



TUGAS AKHIR - M0141326

**ANALISIS KELELAHAN STRUKTUR STEEL
CATENARY RISER AKIBAT VORTEX INDUCED
VIBRATION DAN PERGERAKAN SEMI-
SUBMERSIBLE**

**MARSANURA HIBATULLAH
NRP. 04311440000115**

Dosen Pembimbing :

**Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D.
Dr. Eng. Shade Rahmawati, S.T., M.T.**

**DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya
2018**



FINAL PROJECT - MO141326

FATIGUE ANALYSIS OF STEEL CATENARY RISER DUE TO VORTEX INDUCED VIBRATION AND SEMISUBMERSIBLE MOTIONS

MARSANURA HIBATULLAH

NRP. 04311440000115

Supervisors :

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

Dr. Eng. Shade Rahmawati, S.T., M.T.

**DEPARTMENT OF OCEAN ENGINEERING
Faculty Of Marine Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya
2018**

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS KELELAHAN STRUKTUR STEEL CATENARY RISER AKIBAT VORTEX INDUCED VIBRATION DAN PERGERAKAN SEMI-SUBMERSIBLE

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat

Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

Pada Program Studi S-1 Departemen Teknik Kelautan

Fakultas Teknologi Kelautan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

Marsanura Hibatullah

NRP. 04311440000115

Disetujui oleh:

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

.....
2. Dr. Eng. Shade Rahmawati, S.T., M.T. (Pembimbing 2)

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

.....
4. Yoyok Setyo Hadiwidodo, S.T., M.T., Ph.D. (Penguji 2)

.....
5. Ir. Murdjito, M.Sc.Eng. (Penguji 3)

SURABAYA, JULI 2018

Abstrak

Nama	: Marsanura Hibatullah
NRP	: 04311440000115
Departemen	: Teknik Kelautan
Dosen Pembimbing	: Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D.
	Dr. Eng. Shade Rahmawati, S.T., M.T.

Riser didefinisikan sebagai segmen vertikal (mendekati vertikal) pipa yang menghubungkan fasilitas di atas air dengan jaringan pipa bawah laut. Riser akan mendapatkan gaya hidrodinamis yang bersifat siklik. Gaya yang bekerja terus menerus pada riser akan mengakibatkan suatu kelelahan yang menyebabkan kegagalan fatigue. Fatigue merupakan salah satu kriteria desain yang harus diperhitungkan dalam proses desain struktur. Dalam Laporan Tugas Akhir ini dibahas *fatigue analysis* akibat pergerakan *floater* yaitu *1st Order wave loads* dan *2nd Order wave drift*, dan juga akibat fenomena *Vortex Induced Vibration* yang terjadi pada riser tipe *Steel Catenary Riser* di suatu *Semi-Submersible* yang beroperasi di laut Natuna. Studi dilakukan dengan membuat model struktur *Semi-Submersible* dan riser lalu disimulasikan menggunakan perangkat lunak analisis dinamik. Analisis fatigue dilakukan dengan pendekatan Kurva S-N dan mengacu pada DNV RP F204 “Riser Fatigue” dan DNV RP C203 “Fatigue Design of Steel Structure”. Hasil analisis menunjukkan bahwa *1st order wave loads* memberikan dampak paling besar pada *tension* dan *bending moment* SCR,. Tegangan Nominal rata-rata terbesar terjadi pada bagian flex joint di titik *arc length* 0 m arah 90° sebesar 72,253 MPa dan titik ini yang dijadikan sebagai titik tinjau untuk analisa *fatigue*. Hasil perhitungan fatigue menunjukan bahwa umur yang *fatigue* sebesar 74,5 tahun yang mana sesuai dengan umur yang direncanakan yaitu 20 tahun.

Kata Kunci: *Steel Catenary Riser, Fatigue Damage, Umur Rencana, Pergerakan Floater, Vortex Induced Vibration*

Abstract

Name	: Marsanura Hibatullah
REG	: 04311440000115
Department	: Ocean Engineering
Supervisors	: Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D.
	Dr. Eng. Shade Rahmawati, S.T., M.T.

A riser is the nearly – vertical segment of pipe which connects the offshore facilities with subsea pipes and installations. Risers are subject to cyclic hydrodynamic loads. The forces that continuously work on risers cause fatigue damage which cause fatigue failure. Fatigue is a design criterion which must be considered in the structure design process. In this research, fatigue analysis due to 1st and 2nd order floater motions and Vortex Induced Vibration is investigated on the Steel Catenary Riser of a Semi – Submersible operating in the Natuna Sea. The study models a semi – submersible structure and risers and is simulated using a dynamic analysis software. Fatigue analysis is carried out with S-N curve approach referring to DNV RP F204 “Riser Fatigue” and DNV RP C203 “Fatigue Design of Steel Structure”. The analysis results show that 1st order floater motions have the biggest effect on tension and bending moment on the Steel Catenary Riser. The biggest mean nominal stress of 72,253 MPa occurs at flex joint arc length 0 m at 90° and this point is used for the fatigue analysis. The results of fatigue damage calculation show that the fatigue life of 74,5 years is suitable for the design life.

Key Words: Steel Catenary Riser, Fatigue Damage, Design Life, Floater Motions, Vortex Induced Vibration

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Wr Wb

Puji syukur penulis kepada ALLAH SWT yang telah memberikan rahmat dan karunia-Nya, serta kepada seluruh pihak yang telah membantu, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan baik dan lancar. Tugas akhir ini berjudul “Analisis kelelahan struktur *steel catenary riser* akibat *vortex induced vibration* dan pergerakan *semisubmersible*”.

Tugas akhir ini disusun guna memenuhi persyaratan dalam menyelesaikan Studi Sarjana (S1) di Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan (FTK), Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya. Tugas akhir ini membahas tentang analisis umur kelelahan *steel catenary riser* akibat *vortex induced vibration* dan pergerakan semisubmersible.

Penulis menyadari dalam penggerjaan dan penulisan tugas akhir ini masih jauh dari kesempurnaan sehingga penulis mengharapkan kritik dan saran sebagai bahan penyempurnaan pada laporan selanjutnya. Penulis berharap tugas akhir ini dapat mendukung kemajuan dunia pendidikan khususnya di bidang teknologi bawah laut (*subsea engineering*).

Wassalamu’alaikum Wr. Wb.

Surabaya, 27 Juli 2018

Marsanura Hibatullah

UCAPAN TERIMA KASIH

Selama menyelesaikan penyusunan tugas akhir ini penulis telah banyak bantuan dari berbagai pihak, baik secara langsung maupun tidak langsung. Dengan segala kerendahan hati, penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang turut membantu, khususnya:

1. Allah SWT, Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberikan ridho dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.
2. Ibunda Penulis yang telah memberikan dukungan moral maupun moril kepada penulis yang tiada hentinya agar diberi kemudahan dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
3. Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D selaku dosen pembimbing satu penulis yang telah sabar membimbing, memberikan petunjuk, dan meluangkan waktunya sehingga Tugas Akhir ini dapat selesai.
4. Ibu Dr. Eng. Shade Rahmawati, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing dua penulis yang telah sabar membimbing, memberikan petunjuk, dan meluangkan waktunya sehingga Tugas Akhir ini dapat selesai.
5. Prof. Ir. Mukhtasor, M.Eng.,Ph.D. selaku dosen wali penulis, terima kasih atas bimbingan, nasehat, dan bimbingannya.
6. Bapak Dr. Eng. Rudi Walujo Prastianto, S.T., M.T., selaku Ketua Departemen Teknik Kelautan, Bapak Yoyok Setyo Hadiwidodo S.T., M.T., Ph.D selaku Sekretaris Departemen Teknik Kelautan, semua bapak dan ibu dosen serta staf maupun karyawan Departemen Teknik Kelautan, terima kasih atas segala ilmu dan bantuannya.
7. Para penguji Tugas Akhir yang telah memberikan evaluasi dan saran kepada penulis guna menyempurnakan tugas akhir yang dikerjakan.
8. Seluruh keluarga besar mahasiswa teknik kelautan ITS khususnya angkatan 2014 (MAELSTROM) yang telah memberikan semangat dan bantuan kepada penulis dalam menyelesaikan tugas akhir.
9. Udin Hybrid Kons, BARUDAK12, Wiboos14, Krewoolida dan

Areks Underground Skuat Club 2014-2017 Teknik Kelautan yang menemani 4 tahun dan memberi banyak pelajaran dimasanya.

10. Seluruh Pengurus SPE ITS SC khusus nya SPE ITS SC 2017-2018 SUPREME yang selalu memberikan inspirasi dan motivasi .
11. Teman-teman Panitia OCEANO 2017 dan Petrolida 2016 yang telah memberikan pelajaran dalam kerjasama tim dan ketelitian dalam pekerjaan.
12. Teman-teman Cirebon yang di Surabaya yang selalu menemani tanpa pamrih.
13. Semua pihak yang telah membantu baik secara langsung maupun tidak langsung.

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
ABSTRAK	ii
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	iv
UCAPAN TERIMA KASIH.....	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan.....	3
1.4 Manfaat.....	3
1.5 Batasan Masalah	3
1.6 Sistematika Penulisan	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....	7
2.1 Tinjauan Pustaka.....	7
2.1.1 Riser	8
2.1.2 Jenis Riser.....	10
2.2.2.1 Top Tensioned Riser	10
2.2.2.2 Compliant Riser	11
2.1.3 Steel Catenary Riser	13
2.1.4 Semi-submersible	15
2.2 Dasar Teori	16
2.2.1 Gaya yang Menyebabkan Kerusakan Fatigue	16
2.2.2 Gelombang.....	17
2.2.2.1 Gelombang Reguler	17
2.2.2.2 Gelombang Acak	17
2.2.2.3 Spektrum Gelombang	18
2.2.3 Arus	19
2.2.4 Tension pada Steel Catenary Riser	19

2.2.5 Gaya Tarik Efektif (Effective Tension)	21
2.2.6 Momen Lentur	20
2.2.7 Teori Dasar Gerak Bangunan Apung.....	22
2.2.8 Response Amplitude Operator (RAO)	25
2.2.9 Vortex-Induced Vibration.....	26
2.2.10 Vortex Shedding.....	26
2.2.11 Teori Fatigue	28
2.2.12 Fatigue Stress	28
2.2.13 Rentang Tegangan	30
2.2.14 Stress Concentration Factor	31
2.2.15 Siklus Tegangan	33
2.2.16 Kurva S-N	35
2.2.17 <i>Fatigue Damage</i>	37
2.2.18 Penjumlahan Fatigue Damage.....	37
2.2.19 Umur Kelelahan	38
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	38
3.1 Metodologi Penelitian	39
3.1.1 Diagram Alir.....	39
3.2 Rencana Pengerjaan Tugas Akhir	40
BAB 4 ANALISIS DAN PEMBAHASAN.....	46
4.1 Pemodelan Konfigurasi Semi-submersible Tertambat dan Steel Catenary Riser dengan Orcaflex 9.2	47
4.2 Analisis Konfigurasi Statis <i>Steel Catenary Riser</i>	48
4.3 Pemodelan 3D <i>Riser</i>	50
4.4 Pemodelan Lingkungan.....	52
4.5 Analisis Kekuatan	53
4.6 Langkah Analisis <i>Effective Tension</i> dan <i>Bending Moment</i>	54
 4.6.1 Effective Tension.....	55
 4.6.2 Bend Moment	57
4.7 Titik Tinjau	59
4.8 Seri Waktu Tegangan Nominal	62
4.9 Rentang Tegangan dan Jumlah Siklus	65
4.10 Perhitungan Umur <i>Fatigue</i>	67
BAB 5 PENUTUP.....	71

5.1 Kesimpulan.....	71
5.2 Saran	72
DAFTAR PUSTAKA.....	73
LAMPIRAN	
BIODATA PENULIS	

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Klasifikasi Sambungan untuk Pipeline dan Riser	32
Tabel 2.2	Perhitungan Siklus Rentang Tegangan	35
Tabel 2.3	Kesimpulan jumlah siklus dan Rentang Tegangan	35
Tabel 2.4	Kurva S-N untuk struktur di laut dengan perlindungan katodik	36
Tabel 2.5	Klasifikasi Safety Class	38
Tabel 3.1	Main Dimension Semi-submersible	42
Tabel 3.2	Data Steel Catenary Riser	42
Tabel 3.3	Data Mooring	43
Tabel 3.4	Data Lingkungan Belanak Natuna.....	43
Tabel 4.1	Validasi Model.....	47
Tabel 4.2	Hasil Perhitungan Teori <i>Catenary</i>	49
Tabel 4.3	Kriteria Kekuatan SCR-LRFD	54
Tabel 4.4	Tegangan Maksimum SCR	62
Tabel 4.5	Klasifikasi Sambungan untuk Pipeline dan Riser yang Digunakan....	66
Tabel 4.6	Stress Range dan Siklus Tegangan yang terjadi	67
Tabel 4.7	Angka Probabilitas kejadian tiap arah.....	67
Tabel 4.8	Angka Probabilitas kejadian tiap arah.....	68
Tabel 4.9	Input untuk Perhitungan Umur <i>Fatigue</i>	69
Tabel 4.10	<i>Fatigue Damage</i> dan umur <i>Fatigue</i> pada bagian <i>flex joint</i>	69

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Steel Catenary Riser	1
Gambar 2.1 Sistem Integritas pada <i>Riser</i>	8
Gambar 2.2 Top Tensioned Riser	11
Gambar 2.3 Konfigurasi pada <i>compliant riser</i>	12
Gambar 2.4. Struktur lapisan pada <i>flexible riser</i>	13
Gambar 2.5 Steel Catenary Riser	14
Gambar 2.6 Flexjoint terhubung pada <i>floater</i>	15
Gambar 2.7 Semi-submersible.....	16
Gambar 2.8 Ilustrasi Gelombang Acak	17
Gambar 2.9 Model <i>Catenary</i>	20
Gambar 2.10 Kesetimbangan pipa ketika dikenai fluida	22
Gambar 2.11 Moda geral 6 derajat kebebasan	24
Gambar 2.12 Visualisasi VIV	26
Gambar 2.13 Vortex Shedding pada riser	27
Gambar 2.14 konfigurasi gaya list dan gaya drag pada silinder	27
Gambar 2.15 Perhitungan Bending Stress.....	30
Gambar 2.16 Unsymmetrical Weld Groove.....	33
Gambar 2.17 Rainflow Plot.....	34
Gambar 2.18 Kurva S-N untuk struktur di laut dengan perlindungan katodik ..	36
Gambar 3.1 General Arrangement tampak depan.....	41
Gambar 3.2 General Arrangement tampak atas	41
Gambar 4.1 Pemodelan dengan Maxsurf dan Moses	48
Gambar 4.2 Pemodelan Semi-Submersible dengan Sistem <i>Mooring</i> dan <i>Steel Catenary Riser</i>	48
Gambar 4.3 Pemodelan Semi-Submersible dengan Sistem <i>Mooring</i> dan <i>Steel Catenary Riser</i>	47
Gambar 4.4 Konfigurasi Statis Steel Catenary Riser	49
Gambar 4.5 Perbandingan Konfigurasi Statis Steel Catenary Riser	49
Gambar 4.6 Steel Catenary Riser model 3D Solidworks 2013.....	50
Gambar 4.7 Hang-Off Location Model 3D Solidworks 2013.....	51
Gambar 4.8 Middle Sagbend Model 3D Solidworks 2013	51
Gambar 4.9 Touchdown Point to PLEM/Subsea Manifold Model 3D	

<i>Solidworks 2013</i>	51
Gambar 4.10 Profil Gelombang	51
Gambar 4.11 <i>Input</i> Profil Gelombang	53
Gambar 4.12 Arah Gelombang dan Sistem Tambat.....	53
Gambar 4.13 Grafik <i>Effective Tension</i> Akibat Beban Gabungan	55
Gambar 4.14 <i>Grafik Effective Tension</i> Akibat <i>1st Order</i>	56
Gambar 4.15 Grafik <i>Effective Tension</i> Akibat <i>2nd Order</i>	56
Gambar 4.16 <i>Grafik Effective Tension</i> Akibat <i>VIV</i>	57
Gambar 4.17 Grafik <i>Effective Tension</i> Gabungan arah 90°	57
Gambar 4.18 Grafik <i>Effective Tension</i> akibat <i>1st Order</i> arah 90°	58
Gambar 4.19 Grafik <i>Effective Tension</i> akibat <i>2nd Order</i> arah 90°	58
Gambar 4.20 Grafik <i>Effective Tension</i> Akibat <i>VIV</i> arah 0°	59
Gambar 4.21 Grafik <i>Effective Tension</i> rata-rata sepanjang <i>arc length</i>	60
Gambar 4.22 Grafik <i>Bend Moment</i> rata-rata sepanjang <i>arc length</i>	60
Gambar 4.23 Grafik <i>Nominal Stress</i> rata-rata sepanjang <i>arc length</i>	61
Gambar 4.24 Grafik <i>Nominal Stress Time History</i> Arah 0°	63
Gambar 4.25 Grafik <i>Nominal Stress Time History</i> Arah 45°	63
Gambar 4.26 Grafik <i>Nominal Stress Time History</i> Arah 90°	64
Gambar 4.27 Grafik <i>Nominal Stress Time History</i> Arah 135°	64
Gambar 4.28 Grafik <i>Nominal Stress Time History</i> Arah 180°	65
Gambar 4.29 <i>Input Stress Time History Matlab 2017</i>	66

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN A Perhitungan nominal stress	75
LAMPIRAN B Rentang Tegangan dan Jumlah Siklus	81
LAMPIRAN C Angka Probabilitas Kejadian	83

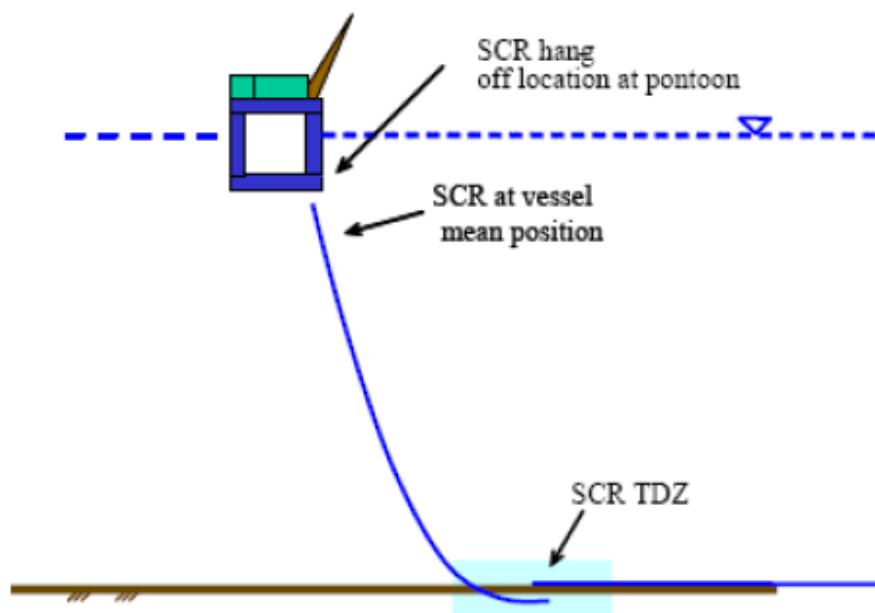
BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Industri Minyak dan gas (migas) lepas pantai selalu berkembang tiap tahunnya dan salah satu tantangan dalam industri ini adalah eksplorasi dan eksploitasi laut dalam. Beberapa tahun terakhir, aktivitas eksplorasi dan eksploitasi laut dalam meningkat drastis dan ladang-ladang baru mulai ditemukan. Pada laut dalam, kegiatan eksplorasi dan eksploitasi membutuhkan jenis infrastruktur yang berbeda dari infrastruktur pada laut dangkal, salah satunya adalah riser (Gilang, 2012).

Riser sangat dibutuhkan untuk mentransport gas atau crude oil dari fasilitas subsea ke offshore platform (Agusta, 2012). Salah satu konsep riser yang digunakan untuk laut dalam adalah Steel Catenary Riser (SCR) (Keprate, 2009).



Gambar 1.1 Steel Catenary Riser (Gilang, 2012)

Steel Catenary Riser (SCR) adalah riser berkonfigurasi *catenary* yang terbuat dari pipa baja (*steel pipe*). Penggunaan material baja ini membuat

biaya SCR lebih ekonomis dari *flexible riser* dan *hybrid riser* dan pipa baja relatif ringan sehingga dapat mengurangi beban angkut *floater* (Howells, 1995). Penggunaan diameter besar diizinkan dalam konsep SCR, yang mana sesuai untuk laut dalam yang memiliki karakteristik *High Pressure and High Temperature* (HPHT). Namun, beberapa studi menunjukkan bahwa performa dinamis SCR terbatas.

Kelelahan struktur atau *Fatigue* yang terjadi pada *Steel Catenary Riser* bisa disebakan oleh *motion* dari *Floating Unit* yang terhubung dengan *riser* dan *Vortex-Induced Vibration* (Martins, 1999). *Riser* yang terbentang dari dasar laut sampai ke fasilitas di atas air akan mendapatkan gaya hidrodinamis yang bersifat siklik. Gaya hidrodinamis yang bekerja pada *riser* diantaranya adalah gaya gelombang dan gaya arus. Gaya yang bekerja terus menerus pada *riser* akan mengakibatkan suatu kelelahan yang menyebabkan kegagalan *fatigue*. *Fatigue* dapat menyebabkan dinding *riser* rusak dan retak sehingga *riser* tidak dapat berfungsi sebagaimana mestinya. (Rumingkang, 2017).

Oleh karena itu, dibutuhkan suatu analisis untuk melihat kekuatan *riser* dalam menahan beban siklik yang terjadi. *Output* dari analisis ini adalah mendapatkan umur *fatigue* dari *riser*. Umur *fatigue* adalah waktu yang dibutuhkan hingga terjadi retak yang menembus dinding *riser*. Umur *fatigue* dari *riser* haruslah memenuhi masa layan yang diinginkan agar *riser* dapat berfungsi dengan baik.

1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan yang akan dikaji dalam tugas akhir ini adalah :

1. Bagaimana pengaruh *1st Order Wave Loads*, *2nd Order Wave Drift* dan *VIV* terhadap *Effective Tension* dan *Bend Moment Steel Catenary Riser*?
2. Berapa nilai *Nominal Stress* terbesar yang diterima oleh *Steel Catenary Riser*?
3. Berapa umur kelelahan pada *Steel Catenary Riser*?

1.3 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui pengaruh *1st Order Wave Loads*, *2nd Order Wave Drift* dan *Vortex Induced Vibration* terhadap *Effective Tension* dan *Bend Moment* Steel Catenary Riser
2. Mendapatkan nilai tegangan nominal terbesar pada *Steel Catenary Riser*
3. Mengetahui umur *fatigue* dari *Steel Catenary Riser*

1.4 Manfaat

Manfaat penggerjaan tugas akhir ini adalah didapat pemahaman mengenai cara menentukan umur kelelahan dari *Steel Catenary Riser*. Selain itu dapat diketahui pengaruh *vortex-induced vibration*, kedalaman, *offset* dan pergerakan *floater* terhadap tegangan yang terjadi pada *steel catenary riser*.

1.5 Batasan Masalah

Untuk menghindari pembahasan diluar topik yang akan dikaji, maka dilakukan pembatasan masalah dengan asumsi-asumsi sebagai berikut :

1. Analisis *riser* mengacu pada DNV OS F201 “*Dynamic Riser*”.
2. Analisis *fatigue* pada *riser* yang dilakukan mengacu pada DNV RP F204 “*Riser Fatigue*” dan DNV RP C203 “*Fatigue Design of Steel Structure*”.
3. *Floater* yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah *Semi-Submersible* “*Essar Wildcat*”, dan disimulasikan dalam kondisi *moored*.
4. Peralatan dan perlengkapan di atas *semi-submersible* tidak dimodelkan.

5. Arah pembebanan gelombang ditinjau dari arah 0° , 45° , 90° , 135° , 180° .
6. Pemodelan *semi-submersible* menggunakan *software Maxsurf* dan *MOSES 7.0*.
7. Pemodelan sistem *riser* untuk mendapatkan nilai *tension* dan *moment* yang terjadi akibat *floater* dan VIV dilakukan menggunakan *software Orcaflex 9.2*.
8. Simulasi dengan *software Orcaflex 9.2* dengan mempertimbangkan *1st Order Wave Loads*, *2nd Order Wave Drift* dan *Vortex Induced Vibration* yang terjadi dan disimulasikan selama 10800s. VIV yang digunakan dalam simulasi menggunakan faktor Iwan-Blevins Wake Oscillator.
9. *Fatigue damage* hanya dianalisa pada titik *arch length* yang memiliki tegangan nominal rata-rata terbesar.
10. Nilai Rentang Tegangan dan Siklus yang terjadi ditentukan dengan menggunakan metode *rainflow counting* yang dibantu dengan *software MATLAB 2017b*.
11. Perhitungan *fatigue damage* dan umur fatigue dilakukan menggunakan aturan Miner-Palmgren.
12. Kondisi dasar laut diasumsikan datar.

1.6 Sistematika Penulisan

Pada BAB I Pendahuluan diterangkan berbagai hal yang dapat menyangkut penelitian yang dilakukan yakni :

1. Hal-hal yang melatar belakangi dilakukannya penelitian.
2. Permasalahan yang ingin diselesaikan dengan mengerjakan penelitian.
3. Tujuan yang digunakan untuk menjawab permasalahan yang diangkat.
4. Manfaat yang diperoleh dari dilakukannya penelitian.
5. Hal-hal yang menjadi batasan dalam pengerjaan penelitian.
6. Penjelasan dari sistematika laporan yang digunakan dalam penelitian.

BAB II Tinjauan Pustaka dan Dasar Teori berisi tinjauan pustaka yang dijadikan acuan dalam penggerjaan penelitian ini.

BAB III Metodologi Penelitian menerangkan tentang metode yang dipergunakan dalam mengerjakan penelitian ini.

BAB IV Analisa data dan pembahasan, membahas dari analisa yang telah dilakukan pada penelitian, meliputi analisa hasil, dan pembahasan hasil analisa

BAB III Kesimpulan dan saran, berisi tentang kesimpulan setelah dilakukan analisa dan saran serta rekomendasi dari hasil penggerjaan tugas akhir

Daftar Pustaka menampilkan seluruh informasi dan dokumen tertulis yang dijadikan landasan dan pengembangan penelitian

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Beberapa tahun terakhir, pemilihan konsep riser untuk eksploitasi minyak dan gas di laut dalam telah menjadi perhatian utama dalam industri minyak dan gas (Souza et al,2008). Keprate (2009) dalam penelitiannya, menjelaskan bahwa konsep riser yang sering digunakan untuk laut dalam yaitu :

1. Free hanging flexible riser
2. *Steel Catenary Riser*
3. Hybrid riser tower

Dari ketiga *riser* tersebut, menurut Howells (1995) dalam penelitiannya, menyatakan bahwa *Steel Catenary Riser* (SCR) merupakan konsep *riser* yang tepat untuk digunakan di laut dalam, karena *riser* tersebut menggunakan material baja sehingga lebih ekonomis dan mengurangi beban angkut *floater* karena relatif lebih ringan.

Salah satu kelemahan SCR adalah rentannya terhadap perilaku dinamis dari *floater*. Buberg (2014) dalam penelitiannya menyatakan bahwa gerakan *heave* dan *surge* yang signifikan dapat mengakibatkan momen lentur yang besar pada panjang bentang *riser*, terutama pada bagian *Touch Down Point* (TDP). Agusta (2012) dalam tugas akhirnya juga menyatakan bahwa jika riser terlalu jauh dari TDP akan menyebabkan gaya tarik yang besar, dan jika riser terlalu dekat dengan TDP akan menyebabkan momen lentur yang besar pula.

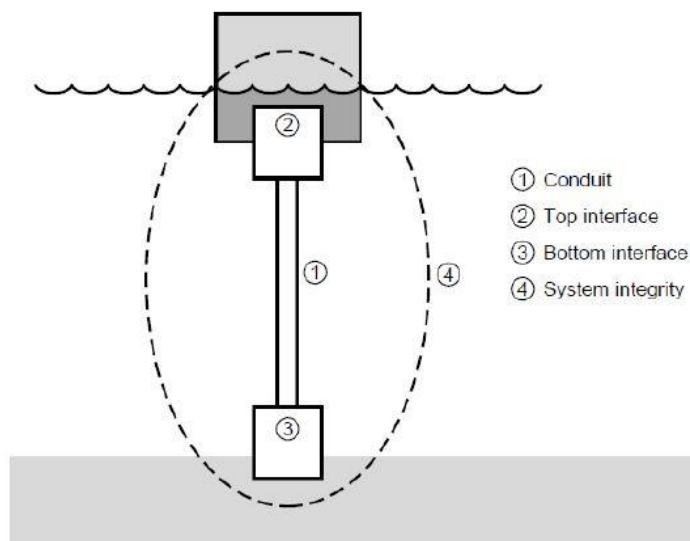
Maka dari itu, untuk mengetahui gaya tarik efektif dan momen lentur maksimal harus dilakukan analisis global pada *riser*. Beberapa orang telah melakukan penelitian tentang analisis global pada riser diantaranya, Erestio (2016) Ruswandi (2009), Agusta (2012 dan 2014), Nurwanto (2012), Buberg (2014) dan Keprate (2014).

