SKRIPSI

ANALISIS KEKUATAN *ANCHOR CROWN SHACKLE* PADA *FPU MADURA STRAIT* DENGAN VARIASI SUDUT *MOORING LINE*

Disusun dan diajukan oleh

IMAM ABADI IBNU ISMAIL

D081171311

DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

GOWA

2021

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

ANALISIS KEKUATAN *ANCHOR CROWN SHACKLE* PADA *FPU MADURA STRAIT* DENGAN VARIASI SUDUT *MOORING LINE*

Disusun dan diajukan oleh

IMAM ABADI IBNU ISMAIL

D081171311

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi Program Sarjana Program Studi Teknik Kelautan Fakultas Universitas Hasanuddin

Pada tanggal 27 oktober 2021

dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui

Pembimbing Utama,	Pembimbing Pendamping,
Daeng Paroka, ST., MT., Ph.D.	**Muh. Zubair Muis Alie, ST., MT., Ph.D.**
NIP.1970118 199802 1 001	**NIP.1975060 820050 11 003**

Ketua Program Studi,

Dr. Ir. Chairul Paotonan, ST., MT.
NIP.197506052002121003

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini ;

Nama	: Imam Abadi Ibnu Ismail
NIM	: D081171311
Program Studi	: Teknik Kelautan
Jenjang	: S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

"Analisis Kekuatan *Anchor Crown Shackle* pada *FPU Madura Strait* dengan Variasi Sudut *Mooring Line*"

Adalah karya tulisan saya sendiri, bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 17 Oktober 2021

Yang Menyatakan,

Imam Abadi Ibnu Ismail

ABSTRAK

IMAM ABADI IBNU ISMAIL. Analisis Kekuatan *Anchor Crown Shackle* pada *Fpu Madura Strait* dengan Variasi Sudut *Mooring Line.*
(dibimbing oleh **Daeng Paroka** dan **Muhammad Zubair Muis Alie**).

Floating produciton unit Madura Strait yang akan disingkat *FPU* adalah suatu struktur terapung yang berfungsi sebagai unit produksi minyak dan gas yang akan diletakkan pada selat madura yang akan ditambatkan secara *catenary* kepada jangkar di dasar laut. Selama pengoperasiannya *FPU* akan mengalami pergerakan secara terus menerus akibat hasil respon terhadap beban dinamis yang menghantamnya. Hal ini akan berisiko kepada gagalnya *mooring line.* Selain *mooring line*, kekuatan penyambung rantai juga menjadi salah satu struktur yang mesti diperhatikan, yaitu *anchor crown shackle* dan *conecting link.* Dalam penelitian kali ini bertujuan menganalisa kekuatan dari *anchor crown shackle* dan *connecting link*, yang didahulukan dengan mencari nilai *tension* terbesar dengan melakukan analisa *time domain* terhadap *mooring line* dengan variasi beberapa sudut antar *mooring line* pada kondisi *ULS* dan *ALS*. Hasil analisanya menunjukkan bahwa variasi sudut antar *mooring line* sebesar 5° adalah yang paling aman bagi *FPU* karena memiliki akumulasi nilai *RAO* yang rendah dan *safety factor mooring line* yang paling tinggi secara akumulasi dalam kondisi *ALS* dan *ULS* dibanding variasi yang lain. Untuk kekuatan *anchor crown shackle* dan *connecting link*, hasil analisa dengan menggunakan beban sebesar 2500kN akibat *tension* maksimum yang dihasilkan oleh *mooring line* pada kondisi *ALS* menunjukkan nilai tegangan maksimum 278.54 Mpa yang berarti nilainya lebih kecil dari 90% yield strength material (417.42 Mpa) dan deformasi terbesar 0.00024 m untuk *anchor crown shackle* dan 0.00034 untuk *connecting link* yang berarti masing – masing nilainya kurang dari 5% diameter struktur (0.01 m) sehingga struktur tersebut dapat dikatakan aman menurut standar yang diizinkan oleh *ABS.*

Kata Kunci: *FPU, tension, RAO, von mises stress, anchor crown shacle, connecting link.*

ABSTRACT

***IMAM ABADI IBNU ISMAIL**. Strength Analysis of Anchor Crown Shackle on FPU Madura Strait with Mooring Line Angle Variation. (supervised by **Daeng Paroka** and **Muhammad Zubair Muis Alie**)*

Floating production unit Madura Strait which will be abbreviated as FPU is a floating structure that serves as a unit of oil and gas production where will be placed on the Madura strait and tethered as catenary to the anchor at seabed. During its operation, FPU will be charged with continuous force due to the response results to the dynamic load. This could be risky to the mooring line's failure. Besides the mooring line, the strength of the chain's link must be considered, there anchor crown shackle, and connecting link. This analysis aims to analyze the strength of anchor crown shackle and connecting link, which previously finding the value of maximum tension by using time domain analysis of the mooring line with variations of several angles between them on ULS and ALS conditions. The analysis results showed that 5°angle variation between mooring lines is the safest for FPU because it has the lowest accumulation of RAO values and the highest safety factor value of mooring line accumulated in ALS and ULS conditions than other variations. For anchor crown shackle and connecting link strength, analysis results using a load of 2500kN due to maximum tension generated by mooring line at ALS conditions shows 278.54 Mpa as stress value which means less than 90% of yield strength material (417.42 Mpa) and the largest deformation is 0.00024 m for anchor crown shackle and 0.00034 for connecting links which means both are less than 5% of the structure's diameter (0.01 m) as of the structure is safe according to the standards permitted by the ABS.

