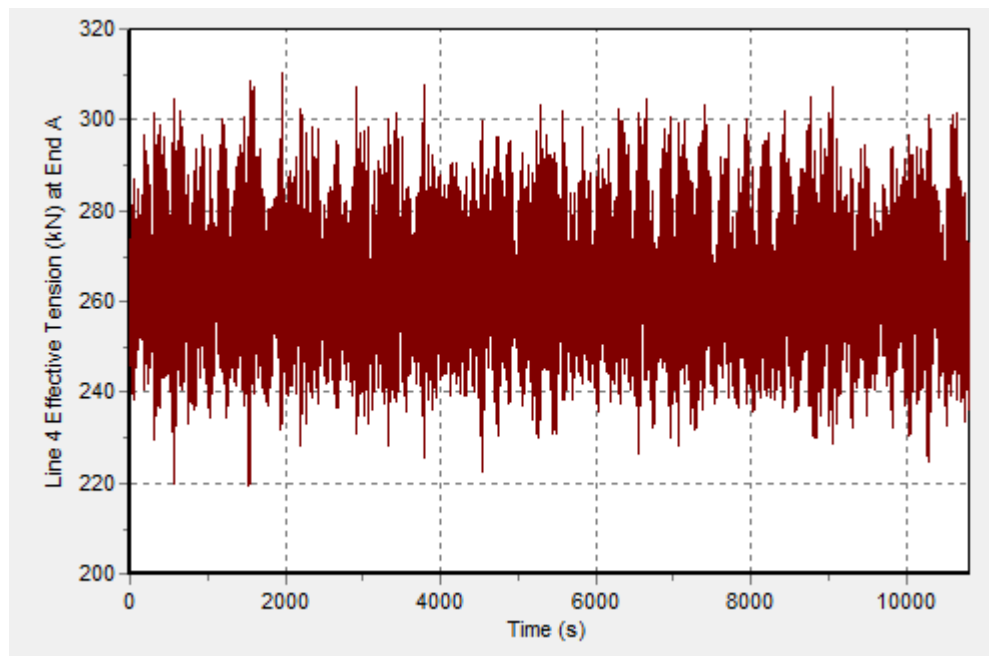
- *Line 2*



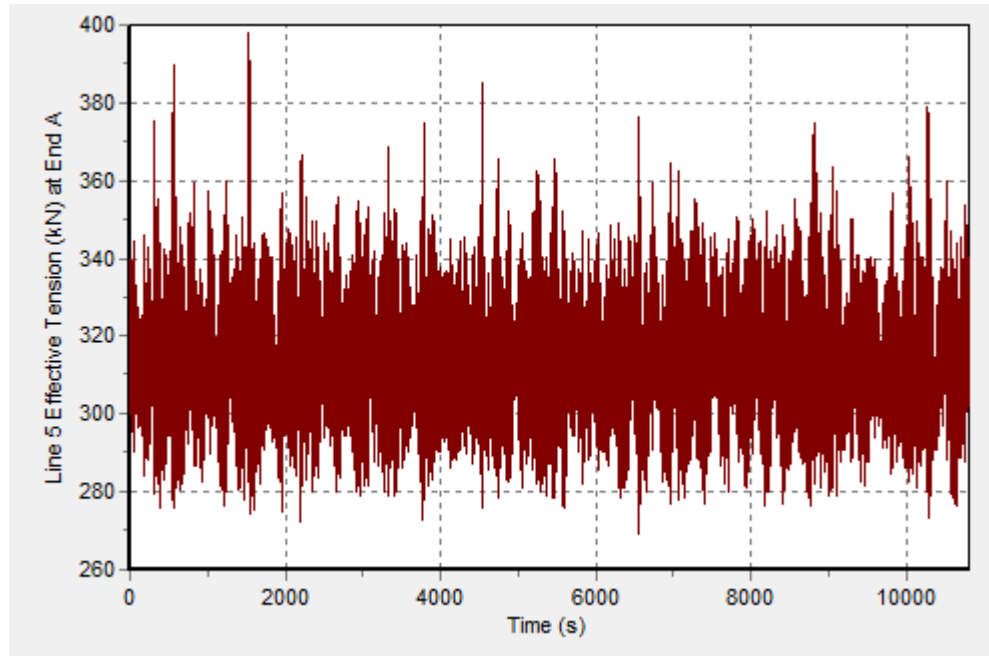
- **Line 3**



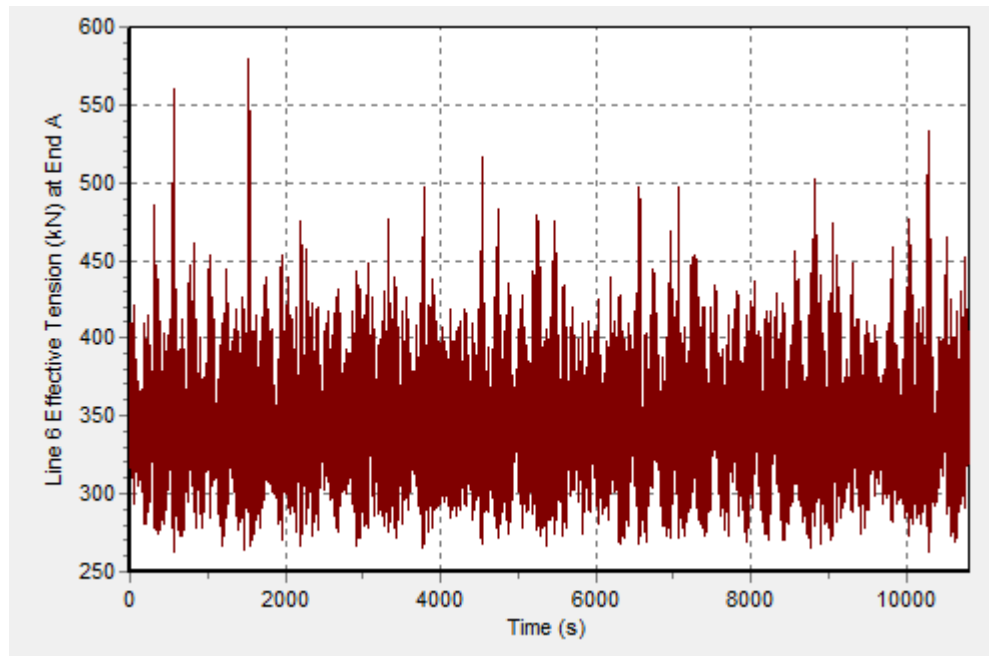
- **Line 4**



- **Line 5**

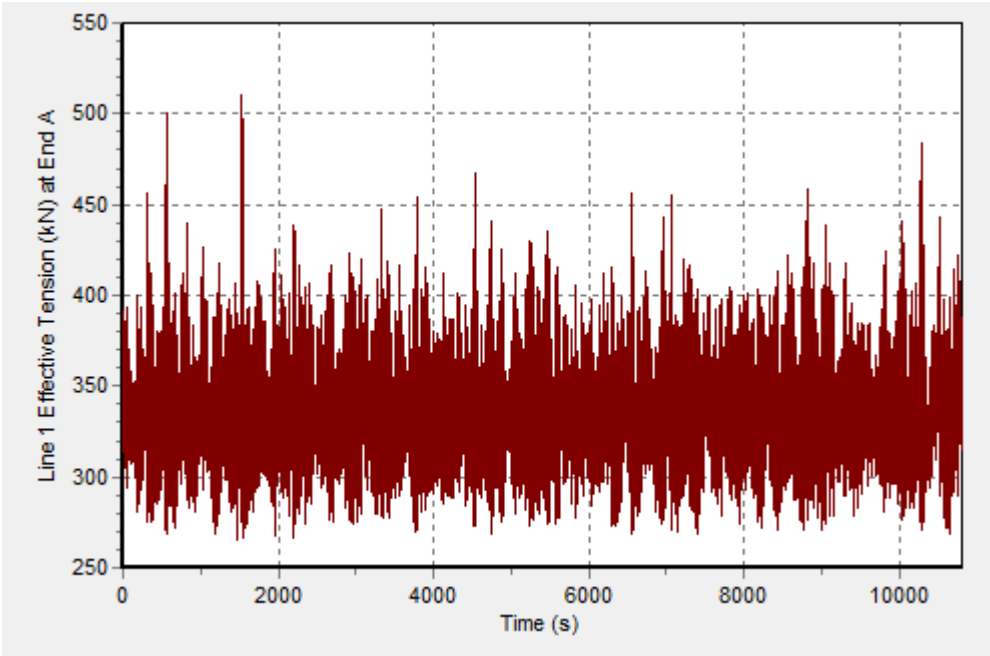


- **Line 6**

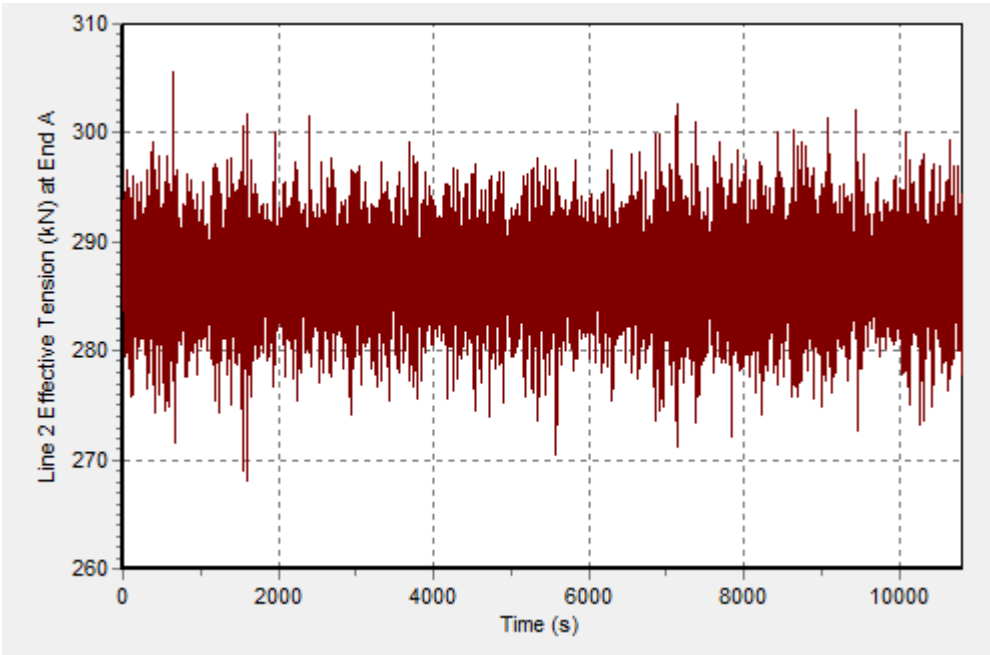


2. *LOAD CASE 2 (Intact, Full Load, Between Line)*

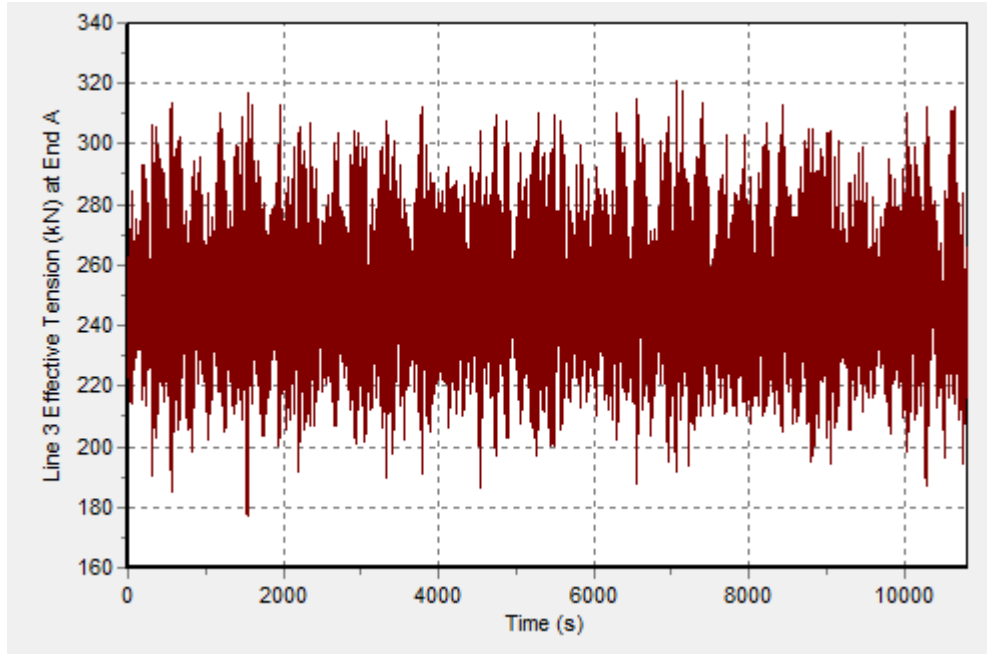
- *Line 1*



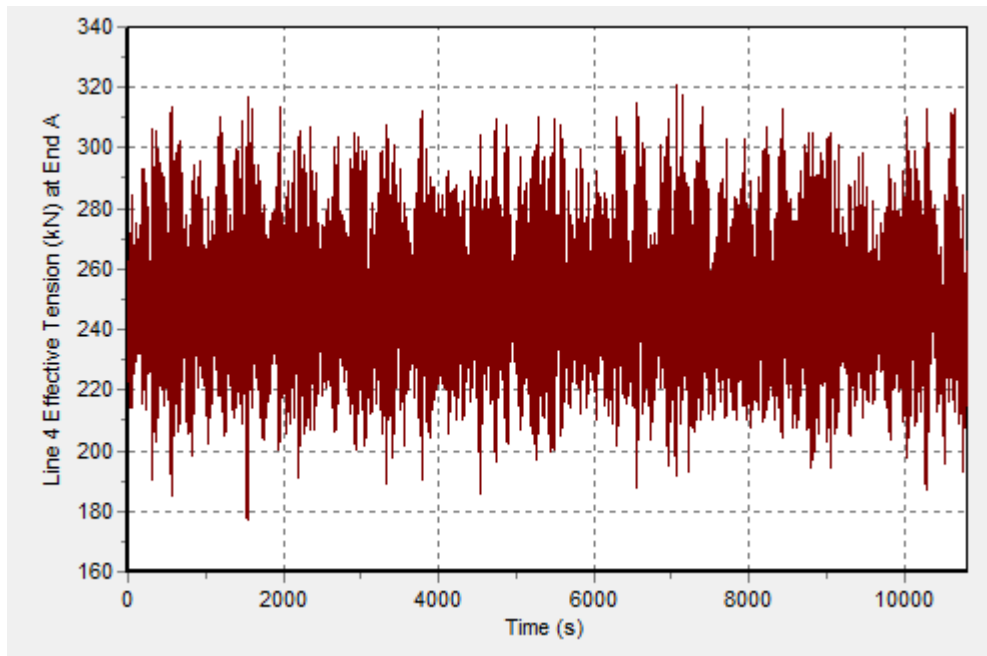
- *Line 2*