2.1.1 Riser

Riser merupakan bagian paling penting dalam sebuah kegiatan produksi, pengeboran dan eksport/import minyak dan gas di lepas pantai. Tugas utama riser adalah untuk mentransportasi fluida dari dasar laut sampai ke host platform.

Menurut *American Petroleum Institute* (API), elemen-elemen yang terdapat dalam sistem riser antara lain sebagai berikut (API, 1998) Gambar 2.1 :

- *Riser body* : pipa metal dan pipa fleksibel
- *Top interface*
- *Bottom interface*



Gambar 2.1 Sistem Integritas pada *Riser* (API RP 2RD, 1998)

Conduit/riser body adalah komponen yang mentransport fluida/gas, konfigurasinya dapat berbeda-beda tergantung kedalaman laut, kondisi lingkungan dan fluida/gas yang ditransport. *Top interface* adalah fasilitas yang berada di permukaan, bisa berupa fixed platform atau FPU. *Bottom interface* merupakan fasilitas-fasilitas yang berada pada dasar laut.

Menurut Yong Bai (2005),*riser* memiliki beberapa fungsi dalam industri minyak dan gas :

1. Drilling riser – riser ini digunakan untuk mengebor sumur

2. Production riser – digunakan untuk mengalirkan minyak/gas dari sumur ke platform
3. Workover riser – digunakan dalam operasi sumur atau *maintenance* sumur
4. Export riser – digunakan untuk mentransport minyak/gas yang sudah di proses ke tanker

Sebuah sistem *riser* berfungsi sebagai penghubung antara struktur statik pada bagian dasar laut melalui *bottom interface* dan struktur yang bergerak melalui *top interface*.

Nyatanya, pada suatu ladang minyak atau gas tidak hanya terdapat satu riser saja, melainkan banyak *riser body* dan *interface*. Hal ini disebabkan karena pada suatu reservoir memungkinkan adanya perbedaan tekanan dan jenis fluida. Kondisi batimetri tiap sumur juga dapat berbeda. Hal ini menyebabkan perbedaan desain suatu *riser* dalam sebuah sistem *riser*.

Perbedaan desain riser dapat disebabkan hal-hal sebagai berikut :

- Kedalaman perairan

Dalamnya perairan sangat mempengaruhi berat *riser*. Semakin dalam perairan, semakin berat juga fluida yang ditransportasi maka riser akan semakin berat. Hal ini menyebabkan tegangan pada riser sehingga akan menambah beban pada *floater*. Diameter besar juga dibutuhkan pada perairan yang dalam guna menahan tekanan hidrostatik yang tinggi.

- Pergerakan *floater*

Pergerakan *floater* mempengaruhi beban riser dengan merubah departure angle dari riser sehingga merubah panjang bentang riser. Hal ini dapat menambah atau mengurangi berat riser yang terbentang sehingga mempercepatkan kerusakan riser akibat fatigue.

- Perubahan komposisi fluida saat operasi

Jenis fluida yang terkandung pada reservoir merupakan salah satu penentu dalam mendesain sebuah sistem riser. Jenis fluida yang ditransportasi oleh sebuah riser dapat berbeda-beda selama operasi dikarenakan kandungan reservoir yang beragam. Hal ini bisa menyebabkan perubahan diameter pipa untuk memastikan fluida mengalir dengan baik.

- Perbedaan tekanan internal

Dalam satu field, dapat terjadi perbedaan tekanan internal pada well yang ada. Ladanggas dan minyak yang membutuhkan tekanan yang tinggi akan membutuhkan tebal pipa yang lebih tinggi. Penambahan tebal pipa ini akan berakibat pada penambahan berat riser dan gaya tarik yang dibebankan pada *floater*.

Perilaku dinamis dari *floater* di permukaan merupakan tantangan utama dalam mendesain sistem riser. Maka dari itu sistem riser dapat dikategorikan berdasarkan kemampuan dari riser dalam menanggasi pergerakan *floater* (DNV,2010) :

- Top Tensioned Riser (TTRs)
- Compliant riser

Hybrid riser merupakan gabungan dari kedua riser di atas.

2.1.2 Jenis Riser

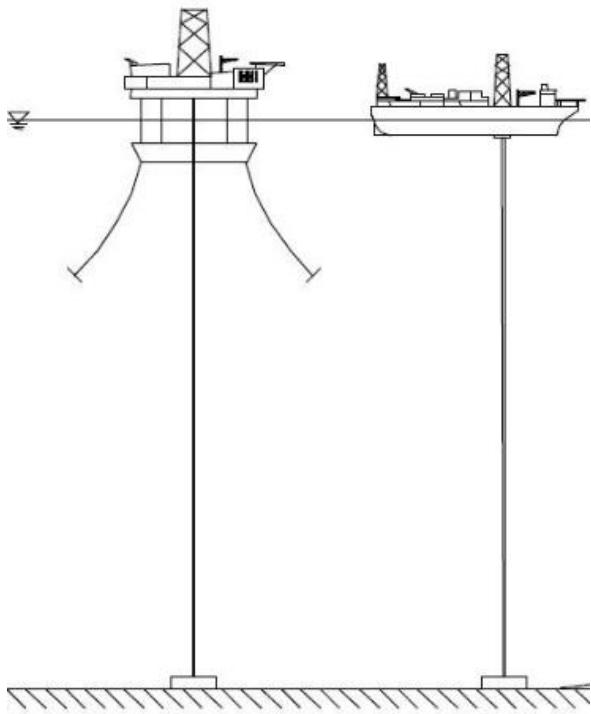
2.1.2.1 Top Tensioned Riser

Top tensioned riser (TTRs) membutuhkan platform dengan respon gerakan heave yang kecil seperti SPAR atau TLP.TTRs dilengkapi dengan *tensioning system* yang berfungsi untuk menahan gerakan vertikal yang diperbolehkan.Secara umum, TTRs dapat digunakan untuk mengebor, produksi, eksport dan import.

Gambar 2.2

TTRs terdiri dari :

- Riser joint
- Blow Out Preventer
- Tensioning System
- Guides
- Keel joint
- Stress joint and tieback connector
- Strakes



Gambar 2.2 Top Tensioned Riser (DNV, 2010)

Pada laut dalam, TTRs dihadapi oleh masalah yaitu tegangan pada riser akan meningkat, yang mana akan berdampak pada penambahan ukuran *tensioning system* dan *bouyancy can*. Penambahan ukuran ini biasanya membuat konfigurasi TTRs menjadi tidak maksimal dan biaya tidak ekonomis.

2.1.2.2 Compliant Riser

Compliant riser merupakan tipe *riser* laut dalam yang paling banyak digunakan. *Riser* tipe ini banyak digunakan karena dapat mengakomodir radius kurvatur yang tinggi dan pergerakan dinamis pada *floater*. *Riser* ini juga mudah untuk diinstalasi dan dapat digunakan kembali. Konfigurasi compliant riser adalah sebagai berikut :

- *Free Hanging*

Free hanging merupakan konfigurasi *flexible pipe* paling sederhana. Konfigurasi mudah untuk diinstalasi. Namun, konfigurasi ini sangat rentan terhadap pergerakan *floater* dan gaya tarik akibat besarnya berat pipa yang terbentang. Seperti pada Gambar 2.3

- *Lazy S* dan *Steep S*

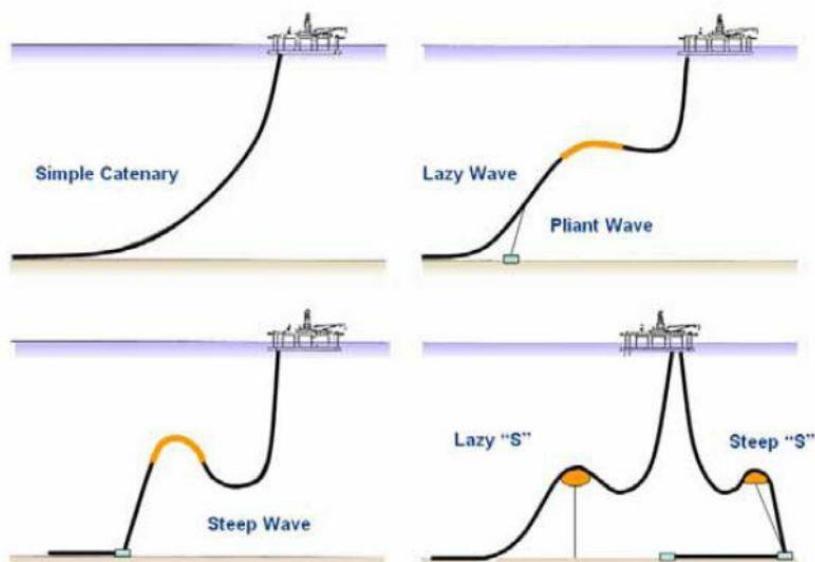
Tipe konfigurasi *riser* *Lazy S* dan *Steep S* dibentuk dengan menambah *buoy* baik terpasang permanen pada pipa (*fixed buoy*) ataupun dengan menggunakan rantai (*buoyant buoy*). Penambahan *buoy* ini mengurangi permasalahan kurvatur dan gaya tarik pada TDP yang disebabkan oleh pergerakan *floater*. Gaya tarik pada *riser* juga dapat berkurang dikarenakan berkurangnya berat pipa yang terbentang.

- *Lazy Wave* dan *Steep Wave*

Konfigurasi menambahkan beberapa *buoy* secara berdekatan dalam panjang tertentu. Kelebihan bentuk *wave* adalah kemudahan dalam mendistribusikan berat dan bentuk *riser* yang diinginkan.

- *Pliant Wave*

Pliant wave merupakan konfigurasi *riser* yang menambahkan *anchor* pada sistem *wave*. *Anchor* ini dihubungkan untuk mengurangi perubahan gaya pada TDP dengan mengkombinasikan *anchor* dengan konfigurasi *lazy wave*.



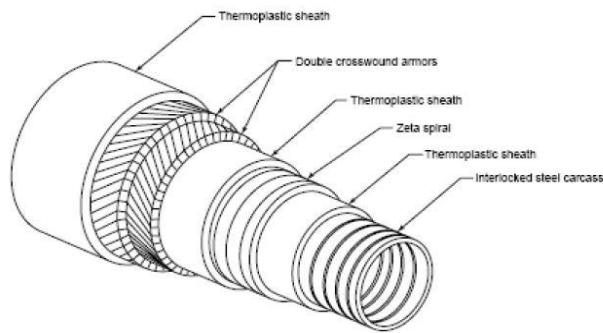
Gambar 2.3 Konfigurasi pada *compliant riser* (Jayeoung Lee, 2007)

Untuk pemilihan material, *compliant riser* dapat menggunakan material :

- *Rigid riser*
- *Flexible riser*

Rigid riser merupakan pipa yang terbuat baja. *Material grades* yang biasanya digunakan adalah X60, X65 atau X70. Titanium merupakan solusi alternatif dari pipa baja karena lebih fleksibel dari baja, yield stress yang lebih tinggi, dan lebih ringan.

Flexible riser terbuat dari beberapa baja dan lapisan komposit untuk meningkatkan fleksibilitas. Jenis ini yang paling sering digunakan untuk aplikasi *riser* di dunia seperti pada Gambar 2.4

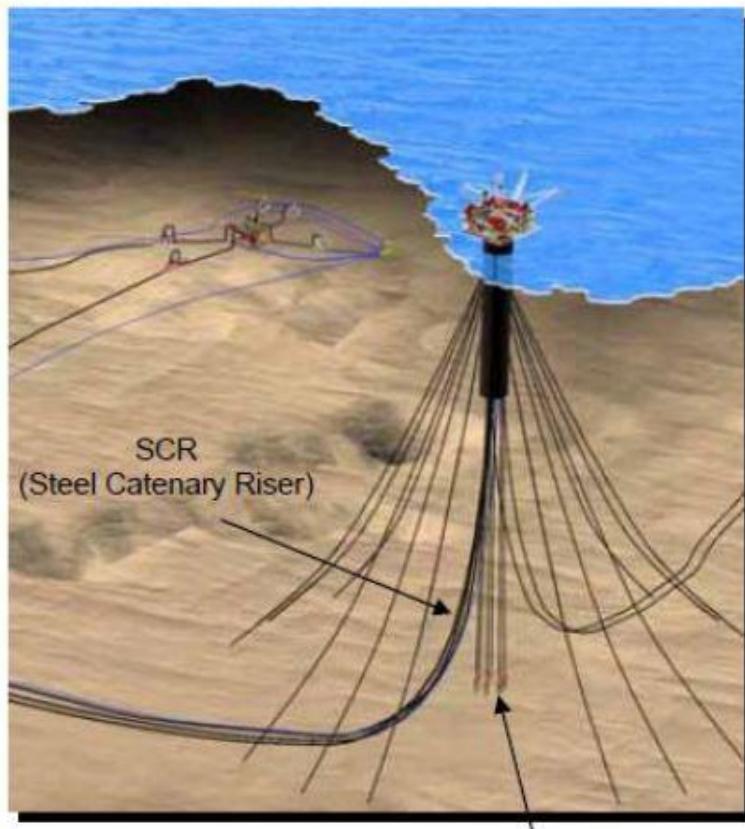


Gambar 2.4 Struktur lapisan pada *flexible riser* (Ruswandi, 2009)

2.1.3 Steel Catenary Riser

Steel Catenary Riser (SCR) merupakan *riser* dengan konfigurasi *free hanging* yang material pipanya terbuat dari baja. Disebut *catenary* dikarenakan konfigurasi *free hanging* pada SCR berbentuk seperti *catenary* seperti pada Gambar 2.5. SCR pertama kali dipasang pada Shell's Auger , *Tension Leg Platfrom* pada tahun 1994 dengan kedalaman 872 meter.

SCR dapat dikatakan *riser* yang ekonomis dari segi instalasi dan konstruksi, dan jika dibandingkan dengan *flexible riser*, SCR lebih mudah dan murah diproduksi untuk pipa yang lebih panjang atau diameter besar. Dalam hal material, SCR dapat menahan tekanan dan temperatur yang tinggi.



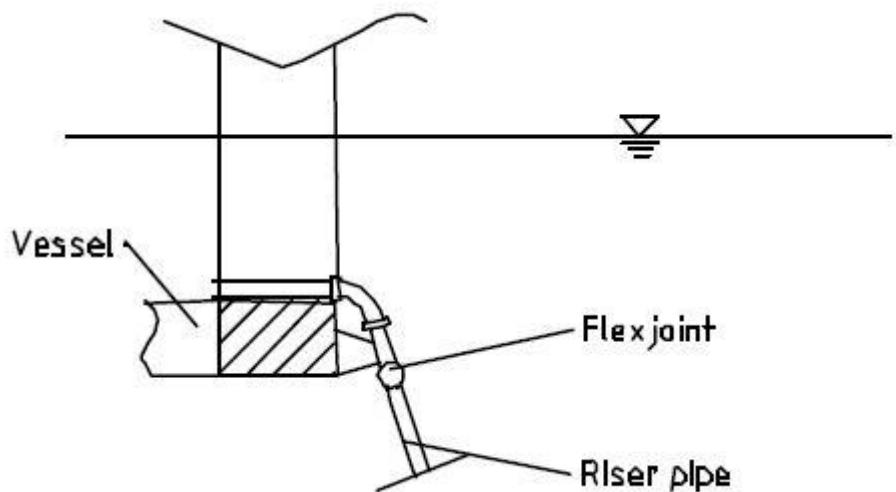
Gambar 2.5 Steel Catenary Riser (Jaeyoung Lee, 2007)

Permasalahan yang biasanya dihadapi SCR adalah sensivitasnya terhadap pergerakan *floater*. Pergerakan *floater* yang signifikan dapat menyebabkan perubahan kurvatur yang besar pada bagian *touch down point*.

Gaya eksternal dan beban secara konstan mempengaruhi riser, sehingga mengganggu stabilitas riser. Maka dari itu, beberapa komponen telah dikembangkan agar riser dapat menjaga stabilitasnya.

- *Flex joint*

Flex joint digunakan untuk mengurangi bending moment pada bagian atas SCR (Ruswandi, 2009). Komponen ini terdiri dari lapisan-lapisan elastomeric dan metal, yang dapat memungkinkan defleksi angular pada bagian sambungan atas riser seperti pada Gambar 2.6. Untuk aplikasi laut dalam, desain flexjoint harus mempertimbangkan pengaruh gaya tarik bagian atas (Bai, 2005).



Gambar 2.6 Flexjoint terhubung pada floater (DNV,2010)

- Stress joint

Stress joint digunakan untuk mempermudah transisi antara bagian pipa yang kaku dengan pipa yang tidak terlalu kaku. Membantu mengurangi *local bending stress* dan memberikan fleksibilitas pada ujung akhir riser.

- VIV-strakes

Kecepatan arus yang tinggi pada laut dalam menimbulkan vortex-induced vibrations dan untuk mengurangi fatigue akibat VIV maka digunakanlah VIV-strakes.

2.1.4 Semi-submersible

Semi-submersible merupakan sebuah struktur terapung yang tersusun dari sebuah dek, sejumlah kolom dan pontoon, serta dapat digunakan dari kedalaman 80 – 3000 m. Struktur ini adalah struktur yang “*column stabilized*”, yang berarti bahwa titik pusat gravitasi (*center of gravity*) berada di atas titik pusat pengapungan (*center of buoyancy*) dan stabilitasnya ditentukan oleh momen pengembali dari kolom-kolom *semi-submersible* tersebut (Herwanzah, 2015) seperti pada Gambar 2.7. Struktur lambung yang terendam pada *draft* yang tinggi membuat *semi-submersible* tidak terlalu terpengaruh oleh beban gelombang dibanding dengan kapal. Selain itu, *water plane area* yang kecil membuat *semi-submersible* sensitif terhadap perubahan atau perpindahan beban.



Gambar 2.7 Semi-submersible

Semi-submersibles etidaknya memiliki dua kondisi pengapungan, setengah tenggelam atau *semi-submerged* (mengapung dengan kolomnya) dan mengapung dengan pontonnya. Ponton dari *semi-submersible* diisi sebagian besar dengan *ballast* pada saat kondisi setengah tenggelam. Selain itu, ukuran dari struktur *semi-submersible* yang terendam, proporsi dan jarak antar kolom dan ponton adalah merupakan faktor utama dari performa hidrodinamis *semi-submersible*.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Gaya yang Menyebabkan Kerusakan *Fatigue*

Mengacu pada DNV OSS 302 “Offshore Riser System”, gaya – gaya yang dipertimbangkan dalam analisis sistem *riser* diantaranya adalah:

- a. *Functional loading* seperti berat *riser* itu sendiri, *bouyancy*, dan tekanan yang diberikan pada *riser*
- b. Gaya Arus pada *riser*
- c. Gaya gelombang pada *riser*
- d. Gaya hidro dinamika pada *moonpool* (untuk SPAR)
- e. Gaya akibat pergerakan struktur terapung

Selama masa operasinya, *riser* tentunya akan mendapatkan beban yang terjadi secara berulang atau siklik yang memicu kelelahan atau *fatigue*. Pada umumnya, gaya yang paling berperan dalam terjadinya kegagalan *fatigue* adalah gaya lingkungan berupa gelombang dan arus. Dalam DNV RP F204 “Riser Fatigue” disebutkan bahwa evaluasi *vortex induced vibration* (VIV) lebih

diperlukan untuk *riser* dengan tipe *top tensioned riser* dan *Steel Catenary Riser*. Gaya yang menyebabkan kerusakan *fatigue* akan dijelaskan pada subbab selanjutnya.

2.2.2 Gelombang

2.2.2.1 Gelombang Reguler

Gelombang reguler merupakan gelombang yang memiliki tinggi dan periode yang teratur. Terdapat 2 (dua) teori yang mendefinisikan gelombang reguler, yaitu teori gelombang linier dan teori gelombang non-linier.

a. Teori Gelombang linier (Airy)

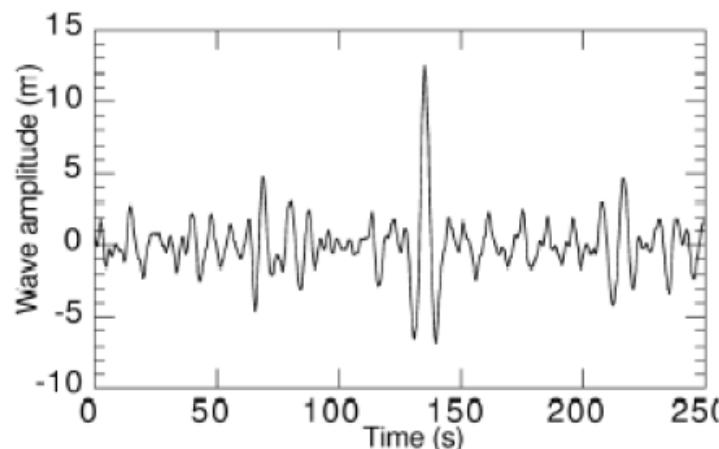
Gelombang linier (*Airy*) dapat didefinisikan sebagai gelombang orde pertama dengan bentuk sinusoidal. Asumsi yang digunakan pada teori gelombang ini adalah bahwa tinggi gelombang jauh lebih kecil dibanding panjang gelombang.

b. Teori Gelombang non-liner (Stokes)

Untuk mendapatkan ketelitian yang lebih baik dalam kecuraman muka gelombang, H/L (H : tinggi gelombang, L : panjang gelombang), Stokes (1847) mengembangkan teori gelombang *Airy* dengan melanjutkan analisis sampai orde ke-3 dan dapat digunakan di laut transisi maupun laut dalam.

2.2.2.2 Gelombang Acak

Dalam kondisi nyata di laut, gelombang yang terjadi adalah gelombang acak yang tidak berbentuk sinusoidal konstan seperti pada kondisi ideal yang dinyatakan dalam teori gelombang reguler. Ilustrasi gelombang acak dapat dilihat pada Gambar 2.8



Gambar 2.8 Ilustrasi Gelombang Acak

Gelombang acak memiliki panjang, tinggi dan perioda yang sangat beragam dan tidak tetap sepanjang waktu sehingga tidak dapat dilakukan perhitungan seperti pada perhitungan gelombang linier. Untuk itu untuk gelombang acak terdapat metode penyederhanaan yang dikenal dengan spektrum gelombang acak. Dalam spektrum gelombang diperlihatkan distribusi dari energi gelombang dengan besar frekuensi gelombang yang berbeda-beda.

2.2.2.3 Spektrum Gelombang

Teori gelombang reguler dapat diaplikasikan pada saat desain metode *single wave* di gunakan. Ini tergantung dari metode yang digunakan pada saat proses pendesainan. Pada gelombang acak, ini di deskripsikan dengan densitas spektrum energi. Spektrum energi gelombang mendeskripsikan energi yang terkandung dari gelombang dan itu didistribusikan keseluruh jangkauan frekuensi pada gelombang acak. Oleh karena itu. Metode gelombang acak mungkin berguna khususnya pada tahap perencanaan bangunan terapung. Pemilihan spektrum energi gelombang didasarkan pada kondisi real laut yang ditinjau. Bila tidak ada maka dapat digunakan model spektrum yang dikeluarkan oleh berbagai institusi dengan mempertimbangkan kesamaan fisik lingkungan.

Spektrum gelombang yang dipakai dalam tugas akhir ini adalah spektrum JONSWAP. Persamaan spektrum JONSWAP merupakan modifikasi dari persamaan spektrum Pierson-Morkowitz yang disesuaikan dengan kondisi laut yang ada (Djatmiko,2012) Persamaan spektrum JONSWAP dapat ditulis sebagai berikut :

$$S_j(\omega) = A_\gamma S_{PM}(\omega) \gamma \exp\left(-0.5 \left(\exp\left(\frac{\omega - \omega_p}{\sigma \omega_p}\right)^2 \right)\right) \quad (2.1)$$

dengan,

S_{PM} = Spektrum *Pierson-Moskowitz*

$$= \frac{5}{16} Hs^2 \omega_p^4 \omega^{-5} \cdot \exp\left(\frac{-5}{4} \left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{-4}\right) \quad (2.2)$$

- H_s = tinggi gelombang signifikan
 ω_p = $2\pi/T_p$ (*angular spectral peak frequency*)
 γ = Non-dimensional parameter bentuk puncak (*peakness parameter*)
= 2.0 – 2.5 untuk perairan indonesia
 σ = *spectral width parameter*
 $\sigma = 0.07$ untuk $\omega \leq \omega_p$
 $\sigma = 0.09$ untuk $\omega > \omega_p$
 A_γ = $1 - 0.287 \ln(\gamma)$ adalah *normalizing factor*

2.2.3 Arus

Arus adalah gerakan massa air laut yang berpindah dari satu tempat ke tempat lain. Arus merupakan salah satu komponen beban lingkungan yang diperhitungkan dalam analisis *fatigue* pada *riser*. Arus relatif memiliki pergerakan yang konstan jika dibandingkan dengan gelombang. Arus di permukaan laut terutama disebabkan oleh tiupan angin, sedangkan arus di kedalaman laut disebabkan oleh perbedaan densitas massa air laut. Selain itu, arus di permukaan laut dapat juga disebabkan oleh gerakan pasang surut air laut atau gelombang. Secara umum, persamaan untuk menghitung besar gaya akibat arus dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$F_a = \frac{1}{2} \rho C_d A u^2 \quad (2.3)$$

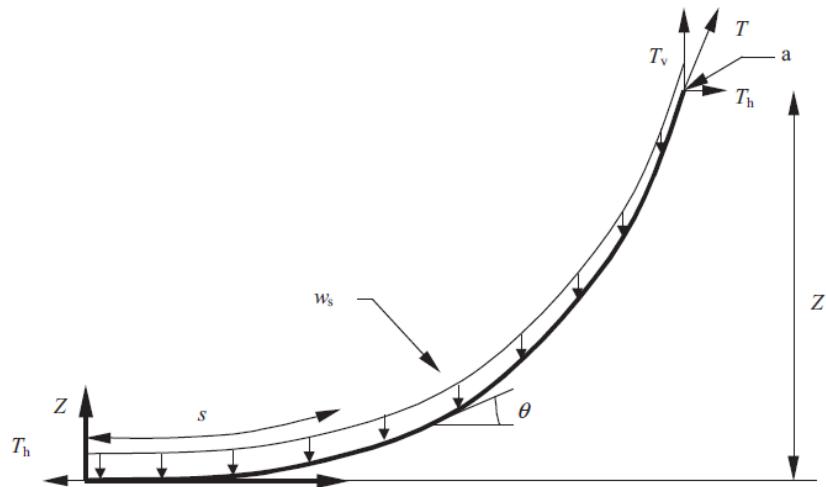
Keterangan:

- F_a : Gaya arus per satuan panjang
 ρ : Massa jenis air
 C_d : Koefisien *drag*
 A : Luas proyeksi penampang struktur
 u : Kecepatan partikel air, tegak lurus terhadap struktur

2.2.4 Tension pada *Steel Catenary Riser*

Perhitungan *tension* pada *riser* menggunakan persamaan yang terdapat pada , Jaeyoung Lee, “*Introduction to Offshore Pipelines and Risers*” (2008) dan untuk

compression adalah *tension* yang bernilai negatif dan dapat diilustrasikan seperti Gambar 2.9



Gambar 2.9 Model Catenary (Bai, 2014)

Persamaan catenary adalah:

$$Z = a \cosh\left(\frac{x}{a}\right) \quad (2.4)$$

dimana,

$$a = \frac{Th}{ws} \quad (2.5)$$

Gaya tarik horizontal pipa adalah konstan sepanjang kedalaman air. Persamaan di atas dapat dikonversi untuk mendapatkan konfigurasi statis *Steel Catenary Riser*:

Top Tension

$$T = Th + ws Z = Ts \sin \theta + ws Z = \frac{ws Z}{1 - \sin \theta} \quad (2.6)$$

Bottom Tension

$$Th = Ts \sin \theta \quad (2.7)$$

Panjang bentang riser hingga TDP

$$S = Z \sqrt{1 + 2 \frac{a}{Z}} \quad (2.8)$$

Jarak horizontal dari floater ke TDP

$$X = a \sinh^{-1} \left(\frac{S}{a} \right) \quad (2.9)$$

Keterangan:

T	= Top Tension	(kN)
T_H	= Gaya horizontal pada SCR dan gaya tarik pada TDP	(kN)
T_v	= Gaya vertikal pada SCR	(kN)
W_s	= Massa pipa SCR per unit panjang	(kg/m)
S	= Panjang bentang bebas SCR	(m)
Y	= Jarak vertikal SCR dari dasar laut	(m)
x	= Jarak horizontal TDP dari <i>floater</i>	(m)
θ	= Sudut datang SCR dari <i>floater</i>	
a	= <i>catenary constant</i>	

2.2.5 Gaya Tarik Efektif (*Effective Tension*)

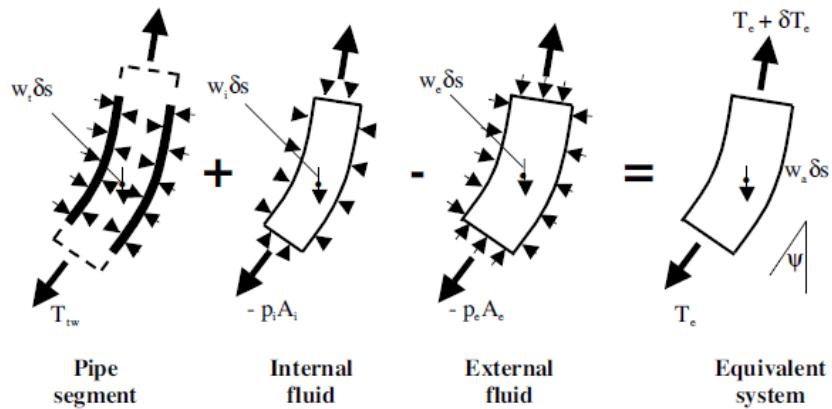
Gaya tarik efektif (*effective tension*), adalah gaya axial dinding pipa yang dipengaruhi oleh tekanan internal dan eksternal.