***Keywords:** FPU, tension, RAO, von mises stress, anchor crown shacle, connecting link.*

PRAKATA

Assalamu'alaikum warahmatullahi wabarakatuh.

Segala puji bagi Allah SWT atas limpahan rahmat dan nikmat kesehatan jasmani serta rohani yang diberikan kepada penulis. Sehingga penulis mampu menyelesaikan tugas akhir ini sesuai yang diharapkan. Shalawat serta salam kita kirimkan kepada Baginda Rasulullah Muhammad SAW, sahabat, keluarga, dan para pengikutnya.

Penulisan skripsi ini bertujuan untuk memenuhi syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin. Dalam proses penyusunan sampai dengan terselesaikannya skripsi yang berjudul **"Analisis Kekuatan *Anchor Crown Shackle* pada *FPU Madura Strait* dengan Variasi Sudut *Mooring Line*"** penulis sangat terbantu oleh banyak pihak, maka dari itu dengan segala kerendahan hati penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Kedua orangtua saya **Ir. Ismail Malliungan** dan **Risnawati Aras S.H., M.M.** yang selalu memberikan doa, dukungan dan semangat serta membantu dan membimbing dari segi moril dan materiil selama berkuliah di Departemen Teknik Kelautan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
2. Bapak **Daeng Paroka, S.T., M.T., Ph.D.** selaku dosen pembimbing I sekaligus Kepala Labo Dofler yang ditengah-tengah kesibukannya telah meluangkan waktu dan pikiran untuk memberikan bimbingan dan pengarahan mulai dari awal penelitian hingga terselesaikannya penulisan skripsi ini.
3. Bapak **Muhammad Zubair Muis Alie, S.T., M.T., Ph.D.** selaku dosen pembimbing II yang ditengah-tengah kesibukannya telah meluangkan waktu dan pikiran untuk memberikan bimbingan dan pengarahan mulai dari awal penelitian hingga terselesaikannya penulisan skripsi ini.

4. Bapak **Dr. Chairul Paotonan, S.T., M.T.** selaku Ketua Departemen Teknik Kelautan sekaligus selaku penasehat akademik (PA) yang telah membimbing selama proses perkuliahan.
5. **Dosen–Dosen Departemen Teknik Kelautan** yang telah memberikan ilmu serta pengalamannya selama dalam proses perkuliahan.
6. **Staf Tata Usaha Departemen Teknik Kelautan**, yang telah membantu segala aktivitas administrasi baik selama perkuliahan serta dalam penyelesaian skripsi ini.
7. **Femy Wahyuny, S.T.** yang telah menjadi teman diskusi, belajar, dan berkegiatan mulai dari pendaftaran, proses perkuliahan, dan pada akhirnya sampai selesainya tugas akhir ini masih setia menjadi penyemangat dan pendukung penulis.
8. **Kanda Fuad Mahfud S. S.T, M.T.** yang telah banyak membantu penulis dalam mencari dan mengumpulkan data untuk tugas akhi ini sekaligus menjadi teman diskusi tentang dinamika bangunan apung.
9. **Fathani Adelia Dara Ismail, Asyam Dzaki Ismail, Muh. Raihan Ramadhan Ismail** selaku adik kandung saya yang senantiasa berdoa bagi keluarga kami.
10. **Siti Djohar M., Hj. Nurliah, dan Hj. Walriah selaku Nenek dan Ernawati Aras sebagai Tante Saya** yang setiap waktu menanyakan kapan hari wisuda saya, sehingga meningkatkan motivasi untuk mengerjakan tugas akhir ini.
11. Teman-teman mahasiswa khususnya **Teknik Kelautan 2017 dan PERIZCOPE CREW** yang selalu memberi motivasi dan dukungannya serta waktu yang telah kita lalui bersama dalam suka dan duka. Tak lupa pula penulis sampaikan banyak terimakasih kepada kanda-kanda **Senior** dan dinda-dinda **Junior** atas motivasi dan dukungannya.
12. Anak – anak **Erekz17** yang selalu setia menemani dalam suka duka, yang selalu ada ketika ada masalah. Terima kasih juga atas perjalanannya selama ini di *Land of Dawn*.