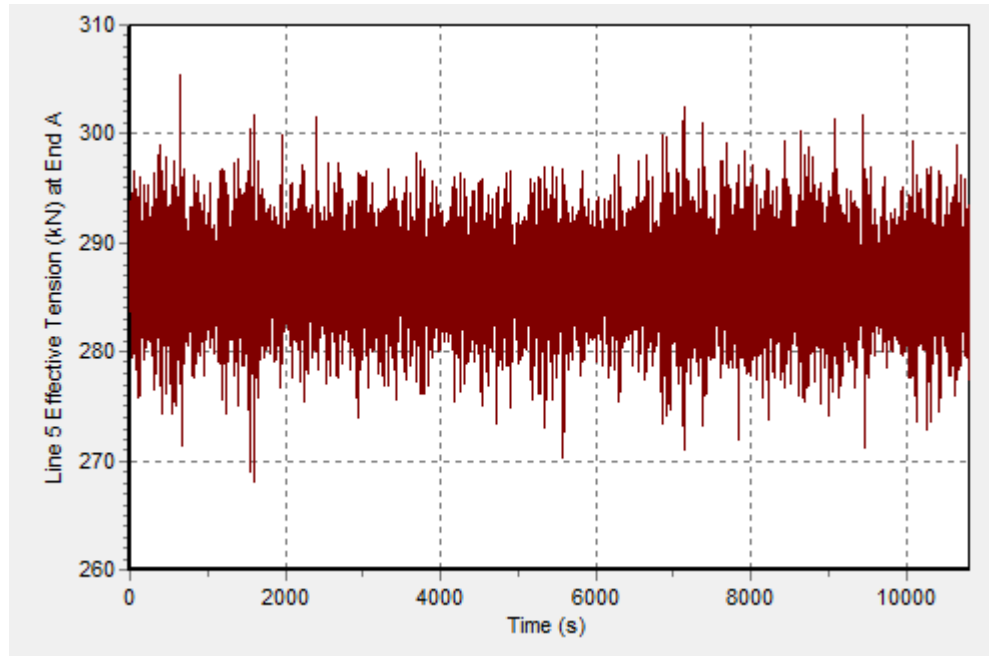
- **Line 3**



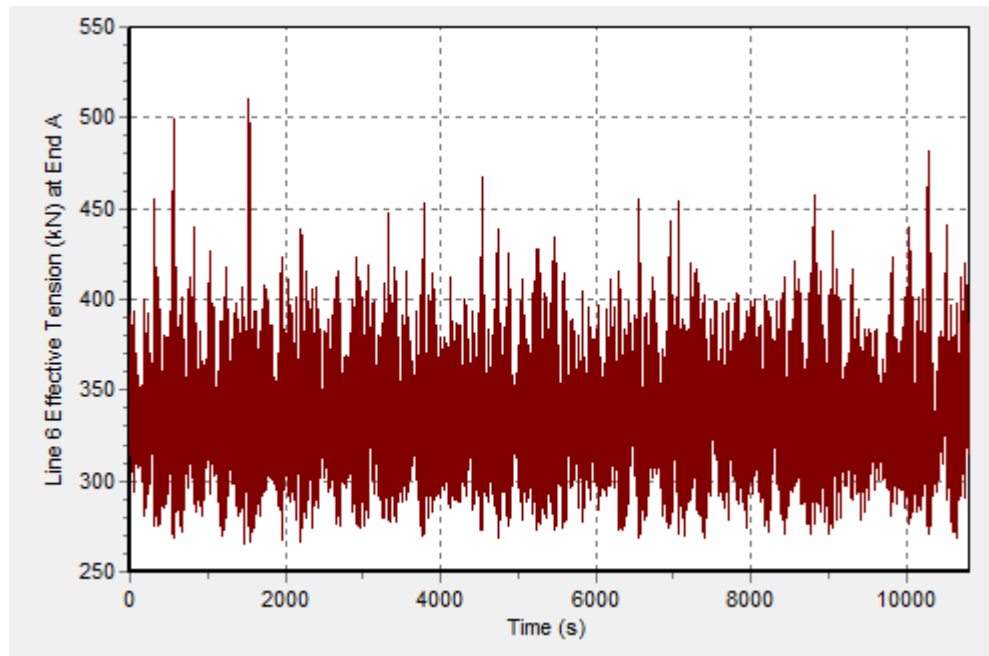
- **Line 4**



- **Line 5**

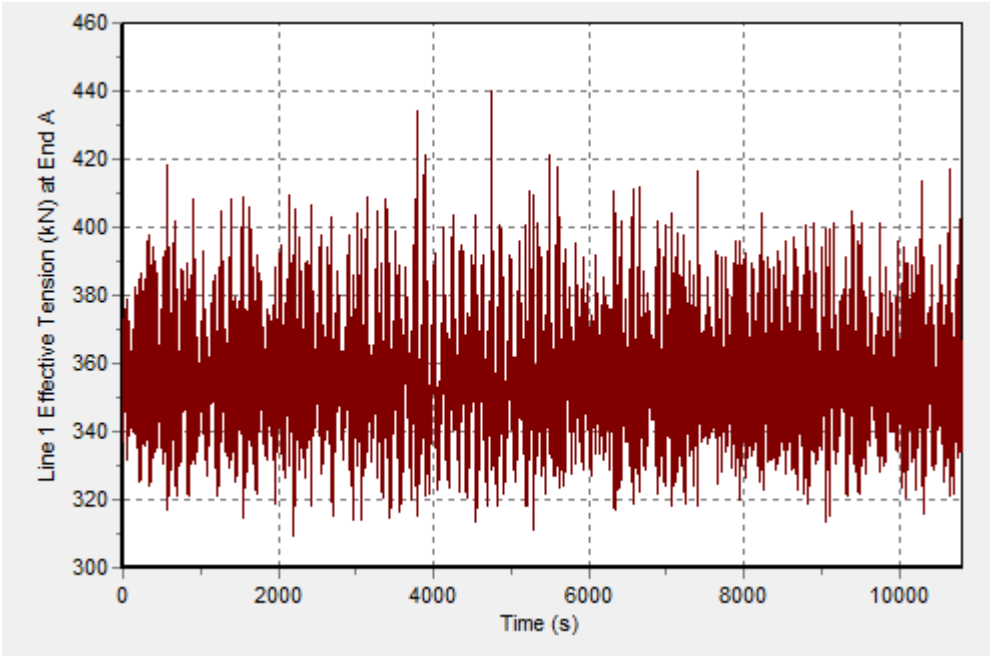


- **Line 6**

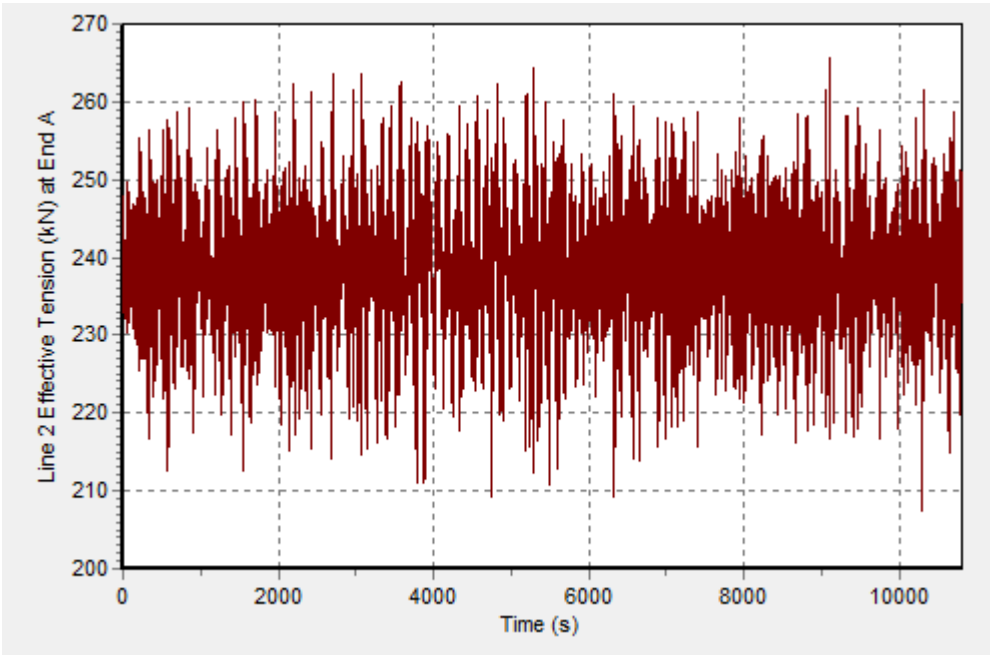


3. *LOAD CASE 3 (Intact, Light Load, In Line)*

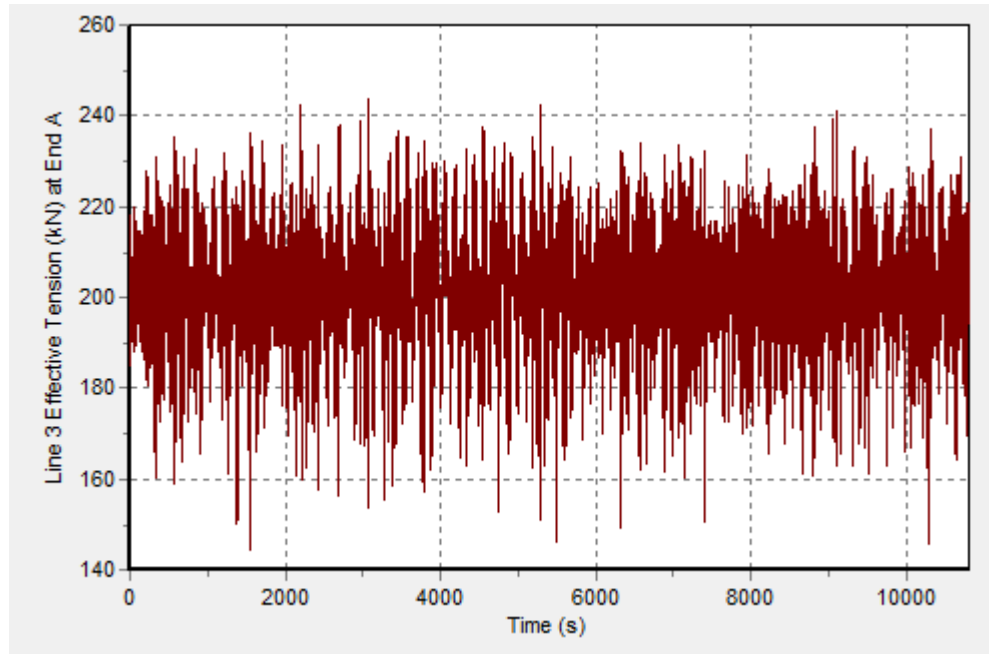
- *Line 1*



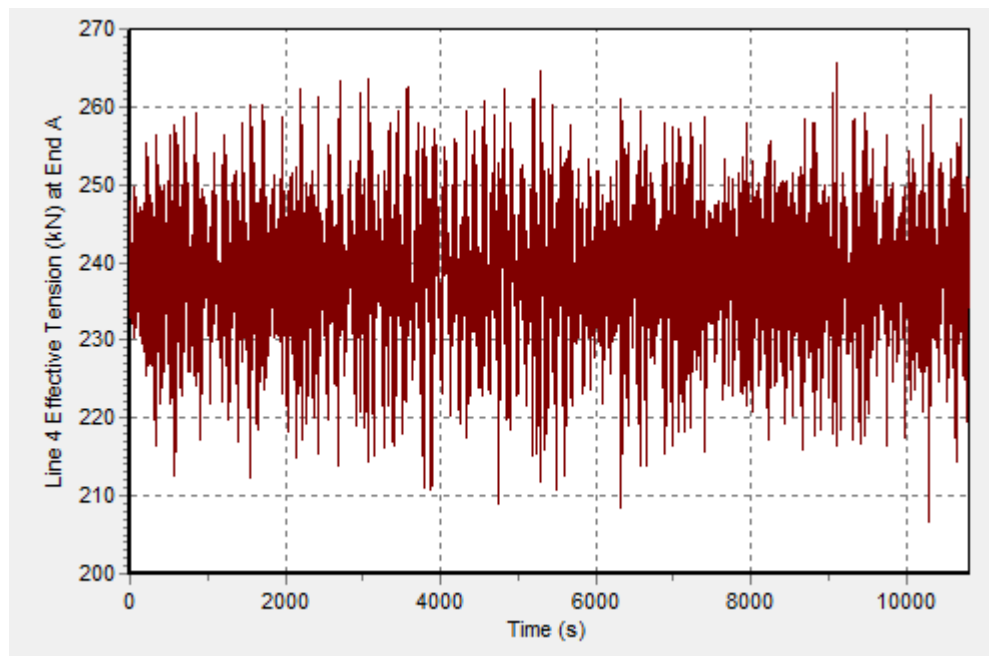
- *Line 2*



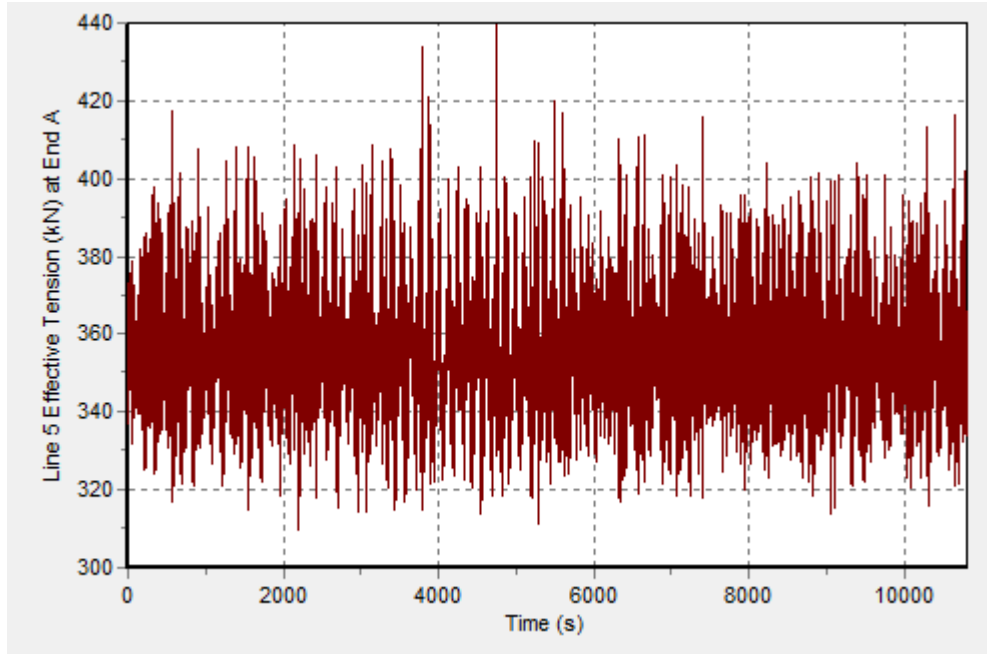