Dari gambar dapat diperoleh persamaan (2.10) untuk menghitung gaya tarik efektif dari *riser*. Penjelasan seperti pada Gambar 2.10

$$T_e = T_{tw} + (-p_i A_i) - (-p_e A_e) \quad (2.10)$$

dimana,

T_{tw}	= tension dinding pipa (tension axial)
P_i	= tekanan internal fluida
A_i	= luas penampang internal
P_e	= tekanan eksternal
A_e	= luas penampang eksternal



Gambar 2.10 Kesetimbangan pipa ketika dikenai fluida (Sparks, 2007)

2.2.6 Momen Lentur

Menurut penilitian Agusta (2012), persamaan momen lentur untuk SCR diturunkan dari persamaan kurvatur untuk sistem non-linear (mempunyai defleksi yang besar). Persamaan tersebut adalah sebagai berikut :

$$K = \frac{\frac{d^2 z}{dx^2}}{\left[1 + \left(\frac{dz}{dx}\right)^2\right]^{1.5}} \quad (2.11)$$

Nilai *bending moment* didapatkan menggunakan persamaan berikut :

$$M = -\kappa EI = -\frac{m_s g}{T_H \left[\cosh \left(\frac{m_s g x}{T_H} \right) \right]^2} EI \quad (2.12)$$

dengan,

M = *Bending moment* (kN.m)

I = Momen Inersia (m^4)

T_H = Gaya horizontal SCR dan *tension* TDP (kN)

E = Modulus Elastisitas (MPa)

m_s = massa pipa per satuan panjang (kg/m)

2.2.7 Teori Dasar Gerak Bangunan Apung

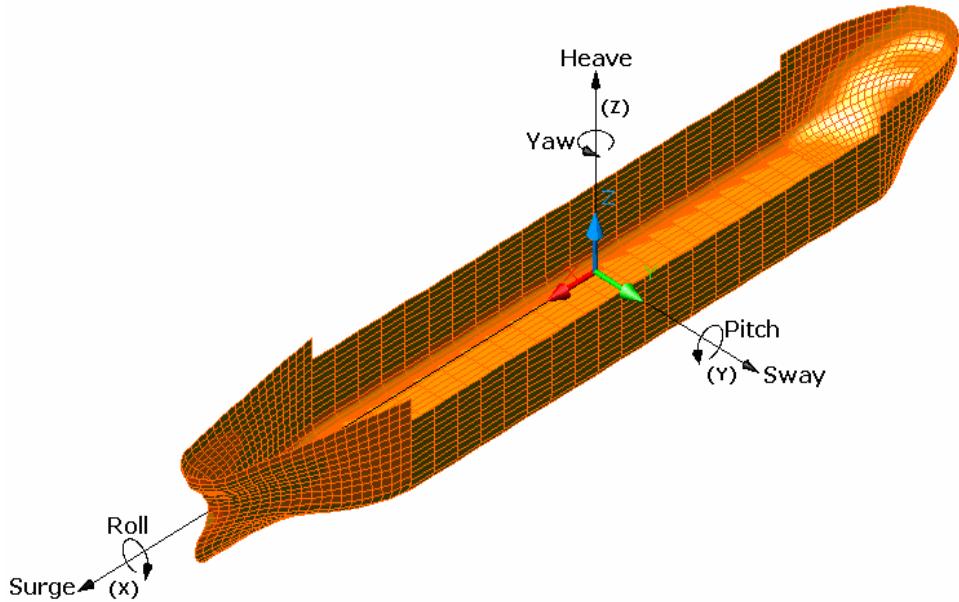
Pada dasarnya benda yang mengapung mempunyai 6 mode gerakan bebas yang terbagi menjadi dua kelompok, yaitu 3 mode gerakan translasional dan 3 mode gerakan rotasional. Berikut adalah keenam mode gerakan tersebut :

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

Definisi gerakan bangunan laut dalam enam derajat kebebasan dapat dijelaskan dengan gambar. 2.4. Dengan memakai konversi sumbu tangan kanan tiga gerakan translasi pada arah sumbu x,y dan z, adalah masing-masing surge (ζ_1), sway (ζ_2) dan heave (ζ_3), sedangkan untuk gerakan rotasi terhadap ketiga sumbu adalah roll (ζ_4), pitch (ζ_5) dan yaw (ζ_6).

Dengan asumsi bahwa gerakan-gerakan osilasi tersebut adalah linier dan harmonik, maka enam persamaan diferensial gerakan kopel seperti Gambar 2.11 dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\sum_{n=1}^6 [(M_{jk} + A_{jk})\xi_k + B_{jk}\xi_k + C_{jk}\xi_k] = F_j e^{i\omega t}, j = 1 \quad (2.15)$$



Gambar 2.11 Moda gerak 6 derajat kebebasan

dengan

\mathbf{M}_{jk} = matriks massa dan momen inersia massa bangunan laut,

\mathbf{A}_{jk} = matriks koefisien-koefisien massa tambah hidrodinamik,

\mathbf{B}_{jk} = matriks koefisien-koefisien redaman hidrodinamik,

\mathbf{C}_{jk} = matriks koefisien-koefisien kekakuan atau gaya dan momen hidrostatik,

\mathbf{F}_j = matriks gaya eksitasi (F_1, F_2, F_3) dan momen eksitasi (M_4, M_5, M_6) dalam fungsi kompleks (dinyatakan oleh $e^{i\omega t}$),

F_1 = gaya eksitasi yang menyebabkan gerakan *surge*,

F_2 = gaya eksitasi yang menyebabkan gerakan *sway*,

F_3 = gaya eksitasi yang menyebabkan gerakan *heave*,

M_4 = momen eksitasi yang menyebabkan gerakan *roll*,

M_5 = momen eksitasi yang menyebabkan gerakan *pitch*,

M_6 = momen eksitasi yang menyebabkan gerakan *yaw*,

ζ_k = elevasi gerakan pada moda ke k ,

$\dot{\zeta}_k$ = elevasi kecepatan gerak pada moda ke k ,

$\ddot{\zeta}_k$ = elevasi percepatan gerak pada moda ke k .

Langkah berikutnya dalam menyelesaikan persamaan gerak adalah menentukan harga koefisien-koefisien massa tambah, redaman dan hidrostatik. Dari persamaan gerak ini didapatkan hasil berupa karakteristik gerakan kapal.

Informasi ini pada umumnya disajikan dalam bentuk grafik, di mana perbandingan gerakan pada mode tertentu ζ_j dengan parameter tinggi (atau amplitudo gelombang, ζ_a) diberikan sebagai fungsi frekuensi encounter ω_e dari sumber eksitasi. Informasi gerakan yang demikian ini dinamakan *Response Amplitude Operator* (RAO).

2.2.8 Response Amplitude Operator (RAO)

Response Amplitude Operator (RAO) atau disebut juga dengan *Transfer Function* merupakan fungsi respon gerakan dinamis struktur yang disebabkan akibat gelombang dengan rentang frekuensi tertentu. RAO merupakan alat untuk mentransfer gaya gelombang menjadi respon gerakan dinamis struktur. Menurut Chakrabarti (1987), persamaan RAO dapat dicari dengan rumus sebagai berikut :

$$RAO(\omega) = \frac{X_p(\omega)}{\eta(\omega)} \quad (2.16)$$

dimana,

$X_p(\omega)$ = amplitudo struktur

$\eta(\omega)$ = amplitudo gelombang

Spektrum respons didefinisikan sebagai respons kerapatan energi pada struktur akibat gelombang. Spektrum respons merupakan perkalian antara spektrum gelombang dengan RAO kuadrat, secara matematis dapat ditulis sebagai berikut :

$$S_R = [RAO(\omega)]^2 S(\omega) \quad (2.1)$$

dimana :

S_R = spektrum respons ($m^2\text{-sec}$)

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

$RAO(\omega)$ = transfer function

ω = frekuensi gelombang (rad/sec)

2.2.9 Vortex-Induced Vibration

Menurut Bai (2001), *Vortex Induced Vibration* (VIV) mungkin merupakan salah satu permasalahan yang paling diperhitungan pada perencanaan desain *riser* secara umum, terutama untuk daerah berarus tinggi Gambar 2.12. Frekuensi tinggi yang dialami pada *riser* diakibatkan oleh *vortex shedding* yang menyebabkan tegangan siklik berfrekuensi tinggi, sehingga pada akhirnya dapat berdampak terhadap kerusakan akibat kelelahan struktur atau *fatigue damage*.

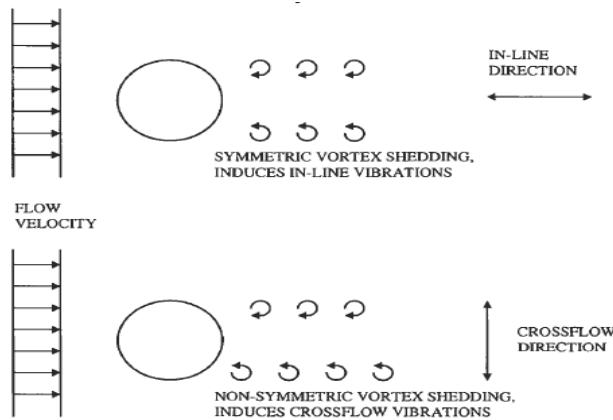


Gambar 2.12 Visualisasi VIV (Lee, 2008)

VIV dapat didapatkan dari gelombang atau arus yang mungkin terjadi baik dari arah *in-line* atau *crossflow* terhadap arah datangnya arus. VIV dapat menjadi sangat berbahaya dari segi *fatigue damage* yaitu pada saat terjadi *vibration* yang dihasilkan oleh aliran *steady* dari arah *crossflow* (Bai, 2001).

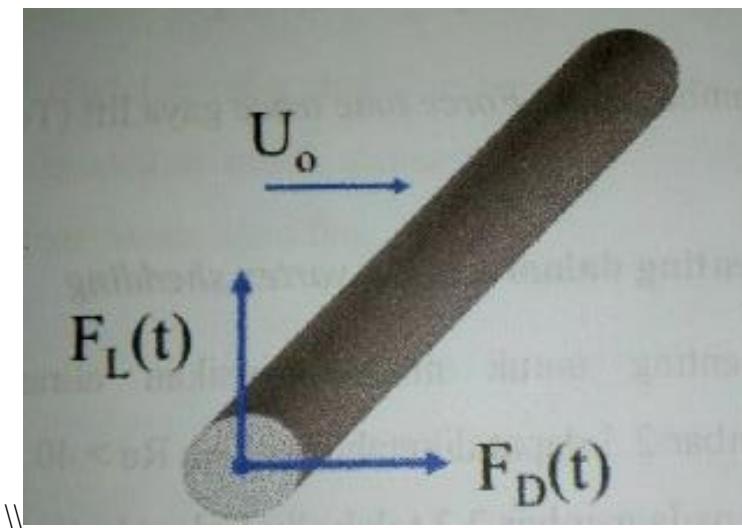
2.2.10 Vortex Shedding

Parameter penting dari VIV yaitu *Vortex Shedding* merupakan proses perubahan aliran ketika berdistraksi dengan bangunan silinder atau struktur yang memiliki permukaan halus sehingga aliran tersebut berubah menjadi suatu pusaran air Gambar 2.13.



Gambar 2.13 Vortex Shedding pada riser (Bai, 2001)

Vortex Shedding dapat menimbulkan gaya drag dan gaya lift pada silinder bulat. Gaya lift memiliki arah tegak lurus terhadap silinder sedangkan gaya drag memiliki arah sejajar dengan silinder. Karena pergantian vortex wake (Karman Street) maka osilasi gaya lift terjadi pada frekuensi vortex shedding dan gaya drag terjadi pada dua kali frekuensi vortex shedding seperti pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 konfigurasi gaya list dan gaya drag pada silinder (techet, 2005)

Frekuensi *vortex shedding* sangat berhubungan dengan diameter pipa dan kecepatan aliran. Jika frekuensi *vortex shedding* mendekati frekuensi natural bentangan bebas pipa, maka resonansi akan terjadi dan pipa mengalami getaran. Pipa dapat mengalami kegagalan akibat *vortex induced vibration*. Kegagalan pipa

ini dapat dicegah jika frekuensi *vortex shedding* memiliki perbedaan cukup besar dengan frekuensi natural pipa (Mouselli, 1981). Persamaan frekuensi *vortex shedding* adalah sebagai berikut:

$$f_s = S_t \left(\frac{U_{\text{eff}}}{D} \right) \quad (2.17)$$

S_t = Strouhal number (0.14 - 0.25)

U_{eff} = Kecepatan effektif

D = Outer Diameter (m)

Strouthal number (St) merupakan frekuensi yang tidak berdimensi (demensiless) merupakan fungsi dari *reynold number*.

2.2.11 Teori Fatigue

Fatigue merupakan fenomena kelelahan struktur akibat terkena pembebanan yang berulang. Kegagalan *fatigue* sangat bergantung pada beban yang terjadi dan kekuatan material struktur itu sendiri. *Fatigue* merupakan salah satu kriteria desain yang harus diperhitungkan dalam proses desain struktur. Analisis *fatigue* bertujuan untuk melihat apakah struktur mampu menahan beban berulang selama masa layannya.

Perhitungan *fatigue* dapat didekati dengan 2 (dua) metode, yaitu dengan pendekatn Kurva S-N dan dengan pendekatan *fracture mechanics*. Pendekatan Kurva S-N bertujuan untuk mengetahui berapa banyak siklus tegangan yang dibutuhkan sampai timbul *crack* yang dapat memicu kegagalan. Sedangkan pendekatan *fracture mechanics* bertujuan untuk menghitung seberapa banyak siklus yang dibutuhkan hingga *crack* yang muncul mencapai *critical crack*. Untuk analisis *fatigue* pada *riser* dalam Tugas Akhir ini menggunakan pendekatan Kurva S-N.

2.2.12 Fatigue Stress

Tegangan yang harus dipertimbangkan dalam perhitungan akumulasi kerusakan akibat *fatigue* pada *riser* adalah tegangan yang terjadi akibat beban siklik.

Dalam DNV RP F204 “Riser Fatigue” dijelaskan bahwa komponen pembentuk tegangan nominal siklik (σ) pada pipa pada umumnya merupakan kombinasi linear dari *axial stress* dan *bending stress* seperti pada persamaan berikut.

$$\sigma(t) = \sigma_a(t) + \sigma_M(\theta, t) \quad (2.18)$$

Dimana,

$\sigma(t)$ = Nominal Stress

$\sigma_a(t)$ = Axial Stress

$\sigma_M(\theta, t)$ = Bending Stress

θ = Koordinat angular yang menunjukkan lokasi titik kritis (*hot spot*) di sepanjang keliling pipa *riser*.

Axial Stress dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\sigma_a(t) = \frac{T_e(t)}{\pi \cdot (OD - t_{fat}) \cdot t_{fat}} \quad (2.19)$$

Keterangan:

σ_a : axial stress

T_e : Effective tension

OD : Diameter luar pipa

t_{fat} : Tebal *fatigue* pipa

$$\sigma_M(\theta, t) = (M_y(t) \sin(\theta) + M_z(t) \cos(\theta)) \cdot \left(\frac{OD - t_{fat}}{2I} \right) \quad (2.20)$$

Bending stress pada tengah-tengah pipa *riser* seperti pada Gambar 2.15 dapat dirumuskan dengan persamaan berikut.

Keterangan:

σ_M : Bending stress

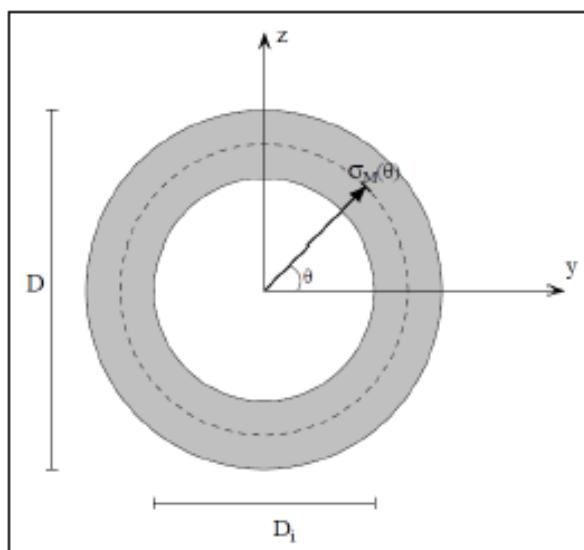
t_{fat} : Tebal *fatigue* pipa

M_y : Bend moment di sumbu lokal

I : Momen inersia pipa

M_z : Bend moment di sumbu lokal z

OD : Diameter luar pipa



Gambar 2.15 Perhitungan Bending Stress (DNV RP F204)

2.2.13 Rentang Tegangan

Rentang tegangan atau *stress range* yang digunakan pada perhitungan akumulasi kerusakan akibat *fatigue* merupakan nilai yang didapat dari pengaplikasian *stress concentration factor* dan nilai koreksi ketebalan ke *nominal stress range* atau rentang tegangan nominal. Pada kasus analisis *fatigue* pada *riser* ini, tegangan nominal didapatkan dari tegangan yang dihasilkan akibat gaya gelombang dan arus. Selisih tegangan maksimal dan minimal akibat gaya hidrodinamika tersebutlah yang kemudian menjadi nilai rentang tegangan nominal. Nilai rentang tegangan dinyatakan dalam persamaan berikut.

$$S = S_0 \cdot SCF \cdot \left(\frac{t_{fat}}{t_{ref}} \right)^k \quad (2.21)$$

Keterangan:

S : *Stress range*

S_0 : *Nominal stress range*

SCF : Stress concentration factor

$(t_{fat}/t_{ref})^k$: Faktor koreksi ketebalan

t_{fat} adalah nilai ketebalan pipa rata-rata yang digunakan dalam perhitungan kerusakan akibat *fatigue* yang dinyatakan dengan persamaan (a) untuk kondisi lingkungan yang bersifat korosif, dan persamaan (b) untuk kondisi sebelum operasi.

(a)
$$t_{fat} = t_{nom} - 0,5 \cdot t_{corr} \quad (2.22)$$

(b)
$$Keterangan: \quad t_{fat} = t_{nom} \quad (2.23)$$

t_{nom} : Tebal pipa

t_{corr} : Corrosion allowance

t_{ref} adalah ketebalan referensi yang nilainya diambil 25 mm untuk sambungan las selain sambungan tubular. Untuk sambungan tubular, ketebalan referensi diambil 32 mm. Untuk baut, ketebalan referensi juga diambil 25 mm. Dalam DNV RP F204 “Riser Fatigue” disebutkan bahwa faktor koreksi ketebalan hanya diaplikasikan untuk pipa yang memiliki tebal lebih besar dari ketebalan referensi = 25 mm.

Thickness exponent (k) adalah fungsi dari struktur desain yang juga berhubungan dengan Kurva S-N. Selain yang telah ditentukan berdasarkan Kurva S-N, nilai k dapat diambil 0,10 untuk *tubular butt welds* yang dibuat di satu sisi dan diambil 0,25 untuk baut ulir.

2.2.14 Stress Concentration Factor

Stress concentration factor (SCF) digunakan untuk mengakomodasi kemungkinan perbesaran tegangan akibat ketidak sempurnaan geometri dari dua bagian yang disambung. SCF didefinisikan sebagai perbandingan atau rasio dari *hot spot stress range* dan *nominal stress range*. *Hot spot* adalah titik pada suatu struktur dimana *initial crack* akibat *fatigue* mungkin terjadi akibat kombinasi dari fluktuasi tegangan pada struktur dan geometri lasan. SCF yang biasa

digunakan untuk *pipeline* dan *riser* berdasarkan kondisi sambungannya dapat dilihat pada **Tabel 2.2**.

Dalam DNV RP C203 “Fatigue Design of Steel Structure” disebutkan bahwa sambungan yang biasa digunakan untuk *pipeline* dan *riser* adalah *symmetric weld groove* yang hanya di las pada bagian luarnya saja. Toleransi ketebalan untuk sambungan ini adalah 0,1t atau maksimal 3mm (t = tebal pipa). Nilai SCF untuk sambungan jenis ini dapat dilihat pada **Tabel 2.2**.

Untuk sambungan jenis *weld groove* yang tidak simetris seperti pada Gambar 2.16 nilai SCF dihitung dengan persamaan berikut.

$$SCF = 1 + \frac{3(\delta_m)}{t} e^{-\sqrt{t/OD}}$$
(2.24)

Keterangan:

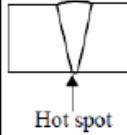
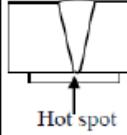
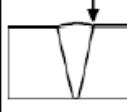
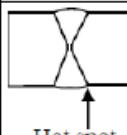
SCF : Stress concentration factor

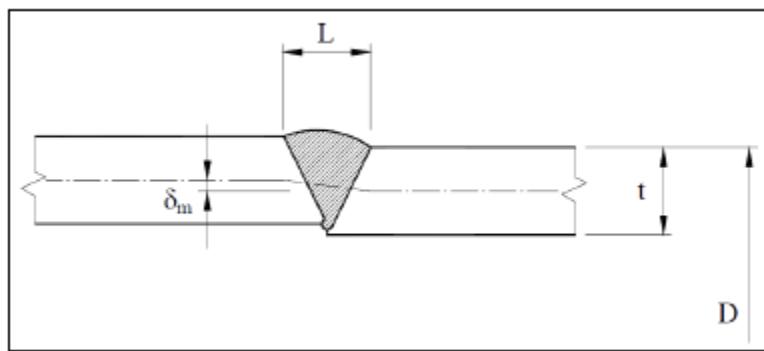
δ_m : Toleransi eksentrisitas maksimum

t : Tebal pipa

OD : Diameter luar pipa

Tabel 2.1 Klasifikasi Sambungan untuk *Pipeline* dan *Riser*

<i>Description</i>		<i>Tolerance requirement</i>	<i>S-N curve</i>	<i>Thickness exponent k</i>	<i>SCF</i>
<i>Welding</i>	<i>Geometry and hot spot</i>				
<i>Single side</i>		$\delta \leq \min(0.15t, 3 \text{ mm})$	F1	0.00	1.0
		$\delta > \min(0.15t, 3 \text{ mm})$	F3	0.00	1.0
<i>Single side on backing</i>		$\delta \leq \min(0.1t, 2 \text{ mm})$	F	0.00	1.0
		$\delta > \min(0.1t, 2 \text{ mm})$	F1	0.00	1.0
<i>Single side</i>			D	0.15	Eq. (2.9.1)
<i>Double side</i>			D	0.15	Eq. (2.9.1)



Gambar 2.16 Unsymmetrical Weld Groove (DNV RP C203)

2.2.15 Siklus Tegangan

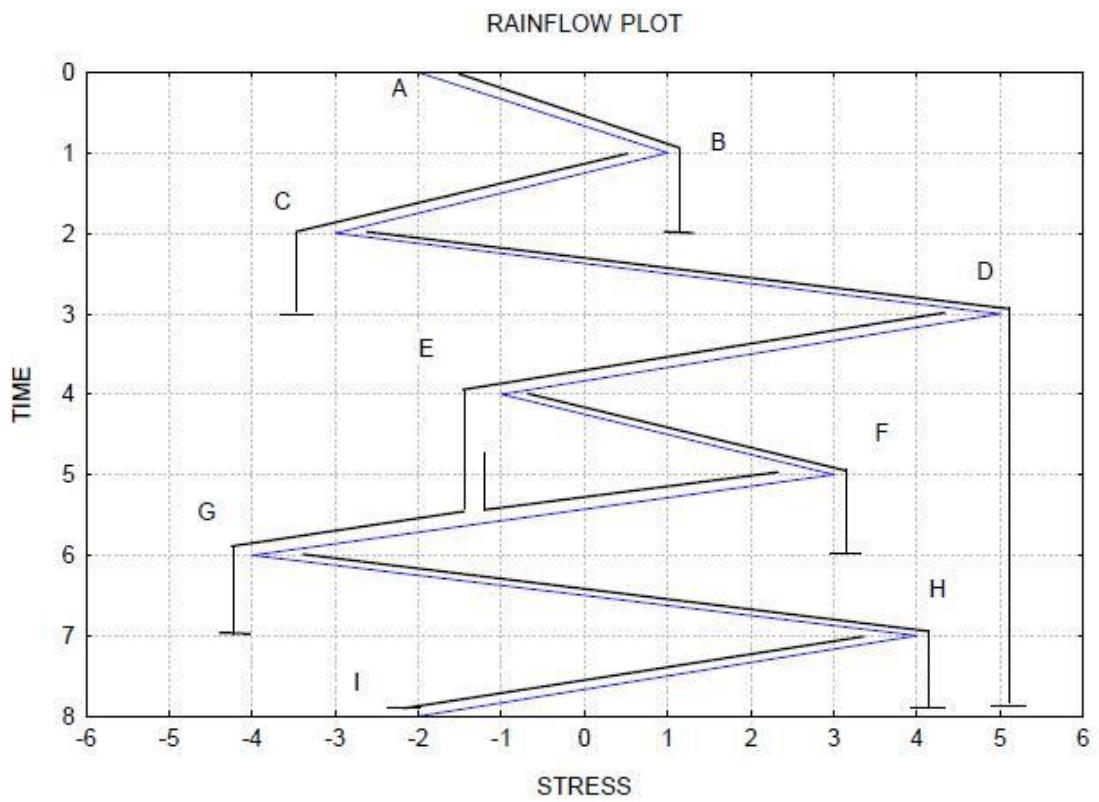
Parameter utama dalam analisis *fatigue* adalah tegangan yang terjadi dalam durasi waktu tertentu. Contoh seri waktu tegangan dapat dilihat pada Gambar 2.17. Karena sangat acaknya siklus tegangan yang terjadi maka diperlukan suatu metode untuk menyederhanakan perhitungan tersebut. Metode yang biasanya digunakan dalam perhitungan siklus tegangan untuk analisis *fatigue* adalah metode *rainflow counting*. Metode ini digunakan untuk mengurangi siklus tegangan yang sangat bervariasi menjadi sekumpulan data yang lebih sederhana.

Perhitungan siklus dengan metode *rainflow counting* menggunakan analogi turunnya air dari atap pagoda. Aturan dari metode ini adalah sebagai berikut:

1. Putar grafik seri waktu tegangan 90° sehingga sumbu X menjadi tegangan dan sumbu Y menjadi waktu.
2. Aliran dimulai dari setiap puncak dan setiap lembah.
3. Ketika aliran dimulai dari lembah, aliran akan berhenti bila lembah selanjutnya lebih negatif daripada lembah yang sebelumnya. Aliran akan terus berlanjut ke bawah sampai menemukan lembah yang lebih negatif atau ketika seri waktu berakhir.
4. Ketika aliran dimulai dari puncak, aliran akan berhenti bila puncak selanjutnya lebih positif daripada puncak sebelumnya. Aliran akan terus berlanjut ke bawah sampai menemukan puncak yang lebih positif atau ketika seri waktu berakhir.