13. Teman-teman **Khalid Squad,** tempat saya untuk berdiskusi dan motivasi diri.
14. Kepada seluruh pihak yang tak sempat penulis ucapkan satu per satu, terima kasih yang sebesar besarnya untuk segala sumbangsih selama proses penyelesaian skripsi ini.

Penulis menyadari dalam penulisan skripsi ini masih banyak kekurangan. Oleh karena itu, saran dan kritik sangat penulis harapkan sebagai bahan untuk menutupi kekurangan dari penulisan skripsi ini. Penulis berharap semoga tulisan ini bermanfaat bagi perkembangan ilmu Teknik Kelautan, bagi pembaca umumnya dan penulis pada khususnya.

Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.

Gowa, Oktober 2021

Imam Abadi Ibnu Ismail

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI ii

PERNYATAAN KEASLIAN iii

ABSTRAK iii

ABSTRACT v

PRAKATA vi

DAFTAR ISI ix

DAFTAR GAMBAR xiii

DAFTAR TABEL xvi

DAFTAR NOTASI xviii

DAFTAR ISTILAH xx

BAB I PENDAHULUAN 1

1.1 Latar Belakang 1

1.2 Perumusan Masalah 2

1.3 Tujuan 2

1.4 Manfaat Penelitian 3

1.5 Batasan Masalah 3

1.6 Sistematika Penulisan 3

BAB II TINJAUAN PUSTAKA 5

2.1 *Floating Production Unit* (*FPU*) 5

2.2 Sistem Penambatan 5

2.2.1 Bagian-Bagian Utama dalam Penambatan 5

2.2.2 Jenis-Jenis Penambatan 6

2.3 Beban Lingkungan 11

2.3.1 Beban Gelombang.....11
2.3.2 Beban Arus.....12
2.3.3 Beban Angin 13
2.4 Teori Gerak Kapal.....14
2.4.1 Gerakan *Surge* (x) Murni 16
2.4.2 Gerakan *Sway* (y) Murni 16
2.4.3 Gerakan *Heave* (z) Murni 17
2.4.4 Gerakan *Roll* (φ) Murni 17
2.4.5 Gerakan *Pitch* (θ) Murni.....18
2.4.6 Gerakan *Yaw* (ψ) Murni.....18
2.5 *Response Amplitude Operator (RAO)*.....20
2.6 *Spektrum* Gelombang.....21
2.7 *Tension* pada *Mooring Line* 23
2.8 *Mooring Chain*.....24
2.9 Tegangan pada *Anchor Crown Shackle* 26
2.10 Kurva *True Stress - Strain*.....28

BAB III METODE PENELITIAN.....30
3.1 Lokasi Penelitian.....30
3.2 Prosedur Penelitian.....30
3.3 Diagram Alur Penelitian 32
3.4 Pengumpulan Data 33
3.4.1 *FPU*.....33
3.4.2 Mooring Layout.....35
3.4.3 *Mooring Line Specification*.....36