- **Line 3**



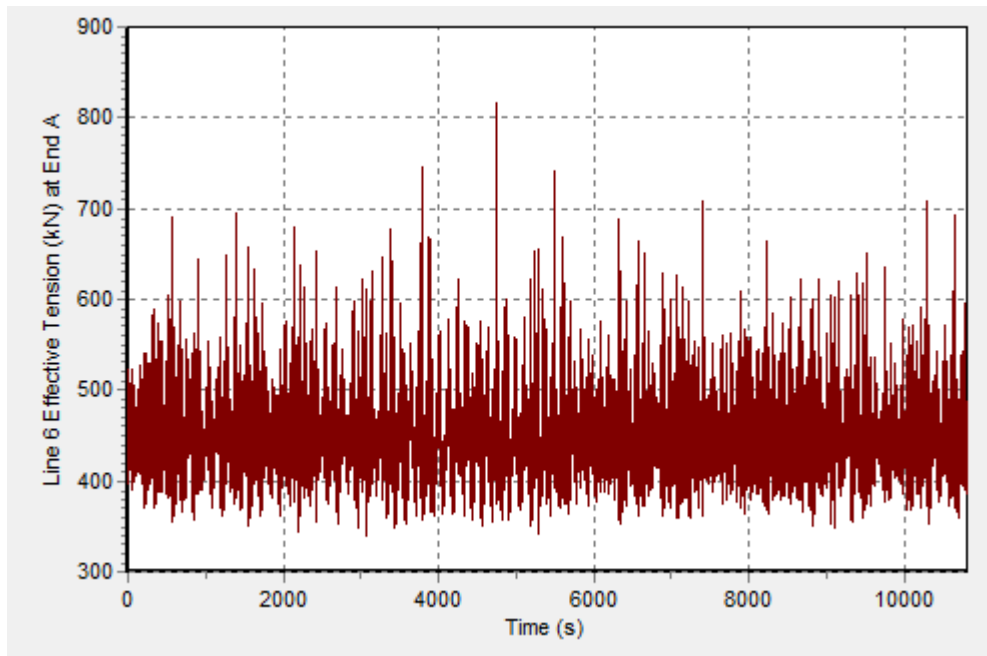
- **Line 4**



- **Line 5**

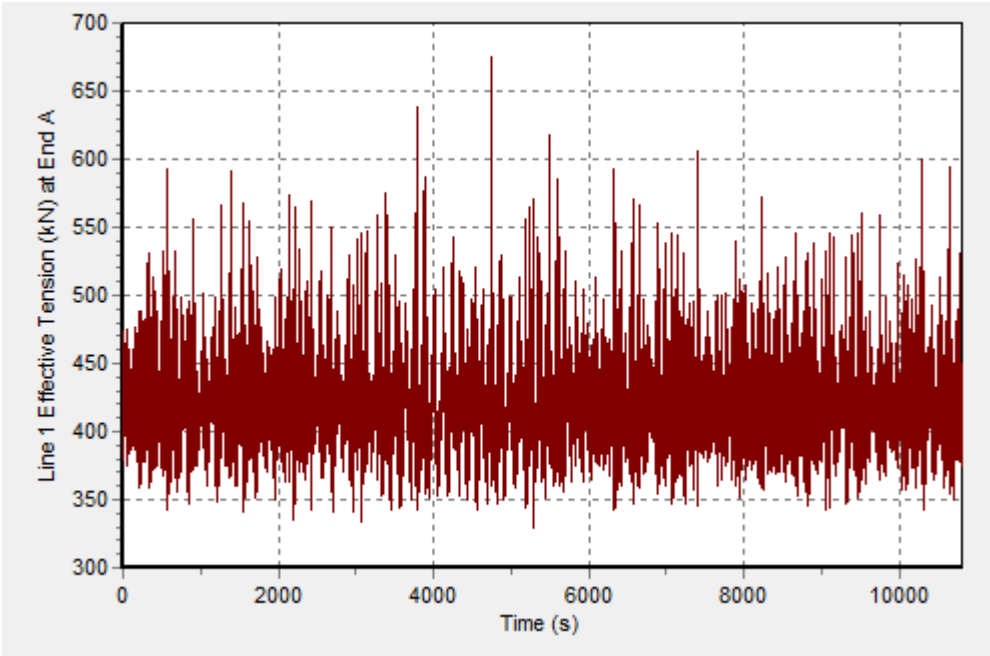


- **Line 6**

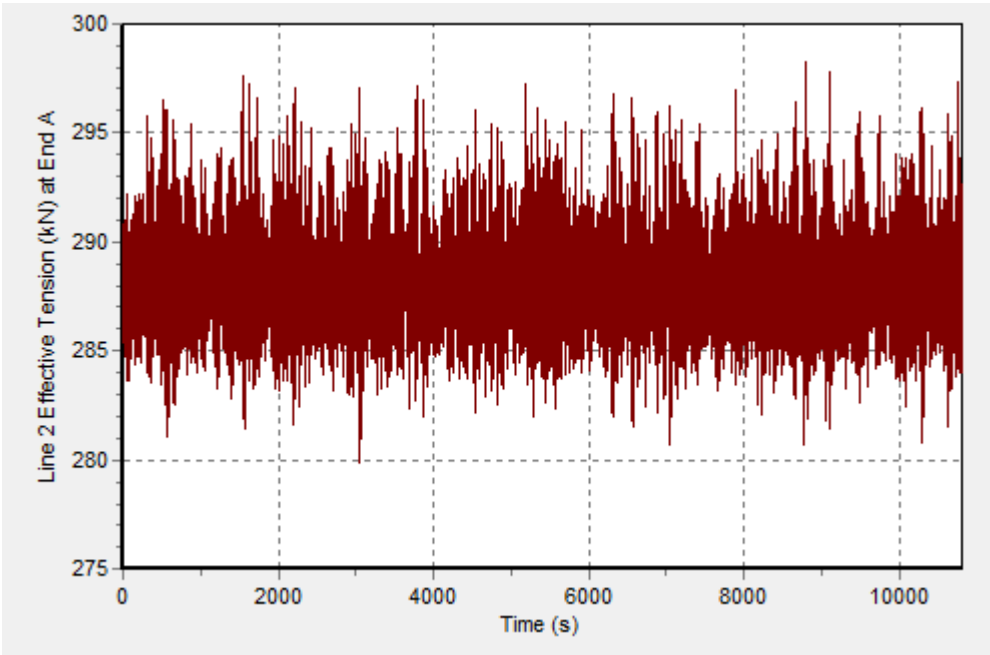


4. *LOAD CASE 4 (Intact, Light Load, Between Line)*

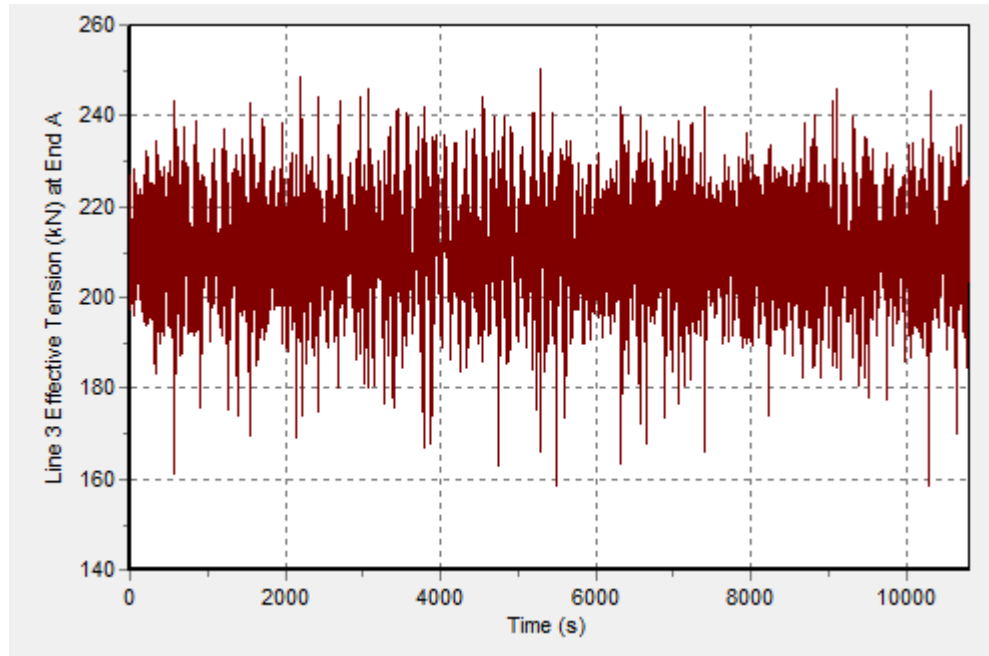
- *Line 1*



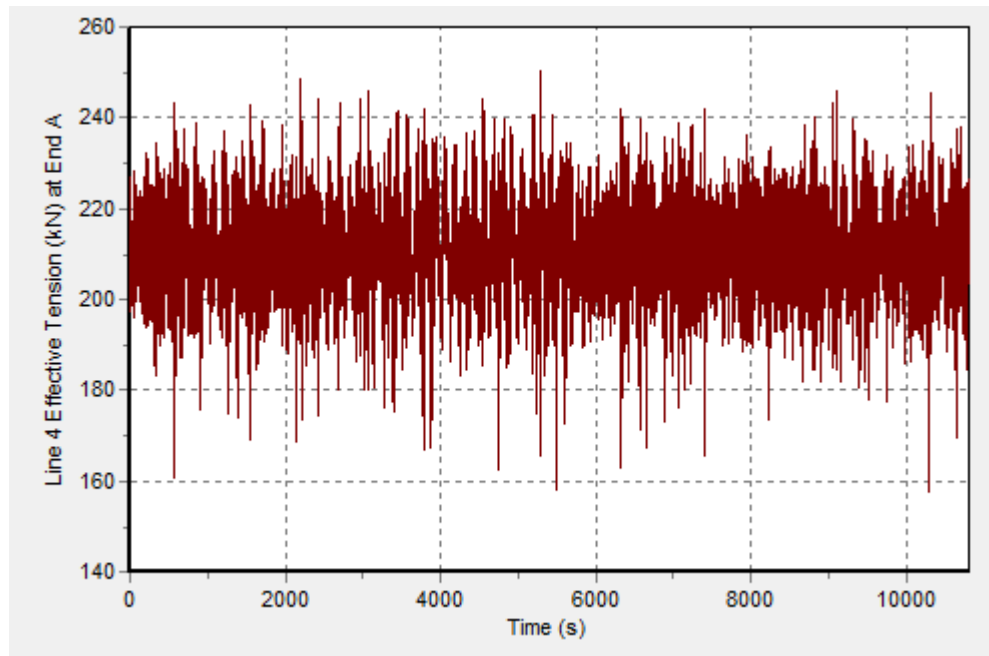
- *Line 2*



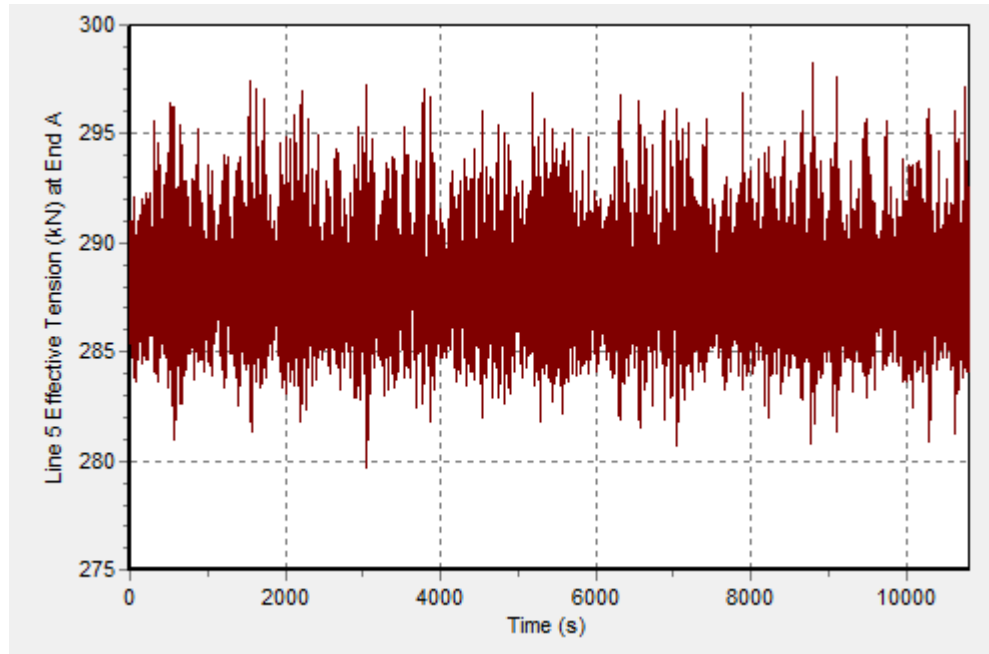
- **Line 3**



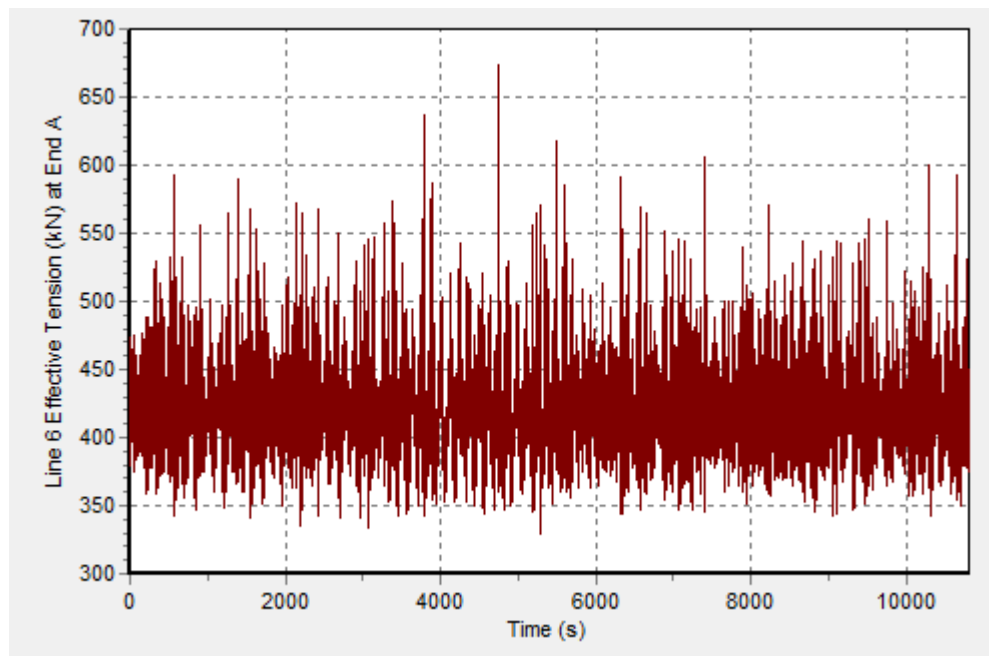