5. Jika terdapat aliran yang memotong jalur aliran yang jatuh di atasnya maka aliran tersebut berhenti dan dihitung setengah siklus.
6. Hitung rentang tegangan pada setiap aliran. Setiap aliran dihitung setengah siklus.
7. Untuk menghitung total siklus, jumlahkan siklus yang memiliki rentang tegangan yang sama

Contoh perhitungan siklus tegangan dengan metode *rainflow counting* dapat dilihat pada Gambar 2.17 .



Gambar 2.17 Rainflow Plot

Berdasarkan metode *rainflow counting* maka kesimpulan rentang tegangan dan siklus tegangan untuk seri waktu pada Gambar 2.19 dapat dilihat pada Tabel 2.2 dan Tabel 2.3.

Tabel 2.2 Perhitungan Siklus Rentang Tegangan

Jalur	Siklus	Rentang Tegangan (MPa)
A-B	0,5	3
B-C	0,5	4
C-D	0,5	8
D-G	0,5	9
E-F	1	4
G-H	0,5	8
H-I	0,5	6

Tabel 2.3 Kesimpulan jumlah siklus dan Rentang Tegangan

Rentang Tegangan (Mpa)	Total Siklus	Jalur
10	0	-
9	0,5	D-G
8	1,0	C-D, G-H
7	0	-
6	0,5	H-I
5	0	-
4	1,5	B-C, E-F
3	0,5	A-B
2	0	-
1	0	-

2.2.16 Kurva S-N

Dalam melakukan analisis *fatigue* dapat digunakan beberapa metode, salah satunya adalah dengan pendekatan kurva S-N. Kurva S-N terbentuk dari proses uji laboratorium. Kurva S-N menunjukkan perbandingan antara jumlah siklus tegangan yang menyebabkan kegagalan (N) dengan nilai *stress range* tertentu (S). Kurva S-N yang digunakan untuk analisis *fatigue* pada *riser* adalah Kurva S-N untuk lingkungan laut dengan perlindungan katodik yang dapat dilihat pada Gambar 2.20 dan Tabel 2.4. Kurva S-N dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut.

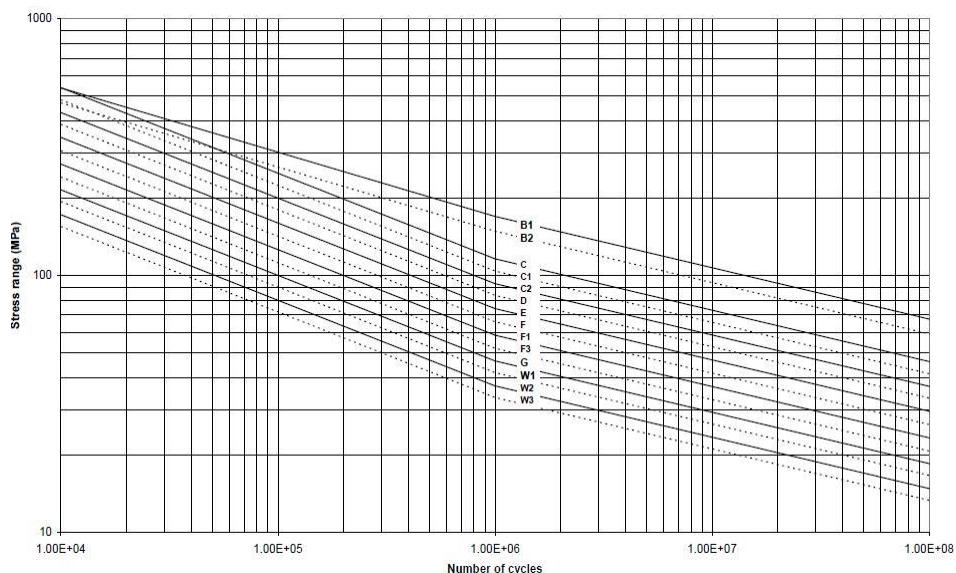
$$\log(N) = \log(\bar{a}) - m \log(S) \quad (2.25)$$

Atau dapat ditulis sebagai berikut,

$$N = \bar{a}S^{-m} \quad (2.26)$$

Keterangan:

- N : Jumlah siklus tegangan untuk mencapai kegagalan
- S : *Stress range* (rentang tegangan)
- \bar{a} dan m : konstanta empiris yang didapatkan dari proses percobaan.



Gambar 2.18 Kurva S-N untuk struktur di laut dengan perlindungan katodik
(DNV RP C203)

Tabel 2.4 Tabel Kurva S-N untuk struktur di laut dengan perlindungan katodik

<i>S-N curve</i>	$N \leq 10^6$ cycles		$N > 10^6$ cycles $\log \bar{a}_2$ $m_2 = 5.0$	<i>Fatigue limit at 10^7 cycles^{*)}</i>	<i>Thickness exponent k</i>	<i>Stress concentration in the S-N detail as derived by the hot spot method</i>
	m_1	$\log \bar{a}_1$				
B1	4.0	14.917	17.146	106.97	0	
B2	4.0	14.685	16.856	93.59	0	
C	3.0	12.192	16.320	73.10	0.15	
C1	3.0	12.049	16.081	65.50	0.15	
C2	3.0	11.901	15.835	58.48	0.15	
D	3.0	11.764	15.606	52.63	0.20	1.00
E	3.0	11.610	15.350	46.78	0.20	1.13
F	3.0	11.455	15.091	41.52	0.25	1.27
F1	3.0	11.299	14.832	36.84	0.25	1.43
F3	3.0	11.146	14.576	32.75	0.25	1.61
G	3.0	10.998	14.330	29.24	0.25	1.80
W1	3.0	10.861	14.101	26.32	0.25	2.00
W2	3.0	10.707	13.845	23.39	0.25	2.25
W3	3.0	10.570	13.617	21.05	0.25	2.50
T	3.0	11.764	15.606	52.63	0.25 for SCF ≤ 10.0 0.30 for SCF > 10.0	1.00

Dalam mendesain *fatigue*, sambungan pengelasan dibagi kedalam beberapa kelas, masing-masing memiliki korespondensi dengan Kurva S-N tersendiri. Semua sambungan tubular diasumsikan berada di kelas T. Jenis sambungan yang lain, termasuk pelat tabung diklasifikasikan ke dalam 14 kelas yang lain tergantung pada:

- Detail susunan geometri
- Detail arah tegangan fluktuatif relatif
- Detail metode fabrikasi dan inspeksi

2.2.17 Fatigue Damage

Perhitungan akumulasi kerusakan struktur akibat *fatigue* (*fatigue damage*) dilakukan menggunakan aturan Miner-Palmgren. Aturan ini memungkinkan perhitungan kerusakan *fatigue* dengan beberapa amplitudo yang berbeda. Siklus pemberian dapat dibagi menjadi beberapa grup yang memiliki rentang tegangan (*stress range*) yang sama. *Fatigue damage* yang terjadi adalah penjumlahan dari kerusakan *fatigue* dari masing-masing grup. Aturan Miner-Palmgren dapat dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut.

$$D = \sum_{i=1}^m \frac{n(S_i)}{N(S_i)}$$
(2.27)

Keterangan:

- | | |
|----------|---|
| D | : <i>Fatigue damage</i> |
| $n(S_i)$ | : Jumlah siklus pada <i>stress range</i> ke-i |
| $N(S_i)$ | : Jumlah siklus untuk mencapai kegagalan |
| m | : Jumlah pembagian grup <i>stress range</i> |

2.2.18 Penjumlahan Fatigue Damage

Dalam DNV RP F204 “Riser Fatigue” Sec. 5 *combined damage*, dalam standar industri *fatigue damage* dijumlahkan dengan fatigue damage akibat gelombang/*floater*. Prosedure ini dapat diterima hanya jika *Vortex Induced Vibration* (VIV) yang ditinjau sama dengan kritikal kondisi dari *wave frequency* dan *low frequency damage*

2.2.19 Umur Kelelahan

Dalam aturan Miner-Palmgren, kegagalan pada struktur terjadi apabila siklus yang terjadi pada struktur sama dengan jumlah siklus yang menyebabkan kegagalan. Dengan kata lain, kegagalan *fatigue* terjadi apabila nilai *fatigue damage* (D) telah mencapai satu. Maka dari itu, umur *fatigue* dari struktur dapat dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut

$$T_{life} = \frac{1}{D} \quad (2.28)$$

Keterangan:

- T_{life} : Umur *fatigue*
 D : *Fatigue damage*

Berdasarkan DNV RP F204 “Riser Fatigue”, perhitungan *fatigue* dari suatu material harus memenuhi persyaratan sebagai berikut.

$$D \cdot DFF \leq 1,0 \quad (2.29)$$

Keterangan:

- D : *Fatigue damage* (menurut aturan Miner-Palmgren)
 DFF : *Design Fatigue Damage*

Nilai *Design Fatigue Damage* (DFF) berdasarkan kelas keamanan pipa *riser* dapat dilihat pada Tabel 2.5

Tabel 2.4 Tabel Safety Class

Safety Class		
Low	Normal	High
3.0	6.0	9.0

BAB III

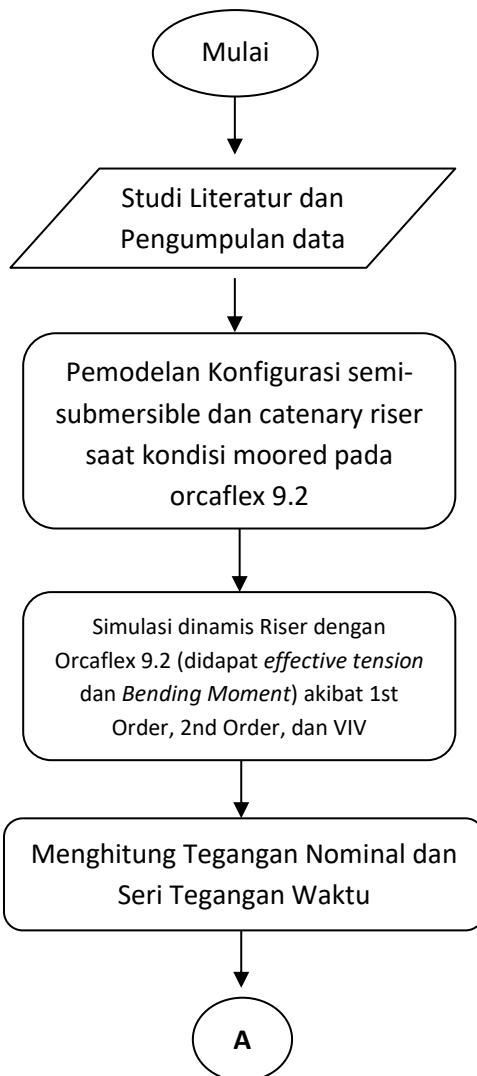
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metodologi Penelitian

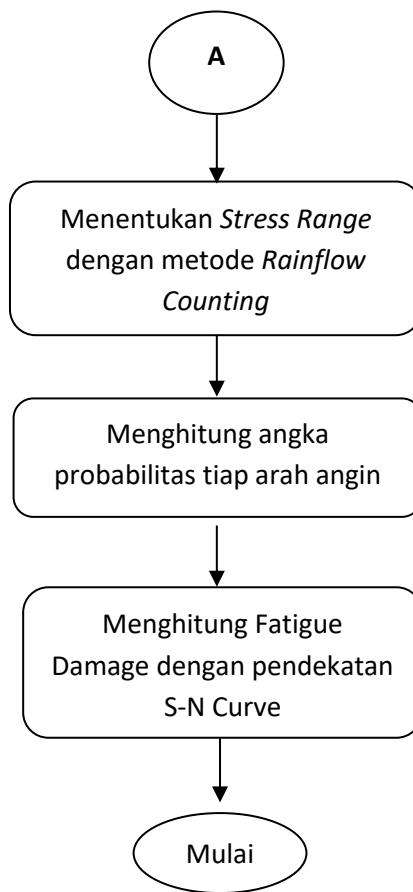
Metodologi penelitian merupakan suatu proses penentuan tahap – tahap dalam penggerjaan suatu karya ilmiah. Penggerjaan tugas akhir ini dijelaskan secara bertahap di dalam diagram alir dan prosedur penelitian.

3.1.1 Diagram Alir Penelitian (Umum)

Metodologi penelitian tugas akhir ini dijelaskan dalam diagram alir pada Gambar 3.1 dan Gambar 3.2 :



Gambar 3.1 Diagram Alir



Gambar 3.1 Diagram Alir (lanjutan)

3.2 Rencana Penggerjaan Tugas Akhir

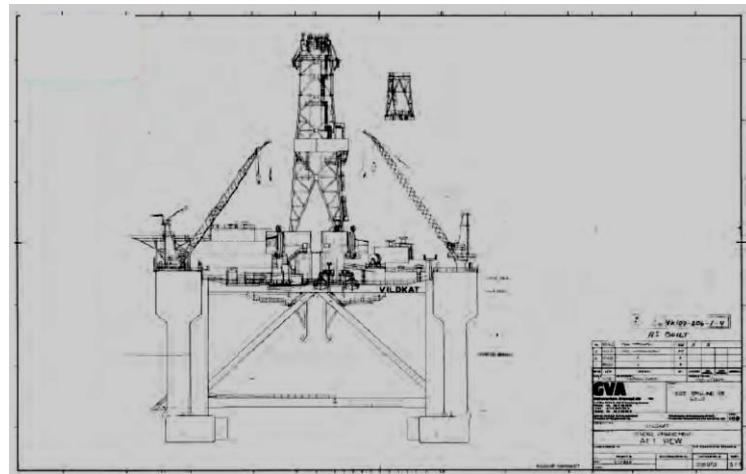
Langkah-Langkah penelitian penggerjaan tugas akhir yang tertera pada diagram alir akan dijelaskan sebagai berikut :

1. Studi literatur dan pengumpulan data

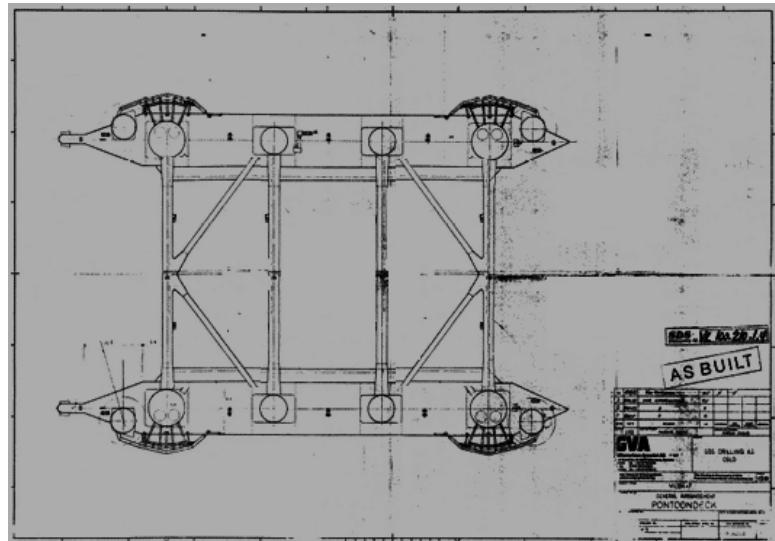
Studi literatur dilakukan untuk menambah wawasan guna menunjang penggerjaan tugas akhir ini, dengan cara mengumpulkan dan membaca buku, *codes*, jurnal, tesis, dan tugas akhir lainnya yang berhubungan dengan *steel catenary riser*. Data-data yang harus dikumpulkan untuk mengerjakan tugas akhir ini antara lain data lingkungan, data fluida, data *semisubmersible* dan data *steel catenary riser*.

Tugas akhir ini menggunakan *Semi-submersible* “Essar Wildcat”, yang mana digunakan oleh *Conoco Philipps* di perairan Belanak-

Natuna. Berikut adalah general arrangement dari Essar Wildcat yang mana disajikan dalam tampak depan dan atas.



Gambar 3.1 General Arrangement tampak depan



Gambar 3.2 General Arrangement tampak atas

Selain *general arrangement* pada Gambar 3.3 dan Gambar 3.4, terdapat juga data ukuran utama dari semi-submersible Essar Wildcat yang dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Main Dimension Semi-submersible

Description	Quantity	Unit
Length Overall	108.2	m
Breadth (Moulded)	71.8	m
Large Column Diameter	7.92	m
Small Column Diameter	5.79	m
Corner Column Diameter	5.2	m
Height of Columns	29.87	m
Height of Pontoons	6.71	m
Longitudinal distance between column	22.85	m
Transversal distance between column	56.38	m
Operating Draught	21.33	m
Transit Draught	6.41	m
Operating Displacement	24173	m
Transit Displacement	16077	m
VCG (operating)	17.83	m
VCG (transit)	24.08	m
GM (operating)	2.74	m
GM (transit)	75.63	m

Tabel 3.2 Data Steel Catenary Riser

Riser Data		
Material Grade	X65	
Riser Density	7860	kg/m ³
Outer Diameter	20	in
Nominal Thickness	25.4	mm
Young's Modulus	210000	MPa
Poisson ratio	0.3	
SMYS	448	MPa
SMTS	535	MPa
Riser Length	187	m

Tabel 3.3 Data Mooring

Description	Quantity
Chain Type	Studlink chain R4
Chain Size	76 mm diameter
Length of chain	1200 m (approximately)
Chain break load	611.693 tonnes / 6000 kN
Chain weight in air	0.126 tonnes/m
Chain weight in water	0.011 tonnes/m
Anchor Type	8x15000kg HY – 17 Anchor
Number of line	8

Tabel 3.4 Data Lingkungan Belanak Natuna

Parameter	100 years return period
Depth	90 m
Wave :	
Significant Wave Height (Hs)	5.3 m
Peak period (Tp)	11.1 s
Maximum Wave Height (Hm)	10.2 m
Average period (Tm)	6.71
Wave Spectrum	JONSWAP
Current :	
Surface	1 m/s
Mid depth	0.8 m/s
Near bottom	0.8 m/s

2. Pemodelan konfigurasi *Semi-submersible* dan *Steel Catenary Riser*

Pada tugas akhir ini, dalam pemodelan terhadap *Semi-Submersible* maupun konfigurasi *Steel Catenary Riser* adalah sebagai berikut.

a. Pemodelan Struktur Semi-submersible

Dari data dimensi semi-submersible yang didapat, maka struktur dapat dimodelkan. Pemodelan struktur pada tugas akhir ini menggunakan software Maxsurf dan MOSES, yang mana hasil hidrostatik dari kedua model ini, antara lain *displacement*, KB, LCB, KM_t, KM_l, BM_t, BM_l, akan di validasi berdasarkan persyaratan ABS MODU.

b. Simulasi MOSES

Setelah struktur dimodelkan, dilakukan analisis pada MOSES agar diperoleh RAO (*Response Amplitude Operator*), yaitu nilai perbandingan amplitudo struktur dengan amplitudo gelombang pada setiap 1 meter. Selain itu diperoleh juga *wave drift force*, *mass*, *added mass*, *hydrostatic*, dll.

c. Pemodelan Orcaflex 9.2

Setelah memperoleh *output data* dari analisis struktur pada MOSES, maka dilanjutkan dengan pemodelan *semi-submersible* dan *steel catenary riser* pada Orcaflex saat kondisi tertambat

d. Input Orcaflex 9.2

Hasil simulasi dari MOSES, yang berupa RAO, *wave drift force*, dll, dimasukkan ke Orcaflex agar dapat dilakukan analisis statis dan dinamis pada *riser*.

3. Simulasi Orcaflex 9.2

Setelah struktur dan *riser* dimodelkan, dan RAO sudah dimasukkan, analisis dinamis pada Orcaflex dapat dilakukan. Simulasi dilakukan selama 10800s mengikuti kentenuan DNV RP F204 “Riser Fatigue” yang dimana bisa mewakili masa operasi selama 2 tahun. Faktor *Vortex-Induced Vibration* menggunakan *Iwan-Blevins Wake Oscillator* dengan *strouhal number* 0,2. Dari simulasi ini didapat *effective tension* dan *bending moment* terhadap *Arc Length* dan *Time History*.

4. Menghitung tegangan nominal dan menentukan titik kritis dari Steel Catenary Riser

Setelah didapat *effective tension* dan *bending moment* dimana dua variable tersebut untuk menghitung *axial stress* dan *bending stress*. Setelah itu dilakukan perhitungan untuk mendapatkan tegangan nominal.

Menentukan titik kritis dari *Steel Catenary Riser* dengan melihat tegangan nominal terbesar. Dalam tiga akhir ini akan ditentukan 3 titik tinjau pada *steel catenary riser*.

5. Menentukan Rentang Tegangan

Menghitung seri tegangan waktu dari titik yang ditentukan. Untuk mendapatkan *Stress* yang digunakan untuk menentukan *Stress Range*, Seri tegangan waktu dikalikan dengan *Stress Concentration Factor (SCF)* mengikuti DNV RP C203.

Perhitungan Stress Range akibat pergerakan *semisubmersible* dibantu dengan menggunakan metode *Rainflow Counting* di bantu dengan *software MATLAB 2017*. Fungsi *Rainflow Counting* mengacu pada ASTM E-1049-85 “*Standar Practices for Cycle Counting in Fatigue Analysis*

6. Menghitung *Fatigue Damage*

Perhitungan *fatigue damage* mengacu pada DNV RP F204 dan DNV RP C203 dengan pendekatan S-N Curve. Dari S-N curve bisa didapatkan Jumlah Siklus Kegagalan (N). Untuk menghitung *fatigue damage* mengikuti aturan Palmgren-Miner. Perhitungan fatigue damage dengan cara membuat tabel untuk penyebaran dari jumlah rentang tegangan dan siklus kejadian.

Dalam aturan Miner-Palmgren, kegagalan pada struktur terjadi apabila siklus yang terjadi pada struktur sama dengan jumlah siklus yang menyebabkan kegagalan. Dengan kata lain, kegagalan *fatigue* terjadi apabila nilai *fatigue damage (D)* telah mencapai satu.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV

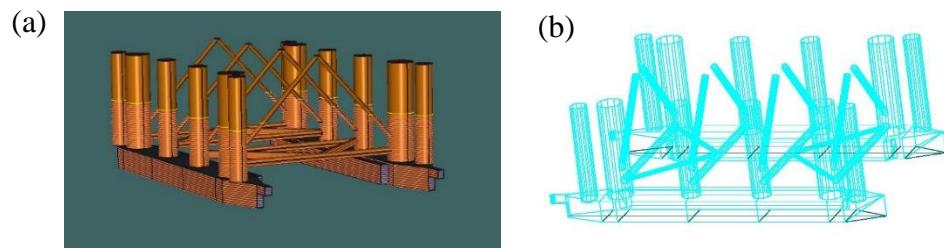
ANALISIS HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pemodelan Konfigurasi *Semi-submersible* tertambat dan *Steel Catenary Riser* dengan Orcaflex 9.2

1. Pemodelan *Semisubmersible* dengan perangkat lunak *Maxsurf* dan MOSES
Pemodelan dengan *Maxsurf* (Gambar 4.1) perangkat lunak bertujuan untuk memodelkan dan mendapatkan nilai hidrostatik dari semi-submersible Essar Wildcat. Nilai hidrostatik yang diperoleh adalah saat kondisi operasi. Nantinya, nilai ini akan divalidasi dengan nilai hidrostatik pada MOSES seperti pada Table 4.1.

Tabel 4.1 Validasi Model

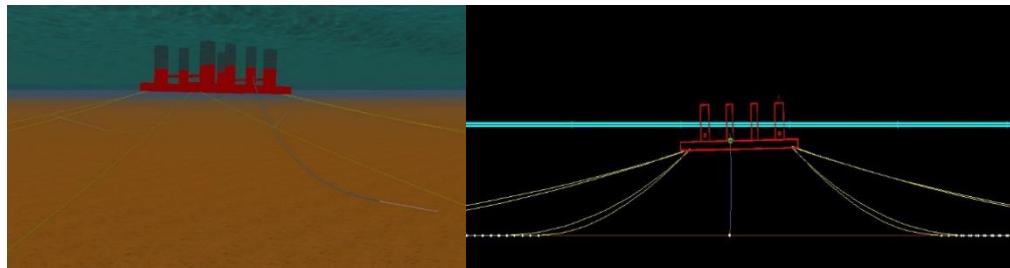
Parameter	Unit	Data	Maxsurf	Selisih (%)	Moses	Selisih (%)	Kriteria
Displacement	ton	24173	23745	1.8%	23889	1.2%	OK
KB	m	-	6.41	-	6.34	1%	OK
LCB	m	-	51.56	-	51.63	0.1%	OK
KMt	m	-	20.60	-	20.55	0.2%	OK
KMl	m	-	24.60	-	24.63	0.1%	OK
BMt	m	-	14.20	-	14.21	0.1%	OK
BML	m	-	18.20	-	18.30	0.5%	OK
LCG	m	51.58	51.58	0.0%	51.72	0.3%	OK
GMt	m	2.74	2.77	1.0%	2.72	0.7%	OK



Gambar 4.1 Pemodelan dengan Maxsurf (a) dan Moses (b)

3. Pemodelan dengan prangkat lunak Orcaflex 9.2

Pemodelan dengan *software Orcaflex 9.2* Seperti Gambar 4.2 dilakukan dengan tujuan untuk memperoleh *effective tension* dan *bending moment* pada *steel catenary riser*.

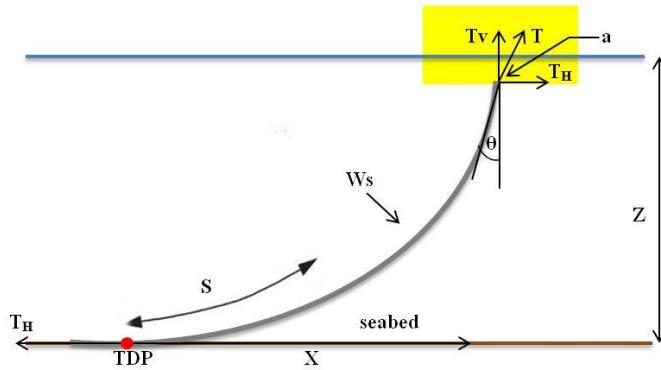


Gambar 4.2 Pemodelan Semi-Submersible dengan Sistem *Mooring dan Steel Catenary Riser* 3D

4.2 Analisis Konfigurasi Statis *Steel Catenary Riser*

Perhitungan konfigurasi statis *steel catenary riser* pada tugas akhir ini menggunakan teori *catenary* yang terdapat pada buku *Introduction to Offshore Pipeline and Risers* (Lee, 2007) dan *Subsea Pipeline Design, Analysis, and Installation* (Bai, 2014).