3.4.4 Data Lingkungan.....36

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 38

4.1 Pemodelan Struktur *FPU*.....38

4.1.1 Data Geometri *FPU*.....39

4.1.2 Model *FPU* 39

4.2 Proses Meshing 40

4.3 Input Data.....42

4.4 Simulasi.....43

4.5 Analisa Gerakan Struktur *FPU Madura Strait* pada Kondisi *Free Floating*...44

4.5.1. *Hydrostatic*.....45

4.5.2. Analisa *RAO* pada Kondisi *Free Floating* Gelombang *Regular*.....47

4.6 Analisa Gerakan Struktur *FPU Madura Strait* dengan Variasi Sudut *Mooring Line* 53

4.6.1 Analisa *RAO* Pada Kondisi Sudut *Mooring* 5° pada Gelombang *Irregular* 53

4.6.2 Analisa *RAO* Pada Kondisi Sudut *Mooring* 10° pada Gelombang *Irregular* 56

4.6.3 Analisa *RAO* Pada Kondisi Sudut *Mooring* 15° pada Gelombang *Irregular* 59

4.6.4 Analisa *RAO* Pada Kondisi Sudut *Mooring* 20° pada Gelombang *Irregular* 62

4.6.5 Analisa *RAO* Pada Kondisi Sudut *Mooring* 25° pada Gelombang *Irregular* 65

4.6.6 Analisa *RAO* Pada Kondisi Sudut *Mooring* 30° pada Gelombang *Irregular* 69

4.7 Analisa *Tension Mooring Lines FPU Madura Strait*.....73

4.8 Analisa Kekuatan *Anchor Crown Shackle Chain* 82

BAB V PENUTUP.....92

5.1 Kesimpulan 92

5.2 Saran 92

DAFTAR PUSTAKA 94

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Taut dan *Catenary Mooring* 7
Gambar 2.2 Sketsa *Catenary Mooring* 8
Gambar 2.3 Jenis Pengaturan Sistem Penambatan 9
Gambar 2.4 llustrasi Gerakan *Six Degrees of Freedom* pada *FPU* 14
Gambar 2.5 Arah *Heading* Gelombang pada *Ansys* 19
Gambar 2.6 Jenis *Mooring Lines Type Chain* 25
Gambar 2.7 Jenis – Jenis Rantai 26
Gambar 2.8 *Von Mises Stress* pada Penampang 27
Gambar 2.9 Perbedaan antara *Enginering Vs True Stress Strain Curve* 28
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian 32
Gambar 3.2 *General Arrangement* 34
Gambar 3.3 Konfigurasi *Mooring FPU Madura Street* 36
Gambar 4.1 Alur Pengerjaan *Ansys Aqwa* 39
Gambar 4.2 Model *FPU Madura Strait* 40
Gambar 4.3 Hasil *Meshing* pada *FPU Madura Strait* 41
Gambar 4.4 *RAO Surging* 47
Gambar 4.5 *RAO Swaying* 48
Gambar 4.6 *RAO Heaving* 49
Gambar 4.7 *RAO Rolling* 50
Gambar 4.8 *RAO Pitching* 51
Gambar 4.9 *RAO Yawing* 52
Gambar 4.10 *RAO* Gerakan Translasi dengan *Wave Heading* 0° 53
Gambar 4.11 *RAO* Gerakan Rotasi dengan *Wave Heading* 0° 54
Gambar 4.12 *RAO* Gerakan Translasi dengan *Wave Heading* 45° 54
Gambar 4.13 *RAO* Gerakan Rotasi dengan *Wave Heading* 45° 55
Gambar 4.14 *RAO* Gerakan Translasi dengan *Wave Heading* 90° 55
Gambar 4.15 *RAO* Gerakan Rotasi dengan *Wave Heading* 90° 56
Gambar 4.16 *RAO* Gerakan Translasi dengan *Wave Heading* 0° 56
Gambar 4.17 *RAO* Gerakan Rotasi dengan *Wave Heading* 0° 57

Gambar 4.18 *RAO* Gerakan Translasi dengan *Wave Heading* 45° 57
Gambar 4.19 *RAO* Gerakan Rotasi dengan *Wave Heading* 45° 58
Gambar 4.20 *RAO* Gerakan Translasi dengan *Wave Heading* 90° 58
Gambar 4.21 *RAO* Gerakan Rotasi dengan *Wave Heading* 90° 59
Gambar 4.22 *RAO* Gerakan Translasi dengan *Wave Heading* 0° 59
Gambar 4.23 *RAO* Gerakan Rotasi dengan *Wave Heading* 0° 60
Gambar 4.24 *RAO* Gerakan Translasi dengan *Wave Heading* 45° 60
Gambar 4.25 *RAO* Gerakan Rotasi dengan *Wave Heading* 45° 61
Gambar 4.26 *RAO* Gerakan Translasi dengan *Wave Heading* 90° 61
Gambar 4.27 *RAO* Gerakan Rotasi dengan *Wave Heading* 90° 62
Gambar 4.28 *RAO* Gerakan Translasi dengan *Wave Heading* 0° 62
Gambar 4.29 *RAO* Gerakan Rotasi dengan *Wave Heading* 0° 63
Gambar 4.30 *RAO* Gerakan Translasi dengan *Wave Heading* 45° 63
Gambar 4.31 *RAO* Gerakan Rotasi dengan *Wave Heading* 45° 64
Gambar 4.32 *RAO* Gerakan Translasi dengan *Wave Heading* 90° 64
Gambar 4.33 *RAO* Gerakan Rotasi dengan *Wave Heading* 90° 65
Gambar 4.34 *RAO* Gerakan Translasi dengan *Wave Heading* 0° 65
Gambar 4.35 *RAO* Gerakan Rotasi dengan *Wave Heading* 0° 66
Gambar 4.36 *RAO* Gerakan Translasi dengan *Wave Heading* 45° 66
Gambar 4.37 *RAO* Gerakan Rotasi dengan *Wave Heading* 45° 67
Gambar 4.38 *RAO* Gerakan Translasi dengan *Wave Heading* 90° 67
Gambar 4.39 *RAO* Gerakan Rotasi dengan *Wave Heading* 90° 68
Gambar 4.40 *RAO* Gerakan Translasi dengan *Wave Heading* 0° 68
Gambar 4.41 *RAO* Gerakan Rotasi dengan *Wave Heading* 0° 69
Gambar 4.42 *RAO* Gerakan Translasi dengan *Wave Heading* 45° 69
Gambar 4.43 *RAO* Gerakan Rotasi dengan *Wave Heading* 45° 70
Gambar 4.44 *RAO* Gerakan Translasi dengan *Wave Heading* 90° 70
Gambar 4.45 *RAO* Gerakan Rotasi dengan *Wave Heading* 90° 71
Gambar 4.46 Grafik *Safety Factor* untuk Kondisi ULS 81
Gambar 4.47 Grafik *Safety Factor* untuk Kondisi ALS 82
Gambar 4.48 Dimensi *Connecting Links* 83