- **Line 4**



- **Line 5**

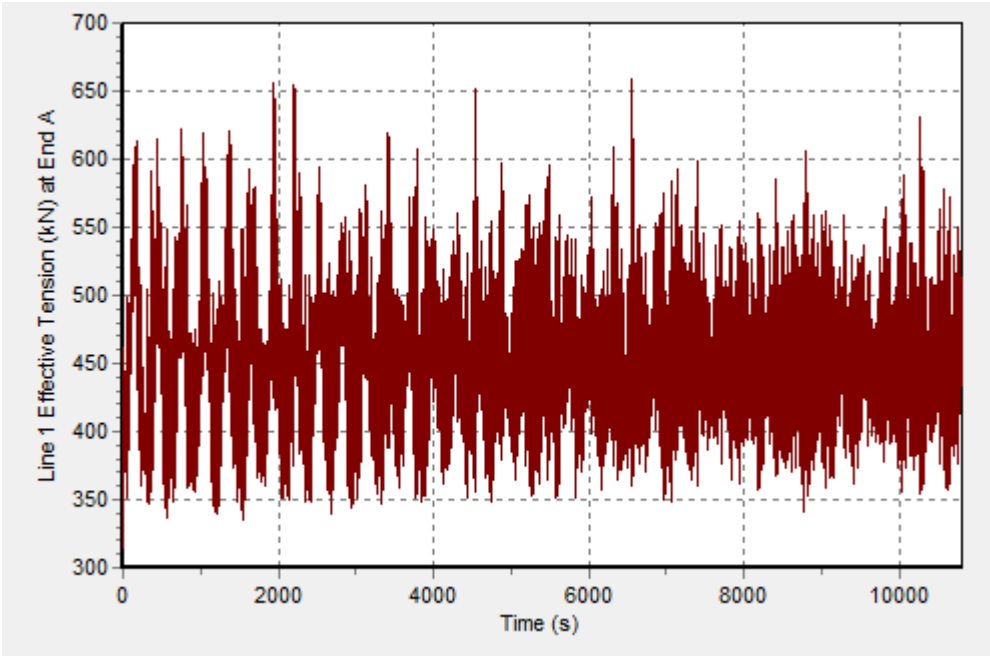


- **Line 6**

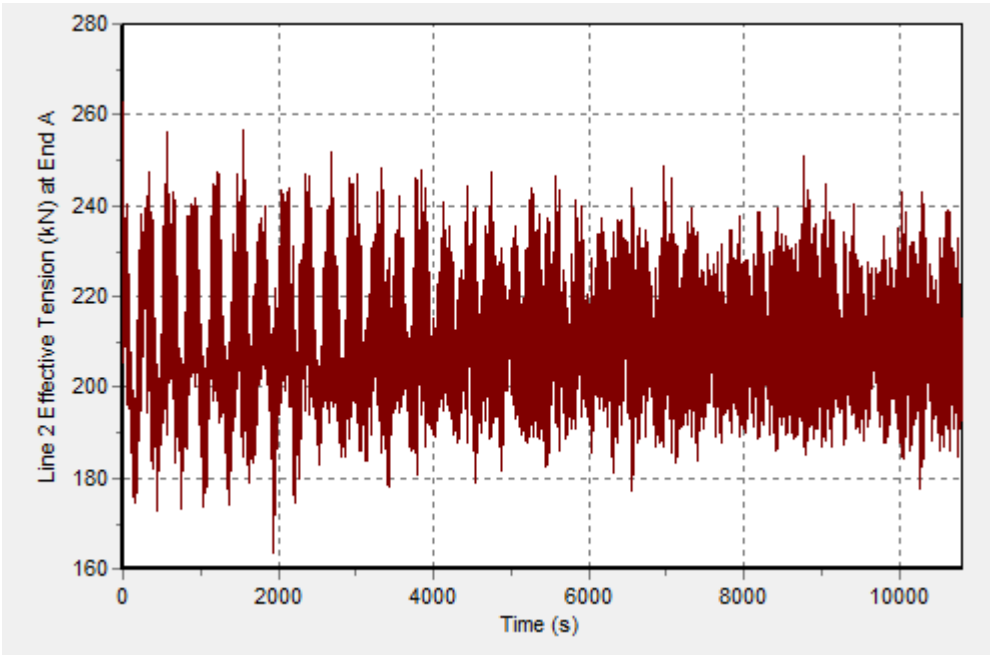


5. LOAD CASE 5 (Damage, Full Load, In Line)

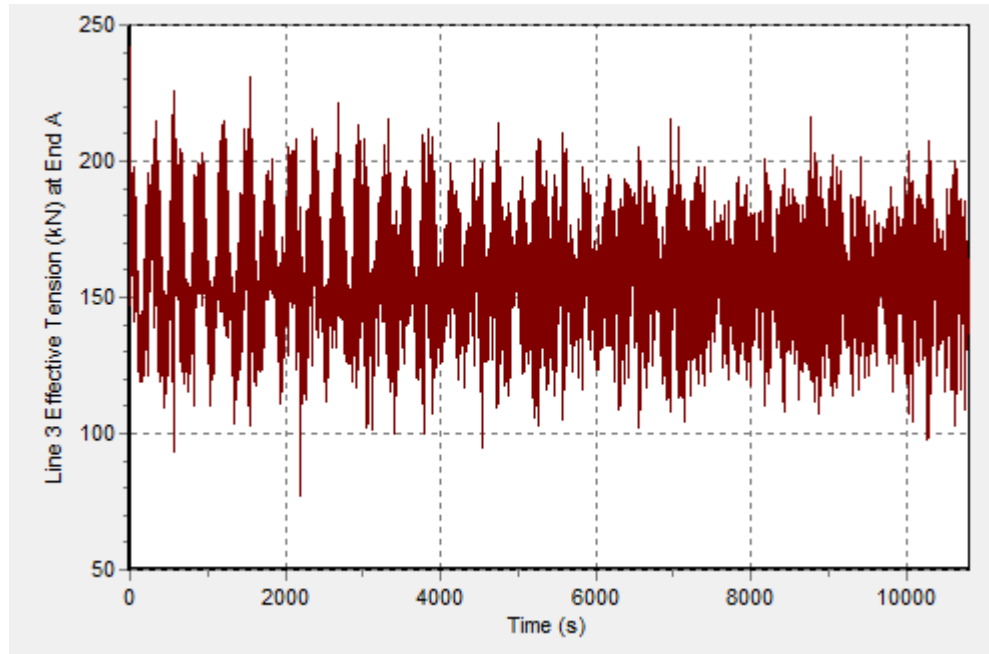
- *Line 1*



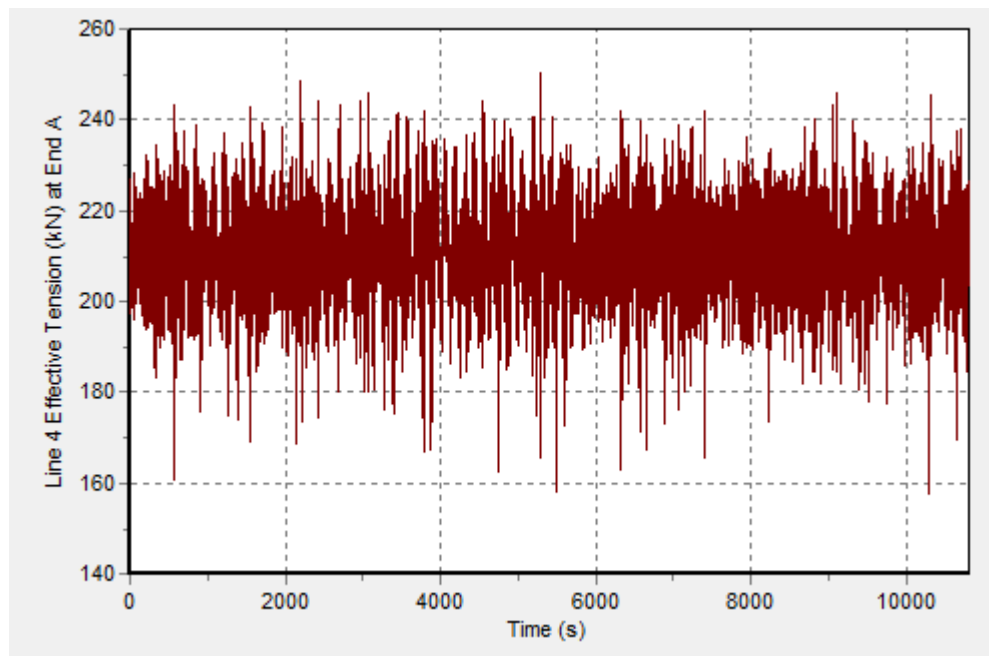
- *Line 2*



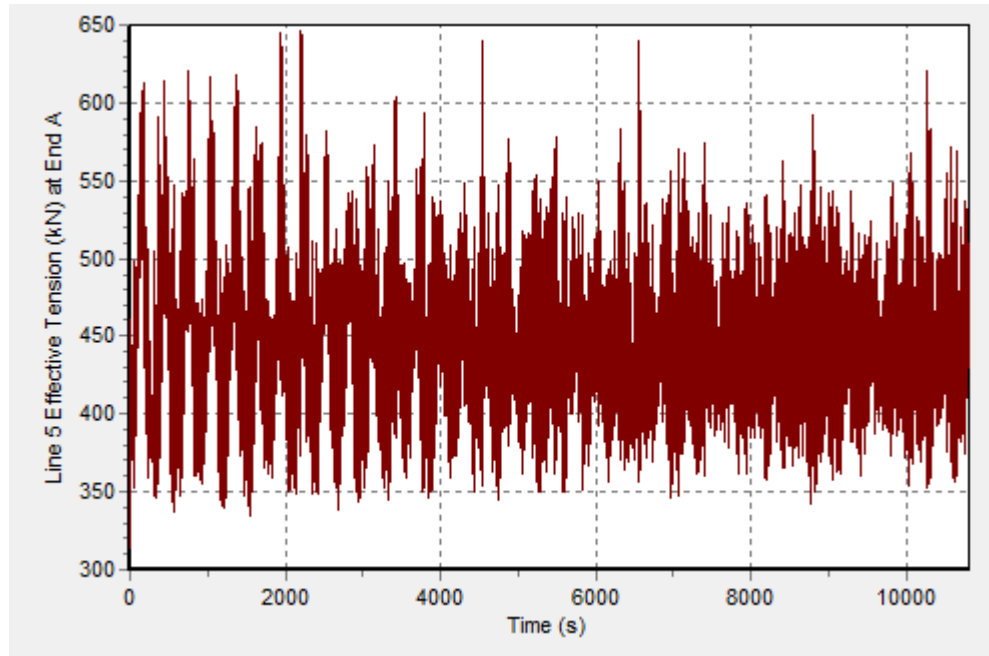
- **Line 3**



- **Line 4**

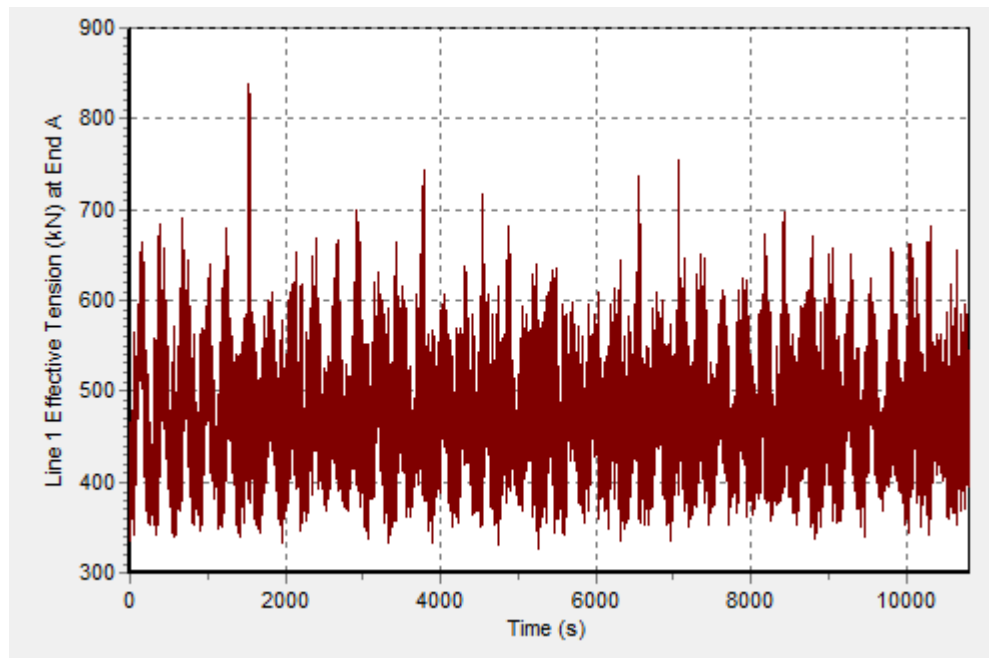


- **Line 5**

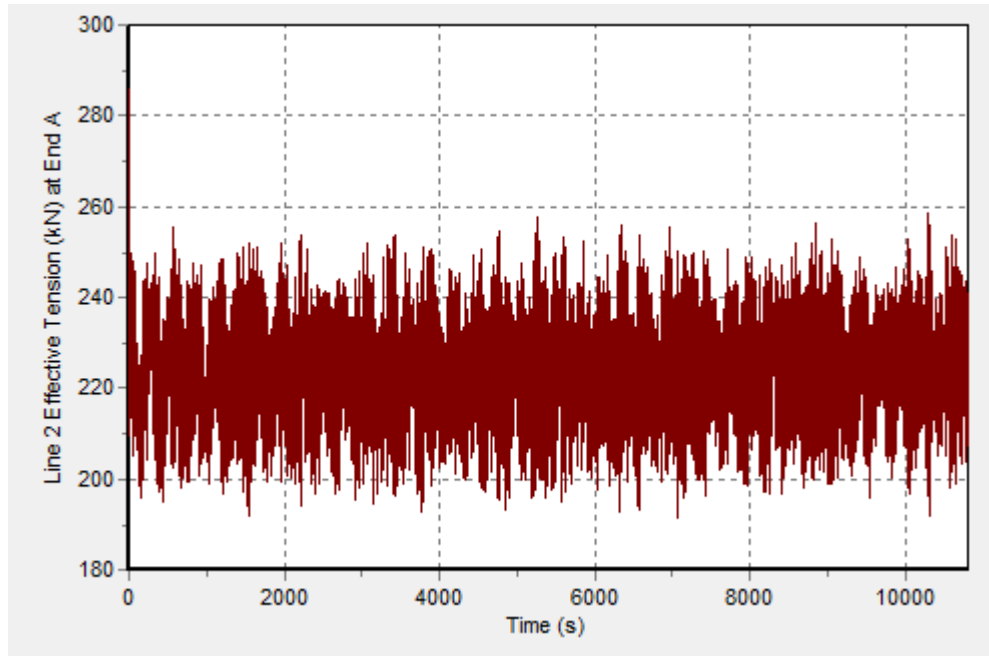