Tujuan dari analisis konfigurasi statis adalah untuk mengetahui panjang bentang *riser* dan juga jarak horizontal dari TDP ke *semi-submersible*. Deskripsi gambar dan hasil perhitungan konfigurasi statis dapat dilihat pada Gambar 4.3 dan Tabel 4.2

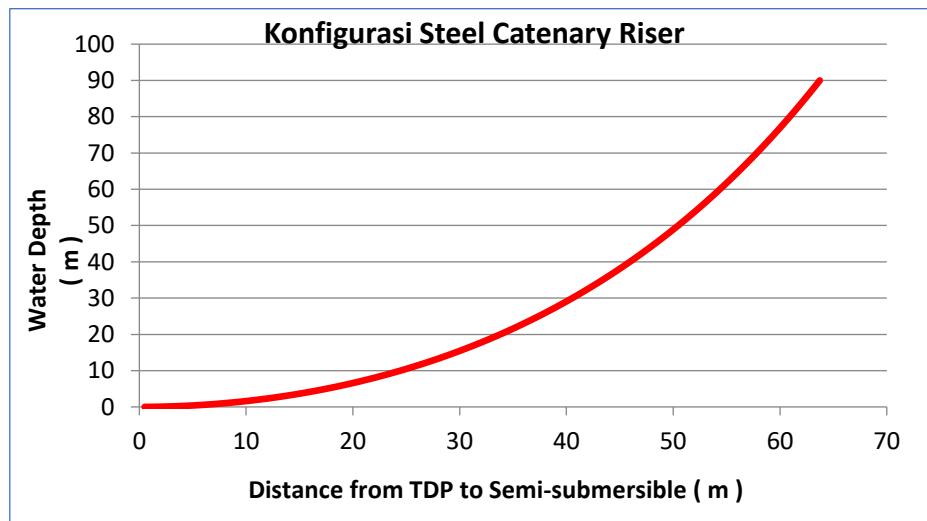


Gambar 4.3 Konfigurasi Statis Steel Catenary Riser

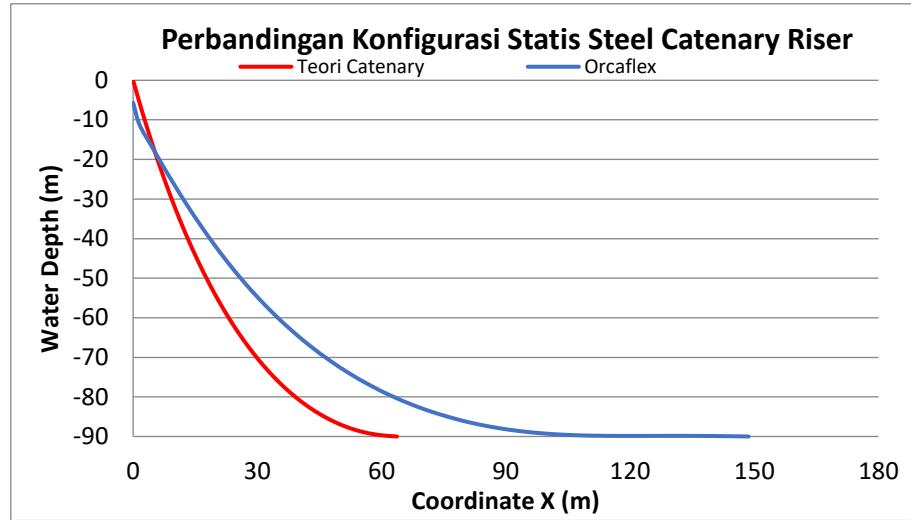
Tabel 4.2 Hasil Perhitungan Teori Catenary

Catenary Constant	a	31.428	
Riser Free Span Length to Touchdown	S	117.29	m
Horizontal Distance from Vessel to Touchdown	X	63.723	m

Konfigurasi SCR dari dasar laut sampai ke *semi-submersible* dapat ditentukan dengan teori *catenary*, yang mana perhitungan dilakukan dengan mendiskritkan variabel X dengan interval tentu dan dimasukkan pada persamaan *catenary*. Konfigurasi dapat dilihat pada Gambar 4.4



Gambar 4.4 Konfigurasi Statis Steel Catenary Riser

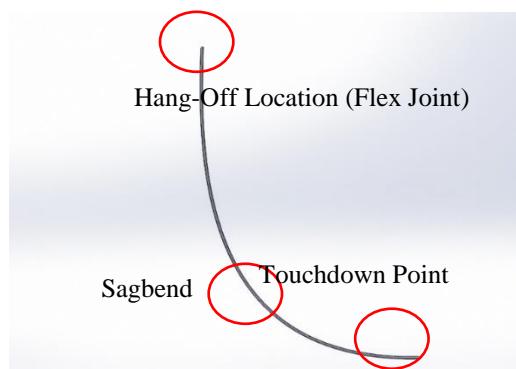


Gambar 4.5 Perbandingan Konfigurasi Statis *Steel Catenary Riser*

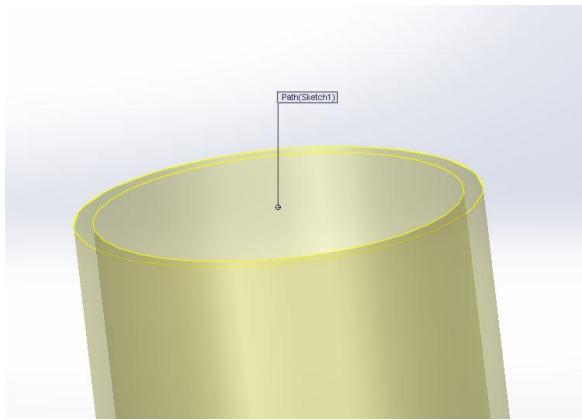
Teori *catenary* juga hanya menghasilkan panjang bentang minimum SCR, yaitu sepanjang 117.29 m, yang mana berbeda dengan *Orcaflex* 9.2 seperti Gambar 4.6 yang harus mempertimbangkan panjang *flowline* menuju PLET/PLEM.

4.3 Pemodelan 3D *Riser*

Setelah dilakukan perhitungan konfigurasi statis *Steel Catenary Riser*, maka diketahui panjang bentang *riser* dan juga jarak horizontal dari TDP ke *semi-submersible*. Pemodelan 3D dilakukan untuk mengetahui bentuk dari *Steel Catenary Riser* yang akan di analisa. Pemodelan menggunakan Software Solidworks 2013 seperti Gambar 4.6, Gambar 4.7, Gambar 4.8 dan Gambar 4.9.



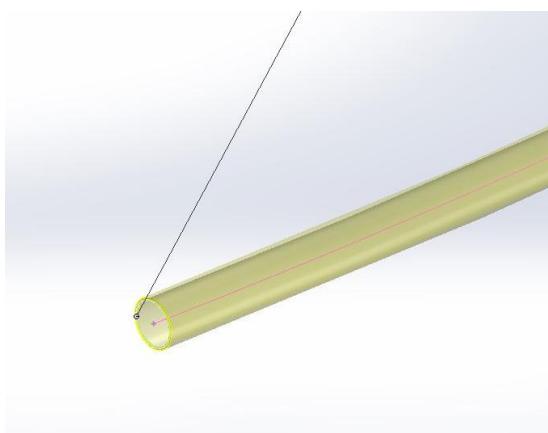
Gambar 4.6 *Steel Catenary Riser* model 3D Solidworks 2013



Gambar 4.7 Hang-Off Location Model 3D Solidworks 2013



Gambar 4.8 Middle Sagbend Model 3D Solidworks 2013

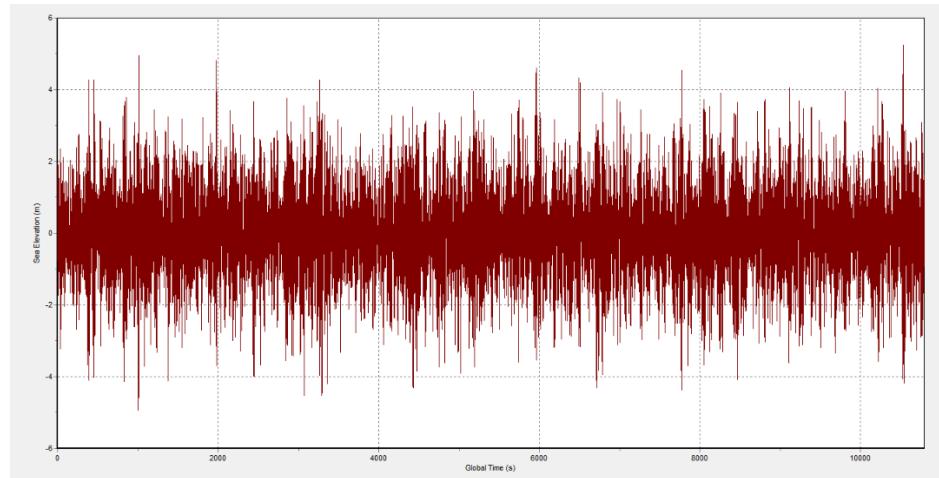


Gambar 4.9 Touchdown Point to PLEM/Subsea Manifold Model 3D Solidworks
2013

4.4 Pemodelan Lingkungan

Parameter kondisi lingkungan yang menjadi input pada pemodelan adalah kondisi perairan, kondisi dasar laut, gelombang, arus dan angin. Data lingkungan yang tersedia di-*input* dan selanjutnya *orcaflex* akan memperhitungkan beban lingkungan pada struktur yang dimodelkan.

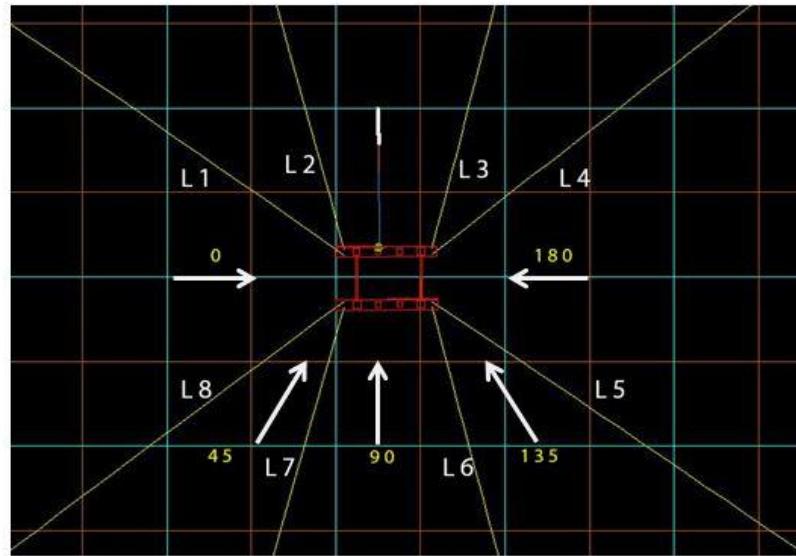
Elevasi muka air ditentukan berada di Z=0 dan dasar laut berada di Z=-90 terhadap kordinat global. Dasar laut juga diasumsikan berjenis *flat* atau rata. Gelombang yang dimodelkan merupakan gelombang acak yang dihitung menggunakan spektrum JONSWAP. Pemilihan spektrum JONSWAP didasari pada penelitian yang dilakukan oleh M.s. Liew et al (2015) yang meneliti spektrum gelombang yang paling cocok digunakan di Laut Cina Selatan. Data gelombang yang digunakan dapat dilihat pada Tabel Pemodelan dilakukan dengan memperhitungkan gelombang dengan arah 0°, 45°, 90°, 180°, 270 °. Input untuk pemodelan gelombang dapat dilihat pada dan profil gelombang yang terbentuk dapat dilihat pada Gambar 4.10 dan Gambar 4.11. Untuk arah gelombang pada Gambar 4.12



Gambar 4.10 Profil Gelombang

Data for Wave Train: Wave1							
Wave Data:							
Direction (deg)	Hs (m)	Tz (s)	Wave Origin X (m)	Y (m)	Wave Time Origin (s)	Wave Type	Number of wave directions
0,00	5,30	8,74	0,00	0,00	0,0000	JONSWAP	1
Spectral Parameters: Automatic						Components:	
γ	α	σ_1	σ_2	f_m (Hz)	T_p (s)	Seed	Number
3,8431	0,0057	0,0700	0,0900	0,0900	11,1055	12345	100 

Gambar 4.11 Input Profil Gelombang



Gambar 4.12 Arah Gelombang dan Sistem Tambat

4.5 Analisis Kekuatan

Sebelum melakukan analisa *fatigue*, harus dilakukan analisa kekuatan yang bertujuan apakah perlu dilanjutkan untuk analisa *fatigue*. Analisis kekuatan dilakukan untuk mengetahui respon dan perilaku dinamis *steel catenary riser* terhadap beban fungsional dan lingkungan yang terjadi. Analisis ini dilakukan pada posisi *mean* dimana *offset* yang terjadi tidak terlalu signifikan. Simulasi *time domain* dilakukan dengan periode ulang gelombang dan arus 100 tahunan pada kedalaman 90 m. Simulasi ini juga untuk mengetahui apakah *steel catenary riser* mampu beroperasi pada perairan dangkal karena menurut beberapa jurnal, *steel catenary riser* biasanya digunakan pada perairan lebih dari 500 m.

Pengecekan tegangan harus dilakukan dalam menganalisis kekuatan SCR untuk mengetahui apakah kekuatan SCR sudah memenuhi kriteria apa belum. Analisa

Kekuatan SCR pada tugas akhir ini mengacu pada tugas akhir sebelumnya dengan yaitu analisa kekuatan *steel catenary riser* (Cesarian, 2016). Pengecekan menggunakan metode LRFD berdasarkan kriteria ULS pada DNV-OS-F201 (*Dynamic Riser*).

Tegangan yang diambil dari hasil pemodelan adalah berupa *von mises stress* merupakan resultan dari semua tegangan yang terjadi pada riser. Untuk memenuhi syarat kekuatan *riser* maka *von mises stress* harus kurang dari 90% SMYS atau 405 MPa

Tabel 4.3 Kriteria Kekuatan SCR

Direction	Max Von Mises Stress (MPa)	Check
0°	253.534	OK
45°	222.454	OK
90°	195.177	OK
135°	199.210	OK
180°	187.959	OK

Berdasarkan hasil pengecekan kekuatan *riser* dengan gaya lingkungan pada arah 0°, 45°, 90°, 180°, 270° dapat dilihat bahwa *riser* cukup kuat untuk menahan beban-beban yang diberikan yang ditunjukkan dengan terpenuhinya syarat kekuatan *riser*. Dengan demikian maka analisis *fatigue* dapat dilakukan.

4.6 Langkah Analisis *Effective Tension* dan *Bending Moment*

Pemodelan orcafex yang dilakukan bertujuan untuk mendapatkan nilai *effective tension* dan *bend moment* pada struktur riser akibat beban yang diberikan pada riser selama masa operasinya. Pemodelan dilakukan dengan waktu simulasi 10800 detik dan dianggap cukup merepresentasikan masa layan struktur yaitu 20 tahun. Struktur akan dikenakan gaya lingkungan pada arah 0°, 45°, 90°, 180°, 270° .

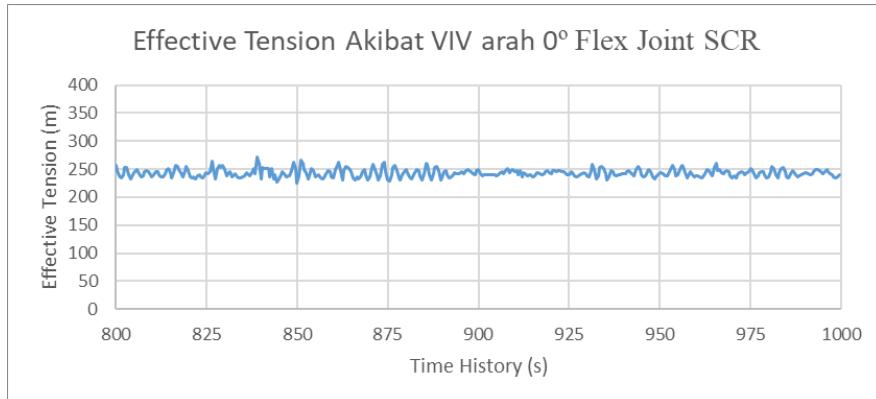
Simulasi dilakukan empat kali yaitu :

1. Kondisi *Steel Catenary Riser* menerima beban dari *1st Order wave loads*
2. Kondisi *Steel Catenary Riser* menerima beban dari *2nd Order wave drift*
3. Kondisi *Steel Catenary Riser* menerima beban dari VIV
4. Kondisi *Steel Catenary Riser* menerima beban gabungan (*1st Order*, *2nd Order*, dan VIV)

4.6.1. *Effective Tension*

Untuk analisa pengaruh *1st order wave loads*, *2nd order wave drift* dan VIV terhadap *Effective Tension* dari *Steel Catenary Riser* akan dianalisa pada flex joint. Untuk titik dan arah yang ditinjau yaitu beban lingkungan dari arah 0° dengan pada bagian *arc length 0m*.

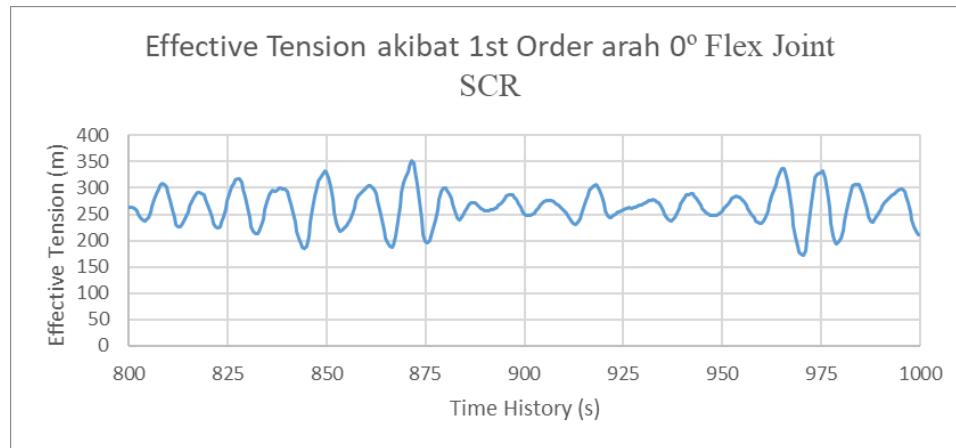
Berikut merupakan hasil analisa *Steel Catenary Riser* akibat VIV Gambar 4.13. Simulasi dilakukan dengan Orcaflex 9.2 dengan faktor VIV Iwan-Blevins dengan durasi 10800s *implicit timestep*. Hasil menunjukkan besar *tension* yang dihasilkan cenderung konstan dengan frekuensi tension paling tinggi.



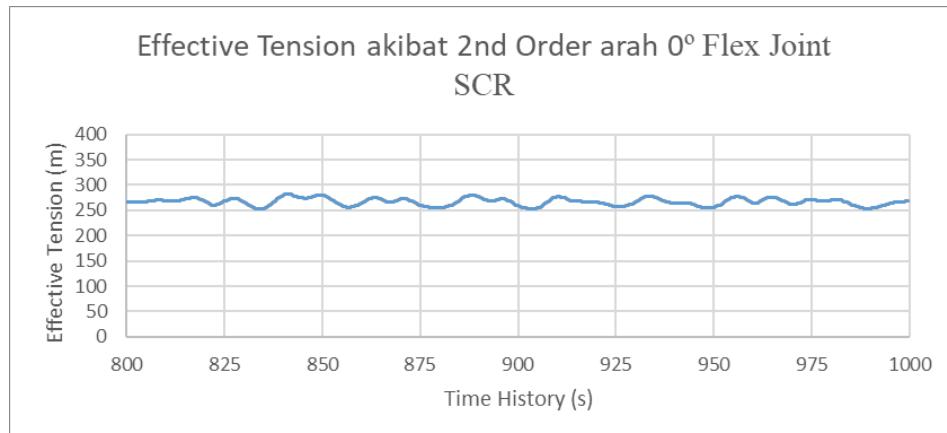
Gambar 4.13 Grafik *Effective Tension* Akibat VIV

Hasil analisa *Steel Catenary Riser* akibat *1st Order Wave loads* Gambar 4.14 dan *2nd order wave drift* Gambar 4.15 menunjukkan hasil yang sangat berbeda.

Frekuensi Tension dari hasil *1st Order Wave loads* seperti Gambar 4.14 lebih tinggi dibandingkan dengan hasil *2nd order wave drift* seperti Gambar 4.15, dikarenakan *1st Order Wave Loads* dipengaruhi oleh *Motion RAO* dari *semisubmersible* dan hasil *2nd order wave drift liner* dengan *offset* dari semisubmersible.



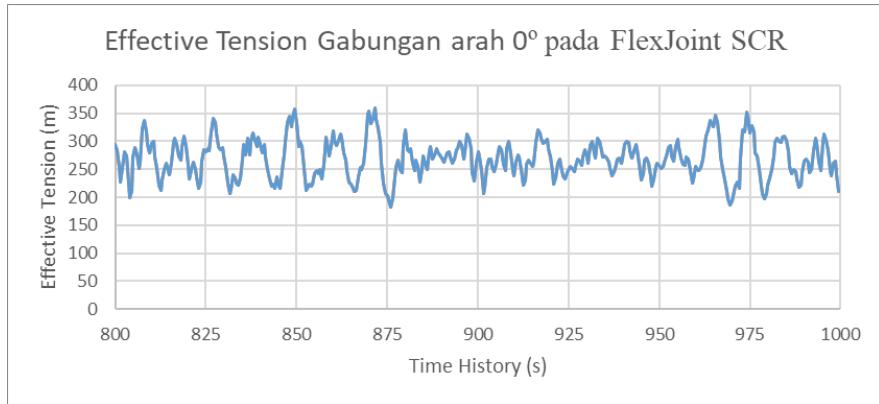
Gambar 4.14 Grafik Effective Tension Akibat *1st Order Wave loads*



Gambar 4.15 Grafik Effective Tension Akibat *2nd order wave drift*

Hasil analisa *Steel Catenary Riser* akibat gabungan dari *1st Order Wave loads*, *2nd order wave drift* dan *Vortex-Induced Vibration* seperti Gambar 4.16 merupakan hasil superposisi. Dari hasil simulasi arah 0° dengan titik flex-joint (Arch length 0m)

selama 200s dapat disimpulkan bahwa *Effective Tension* akibat *1st Order wave loads* paling dominan dalam besaran gaya yang diterima oleh *Steel Catenary Riser*.

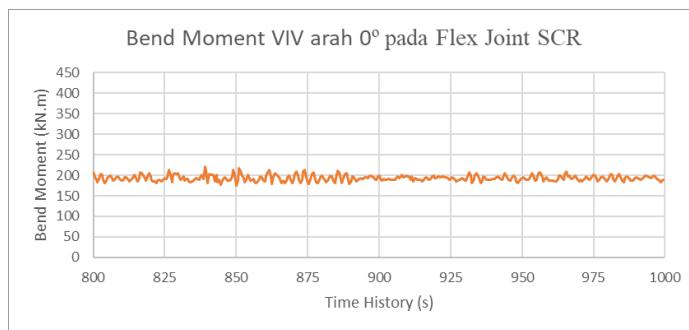


Gambar 4.16 Grafik *Effective Tension* superposisi

4.6.2. Bend Moment

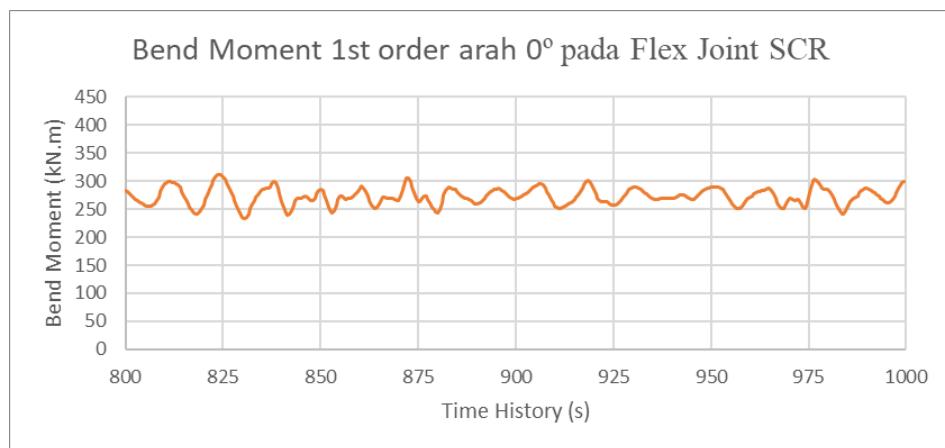
Untuk analisa pengaruh *1st order wave loads*, *2nd order wave drift* dan VIV terhadap *Bend Moment* dari *Steel Catenary Riser* akan dianalisa pada flex joint. Untuk titik dan arah yang ditinjau yaitu beban lingkungan dari arah 0° dengan pada bagian *arc length 0m*.

Berikut merupakan hasil analisa *Steel Catenary Riser* akibat VIV Gambar 4.17. Simulasi dilakukan dengan Orcaflex 9.2 dengan faktor *VIV Iwan-Blevins* dengan durasi 10800s *implicit timestep*. Hasil menunjukan besar *moment* yang dihasilkan cenderung konstan dengan frekuensi tension paling tinggi.

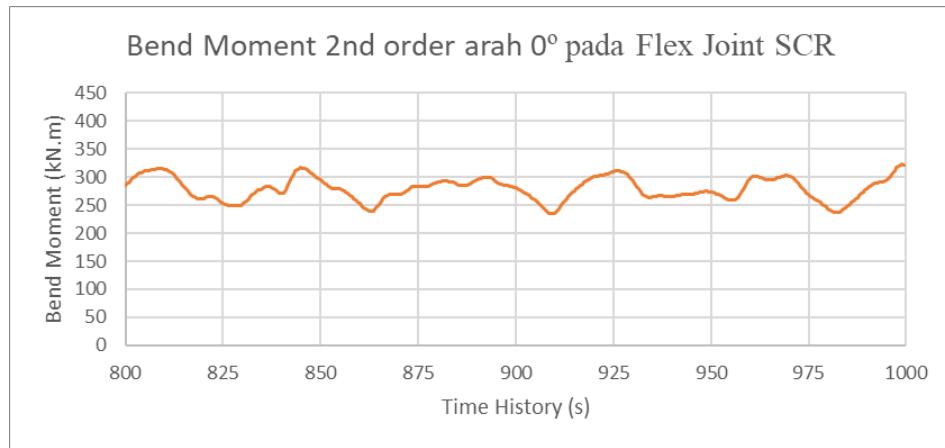


Gambar 4.17 Grafik *Bend Moment* akibat *Vortex-Induced Vibration*

Frekuensi Tension dari hasil *1st Order Wave loads* seperti Gambar 4.18 lebih tinggi dibandingkan dengan hasil *2nd order wave drift* Gambar 4.19, dikarenakan *1st Order Wave Loads* dipengaruhi oleh *Motion RAO* dari *semisubmersible* dan hasil *2nd order wave drift* liner dengan *offset* dari semisubmersible. Tetapi berbeda dengan *effective tension*, pada *2nd order wave drift* besaran nilai moment lebih besar dibandingkan dengan hasil *1st Order Wave Loads* dikarenakan semakin jauh *offset* dari *semisubmersible* maka semakin besar nilai momen.

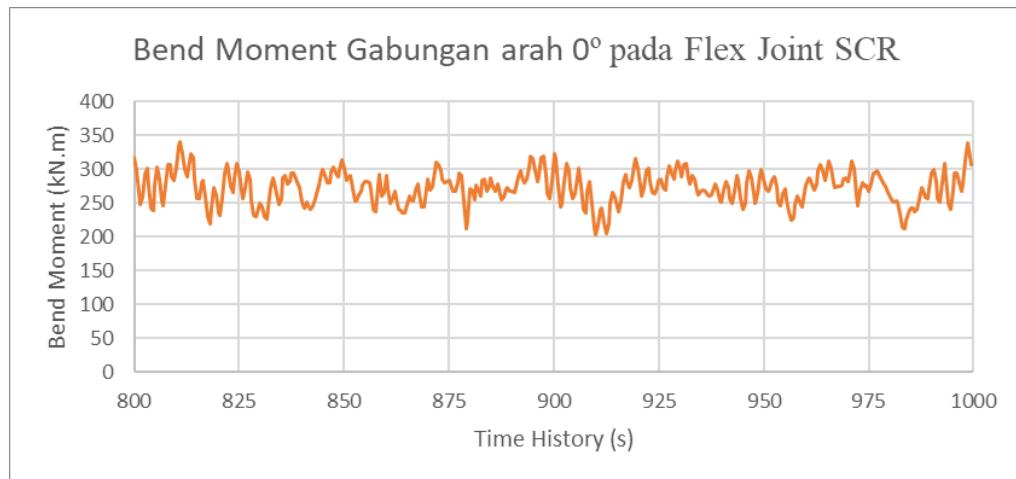


Gambar 4.18 Grafik *Bend Moment* akibat *1st order wave loads*



Gambar 4.19 Grafik *Bend Moment* akibat *2nd order wave drift*

Hasil analisa *Steel Catenary Riser* akibat gabungan dari *1st Order Wave loads*, *2nd order wave drift* dan *Vortex-Induced Vibration* seperti Gambar 4.20 merupakan hasil superposisi. Dari hasil simulasi arah 0° dengan titik flex-joint (Arch length 0m) selama 200s dapat disimpulkan bahwa *Bend Moment* akibat *2nd order wave drift* dengan nilai mean 275 kN.m paling dominan dalam besaran gaya yang diterima oleh *Steel Catenary Riser*.