Gambar 4.49 Dimensi *Anchor Crown Shackles*.....83
Gambar 4.50 Pemodelan *Chain Shackle* dan *Connecting Link* pada *Autodesk Inventor*.....84
Gambar 4.51 Kurva *Meshing Sensitivity*.....85
Gambar 4.52 Hasil *Meshing* Model 86
Gambar 4.53 *True Stress – Strain Curve* 88
Gambar 4.54 *Von Mises Stress*.....89
Gambar 4.55 Deformasi pada Struktur 90

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Kriteria *Tension Limit* dan Faktor Keamanan *Mooring* 10
Tabel 2.2 Arah *Heading* Gelombang pada *Ansys* 19
Tabel 3.1 Posisi *Anchor FPU* dalam Keadaan Asli 35
Tabel 3.2 Spesifikasi Rantai Tambat 36
Tabel 3.3 Data Perairan Selat Madura 37
Tabel 4.1 Data Geometri *FPU* 39
Tabel 4.2 Statistik *Meshing FPU Madura Strait* 41
Tabel 4.3 *Center of Gravity* dan Radius Girasi 42
Tabel 4.4 Nilai Momen Inersia 42
Tabel 4.5 *Hydrostatic Stiffness* 42
Tabel 4.6 Koefisien *Drag* Gaya Arus 43
Tabel 4.7 Koefisien *Drag* Gaya Angin 43
Tabel 4.8 Hidrostatik *FPU Madura Strait* 45
Tabel 4.9 Validasi Hidrostatik 46
Tabel 4.10 Nilai Spektrum Jonswap berdasarkan DNV RP C205 53
Tabel 4.11 Nilai *RAO* Maksimum *FPU Madura Street* dengan Sudut *Mooring* 5° 71
Tabel 4.12 Nilai *RAO* Maksimum *FPU Madura Street* dengan Sudut *Mooring* 10° 72
Tabel 4.13 Nilai *RAO* Maksimum *FPU Madura Street* dengan Sudut *Mooring* 15° 72
Tabel 4.14 Nilai *RAO* Maksimum *FPU Madura Street* dengan Sudut *Mooring* 20° 72
Tabel 4.15 Nilai *RAO* Maksimum *FPU Madura Street* dengan Sudut *Mooring* 25° 72
Tabel 4.16 Nilai *RAO* Maksimum *FPU Madura Street* dengan Sudut *Mooring* 30° 72
Tabel 4.17 Nilai *Tension* Kondisi *ULS* pada Sudut *Mooring Line* 5° 74
Tabel 4.18 Nilai *Tension* Kondisi *ULS* pada Sudut *Mooring Line* 10° 74

Tabel 4.19 Nilai *Tension* Kondisi *ULS* pada Sudut *Mooring Line* 15°.....75
Tabel 4.20 Nilai *Tension* Kondisi *ULS* pada Sudut *Mooring Line* 20°.....75
Tabel 4.21 Nilai *Tension* Kondisi *ULS* pada Sudut *Mooring Line* 25°.....76
Tabel 4.22 Nilai *Tension* Kondisi *ULS* pada Sudut *Mooring Line* 30°.....76
Tabel 4.23 Nilai *Tension* Kondisi *ALS* pada Sudut *Mooring Line* 5° 77
Tabel 4.24 Nilai *Tension* Kondisi *ALS* pada Sudut *Mooring Line* 10° 77
Tabel 4.25 Nilai *Tension* Kondisi *ALS* pada Sudut *Mooring Line* 15° 78
Tabel 4.26 Nilai *Tension* Kondisi *ALS* pada Sudut *Mooring Line* 20° 78
Tabel 4.27 Nilai *Tension* Kondisi *ALS* pada Sudut *Mooring Line* 25° 79
Tabel 4.28 Nilai *Tension* Kondisi *ALS* pada Sudut *Mooring Line* 30° 79
Tabel 4.29 *Mechanical Properties Anhor Chain Grade U3* 84
Tabel 4.30 Hasil *Meshing Sensitivity* 85
Tabel 4.31 Hasil Tegangan Regangan *Tensile Test* 87
Tabel 4.32 Batas Aman Deformasi Struktur 91