6. LOAD CASE 6 (Damage, Full Load, Between Line)

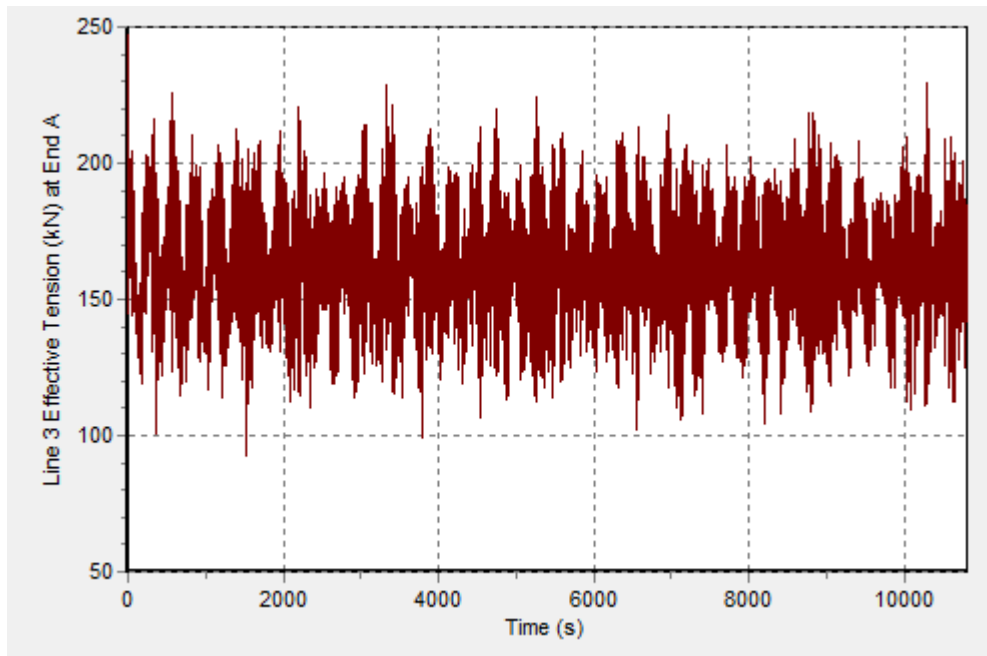
- **Line 1**



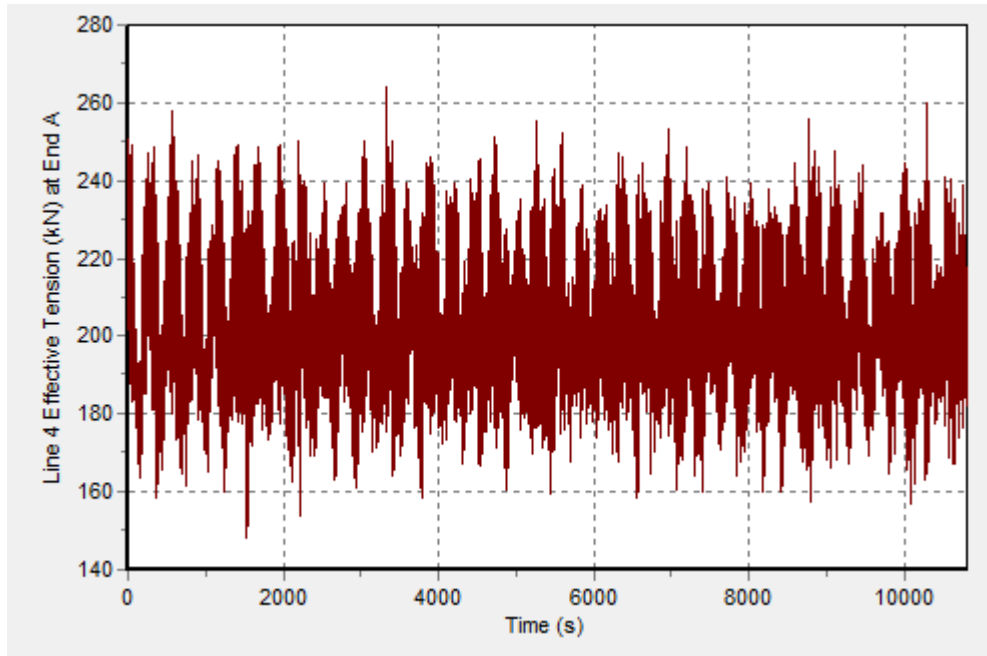
- **Line 2**



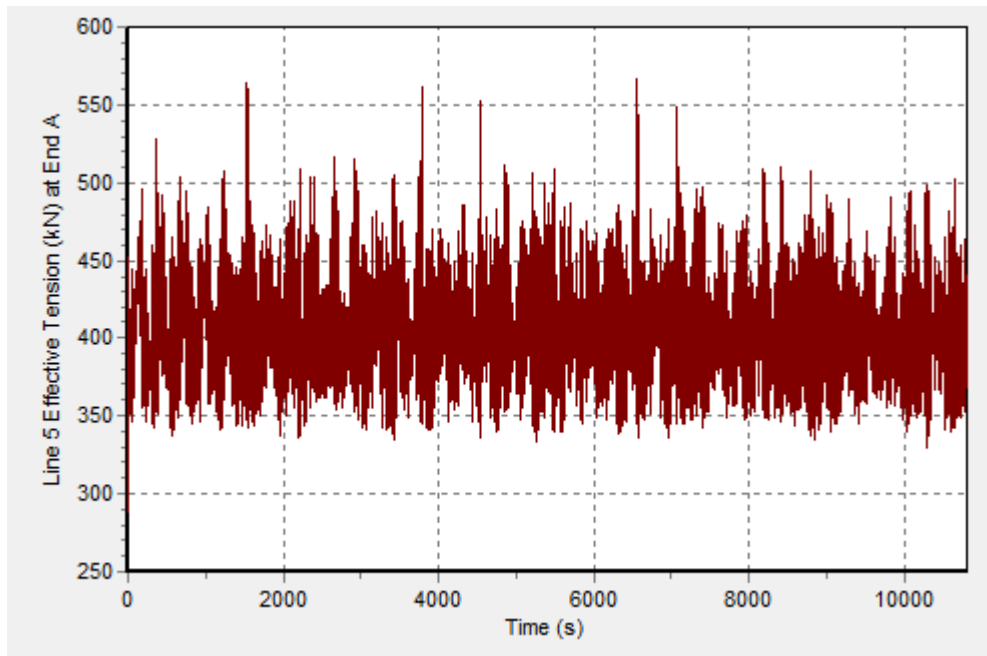
- **Line 3**



- **Line 4**

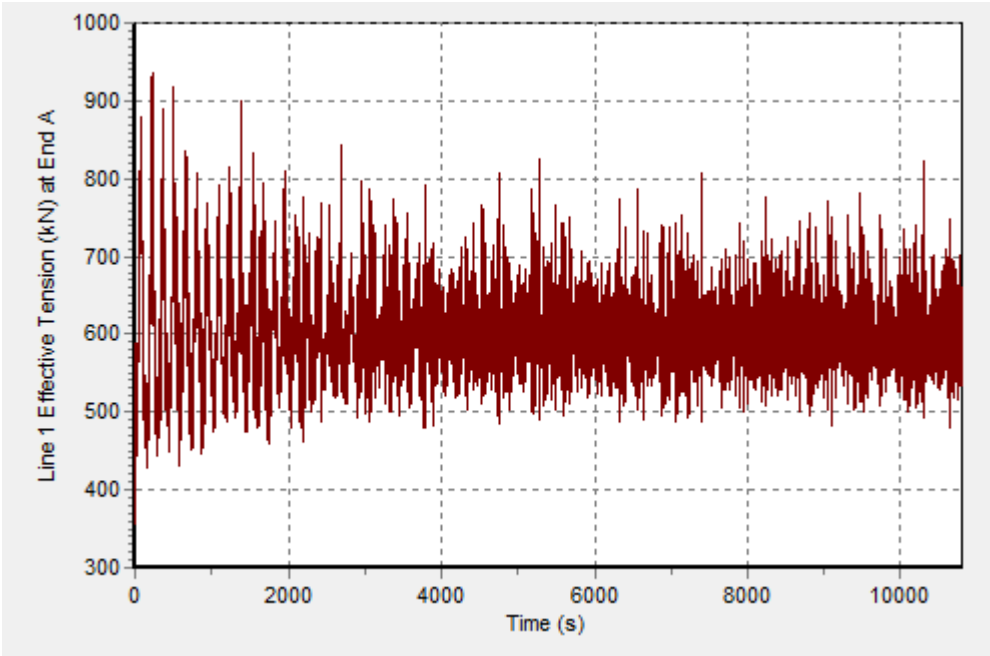


- **Line 5**

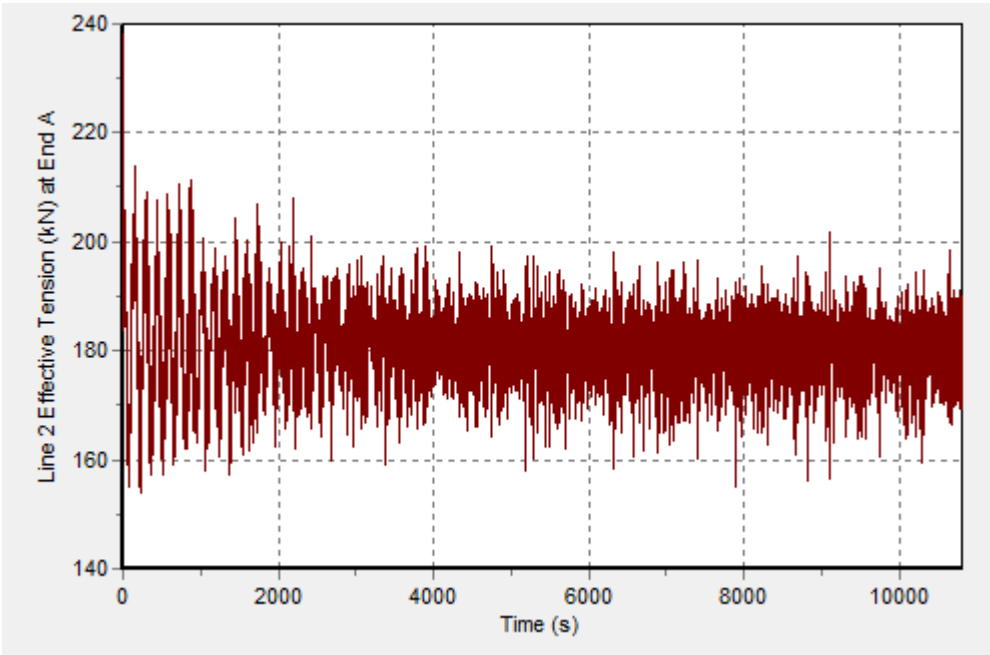


7. LOAD CASE 7 (Damage, Light Load, In Line)

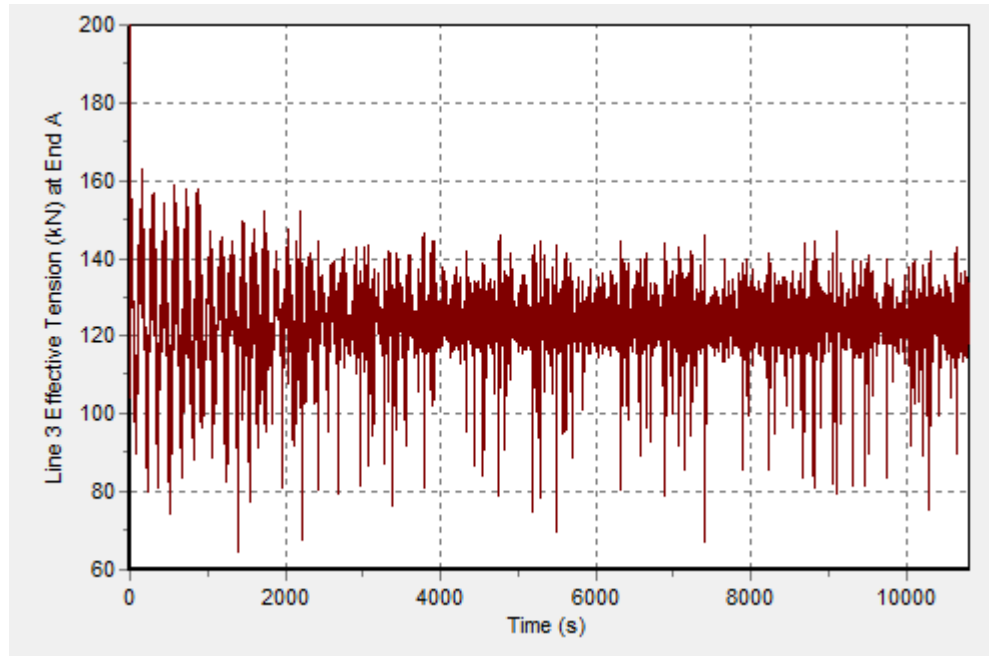