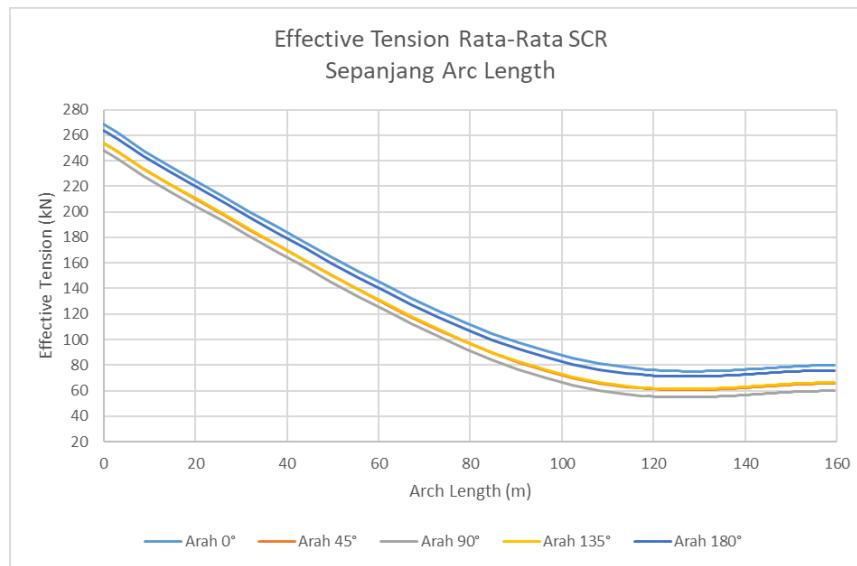


Gambar 4.20 Grafik *Bend Moment* akibat VIV arah 0°

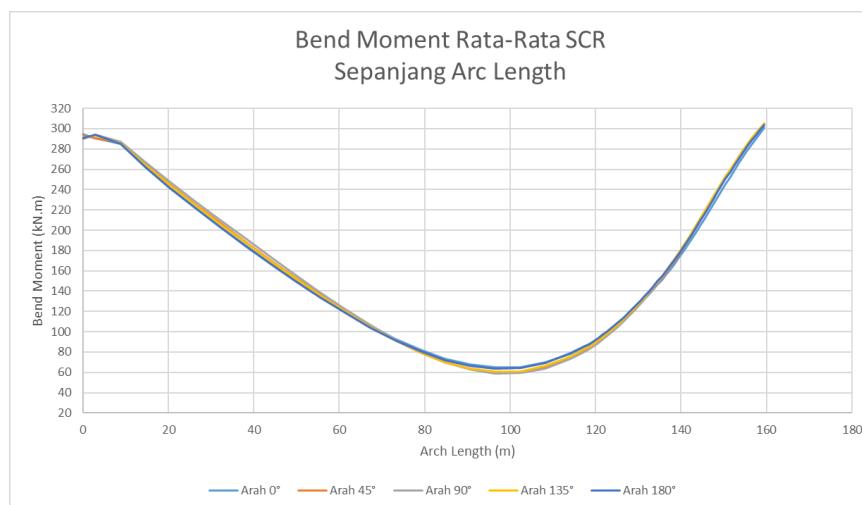
4.7 Titik Tinjau

Titik pada riser yang akan di tinjau untuk dilakukan analisis *fatigue* adalah titik yang kemungkinan paling kritis, yaitu titik yang memiliki nilai tegangan nominal rata-rata yang paling besar. Untuk mengetahui titik yang memiliki tegangan nominal rata-rata yang paling besar maka perlu diketahui titik yang memiliki kombinasi *effective tension* dan *bend moment* yang membuat tegangan paling besar. Nilai *effective tension* dan *bend moment* yang didapatkan dari hasil pemodelan dihitung menggunakan persamaan *axial stress* (2.19) dan persamaan *bending stress* (2.20), kemudian axial stress dan bending stress dijumlahkan sesuai persamaan (2.18) untuk mendapatkan nilai tegangan nominal pada riser. Untuk menghitung tegangan nominal, tebal yang digunakan adalah tfat yaitu 23,9 mm ($t_{nom} - 0,5 \text{ tcorr}$). Nilai tegangan nominal di

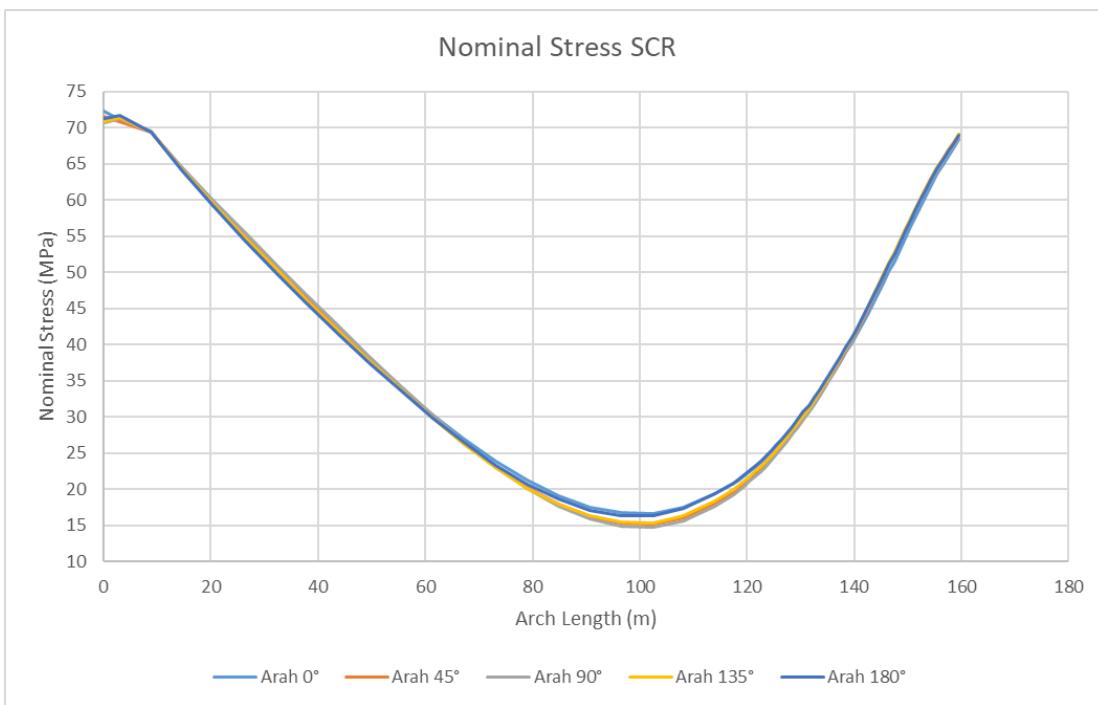
sepanjang riser untuk seluruh kondisi dapat dilihat pada Lampiran. Effective tension dan bend moment yang digunakan yaitu effective tension gabungan dan bend moment gabungan yang disimulasikan selama 10800s. Untuk menentukan titik yang paling kritis maka perlu dilihat tegangan maksimum. Grafik *effective tension* Gambar 4.21, *bend moment* Gambar 4.22, dan tegangan nominal rata-rata Gambar 4.23 di sepanjang *Riser*.



Gambar 4.21 Grafik *Effective Tension* rata-rata sepanjang *arc length*



Gambar 4.22 Grafik *Bend Moment* rata-rata sepanjang *arc length*



Gambar 4.23 Grafik Nominal Stress rata-rata sepanjang *arc length*

Kesimpulan

- *Effective Tension*
Untuk *effective tension* rata-rata terbesar terjadi pada titik flex joint (Arch Length 0 m) dan pada beban lingkungan arah 0° dengan nilai sebesar 268,39952 kN
- *Bend Moment*
Untuk *bend moment* rata-rata terbesar terjadi pada touchdown point (Arch Length 160 m) dan pada beban lingkungan arah 135° dengan nilai sebesar 346,05 kN.m
- *Nominal Stress Maximum*
Untuk *bend moment* terbesar terjadi pada titik near flex joint (Arch Length 0 m) dan pada beban lingkungan arah 90° dengan nilai sebesar 72,253 MPa

Kesimpulan bagian riser yang memiliki tegangan terbesar untuk seluruh arah gaya lingkungan dapat dilihat pada Tabel 4.4

Tabel 4.4 Tegangan Maksimum SCR

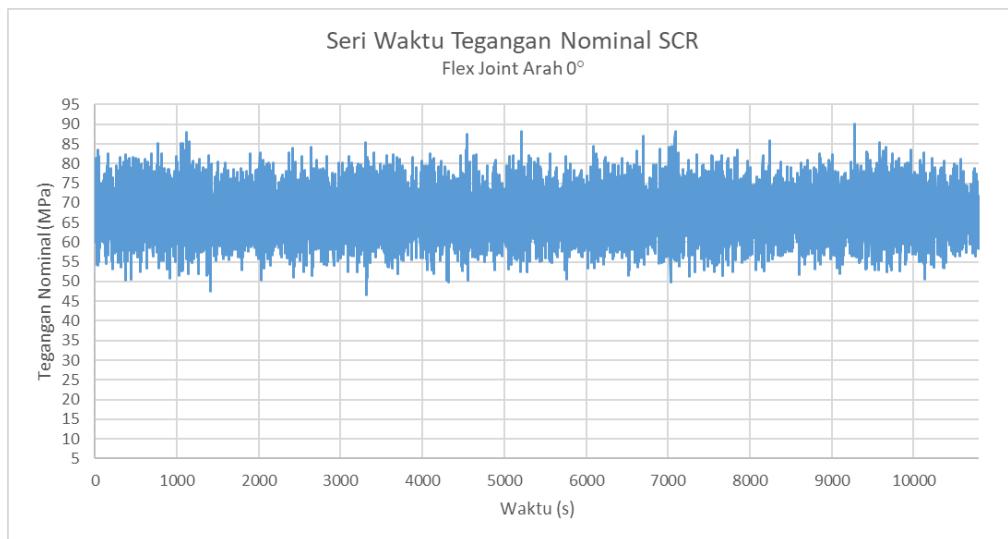
Arah Gaya Lingkungan (°)	Effective Tension			Bend Moment			Nominal Stress	
	Arc Length (m)	Besar Effective Tension (kN)	Axial Stress (MPa)	Arc Length (m)	Besar Bend Moment (kN.m)	Bending Stress (Mpa)	Arc Length (m)	Besar Nominal Stress (Mpa)
0°	0	268,39952	7,38	160	300,64	66,15	0	72,253
45°	0	253,8242	6,9	160	305,411	67,204	0	71,52
90°	0	247,8992	6,82	160	304,06	66,9	0	70,67
135°	0	253,8267	6,98	160	346,05	76,2	0	70,871
180°	0	263,658	7,25	160	345,87	76,01	0	71,222

4.8 Seri Waktu Tegangan Nominal

Setelah mendapatkan nilai tegangan nominal di sepanjang riser untuk seluruh arah gaya lingkungan, kemudian dilakukan analisis untuk melihat seri waktu tegangan nominal pada titik riser yang memiliki tegangan rata-rata paling besar. Analisis selanjutnya dilakukan hanya pada titik riser yang menjadi tinjauan. Seri waktu dari *effective tension* dan *bend moment* pada titik tersebut kemudian dihitung kembali menggunakan persamaan (2.18), persamaan (2.19), dan persamaan (2.20) untuk mendapatkan seri waktu tegangan nominal-nya. Hasil perhitungan tegangan nominal pada titik dengan tegangan nominal terbesar untuk seluruh arah datang gaya lingkungan dapat dilihat pada gambar berikut.

- Arah 0°

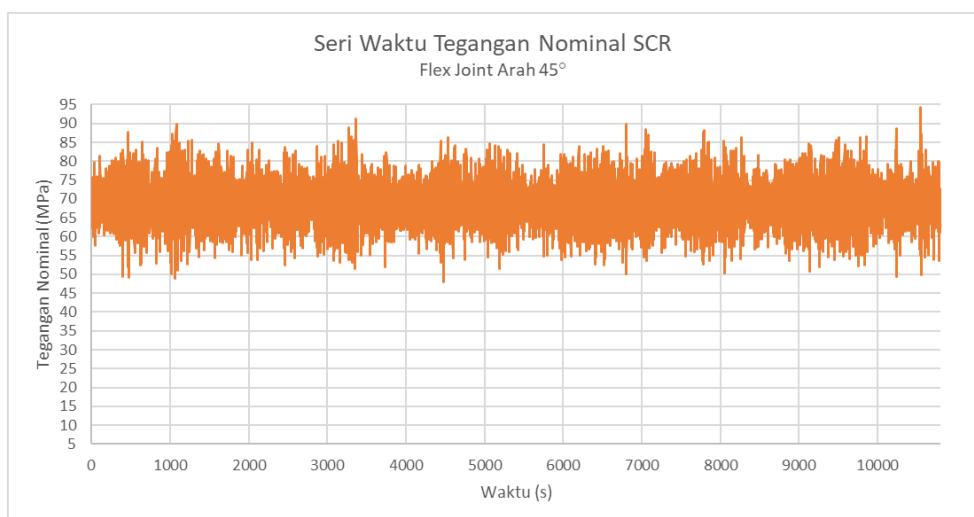
Seri Waktu Tegangan Nominal dengan gaya lingkungan arah 0° dapat dilihat pada Gambar 4.24.



Gambar 4.24 Grafik Nominal Stress Time History Arah 0°

- Arah 45°

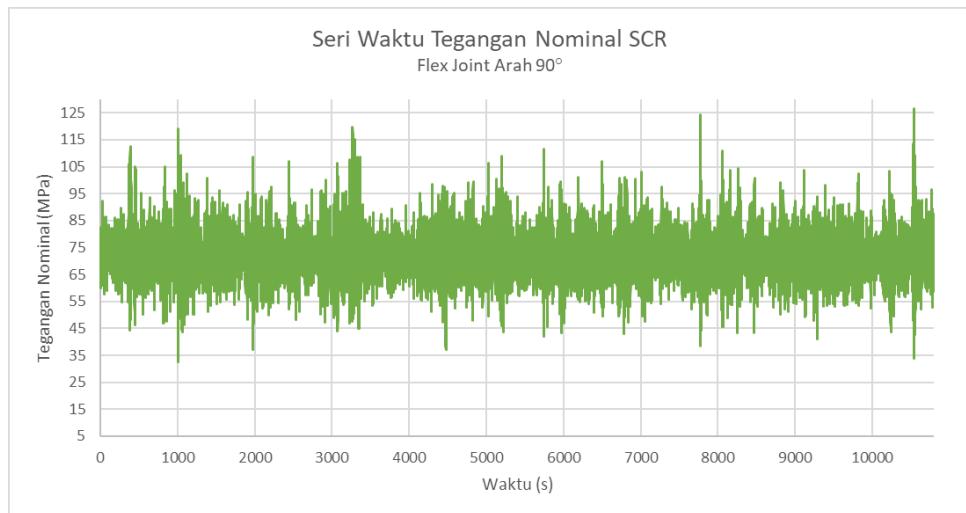
- Seri Waktu Tegangan Nominal dengan gaya lingkungan arah 45° dapat dilihat pada Gambar 4.25.



Gambar 4.25 Grafik Nominal Stress Time History Arah 45°

- Arah 90°

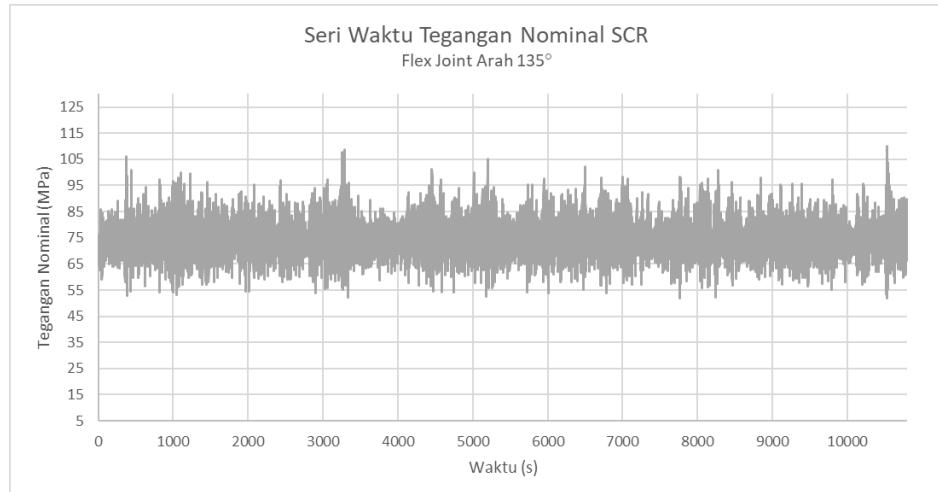
Seri Waktu Tegangan Nominal dengan gaya lingkungan arah 0° dapat dilihat pada Gambar 4.26.



Gambar 4.26 Grafik Nominal Stress Time History Arah 90°

- Arah 135°

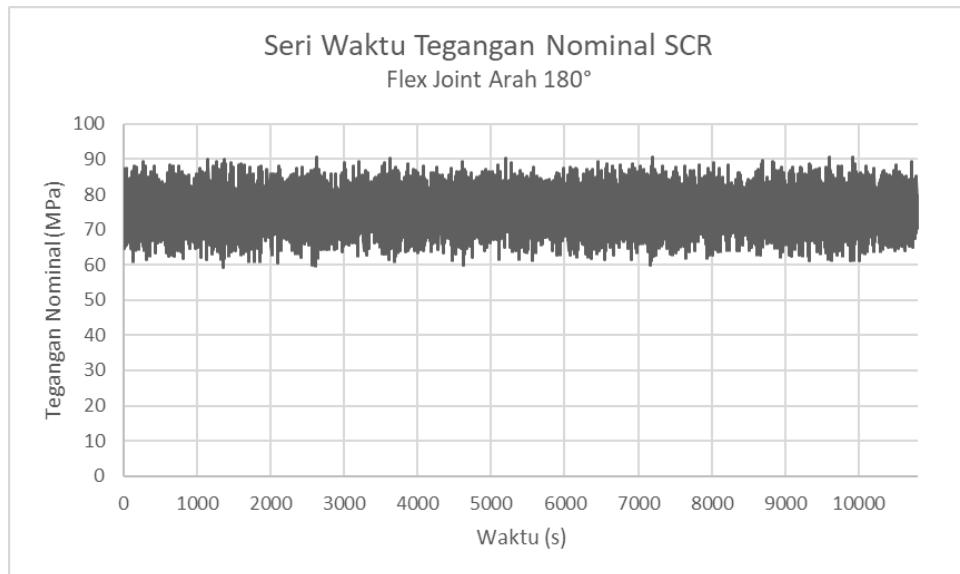
Seri Waktu Tegangan Nominal dengan gaya lingkungan arah 0° dapat dilihat pada Gambar 4.27.



Gambar 4.27 Grafik Nominal Stress Time History Arah 135°

- Arah 180°

Seri Waktu Tegangan Nominal dengan gaya lingkungan arah 0° dapat dilihat pada Gambar 4.28



Gambar 4.28 Grafik *Nominal Stress Time History* Arah 180°

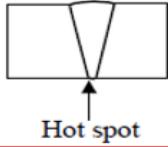
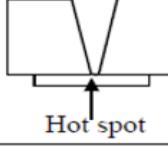
4.9 Rentang Tegangan dan Jumlah Siklus

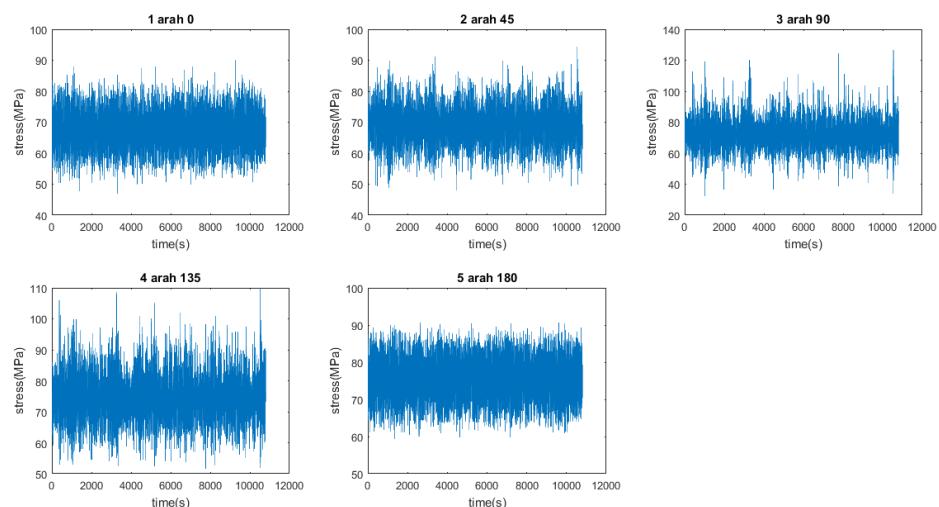
Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, stress range atau rentang tegangan merupakan nilai yang didapat dari pengaplikasian stress concentration factor dan nilai koreksi ketebalan ke rentang tegangan nominal. Untuk mendapatkan nilai rentang tegangan nominal dilakukan pembedahan seri waktu tegangan nominal untuk setiap kondisi menggunakan *Software Matlab 2017*. Coding yang digunakan yaitu milik Adam Nieslony yang dipublikasikan *Mathworks File Exchange*, algoritma yang dibuat sesuai dengan ASTM standard (Standard practices for cycle counting in fatigue analysis). Input data yang dimasukan kedalam coding adalah *stress time history* Gambar 4.29 dan keluaran dari perangkat lunak *Matlab 2017* adalah *Range*, *Cycle Count*, dan *Mean Stress* yang ditentukan berdasarkan prinsip rainflow. Untuk dari matlab 2017 pada lampiran.

Jenis sambungan yang digunakan untuk pipa riser ini adalah jenis single side symmetric weld groove yang didefinisikan sebagai F1 sehingga berdasarkan DNV RP C203 “Fatigue Design of Steel Structure” memiliki nilai SCF 1 (satu) dan thickness exponent (k) = 0 sesuai Tabel 4. sehingga nilai rentang tegangan (stress range) sama dengan nilai rentang tegangan nominal (*nominal stress range*). Berikut merupakan table klasifikasi sambungan untuk *pipeline* dan *riser* dari DNV RP C203 “Fatigue Design of Steel Structure”

Tabel 4.5 Klasifikasi Sambungan untuk Pipeline dan Riser yang Digunakan

(DNV RP C203, 2005)

Description		Tolerance requirement	S-N curve	Thickness exponent k	SCF
Welding	Geometry and hot spot				
Single side	 Hot spot	$\delta \leq \min(0.15t, 3 \text{ mm})$	F1	0.00	1.0
		$\delta > \min(0.15t, 3 \text{ mm})$	F3	0.00	1.0
Single side on backing	 Hot spot	$\delta \leq \min(0.1t, 2 \text{ mm})$	F	0.00	1.0
		$\delta > \min(0.1t, 2 \text{ mm})$	F1	0.00	1.0



Gambar 4.29 Input Stress Time History Matlab 2017

Dari hasil *Rainflow Counting* pada Matlab 2017 dapat disimpulkan seperti pada Tabel 4.6

Tabel 4.6 Stress Range dan Siklus Tegangan yang terjadi

Range	Number of Cycle Each Direction				
	0°	45°	90°	135°	180°
2,5	2138	2758	1666	2011	1277
7,5	1514	549	345	374	2279
12,5	352	220	260	266	428
17,5	61	55	183	125	123
22,5	3	7	26	39	1
27,5	1	1	20	8	0
32,5	0	0	7	1	0
37,5	0	0	1	0	0

4.10 Angka Probabilitas Kejadian

Siklus yang telah didapat harus dilakukan perhitungan dengan variabel kemungkinan terjadinya angin atau gelombang dalam tiap arah. Dalam tugas akhir ini, sehingga untuk menentukan Angka Probabilitas Kejadian tiap arah diperlukan data angin yang terjadi di tiap arah di laut Natuna. Data yang digunakan merupakan kejadian tiap waktu dalam satuan jam dengan arah masing-masing. Data didapat dari BMKG untuk laut natuna di sekitar Belanak dan Pulau Subi Utara yang sudah dilakukan *hindcasting*. Data angina yang digunakan dari tahun 2007-2009 selama 3 tahun karena mempertimbangkan El Nino dan La Nina dikawasan perairan Natuna lalu diolah oleh Wind Rose Plot (WRPlot). Angka probabilitas dapat dilihat dalam Tabel 4.7

Tabel 4.7 Angka Probabilitas kejadian tiap arah

Direction	Pi
0	0,17835
45	0,26961
90	0,18109
135	0,04782
180	0,32308

Setelah didapat angka probabilitas, lalu angka probabilitas di hitung dengan siklus tiap arah, lalu didapat siklus (n) yang digunakan untuk menghitung umur *fatigue*. Hasil perhitungan Siklus yang sudah dihitung dengan angka probabilitas kejadian tiap arah seperti Tabel 4.8

Tabel 4.8 Angka Probabilitas kejadian tiap arah

Range	Number of Cycle Each Direction					Total
	0°	45°	90°	135°	180°	
2,5	381,3123	743,5844	301,6959	96,16602	412,4116	1936
7,5	270,0219	148,0159	62,47605	17,88468	736,2993	1235
12,5	62,7792	59,3142	47,0834	12,72012	138,2782	321
17,5	10,87935	14,82855	33,13947	5,9775	4,0385	67
22,5	0,53505	1,88727	4,70834	1,86498	0,32308	10
27,5	0,17835	0,26961	3,6218	0,38256	0	5
32,5	0	0	1,26763	0,04782	0	2
37,5	0	0	0,18109	0	0	1
Number of Cycle Total					3574,174	

4.10 Perhitungan Umur *Fatigue*

Untuk menghitung umur fatigue, perlu diketahui jumlah siklus yang menyebabkan kegagalan (N) menggunakan kurva S-N. Kurva S-N yang digunakan adalah kurva S-N untuk kondisi air laut dengan proteksi katodik seperti pada Tabel 4.9.

Input yang digunakan untuk perhitungan umur fatigue berdasarkan Tabel 4.9 untuk garis F1 pada kurva S-N adalah sebagai berikut:

- $N \leq 10^6$ cycles

Nilai eksponen fatigue (m_1) = 3

Nilai karakteristik kekuatan ($\log a_1$) = 11,299

- $N > 10^6$ cycles

Nilai eksponen fatigue (m_2) = 5

Nilai karakteristik kekuatan ($\log a_2$) = 14,832

Tabel 4.9 Input untuk Perhitungan Umur *Fatigue*

(DNV RP C203, 2005)

S-N curve	$N \leq 10^6$ cycles		$N > 10^6$ cycles $\log \bar{a}_2$ $m_2 = 5.0$	Fatigue limit at 10^7 cycles*)	Thickness exponent k	Stress concentration in the S-N detail as derived by the hot spot method
	m_1	$\log \bar{a}_1$				
B1	4.0	14.917	17.146	106.97	0	
B2	4.0	14.685	16.856	93.59	0	
C	3.0	12.192	16.320	73.10	0.15	
C1	3.0	12.049	16.081	65.50	0.15	
C2	3.0	11.901	15.835	58.48	0.15	
D	3.0	11.764	15.606	52.63	0.20	1.00
E	3.0	11.610	15.350	46.78	0.20	1.13
F	3.0	11.455	15.091	41.52	0.25	1.27
F1	3.0	11.299	14.832	36.84	0.25	1.43
F3	3.0	11.146	14.576	32.75	0.25	1.61
G	3.0	10.998	14.330	29.24	0.25	1.80
W1	3.0	10.861	14.101	26.32	0.25	2.00
W2	3.0	10.707	13.845	23.39	0.25	2.25
W3	3.0	10.570	13.617	21.05	0.25	2.50
T	3.0	11.764	15.606	52.63	0.25 for SCF ≤ 10.0 0.30 for SCF > 10.0	1.00

Faktor keamanan yang digunakan adalah untuk kondisi normal adalah 6,0 sesuai Tabel. Perhitungan *fatigue damage* dan umur *fatigue* sesuai persamaan (2.22) dan (2.23) untuk semua kondisi adalah sebagai berikut Tabel 4.10.