DAFTAR NOTASI

Simbol	Keterangan	Satuan
λ	Panjang Gelombang	m
d	Diameter Struktur	m
Φ	Gerak Rotasi Sumbu X (*Roll*)	m/°
Θ	Gerak Rotasi Sumbu Y (*Pitch*)	m/°
Ψ	Gerak Rotasi Sumbu Z (*Yaw*)	m/°
μ	Sudut Arah Datang Pembebanan	
k_{xx}	Radius Girasi terhadap Sumbu X	m
k_{yy}	Radius Girasi terhadap Sumbu Y	m
k_{zz}	Radius Girasi terhadap Sumbu Z	m
I_{xx}	Momen Inersia Polar terhadap Sumbu X	$kg.m^2$
I_{yy}	Momen Inersia Polar terhadap Sumbu Y	$kg.m^2$
I_{zz}	Momen Inersia Polar terhadap Sumbu Z	$kg.m^2$
EA	Kekakuan Lentur	N
BG	Jarak antar COG dan COB	m
S	Rentang Tegangan	N/mm^2
y	Jarak Vertikal antara Permukaan Laut dan Dasar Laut	m
x	Jarak Horizontal antara Jangkar dan FPSO	m
T	Tegangan pada *Mooring Line*	N/m^2
S	Panjang Keseluruhan *Mooring Line* Diukur dari FPSO ke Jangkar	m
α	Sudut yang Dibentuk *Mooring Line* dengan Permukaan Laut	°
ρ	Massa Jenis Fluida	kg/m^3
C_D	Koefisien Hambatan	
C_I	Koefisin Inersia	
v	Kecepatan	m/s
a	Percepatan	m/s^2
b	Persamaan *Froude Krylov*	

d	Diameter Struktur	m
L	Panjang Gelombang	m
E	Gaya Hidrodinamik per Satuan Panjang	N/m
g	Percepatan Gravitasi	m/s^2
H	Tinggi Gelombang	m
k	Bilangan Gelombang	m^{-1}
ω	Frekuensi Sudut	rad/s
ϕ	Potensial Kecepatan Total	m/s
ϕI	Potensial Kecepatan Gelombang Datang	m/s
ϕD	Potensial Kecepatan yang Menyebar	m/s
C_w	Koefisien Gaya Angin	
A	Luasan Bidang	m^2
v	Kecepatan	m/s
X_p $(\boldsymbol{\omega})$	Amplitudo Struktur	m
$\boldsymbol{\eta}(\boldsymbol{\omega})$	Amplitudo Gelombang	m
T_p	Periode Puncak Gelombang	s
H_s	Tinggi Gelombang Signifikan	m
σ	Tegangan *Von Mises*	N/m^2

DAFTAR ISTILAH

Istilah / Singkatan	**Keterangan**
API	*American Petroleum Institute*
ABS	*American Bureau of Shipping*
ALS	*Accidental Limit State*
COB	*Center of Bouyancy*
COG	*Center of Gravity*
DNV	*Det Norske Veritas*
DOF	*Degree of Freedom*
FPU	*Floating Production Unit*
LNG	*Liquid Natural Gas*
OS	*Offshore Standard*
RAO	*Respone Amplitude Operator*
RP	*Recommended Practice*
SF	*Safety Factor*
ULS	*Ultimate Limit State*
ANSYS	*Software* yang digunakan untuk menghitung kekuatan struktur.
Added Mass	Penambahan inersia ke suatu sistem karena mempercepat atau memperlambat sistem untuk bergerak atau berbelok ke beberapa volume fluida di sekitarnya.
Amplitudo	Tinggi puncak gelombang.
Catenary Mooring	Sistem tambat di bagian jangkar dikenai gaya horisontal.
Damping	Penurunan amplitudo osilasi akibatnya energi terkuras dari suatu sistem untuk mengatasi gesekan atau gaya hambatan lainnya.
Deformasi	Perubahan bentuk atau ukuran dari sebuah objek karena pengaruh gaya.

Displacement	Berat air yang dipindahkan oleh lambung kapal yang tercelup di perairan.
FEM	*Finite Elemen Methode.*
Following Seas	Arah pembebanan datang dari arah buritan bangunan apung.
Frequency Domain Analysis	Analisa gerakan dinamis berdasarkan interval frekuensi.
Meshing	Proses pembagian seluruh komponen menjadi jumlah elemen sehingga ketika beban diterapkan pada komponen itu maka beban akan terdistribusi seragam.
Momen	Sebuah besaran yang menyatakan besarnya gaya yang bekerja pada sebuah benda sehingga mengakibatkan benda tersebut berotasi.
Offset	Perpindahan jarak sesuatu dari posisi semula.
Radius of Gyration	Jarak yang menunjukan distribusi massa (area) dari benda tersebut dianggap merata.
Shackle	Rantai dengan fungsi segel penyambung.
Significant Wave Height	Tinggi gelombang signifikan.
Software	Istilah khusus untuk data yang diformat dan disimpan secara digital, termasuk program komputer, dokumentasinya dan berbagai informasi yang bisa dibaca ditulis oleh komputer.
Sway Seas	Arah pembebanan gelombang dari arah samping.
Time Domain Analysis	Analisa gerakan dinamis berdasarkan fungsi waktu
Tension	Gaya tarik.
Wave Heading	Arah datang pembebanan gelombang.
Wave Peak Periode	Periode puncak gelombang.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Industri minyak dan gas Indonesia memiliki banyak kelebihan dibanding negara lainnya. Menurut Laszlo Varro, Indonesia memiliki keuntungan berupa pengaruh kondisi demokrasi yang stabil serta fakta bahwa indsutri ini sudah beroperasi lebih dari seratus tahun dan diminati oleh perusahaan-perusahaan internasional. Selain itu, dengan adanya undang-undang terbaru tentang investasi, maka tidak heran Indonesia menjadi potensi investasi bagi negara maju.