- Line 1



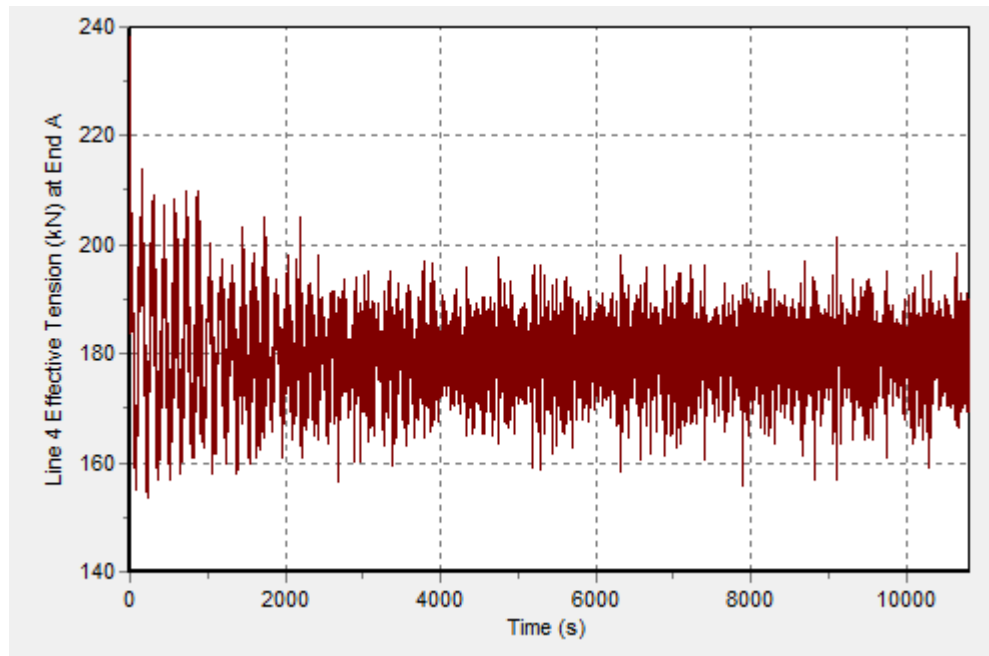
- Line 2



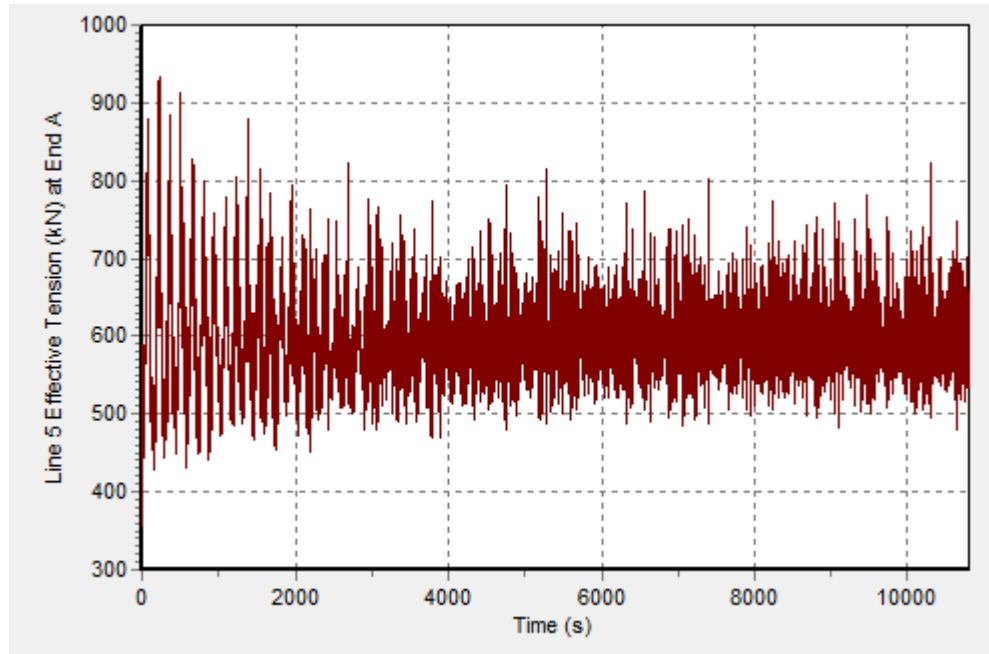
- **Line 3**



- **Line 4**

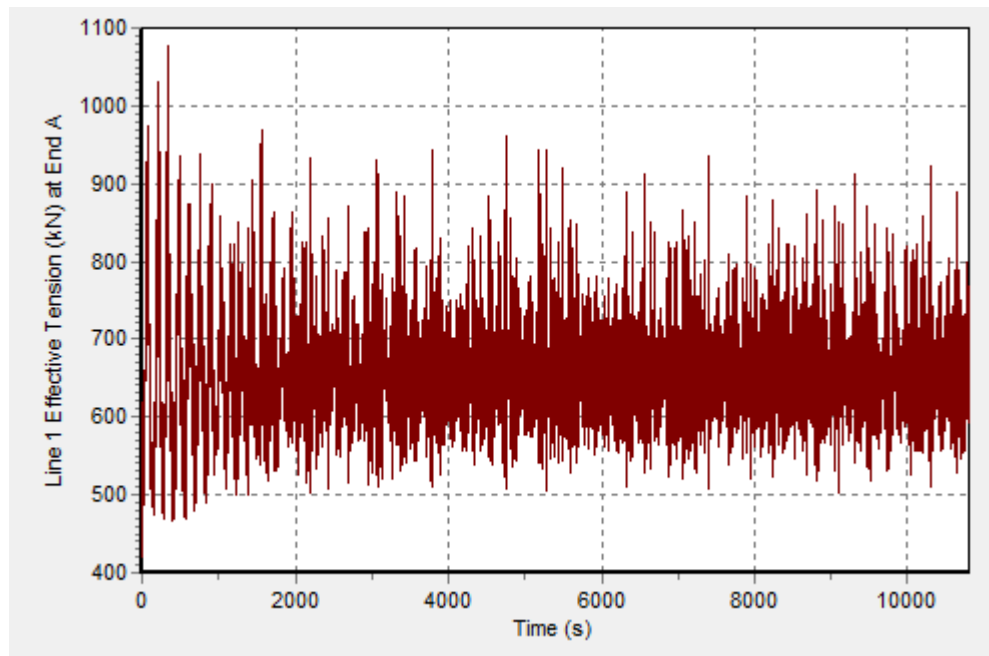


- **Line 5**

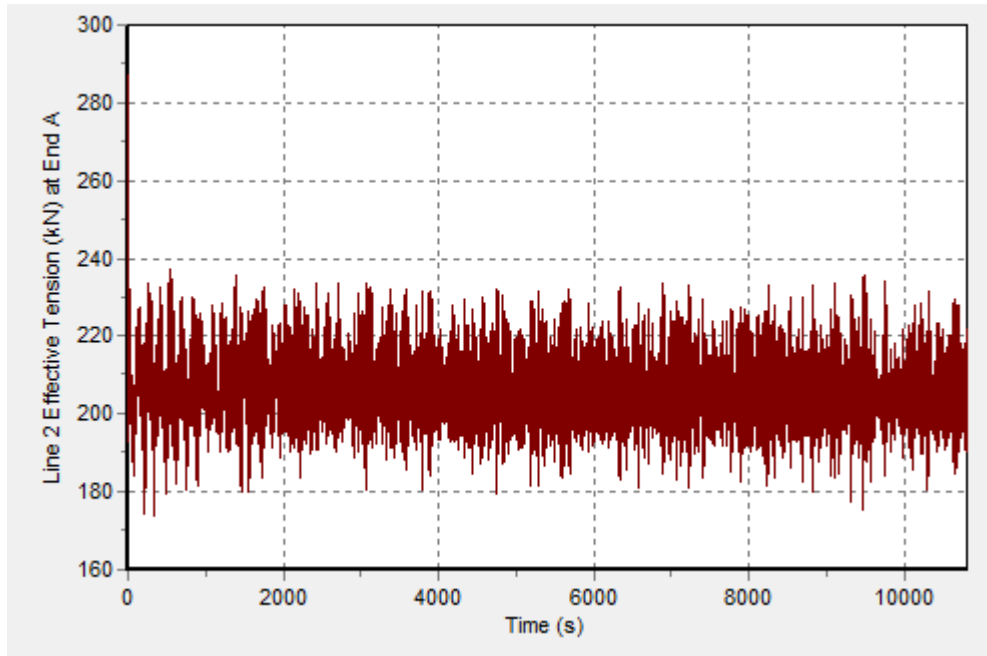


8. LOAD CASE 8 (Damage, Light Load, Between Line)

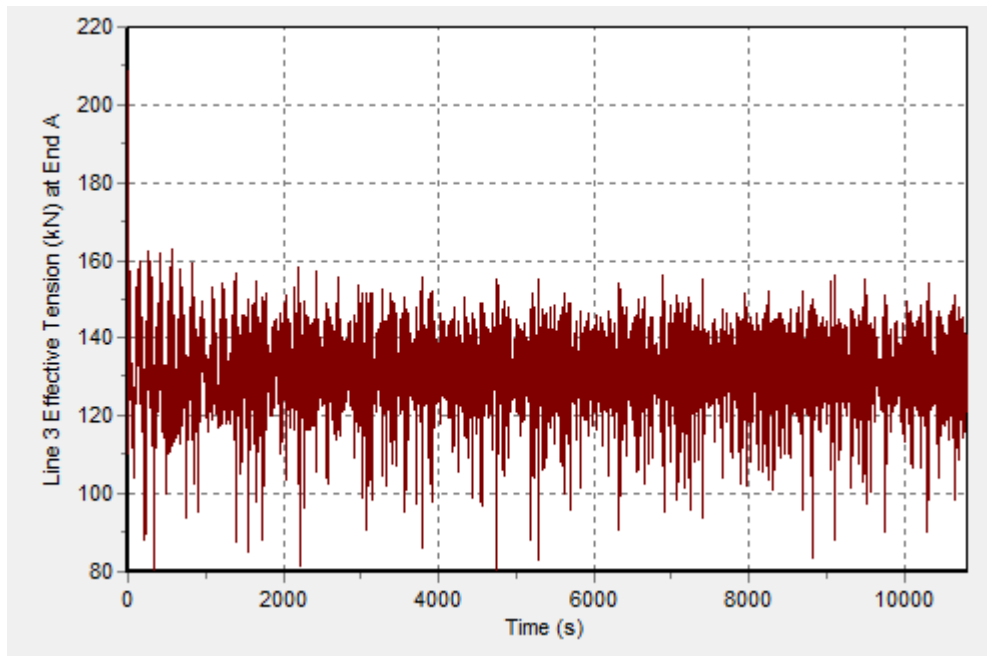
- **Line 1**



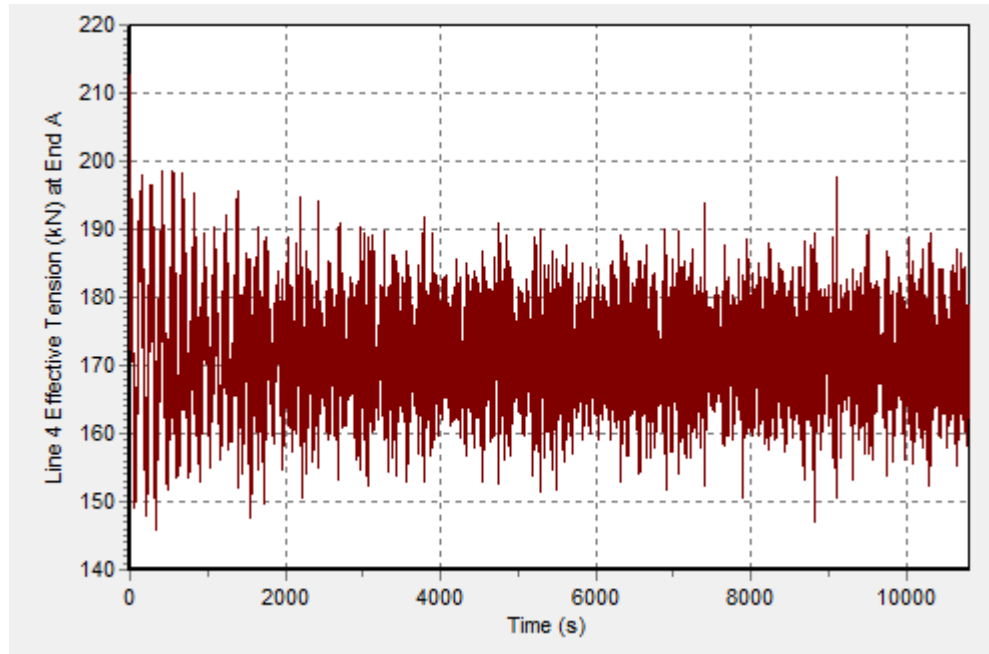
- **Line 2**



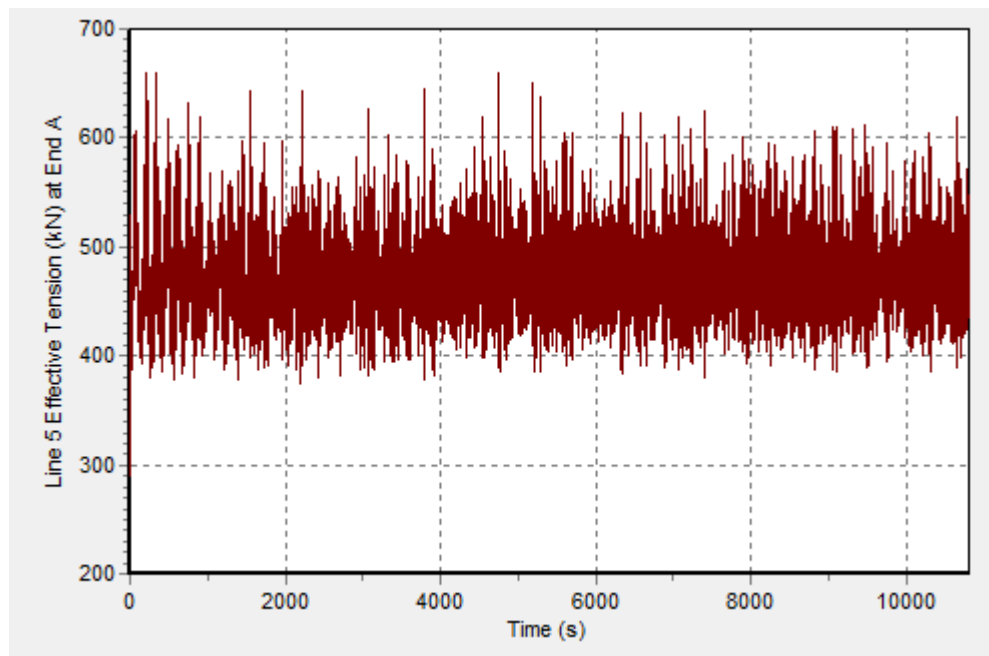
- **Line 3**



- **Line 4**



- **Line 5**



BIODATA PENULIS



M. Alfisyahr Erza Dwiatma dilahirkan di Pekalongan pada 6 Februari 1997, merupakan anak kedua dari 4 bersaudara. Penulis menempuh pendidikan formal di SD Pekuncen 2, SMP 2 Pekalongan, SMA N 1 Pekalongan. Kemudian pada tahun 2015, penulis melanjutkan kuliah jenjang S1 di Departemen Teknik Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Selama masa perkuliahan, penulis sempat aktif dalam berbagai kegiatan kampus, seperti menjadi staf ahli Himpunan Mahasiswa Teknik Kelautan (HIMATEKLA) bidang pengembangan sumber daya manusia, dan sekretaris jendral di Dewan Perwakilan Mahasiswa (DPM) ITS. Selain itu juga penulis aktif di berbagai kepanitiaan seperti menjadi staf pada acara IFC 2016, menjadi koordinator pada IFC 2017.

Kontak Penulis :

- Email : dwiatma.erza@gmail.com
- Telepon : +62 85790698961