Tabel 4.10 *Fatigue Damage* dan umur *Fatigue* pada bagian *flex joint*

Fatigue Calculation										
Stress Range	n	$N < 10^6$		$N > 10^6$		N1	N2	N	Damage	D.DDF
		m1	$\log a_1$	m2	$\log a_2$					
2,5	1936	3	11,299	5	14,832	1,27E+10	6,96E+12	6,96E+12	2,78E-10	1,67E-09
7,5	1235	3	11,299	5	14,832	4,72E+08	2,86E+10	2,86E+10	4,31E-08	2,59E-07
12,5	321	3	11,299	5	14,832	1,02E+08	2,23E+09	2,23E+09	1,44E-07	8,65E-07
17,5	67	3	11,299	5	14,832	3,71E+07	4,14E+08	4,14E+08	1,62E-07	9,71E-07
22,5	10	3	11,299	5	14,832	1,75E+07	1,18E+08	1,18E+08	8,49E-08	5,09E-07
27,5	5	3	11,299	5	14,832	9,57E+06	4,32E+07	43185359	1,16E-07	6,95E-07
32,5	2	3	11,299	5	14,832	5,80E+06	1,87E+07	18731959	1,07E-07	6,41E-07
37,5	1	3	11,299	5	14,832	3,77E+06	9,16E+06	9158907	1,09E-07	6,55E-07
										Fatigue Damage Simulasi
										4,60E-06
										Fatigue Damage (1 tahun)
										1,34E-02
										Fatigue Life (tahun)
										74,49463

Berdasarkan hasil perhitungan diatas menunjukan bahwa *Steel Catenary Riser* dengan jenis Grade X65, Diameter 20 *inch* memiliki umur *fatigue* yaitu sebesar 74,49463 tahun dengan simulasi selama 10800s sesuai aturan DNV dan beban yang diterima akibat pengaruh *1st order wave loads*, *2nd order wave drift* dan VIV dengan 5 arah gaya lingkungan yaitu arah 0° , 45° , 90° , 180° , 270° . Hasil perhitungan sesuai masa layan operasi yang diharapkan yaitu 20 tahun. Apabila *riser* mengalami kegagalan fatigue sebelum masa layannya terpenuhi maka *riser* perlu diperkuat, salah satu caranya adalah dengan menambah tebal penampang pipa *riser*. Desain pipa *riser* dilakukan dengan iterasi menggunakan tebal pipa riser sampai didapatkan umur *fatigue riser* yang memenuhi masa layan desain yaitu 20 tahun.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari analisis yang telah dilakukan, dapat diambil kesimpulan yang menjawab rumusan masalah di atas. Berikut adalah kesimpulan yang dapat diambil dari penggerjaan tugas akhir ini :

- a) *Fatigue* pada *steel catenary riser* terjadi akibat beban siklis. Beban siklis yang sering diperhitungkan dalam analisa *fatigue* pada *riser* yaitu *1st order wave loads*, *2nd order wave drift* dan *Vortex Induced Vibration* (VIV). Dalam tugas akhir ini dilakukan analisis pengaruh *1st order wave loads*, *2nd Order wave drift* dan VIV terhadap *effective tension* dan *bending moment* yang bekerja pada *Steel Catenary Riser*. Didapatkan hasilnya bahwa *1st order wave loads* paling dominan dalam *effective tension*, *1st order wave loads* dipengaruhi oleh RAO yang terjadi pada semisubmersible sehingga beban *effective tension* yang diterima paling dominan dipengaruhi RAO. Sedangkan *2nd order wave drift* dominan terhadap hasil *Bend Moment* yang terjadi pada *Steel Catenary Riser*, karena *2nd order wave drift* dipengaruhi *offset* dari *semisubmersible*.
- b) Diketahui bahwa *effective tension* terbesar terjadi pada bagian *top riser* atau *hang-off location (Flex Joint)*. *Tension* sebesar 268,39952 kN diterima oleh *riser* dari arah pembebanan 0^0 , dan untuk *Bending moment* terbesar terjadi pada area *touchdown point* dengan hasil untuk arah pembebanan 135^0 sebesar 346,05 kN.m Sehingga untuk *Nominal Stress* rata-rata terbesar terjadi pada *hang-off location (Flex Joint)* dengan hasil untuk arah pembebanan 90^0 yaitu sebesar 72,253 MPa dan nilai *Nominal Stress* Rata-Rata terbesar sebagai titik tinjau untuk analisa *fatigue*.

- c) Berdasarkan hasil perhitungan diatas menunjukan bahwa *Steel Catenary Riser* dengan jenis Grade X65, Diameter 20 inch memiliki umur *fatigue* yaitu sebesar 74,49463 tahun dengan simulasi selama 10800s sesuai aturan DNV dan beban yang diterima akibat pengaruh *1st order wave loads*, *2nd order wave drift* dan VIV dengan 5 arah gaya lingkungan yaitu arah 0° , 45° , 90° , 180° , 270° . Hasil perhitungan sesuai masa layan operasi yang diharapkan yaitu 20 tahun.

5.2 Saran

Saran yang diberikan untuk penelitian lebih lanjut adalah

1. Perlu dilakukan analisis parameter *Vortex Induced Vibration* dan menghitung pengaruh VIV di sepanjang riser
2. Perlu dilakukan analisis sensitivitas dengan merubah parameter lain (misal : sensitivitas kekuatan *riser* terhadap perubahan tebal dinding, tekanan internal dan lainnya)
3. Perlu dilakukan analisis perbandingan umur fatigue jenis riser yang lain (misal : *top tension riser* dengan *steel catenary riser*)

DAFTAR PUSTAKA

- ABS. 2015. *Mobile Offshore Drilling Units*. Houston : American Bureau of Shipping.
- Agusta, A. 2012. *Analisis Ketebalan dan Konfigurasi Steel Catenary Riser di Laut Dalam*. Bandung : Institut Teknologi Bandung.
- Agusta, A. 2014. *Structural Design of Steel Catenary Riser with the Environmental Contour Line Method for Operation in Indonesian Water*. Trondheim : Norwegian University of Science and Technology.
- API. 1998. *Recommended Practice 2RD:Design of Risers for Floating Production Systems (FPSS) and Tension-Leg Platforms (TLPs)*.USA : American Petroleum Institute.
- API. 1987. *Recommended Practice for The Analysis of Spread Mooring Systems for Floating Drilling Units*. USA : American Petroleum Institute.
- Bai, Y. dan Bai, Q. 2005. *Subsea Pipelines and Risers*. Houston : Elsevier.
- Bai, Y. dan Bai, Q. 2014. *Subsea Pipeline Design, Analysis, and Installation*. Houston : Elsevier.
- Bhattacharya, R. 1978. *Dynamic of Marine Vehicles*. New York : John Wiley & Sons.
- Buberg, T. 2014. *Design and Analysis of Steel Catenary Riser Systems for Deep Waters*. Trondheim : Norwegian University of Science and Technology.
- DNV. 2010. *Offshore Standard DNV-OS-F201:Dynamic Risers* .Hovik: Det Norsk Veritas.
- Djatmiko, E.B. 2012. *Perilaku dan Operabilitas Bangunan Laut di Atas Gelombang Acak*. Surabaya : ITS Press
- Gemilang, G. 2012. *Analisis Riser Interference Konfigurasi Steel Catenary Riser Pada Laut Dalam*. Bandung : Institut Teknologi Bandung.
- Herwanzah, F. 2015. *Analisis Tegangan Dinamis Flexible Riser Akibat Gerakan Semi-Submersible Pada Kondisi Operasi*. Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Howells, H. 1995. "Advances in Steel Catenary Riser Design".Aberdeen : Journal DEEPTEC.

- Keprate, A. 2014. *Appraisal of Riser Concept for FPSO in Deepwater*. Stavanger : University of Stavanger.
- Lee, J. 2007. *Introduction to Offshore Pipeline and Risers*. Houston: Technip USA.
- Nurwanto, T. 2012. *COBRA Riser Concept for Ultra Deepwater Condition*. Stavanger : University of Stavanger.
- Ruswandi, I. 2009. *Improvisation of Deepwater Weight Distributed Steel Catenary Riser*. Stavanger : University of Stavanger.
- Saglar, N., Toleman, B., Thethi, R. 2015. *Frontier Deepwater Developments-The Impact on Riser System Design in Water Depths Greater than 3,000 m*. Houston : Offshore Technology Conference.
- Sparks, C. 2007. *Fundamental of Marine Riser Mechanics :Basic Principles and Simplified Analysis*. Oklahoma: PennWell.
- Yue,B. ,Campbell,M. ,Walters,D., Thompson,H., dan Raghavan,K. 2010. *Improved SCR Design for Dynamic Vessel Application* .Shanghai : ASME 2010 29th International Conference.

Nominal Stress di sepanjang riser - Arah 0°

Arc Length (m)	Effective Tension (kN)	Bend Moment (kN.M)	Axial Stress (MPa)	Bending Stress (MPa)	Nominal Stress (MPa)
0	268,3995246	294,798221	7,384340165	64,86900854	72,2533487
2,925	262,2535107	290,4660801	7,215247998	63,91574063	71,13098862
8,775	247,1462293	284,894155	6,799609018	62,68966384	69,48927286
14,625	235,291915	262,2128539	6,473467273	57,69874662	64,17221389
20,475	223,3639774	241,2844146	6,145299967	53,09353869	59,23883866
26,325	211,4290505	221,6308961	5,816940371	48,76887128	54,58581165
32,175	199,5396957	202,9177445	5,489834572	44,65112732	50,14096189
38,025	187,7434331	184,9338131	5,165289976	40,69384496	45,85913494
43,875	176,0890503	167,5769067	4,844648846	36,87453661	41,71918545
49,725	164,633657	150,8433526	4,529482413	33,19239408	37,72187649
55,575	153,4481967	134,8197275	4,221742507	29,66646821	33,88821072
61,425	142,6097787	119,6756164	3,923550603	26,33407541	30,25762601
67,275	132,2152126	105,6549441	3,637570172	23,24889019	26,88646036
73,125	122,3713808	93,06532423	3,366741813	20,47860157	23,84534339
78,975	113,1929497	82,26646673	3,114220288	18,10236207	21,21658235
84,825	104,7991713	73,65688501	2,883286515	16,20786274	19,09114926
90,675	97,30494309	67,65936051	2,677101611	14,88813474	17,56523635
96,525	90,81448304	64,70595392	2,498532871	14,23825104	16,73678391
102,375	85,41055429	65,22353547	2,349857316	14,35214251	16,70199983
108,225	81,15533827	69,62124621	2,232785713	15,31983877	17,55262448
114,075	78,0685899	78,28189068	2,147861569	17,22557422	19,37343579
117,5	76,78715739	84,89181693	2,112606166	18,68005844	20,79266461
118,5	76,48799758	87,29825821	2,104375533	19,20958491	21,31396044
119,5	76,22028626	89,84694166	2,097010127	19,77041112	21,86742124
120,5	75,98507027	92,53943469	2,090538749	20,36288197	22,45342072
121,5	75,78129734	95,37727266	2,084932448	20,98733531	23,07226776
122,5	75,60774784	98,36201537	2,080157668	21,64411438	23,72427205
123,5	75,46428958	101,4951862	2,076210774	22,33355439	24,40976516
124,5	75,34993195	104,7782799	2,07306451	23,05598422	25,12904873
125,5	75,26374534	108,212824	2,070693301	23,81174005	25,88243335
126,5	75,20537195	111,8002688	2,069087304	24,60114098	26,67022828
127,5	75,17341248	115,5420985	2,06820802	25,42451359	27,49272161
128,5	75,16744589	119,4398028	2,068043864	26,28218569	28,35022955
129,5	75,18637395	123,4948459	2,068564622	27,17447949	29,24304411
130,5	75,22916543	127,7087238	2,069741922	28,10172418	30,1714661
131,5	75,29417476	132,0829274	2,071530491	29,0642478	31,13577829
132,5	75,3804352	136,6189824	2,073903731	30,06238608	32,13628981
133,5	75,48725812	141,3184052	2,076842696	31,09647271	33,17331541
134,5	75,61319526	146,1827462	2,08030754	32,16684884	34,24715638
135,5	75,75615474	151,2135691	2,084240712	33,27385854	35,35809925
136,5	75,91550324	156,412468	2,088624787	34,41785263	36,50647741
137,5	76,08944564	161,7810483	2,093410376	35,5991843	37,69259468
138,5	76,27639683	167,3208944	2,098553869	36,81820227	38,91675614
139,5	76,47482919	173,0336062	2,104013238	38,07525852	40,17927176
140,5	76,68281647	178,9206642	2,109735487	39,37067889	41,48041438
141,5	76,8987954	184,9830595	2,115677606	40,70468141	42,82035901
142,5	77,12141779	191,2205108	2,121802503	42,07720421	44,19900672
143,5	77,34833359	197,6300905	2,128045522	43,4876031	45,61564862
144,5	77,57827735	204,2044491	2,134371849	44,93426081	47,06863266
145,5	77,81024439	210,9300084	2,14075384	46,41418958	48,55494342
146,5	78,04194555	217,7849178	2,147128517	47,92258124	50,06970975
147,5	78,27045173	224,7379346	2,153415292	49,45256097	51,60597626
148,5	78,49237021	231,7499581	2,159520822	50,99552487	53,15504569
149,5	78,70519956	238,7763594	2,165376288	52,54165255	54,70702884
150,5	78,90604176	245,7690894	2,170901958	54,08037099	56,25127295
151,5	79,09178178	252,6795993	2,176012129	55,60099729	57,77700942
152,5	79,26063438	259,4615843	2,180657685	57,09334225	59,27399994
153,5	79,41112988	266,0734066	2,184798192	58,5482437	60,73304189
154,5	79,54210873	272,4795889	2,188401746	59,957895	62,14629675
155,5	79,65453255	278,6512242	2,191494806	61,3159353	63,5074301
156,5	79,74870743	284,5662434	2,194085792	62,61750838	64,81159418
157,5	79,82534966	290,2092108	2,196194411	63,85921771	66,05541212
158,5	79,88572476	295,5706701	2,19785548	65,03898245	67,23683793
159,5	79,93127602	300,6464218	2,199108709	66,15587855	68,35498726

Nominal Stress di sepanjang riser - Arah 45°

Arc Length (m)	Effective Tension (kN)	Bend Moment (kN.M)	Axial Stress (MPa)	Bending Stress (MPa)	Nominal Stress (MPa)
0	253,8242731	293,2914613	6,983338655	64,53745291	71,52079156
2,925	247,6762676	290,6728128	6,814191694	63,96123123	70,77542292
8,775	233,1226401	286,0963531	6,41378511	62,95420207	69,36798718
14,625	221,2878599	264,8810887	6,088180799	58,28587955	64,37406035
20,475	209,3789078	244,8464184	5,760535831	53,87734142	59,63787725
26,325	197,4485722	225,6157394	5,432302551	49,64571794	55,07802049
32,175	185,5425793	206,9332821	5,104739001	45,53472813	50,63946713
38,025	173,7064387	188,6531632	4,779097259	41,51227105	46,29136831
43,875	161,9899673	170,731667	4,456747917	37,56872727	42,02547518
49,725	150,4513437	153,2213527	4,139291609	33,7156622	37,85495381
55,575	139,159953	136,2638656	3,828637298	29,98424425	33,81288155
61,425	128,1986441	120,0810536	3,527064358	26,42329002	29,95035438
67,275	117,6647758	104,9694985	3,237251374	23,09806101	26,33531238
73,125	107,6699704	91,29444468	2,962269357	20,08892758	23,05119693
78,975	98,33778578	79,47787359	2,705517688	17,48874482	20,19426251
84,825	89,79889635	69,98328358	2,470591549	15,39950345	17,870095
90,675	82,18419302	63,29827286	2,261092073	13,92849722	16,1895893
96,525	75,61452246	59,9159596	2,080344055	13,18423457	15,26457862
102,375	70,1899655	60,31676162	1,931100967	13,27242923	15,20353019
108,225	65,97783041	64,95248095	1,815214628	14,29249819	16,10771282
114,075	63,00053115	74,23480033	1,733301701	16,33503038	18,06833208
117,5	61,80844187	81,34423315	1,700504353	17,89942876	19,59993311
118,5	61,53863464	83,93668597	1,693081283	18,46988622	20,1629675
119,5	61,30214995	86,68308136	1,686575	19,07421804	20,76079304
120,5	61,09835021	89,58500422	1,680967961	19,71277297	21,39374093
121,5	60,92664559	92,6439289	1,676243938	20,38587545	22,06211938
122,5	60,78629484	95,86134552	1,672382539	21,09385335	22,76623589
123,5	60,67655908	99,23874145	1,669363435	21,83703397	23,5063974
124,5	60,59657636	102,7775238	1,667162911	22,61572693	24,28288984
125,5	60,54546468	106,479145	1,665756701	23,43025185	25,09600855
126,5	60,52226834	110,3449991	1,665118512	24,28091549	25,946034
127,5	60,5259829	114,3764542	1,665220709	25,16801886	26,83323957
128,5	60,55550453	118,5749251	1,666032922	26,0918733	27,75790622
129,5	60,60970465	122,9417759	1,667524103	27,05277897	28,72030307
130,5	60,68738724	127,4783636	1,669661345	28,05103445	29,7206958
131,5	60,78726866	132,1860726	1,672409331	29,08694444	30,75935377
132,5	60,90800124	137,0662827	1,675730986	30,16081249	31,83654347
133,5	61,04819731	142,1203586	1,679588129	31,27293891	32,95252704
134,5	61,206373	147,3496657	1,683939937	32,42362416	34,10756409
135,5	61,3810012	152,7555239	1,688744394	33,61315869	35,30190308
136,5	61,57048912	158,3391938	1,693957679	34,84181987	36,53577755
137,5	61,77313271	164,1018081	1,69953291	36,10985695	37,80938986
138,5	61,98722579	170,0441418	1,705423144	37,41744048	39,12286363
139,5	62,21100155	176,1663096	1,711579773	38,76459568	40,47617545
140,5	62,4426616	182,4671545	1,717953319	40,15106794	41,86902126
141,5	62,68037966	188,9432724	1,724493536	41,57610825	43,30060179
142,5	62,92226168	195,5878282	1,731148313	43,03821255	44,76936086
143,5	63,16625828	202,3892628	1,737861268	44,53483733	46,2726986
144,5	63,41014978	209,3302413	1,744571331	46,0621681	47,80673943
145,5	63,65166366	216,3866075	1,75121598	47,6148894	49,36610538
146,5	63,88839699	223,5266808	1,757729105	49,18603007	50,94375918
147,5	64,11769048	230,7116013	1,76403754	50,76703917	52,53107671
148,5	64,3366324	237,8969508	1,770061178	52,34814267	54,11820385
149,5	64,54250578	245,0352009	1,775725268	53,91888215	55,69460742
150,5	64,73307537	252,0782907	1,780968313	55,46868207	57,24965038
151,5	64,90614601	258,9802638	1,785729918	56,98742987	58,77315979
152,5	65,06071264	265,6993418	1,789982431	58,46593245	60,25591488
153,5	65,19596471	272,1992937	1,793703553	59,89621731	61,68992087
154,5	65,31249261	278,4503543	1,796909526	61,27173478	63,0686443
155,5	65,41025365	284,4297985	1,799599176	62,58748429	64,38708347
156,5	65,48987753	290,1220343	1,801789827	63,84003492	65,64182475
157,5	65,55231309	295,5179563	1,803507585	65,02738302	66,8308906
158,5	65,59916954	300,6140197	1,804796723	66,14874861	67,95354534
159,5	65,63283489	305,4113574	1,805722941	67,20438096	69,0101039

Nominal Stress di sepanjang riser - Arah 90°

Arc Length (m)	Effective Tension (kN)	Bend Moment (kN.M)	Axial Stress (MPa)	Bending Stress (MPa)	Nominal Stress (MPa)
0	247,8992937	290,1690471	6,820327698	63,85037987	70,67070757
2,925	241,6196274	293,7460104	6,647558418	64,63747438	71,2850328
8,775	227,5588265	286,9061064	6,260710728	63,1323846	69,39309532
14,625	215,7593508	266,6175924	5,936077728	58,6679893	64,60406703
20,475	203,8842491	247,2255546	5,609364072	54,40085953	60,0102236
26,325	191,9890526	228,3989409	5,282097555	50,25814876	55,54024632
32,175	180,1122823	209,9176395	4,95533799	46,1914224	51,14676039
38,025	168,2993993	191,6656865	4,630336123	42,17516311	46,80549923
43,875	156,598875	173,6248609	4,308425526	38,20536145	42,51378697
49,725	145,0604713	155,8713011	3,990975269	34,29877129	38,28974656
55,575	133,757383	138,5703238	3,679999124	30,49176989	34,17176901
61,425	122,7732779	121,9674712	3,377799006	26,83838764	30,21618665
67,275	112,2015453	106,3816129	3,086944282	23,40879037	26,49573465
73,125	102,1574523	92,19952837	2,810606237	20,28808713	23,09869337
78,975	92,7685037	79,86854398	2,552292852	17,57471006	20,12700292
84,825	84,15390377	69,8836712	2,315283727	15,37758419	17,69286792
90,675	76,46964372	62,76629129	2,103870573	13,8114371	15,91530767
96,525	69,8434035	59,04198403	1,921566182	12,99192021	14,91348639
102,375	64,38018475	59,22183221	1,771259412	13,03149499	14,8027544
108,225	60,1557664	63,7852692	1,65503513	14,03565856	15,69069368
114,075	57,18823595	73,16456927	1,573390968	16,0995309	17,67292187
117,5	56,01451384	80,39183984	1,541098946	17,68985894	19,23095789
118,5	55,75211127	83,03705698	1,533879597	18,27192695	19,80580654
119,5	55,52138381	85,84159377	1,527531709	18,88905252	20,41658423
120,5	55,32435932	88,80701775	1,522111074	19,54158059	21,06369166
121,5	55,16207484	91,93481038	1,517646223	20,22983714	21,74748336
122,5	55,03012497	95,22641092	1,514015953	20,95413888	22,46815483
123,5	54,92864099	98,68323966	1,511223876	21,71479833	23,2260222
124,5	54,85754872	102,3066655	1,50926795	22,51211672	24,02138467
125,5	54,8157021	106,0980167	1,508116646	23,34638631	24,85450295
126,5	54,80193555	110,0585835	1,507737894	24,21789103	25,72562893
127,5	54,81443816	114,189574	1,508081871	25,12689672	26,63497859
128,5	54,85271217	118,4920828	1,509134885	26,07364422	27,5827791
129,5	54,91737322	122,9671418	1,510913872	27,05836061	28,56927448
130,5	55,00096117	127,6156926	1,513213585	28,08125309	29,59446667
131,5	55,11084567	132,438539	1,516236781	29,14249851	30,65873529
132,5	55,238881	137,4363785	1,519757399	30,24225037	31,76200777
133,5	55,38633985	142,6097375	1,523816313	31,3806245	32,90444082
134,5	55,55067032	147,9588542	1,528337454	32,55767334	34,08601079
135,5	55,73039423	153,4835814	1,533282107	33,77336444	35,30664655
136,5	55,92281362	159,183245	1,538576044	35,0275495	36,56612555
137,5	56,12865402	165,0563654	1,544239227	36,31990296	37,86414219
138,5	56,34452206	171,1003141	1,550178295	37,64984638	39,20002468
139,5	56,57024156	177,3109483	1,556388401	39,01646821	40,57285661
140,5	56,80212416	183,6819317	1,56276807	40,41837415	41,98114222
141,5	57,03930086	190,2040885	1,569293392	41,85354512	43,42283851
142,5	57,2784552	196,8648619	1,575873124	43,31921803	44,89509116
143,5	57,51796498	203,6477226	1,582462636	44,81175568	46,39421831
144,5	57,75532527	210,531756	1,588993009	46,32655593	47,91554894
145,5	57,98887957	217,4910948	1,59541867	47,85792681	49,45334548
146,5	58,21675431	224,4947282	1,601688072	49,39904451	51,00073258
147,5	58,4359464	231,5075947	1,607718593	50,94219391	52,54991251
148,5	58,64376619	238,4921354	1,613436234	52,47911033	54,09254657
149,5	58,83845248	245,4095806	1,618792539	54,00126271	55,62005525
150,5	59,0180845	252,2213322	1,623734664	55,50015769	57,12389235
151,5	59,18185136	258,8903765	1,628240299	56,96765057	58,59589087
152,5	59,32871056	265,3827282	1,632280761	58,39626306	60,02854382
153,5	59,4589531	271,6687473	1,635864058	59,77947299	61,41533705
154,5	59,5721579	277,7240335	1,638978605	61,11191119	62,7508898
155,5	59,66795731	283,5297683	1,641614285	62,38943673	64,03105102
156,5	59,74587774	289,0725823	1,643758071	63,60910777	65,25286584
157,5	59,80940513	294,3441656	1,645505868	64,76909571	66,41460158
158,5	59,85998695	299,3405931	1,6468975	65,86853687	67,51543437
159,5	59,89777466	304,0616197	1,647937134	66,90737733	68,55531446

Nominal Stress di sepanjang riser - Arah 135°

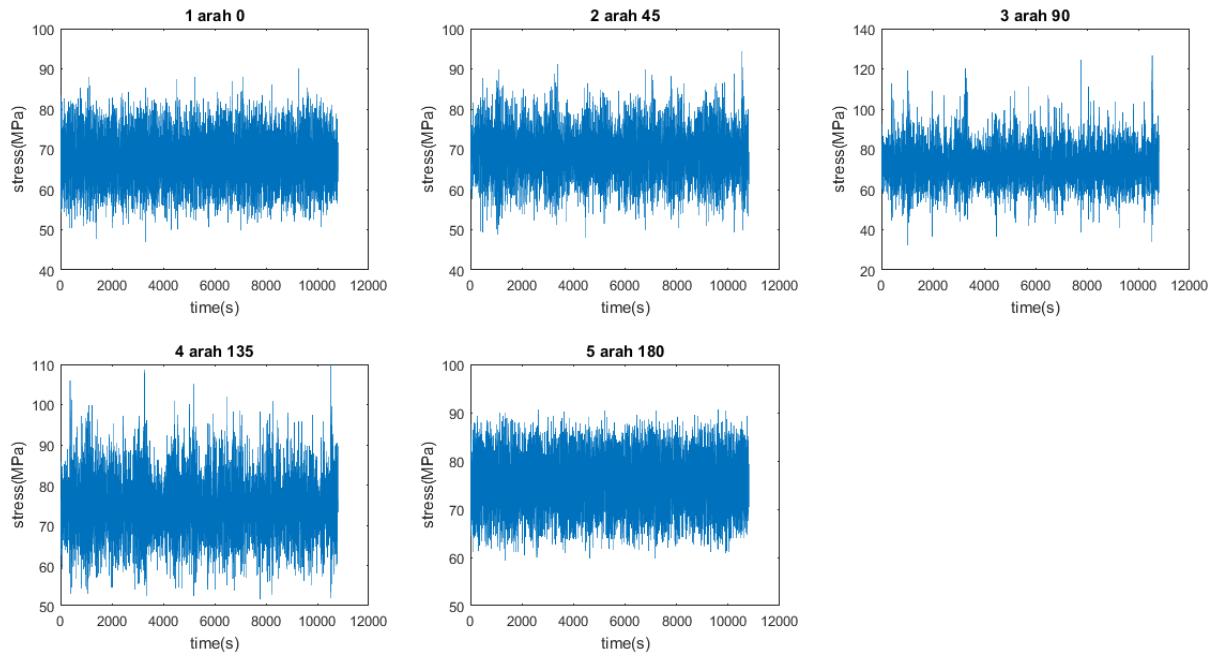
Arc Length (m)	Effective Tension (kN)	Bend Moment (kN.M)	Axial Stress (MPa)	Bending Stress (MPa)	Nominal Stress (MPa)
0	253,8267433	290,3392918	6,983406616	63,88784143	70,87124804
2,925	247,6232935	293,616628	6,812734244	64,60900437	71,42173861
8,775	233,4164564	285,8106135	6,421868731	62,89132635	69,31319509
14,625	221,564653	264,3796855	6,095796068	58,17554806	64,27134413
20,475	209,6307389	244,1911817	5,767464334	53,73315957	59,5006239
26,325	197,6754927	224,8539316	5,438545701	49,47808557	54,91663128
32,175	185,7476769	206,1043822	5,110381747	45,35233246	50,46271421
38,025	173,8900778	187,7948185	4,784149627	41,32339619	46,10754582
43,875	162,1577105	169,8817923	4,46136295	37,38171621	41,84307916
49,725	150,6062484	152,4180578	4,143553425	33,53890081	37,68245424
55,575	139,3112913	135,5445185	3,832800991	29,82595518	33,65875617
61,425	128,3505926	119,4810861	3,531244839	26,2912699	29,82251474
67,275	117,8298274	104,5215853	3,241792357	22,99949975	26,24129211
73,125	107,8590263	91,02682523	2,967470757	20,03003913	22,99750989
78,975	98,55831497	79,41328917	2,711584996	17,47453331	20,18611831
84,825	90,063886269	70,13881074	2,477881433	15,43372649	17,91160792
90,675	82,50484388	63,68531762	2,269913978	14,01366466	16,28357864
96,525	76,00406172	60,54005835	2,091061251	13,32156466	15,41262591
102,375	70,64874956	61,1774362	1,94372326	13,46181676	15,40554002
108,225	66,505862	66,04345104	1,829742093	14,5325612	16,3623033
114,075	63,59355677	75,54427393	1,749617315	16,6231741	18,37279141
117,5	62,43535295	82,77649351	1,71775224	18,21459114	19,93234338
118,5	62,17332074	85,40303978	1,71054308	18,79255071	20,50309379
119,5	61,94561821	88,18299758	1,704278416	19,40426779	21,1085462
120,5	61,74861291	91,11785474	1,698858309	20,05006976	21,74892807
121,5	61,58520721	94,20912305	1,694362611	20,7302893	22,42465192
122,5	61,45093751	97,45828066	1,690668517	21,44525167	23,13592018
123,5	61,34782854	100,8667859	1,687831732	22,19527775	23,88310948
124,5	61,27440926	104,4360537	1,685811784	22,98067891	24,6664907
125,5	61,23015653	108,1674987	1,684594281	23,80176643	25,48636071
126,5	61,21274233	112,0625411	1,684115173	24,65885279	26,34296796
127,5	61,22222331	116,1225572	1,684376019	25,55224088	27,23661689
128,5	61,25627107	120,3489132	1,685312757	26,4822313	28,16754406
129,5	61,31518881	124,7429562	1,686933731	27,4491205	29,13605423
130,5	61,39766834	129,3060395	1,689202949	28,45320624	30,14240919
131,5	61,50127768	134,0394491	1,6920535	29,49477151	31,18682501
132,5	61,62498982	138,94446	1,69545713	30,57409685	32,26955398
133,5	61,7685836	144,0222519	1,699407753	31,69144187	33,39084963
134,5	61,92962774	149,273859	1,703838478	32,84703415	34,55087263
135,5	62,10589462	154,700169	1,70868802	34,041069	35,74975702
136,5	62,29633485	160,3017146	1,713927505	35,27366366	36,98759116
137,5	62,4995542	166,0785113	1,719518576	36,54482151	38,26434008
138,5	62,71338364	172,0298518	1,725401557	37,85438693	39,57978849
139,5	62,93675961	178,1538564	1,731547187	39,2019463	40,93349349
140,5	63,16715168	184,446909	1,737885848	40,58670393	42,32458978
141,5	63,40232546	190,9030172	1,744356065	42,00734118	43,75169725
142,5	63,64160495	197,5127996	1,75093924	43,46179377	45,21273301
143,5	63,88259774	204,2623119	1,757569553	44,94699327	46,70456282
144,5	64,12230531	211,1321846	1,764164506	46,45867752	48,22284202
145,5	64,35901813	218,0972281	1,770677066	47,99130369	49,76198075
146,5	64,5902158	225,1265317	1,77703789	49,53807	51,31510789
147,5	64,8130985	232,1839316	1,783169949	51,09101876	52,87418871
148,5	65,02546196	239,228784	1,789012597	52,64120652	54,43021912
149,5	65,22521385	246,2176041	1,79450827	54,17906461	55,97357288
150,5	65,40955153	253,1063394	1,799579859	55,6948995	57,49447936
151,5	65,57840542	259,8526591	1,80422545	57,17939649	58,98362194
152,5	65,72817873	266,4181174	1,808346087	58,62409575	60,43244184
153,5	65,85888449	272,7694687	1,811942129	60,02168173	61,83362386
154,5	65,97087685	278,8793735	1,815023318	61,3661385	63,18116182
155,5	66,06441969	284,7267596	1,817596915	62,65282923	64,47042615
156,5	66,13906163	290,2967074	1,819650501	63,87847093	65,69812143
157,5	66,19860123	295,5800946	1,821288583	65,04105628	66,86234486
158,5	66,24386824	300,5730459	1,822533992	66,13973252	67,96226651
159,5	66,27396826	305,2762122	1,823362119	67,17464287	68,99800499