Dengan berkembangnya ilmu pengetahuan dan teknologi dan menipisya cadangan minyak di daratan dan pesisir pantai, maka area eksporasi diperluas ke area laut dalam. Untuk menghadapi lingkungan perairan yang lebih dalam, bangunan laut yang akan dioperasikan adalah jenis-jenis yang dianggap efektif dari segi biaya, seperti jenis-jenis anjungan apung. Anjungan lepas pantai untuk *Floating Offshore Structure* sendiri terdapat TLP *platform*, semisubmersible *platform*, *floating production system*, dan juga SPAR *platform* [1].

Salah satu jenis sturuktur yang digunakan dalam pekerjaan eksploitasi lepas pantai adalah *Floating Production Unit* atau *FPU* yang digunakan sebagai unit awal proses produksi natural gas atau hdirokarbon dimana selajutnya akan disalurkan ke kilang darat melaui *subsea sealine* atau kapal *tanker*. Dengan eksploitasi sumber daya menjangkau perairan dalam, struktur terapung digabungkan dengan sistem tambat yang cukup efektif dan andal menjadi semakin populer [2].

Sistem tambat dihadapkan dengan lebih banyak tantangan untuk menjamin keandalan dan keamanan anjungan di lepas pantai. Dalam hal ini, sistem tambat menjadi bagian penting dari sistem pemeliharaan kedudukan anjungan yang dikembangkan untuk eksplorasi dan produksi sumber daya minyak dan gas lepas pantai [3].

Ada tiga jenis pengaturan untuk sistem penambatan *spread mooring* yang dikenal dengan *taut mooring, catenary mooring* dan *catenary mooring with buoyancy* [4]. Tali tambat yang biasanya digunakan berupa *heavy chain*, *steel wire*

ropes dan/atau *synthetic polyester ropes* yang dihubungkan ke jangkar di dasar laut [5].

Dalam penelitian kali yang akan menjadi titik berat penelitian adalah penentuan variasi ukuran sudut tali tambat terhadap tali tambat yang berada di tengah dalam system *grouping*. Dalam teorinya semakin besar sudut antara tali tambat, maka jarak horizontal tali tambat akan semakin besar. Hal tersebut akan membuat *system catenary* akan sedikit lebih tegang.

Selain itu, bagian jangkar dalam sistem tambat harus selalu diperhitungkan. Jangkar sendiri akan menerima gaya tarik terus menerus pada saat *system* tambat beroperasi. Gaya tarik tersebut berasal dari *mooring line* yang memiliki nilai *tension* akibat hasil dari adanya respon strukutur yang ingin diredam gerakannya terhadap beban-beban yang terjadi di laut lepas, contoh beban terbesar adalah beban gelombang. Salah satu titik krisis di bagian jangkar adalah *crown shackle chain* yang digunakan sebagai penghubung awal antara jangkar dan tali tambat. Seperti yang telah dijelaskan di atas, ada berbagai macam jenis tali tambat, dalam penelitian kali ini yang digunakan adalah jenis *heavy chain.* Untuk itu, penulis beranggapan bahwa *crown shackle chain* perlu diperhitungkan kekuatannya.

1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang dibahas dalam tugas akhir ini adalah:

1. Bagaimana perilaku gerak *FPU* saat tertambat dengan variasi sudut *mooring line*?
2. Berapa besar gaya tarik maksimum yang bekerja pada *mooring line?*
3. Bagaimana kekuatan *anchor crown shackle chain* akibat *tension* yang bekerja terhadapnya?

1.3 Tujuan

Tujuan dari tugas akhir ini adalah:

1. Mengetahui perilaku gerak *FPU* saat tertambat dengan variasi sudut *mooring line.*
2. Mengetahui besar gaya tarik maksimum yang bekerja pada *mooring line.*

3. Mengetahui kekuatan *anchor crown shackle chain* terhadap *tenison* yang bekerja terhadapnya.

1.4 Manfaat Penelitian

Dari pengerjaan tugas akhir ini, akan dapat diketahui respon gerak *FPU*, saat tertambat dalam keadaan enam derajat kebebasan diantaranya gerakan *surge, sway, heave, roll, pitch dan yaw*. Kemudian penulis dapat mengetahui besar nilai *tension* maksimal serta kekuatan *anchor crown shackle chain* yang bekerja, sehingga memenuhi aturan dan standar yang ditetapkan oleh *codes* atau *class* yang berlaku.