Nominal Stress di sepanjang riser - Arah 180°

Arc Length (m)	Effective Tension (kN)	Bend Moment (kN.M)	Axial Stress (MPa)	Bending Stress (MPa)	Nominal Stress (MPa)
0	263,6580367	290,7051998	7,253890012	63,96835783	71,22224784
2,925	257,5067533	293,7183494	7,084652866	64,6313877	71,71604057
8,775	242,9062198	284,9819639	6,682955784	62,70898578	69,39194156
14,625	231,0135377	262,4178693	6,355758445	57,74385933	64,09961778
20,475	219,0429804	241,4670971	6,026418566	53,13373714	59,16015571
26,325	207,0614634	221,6901219	5,696777157	48,78190365	54,47868081
32,175	195,1189346	202,7840446	5,368208412	44,62170726	49,98991568
38,025	183,2629321	184,5641221	5,04202022	40,61249614	45,65451636
43,875	171,543837	166,9508474	4,719598693	36,73677509	41,45637379
49,725	160,0170059	149,9607433	4,40246683	32,99817993	37,40064676
55,575	148,755961	133,6985405	4,092647405	29,41975611	33,51240352
61,425	137,8467458	118,3495995	3,792507692	26,04229143	29,83479912
67,275	127,3909634	104,172193	3,504843049	22,92261757	26,42746062
73,125	117,5044165	91,48824806	3,232839492	20,13157313	23,36441262
78,975	108,3076333	80,6709844	2,979813054	17,75128343	20,73109648
84,825	99,91901657	72,13037039	2,74902129	15,87196014	18,62098143
90,675	92,4651413	66,29813327	2,543946595	14,58860287	17,13254947
96,525	86,03862002	63,61276062	2,367136971	13,99768681	16,36482378
102,375	80,72444819	64,50454033	2,220930853	14,1939309	16,41486175
108,225	76,57473847	69,38393845	2,106761992	15,26762027	17,37438227
114,075	73,61528634	78,6329897	2,025340084	17,30283196	19,32817204
117,5	72,41243367	85,62358374	1,992246608	18,8410804	20,83332701
118,5	72,13681678	88,15148623	1,9846637	19,39733386	21,38199756
119,5	71,89372392	90,82459233	1,977975609	19,9855387	21,96351431
120,5	71,68257382	93,64444862	1,972166344	20,60603526	22,57820161
121,5	71,50214916	96,61256826	1,967202411	21,2591565	23,22635891
122,5	71,35334014	99,73047663	1,963108304	21,94523806	23,90834637
123,5	71,23346045	102,9996814	1,959810115	22,66461171	24,62442183
124,5	71,14393369	106,4216424	1,95734701	23,41759868	25,37494569
125,5	71,08232387	109,9978551	1,955651971	24,20452801	26,16017999
126,5	71,04741056	113,7297764	1,954691419	25,02572034	26,98041176
127,5	71,03871124	117,6188523	1,954452078	25,88149382	27,8359459
128,5	71,05641515	121,6665779	1,954939157	26,77217743	28,72711659
129,5	71,09786589	125,8744081	1,95607957	27,69809134	29,65417091
130,5	71,16247981	130,243785	1,95785726	28,65955287	30,61741013
131,5	71,24912725	134,7761855	1,960241148	29,656887	31,61712815
132,5	71,35606324	139,4730879	1,963183223	30,69041903	32,65360225
133,5	71,48290471	144,3359845	1,966672949	31,76047732	33,72715027
134,5	71,62755121	149,366403	1,970652534	32,86739804	34,83805057
135,5	71,78763407	154,5658805	1,975056813	34,01151943	35,98657624
136,5	71,96360226	159,9359735	1,979898137	35,19318399	37,17308213
137,5	72,15314569	165,4782195	1,985112949	36,41273003	38,39784298
138,5	72,35370224	171,1940911	1,99063076	37,67048158	39,66111234
139,5	72,56398025	177,0847277	1,996416032	38,9666894	40,96310544
140,5	72,78254236	183,1502996	2,002429221	40,30139093	42,30382015
141,5	73,00749437	189,3891057	2,008618211	41,67421186	43,68283007
142,5	73,23781628	195,7963137	2,014954942	43,08408884	45,09904379
143,5	73,47058717	202,3624066	2,021359049	44,52892774	46,55028679
144,5	73,70499687	209,0721993	2,027808245	46,00538712	48,03319537
145,5	73,93809256	215,9042441	2,034221288	47,50874753	49,54296882
146,5	74,16761264	222,830242	2,040535958	49,03278188	51,07331784
147,5	74,3909652	229,8148265	2,046680944	50,56970795	52,6163889
148,5	74,60554351	236,8169493	2,052584528	52,11049325	54,16307778
149,5	74,8083091	243,7919941	2,058163115	53,64532015	55,70348327
150,5	74,99706826	250,6934923	2,06335635	55,16396346	57,22731981
151,5	75,16895104	257,4756976	2,068085274	56,65635692	58,7244422
152,5	75,32312627	264,0960127	2,072327019	58,11312717	60,18545419
153,5	75,45822751	270,5166853	2,076043991	59,52596697	61,60201096
154,5	75,57381654	276,7060955	2,079224133	60,88791856	62,96714269
155,5	75,67007733	282,6395752	2,081872508	62,1935538	64,2754263
156,5	75,74755451	288,299523	2,084004098	63,43899958	65,52300368
157,5	75,80865983	293,6747578	2,085685258	64,62179556	66,70748082
158,5	75,85363438	298,7598477	2,08692262	65,74074649	67,82766911
159,5	75,88498235	303,5541411	2,087785081	66,79570896	68,88349404

(halaman ini sengaja dikosongkan)

- **Input Matlab Stress Time History**



- **Coding Matlab 2017 – Rainflow Counting**

```
clear all
```

```
clc
```

```
close all
```

```
data=dlmread('datastress.txt');
```

```
time1=data(:,1);
```

```
stress1=data(:,2);
```

```
time2=data(:,3);
```

```
stress2=data(:,4);
```

```
time3=data(:,5);
```

```
stress3=data(:,6);
```

```
time4=data(:,7);
```

```
stress4=data(:,8);
```

```

time5=data(:,9);

stress5=data(:,10);

% rf = rainflow(stress1, time1);

% tes=sig2ext(stress1)

%

% subplot(2,3,1)

% figure

% plot(time1, stress1)

% xlabel('time(s)')

% ylabel('stress(MPa)')

% title('1 arah 0')

%

% subplot(2,3,2)

% plot(time2, stress2)

% xlabel('time(s)')

% ylabel('stress(MPa)')

% title('2 arah 45')

%

% subplot(2,3,3)

% plot(time3, stress3)

% xlabel('time(s)')

% ylabel('stress(MPa)')

% title('3 arah 90')

```

```

%
```

```

% subplot(2,3,4)

% plot(time4,stress4)

% xlabel('time(s)')

% ylabel('stress(MPa)')

% title('4 arah 135')


%
```

```

% subplot(2,3,5)

% plot(time5,stress5)

% xlabel('time(s)')

% ylabel('stress(MPa)')

% title('5 arah 180')


rf1=rainflow(sig2ext(stress1));

rf2=rainflow(sig2ext(stress2));

rf3=rainflow(sig2ext(stress3));

rf4=rainflow(sig2ext(stress4));

rf5=rainflow(sig2ext(stress5));


dlmwrite('hasil_rf1.dat',rf1,'t')

dlmwrite('hasil_rf2.dat',rf2,'t')

dlmwrite('hasil_rf3.dat',rf3,'t')

dlmwrite('hasil_rf4.dat',rf4,'t')

dlmwrite('hasil_rf5.dat',rf5,'t')

```

figure(1)

subplot(2,3,1)

rfhist(rf1,0:2.5:35,'ampl')

[n(:,1),xo]=rfhist(rf1,0:2.5:35,'ampl');

title('1 arah 0')

subplot(2,3,2)

rfhist(rf2,0:2.5:35,'ampl')

[n(:,2),xo]=rfhist(rf2,0:2.5:35,'ampl');

title('2 arah 45')

subplot(2,3,3)

rfhist(rf3,0:2.5:35,'ampl')

[n(:,3),xo]=rfhist(rf3,0:2.5:35,'ampl');

title('3 arah 45')

subplot(2,3,4)

rfhist(rf4,0:2.5:35,'ampl')

[n(:,4),xo]=rfhist(rf4,0:2.5:35,'ampl');

title('4 arah 45')

subplot(2,3,5)

```

rfhist(rf5,0:2.5:35,'ampl')
[n(:,5),xo]=rfhist(rf5,0:2.5:35,'ampl');
title('5 arah 45')

dlmwrite('n_cycle_1-5.dat',n,'t')
dlmwrite('koordinat_bar_histogram.dat',xo,'t')

%
%figure(2)
% subplot(2,3,1)
% rfhist(rf1,0:2.5:35,'mean')
% [m(:,1),xo]=rfhist(rf1,30,'mean');
% title('1 arah 0')
% clear xo
%
% subplot(2,3,2)
% rfhist(rf2,0:2.5:35,'mean')
% [m(:,2),xo]=rfhist(rf2,30,'mean');
% title('2 arah 45')
% clear xo
%
% subplot(2,3,3)
% rfhist(rf3,0:2.5:35,'mean')
% [m(:,3),xo]=rfhist(rf3,30,'mean');
% title('3 arah 45')

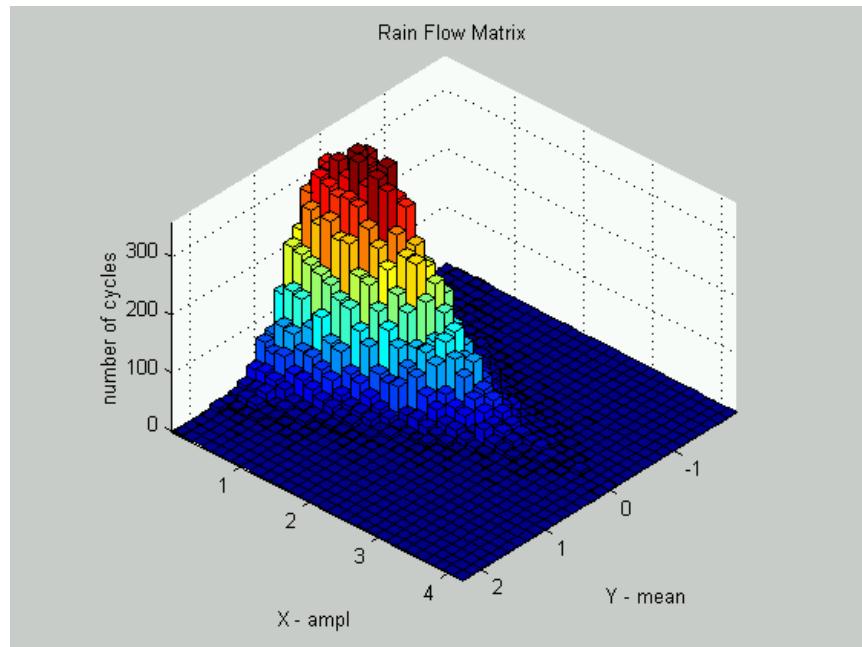
```

```

% clear xo
%
% subplot(2,3,4)
%
% rfhist(rf4,0:2.5:35,'mean')
%
% [m(:,4),xo]=rfhist(rf4,30,'mean');
%
% title('4 arah 45')
%
% clear xo
%
% subplot(2,3,5)
%
% rfhist(rf5,0:2.5:35,'mean')
%
% [m(:,5),xoo]=rfhist(rf5,30,'mean');
%
% title('5 arah 45')
%
% %
%
% %%figure, rfhist(rf,30,'mean')
%
% %%figure, rfmatrix(rf,30,30)
%
%
```

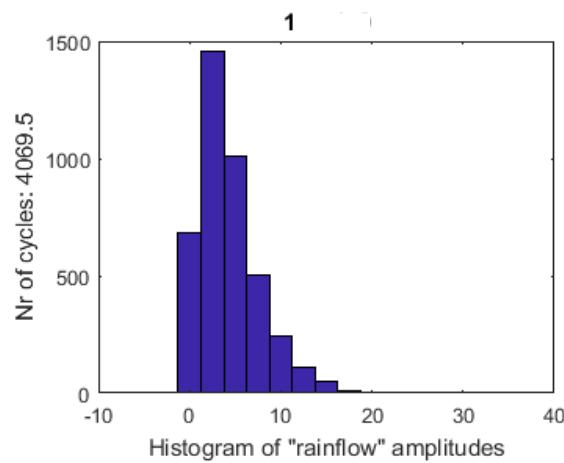
- **Output Rainflow Counting**

- **Rainflow Matrix**

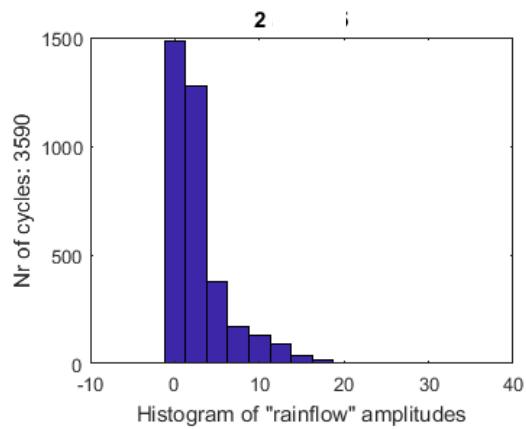


- **Siklus dan Amplitudo**

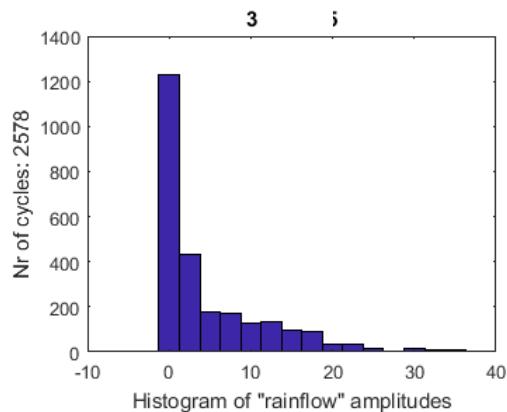
Arah 0°



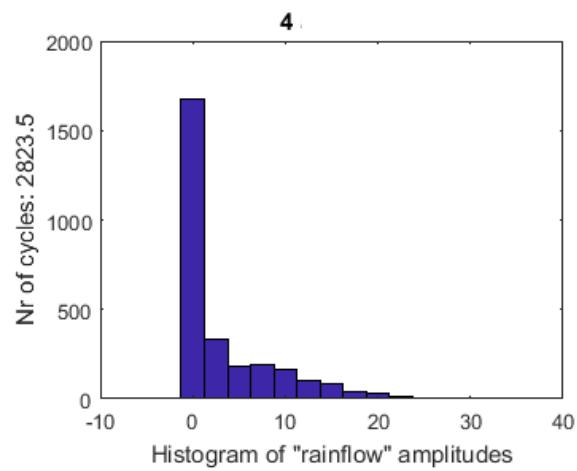
Arah 45°



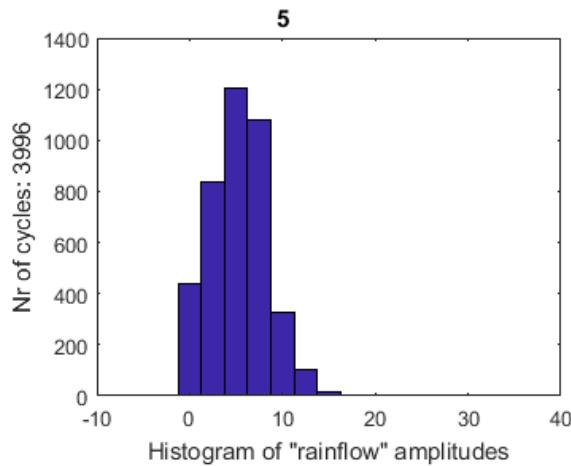
Arah 90°



Arah 135°



Arah 180°



- Rentang Tegangan dan Siklus

Arah 0°

Arah 0°		Arah 0°		
Mean Range	Jumlah Siklus		Amplitudes	Jumlah Siklus
2,5	2138,5		0	683,5
7,5	1514		2,5	1455
12,5	352,5		5	1010,5
17,5	61,5		7,5	503,5
22,5	3		10	242,5
27,5	1		12,5	110
			15	49
			17,5	12,5
			20	2,5
			22,5	0,5
			25	0
			27,5	0
			30	0
			32,5	0
			35	0

Arah 45°

Arah 45°**Arah 45°**

Mean Range	Jumlah Siklus		Amplitudes	Jumlah Siklus
2,5	2758,5		0	1483,5
7,5	549		2,5	1275
12,5	220		5	377,5
17,5	55,5		7,5	171,5
22,5	7		10	130,5
27,5	1		12,5	89,5
			15	40
			17,5	15,5
			20	5,5
			22,5	1,5
			25	0
			27,5	0
			30	0
			32,5	0
			35	0

Arah 90°**Arah 90°****Arah 90°**

Mean Range	Jumlah Siklus		Amplitudes	Jumlah Siklus
2,5	1666		0	1231
7,5	345		2,5	435
12,5	260,5		5	176,5
17,5	183		7,5	168,5
22,5	24,5		10	126,5
27,5	20,5		12,5	134
32,5	7		15	93,5
37,5	1		17,5	89,5
			20	35,5
			22,5	36
			25	18,5
			27,5	6
			30	14
			32,5	6,5
			35	7

Arah 135°

Arah 135°

Arah 135°

Mean Range	Jumlah Siklus		Amplitudes	Jumlah Siklus
2,5	2010,5		0	1680
7,5	374,5		2,5	330,5
12,5	266		5	182,5
17,5	125,5		7,5	192
22,5	38		10	163
27,5	8		12,5	103
32,5	1		15	86
			17,5	39,5
			20	27,5
			22,5	10,5
			25	4,5
			27,5	3,5
			30	1
			32,5	0
			35	0

Arah 180°

Arah 180°

Arah 180°

Mean Range	Jumlah Siklus		Amplitudes	Jumlah Siklus
2,5	1276,5		0	440,5
7,5	2279		2,5	836
12,5	428		5	1201,5
17,5	12,5		7,5	1077,5
22,5	1		10	326,5
			12,5	101,5
			15	12,5
			17,5	0
			20	0
			22,5	0
			25	0
			27,5	0
			30	0
			32,5	0
			35	0

(halaman ini sengaja dikosongkan)

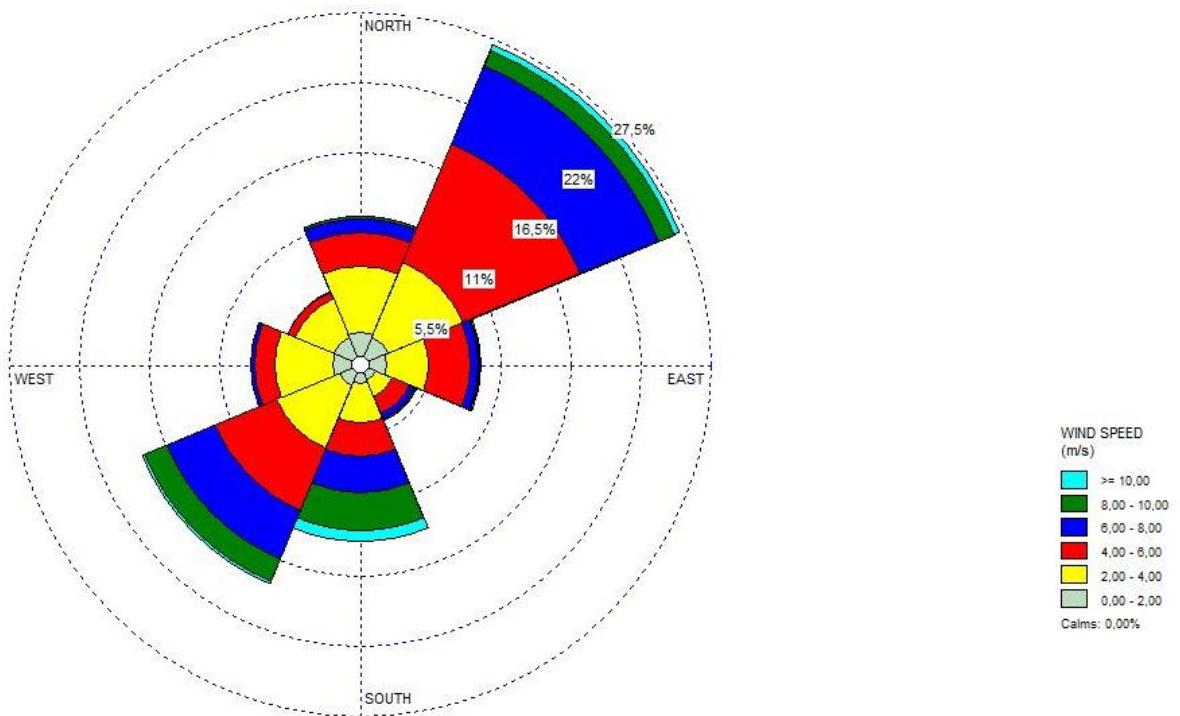
- Wind Classes Direction and Cycles

	Directions / Wind Classes (m/s)	0,00 - 2,00	2,00 - 4,00	4,00 - 6,00	6,00 - 8,00	8,00 - 10,00	$\geq 10,00$	Total
1	337,5 - 22,5	549	1073	575	219	31	10	2462
2	22,5 - 67,5	502	1342	2101	1403	278	97	5723
3	67,5 - 112,5	456	676	691	140	29	17	2009
4	112,5 - 157,5	287	300	296	102	19	11	1015
5	157,5 - 202,5	316	643	561	603	613	197	2933
6	202,5 - 247,5	384	1123	1110	858	410	40	3925
7	247,5 - 292,5	468	969	323	62	13	0	1835
8	292,5 - 337,5	495	698	117	14	0	0	1324
	Sub Total	3457	6829	5774	3401	1393	372	21226
	Calls						0	
	Missing/Incomplete						1	
	Total							21227

- Wind Classes Direction dan Probability

	Directions / Wind Classes (m/s)	0.00 - 2.00	2.00 - 4.00	4.00 - 6.00	6.00 - 8.00	8.00 - 10.00	≥ 10.00	Total
1	337.5 - 22.5	0.02586	0.05078	0.02709	0.01032	0.00146	0.00047	0.11598
2	22.5 - 67.5	0.02365	0.06322	0.09998	0.08610	0.01310	0.00457	0.28961
3	67.5 - 112.5	0.02148	0.03165	0.03255	0.00660	0.00137	0.00080	0.09464
4	112.5 - 157.5	0.01552	0.01413	0.01394	0.00481	0.00090	0.00052	0.04782
5	157.5 - 202.5	0.01489	0.03029	0.02643	0.02341	0.02888	0.00928	0.13817
6	202.5 - 247.5	0.01809	0.05290	0.05299	0.04042	0.01932	0.00188	0.18491
7	247.5 - 292.5	0.02205	0.04565	0.01522	0.00292	0.00061	0.00000	0.08645
8	292.5 - 337.5	0.02332	0.03288	0.00551	0.00066	0.00000	0.00000	0.06237
	Sub-Total	0.16286	0.32171	0.27201	0.16022	0.05562	0.01752	0.99995
	Calls						0.00000	
	Missing/Incomplete						0.00005	
	Total							1.00

- Wind Roses Diagram



(halaman ini sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS



Marsanura Hibatullah lahir di Tangerang pada tanggal 25 Januari 1996. Penulis merupakan anak pertama dari tiga bersaudara dan menghabiskan masa kecil dan sekolahnya di kota Cirebon. Ia menyelesaikan pendidikan dasar di SD Islam Al-Azhar 03 Kota Cirebon pada tahun 2008 dan melanjutkan ke SMP 1 Cirebon (2008-2011). Setelah menyelesaikan pendidikan menengah atas di SMAN 2 Cirebon (2011-2014), penulis melanjutkan studi S1 di Jurusan Teknik Kelautan , Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya. Semasa perkuliahan penulis dikenal aktif mengikuti kegiatan-kegiatan kampus. Terpilih sebagai *Project Leader* Ocean Exhibition and Competition (OCEANO) 2017, yang mana merupakan acara tahunan terbesar Jurusan Teknik Kelautan FTK-ITS, mengadakan beberapa kegiatan seperti kompetisi, seminar nasional dan juga kegiatan *Coral Transplantation* bersama GE Power Surabaya. Selain kepanitian, penulis juga aktif di organisasi kampus, *Society of Petroleum Engineers* (SPE), dimana penulis menjabat sebagai *Vice President*. Selama 3 tahun aktif di SPE, penulis bersama rekan organisasi berhasil membawa SPE ITS *Student Chapter* meraih penghargaan *SPE Gold Standard Designation* dan *SPE Outstanding Student Chapter* 2 kali berturut-turut, yang merupakan pengakuan dari SPE International sebagai salah satu *student chapter* terbaik di dunia. Pada tahun 2017 penulis mendapat kesempatan kerja praktek di PT. Surveyor Indonesia. Penulis juga merupakan juara Lomba Oil Rig Design Competition pertama kali dari ITS sebagai *The First Winner* Oil Rig Design Competition OIL EXPO 2015 Jakarta dan Menjuarai *The First Runner-Up* Oil Rig Design Competition BOGS 2017 Curtin University Sarawak, Malaysia. Penulis juga pernah mewakili ITS dalam ajang Petrobowl Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition (APOGCE) 2015 di Bali. Ketertarikan pada *Deepwater and Subsea Technology* membuat penulis mempelajari bidang keahlian perancangan dan produksi bangunan lepas pantai dan fokus pada teknologi *riser*.