1.5 Batasan Masalah

Agar penelitian ini tidak terlalu melebar dari tujuan yang ingin dicapai, maka ditentukan batasan permasalahan. Adapun batasan masalah dari skripsi ini adalah:

1. Skema *heading* yang diperhitungkan hanya dari arah 0°, 45°,90°.
2. Beban lingkungan yang ditinjau adalah beban arus, beban angin dan beban gelombang pada kondisi lingkungan 100 tahun atau kondisi ekstrim.
3. *Riser* dan *floating hose* tidak dimodelkan.
4. Kondisi *mooring lines* yang ditinjau adalah kondisi *Ultimate Limit State* dan *Accidental Limit State (Single Line Damage).*
5. Jangkar dianggap *fixed.*
6. Gesekan antar *chain* diabaikan.
7. Analisa *mooring* dilakukan hanya dalam kondisi *full load* saja.
8. *FPU* dianggap *rigid body,* sehingga kekuatan memanjang *FPU* dapat diabaikan.
9. Perhitungan hanya mencakup tegangan pada *anchor crown shackle chain* ditambah dengan *connecting links* ke *mooring line*.

1.6 Sistematika Penulisan

Untuk dapat memahami dan mendapatkan pandangan yang lebih jelas mengenai pokok permasalahan yang akan dibahas, diperlukan adanya sistematika

penulisan dalam penelitian ini. Sistematika penulisan dapat dijabarkan sebagai berikut:

BAB I **Pendahuluan**

Berisi latar belakang, perumusan masalah, batasan masalah, tujuan, manfaat penelitian dan sistematika penelitian.

BAB II **Tinjauan Pustaka**

Berisi tentang dasar-dasar teori yang berkaitan dengan penelitian yang akan dilakukan.

BAB III **Metodologi Penelitian**

Terdiri atas lokasi dan waktu penelitian, jenis penelitian, metode pengumpulan data dan pengambilan data.

BAB IV **Hasil dan Pembahasan**

Berisi hasil penelitian dan pembahasan.

BAB V **Penutup**

Berisi kesimpulan akhir penelitian, saran, daftar pustaka pada akhir penulisan dan lampiran.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Floating Production Unit* (*FPU*)

Kebutuhan akan minyak dan gas tiap tahunnya semakin meningkat. Hal ini menjadikan perkembangan dalam dunia minyak dan gas menjadi sorotan lebih saat ini mengacu pada teknologi dan eksplorasi minyak bumi. Namun beberapa akibat dari kegiatan eksplorasi tersebut menyebabkan kecelakaan kerja, seperti terjadinya *oil spill* (minyak tumpah) di laut pada saat proses pengisian dan transfer hasil minyak bumi. Hal tersebut disebabkan karena sistem tambat yang tidak mumpuni menahan gaya yang diberikan oleh kapal tanker atau *Floating Production, Storage & Offloading* (FPSO). Sistem tambat pada kapal haruslah sesuai standar, yaitu disesuaikan dengan besarnya DWT kapal yang akan bertambat [6].

Tidak seperti FPSO yang dapat melakukan kegiatan produksi sekaligus sebagai tempat penyimpanan hidrokarbon, *FPU* merupakan kapal yang hanya bisa melakukan kegiatan produksi saja, hidrokarbon yang telah diolah akan ditransfer dari *FPU* ke kilang darat melalui kapal *tanker* maupun *subsea.* Biasanya *FPU* ini dibuat atas hasil dari revitalisasi kapal lama, maupun dapat dibuat baru. Untuk menghemat biasanya dibuat dari kapal *tanker* lama yang telah habis masa operasinya.

2.2 Sistem Penambatan

Sistem penambatan adalah suatu sistem dimana sebuah benda apung yang diterpa berbagai beban hidup direkayasa sedemikian rupa agar tetap diam di tempat atau tidak terjadi *offset* yang berlebih. Berikut adalah bagian-bagian umum yang mesti diketahui tentang sistem penambatan.

2.2.1 Bagian-Bagian Utama dalam Penambatan

Adapun bagian-bagian utama pada *mooring buoy* antara lain sebagai berikut:

1. *Buoy*, merupakan komponen utama dari *mooring buoy* berfungsi sebagai tempat bertambatnya kapal.

2. *Sinker*, merupakan komponen pemberat yang diletakkan di dasar laut. *sinker* dihubungkan dengan *buoy* menggunakan rantai dan *shackle*.
3. Rantai, sebagai penghubung antara *buoy*, *sinker* dan *anchor*.
4. *Anchor*, komponen yang terpancang pada tanah di dasar laut agar *mooring buoy* dapat menahan kapal tetap pada posisinya.
5. *Shackle*
6. *Manhole*, berfungsi saat dilakukannya pengecekan secara berkala untuk memastikan tidak ada kebocoran.
7. *Fender*, untuk melindungi buoy dari kerusakan yang diakibatkan benturan body kapal.
8. *Bollard*, digunakan untuk menambatkan kapal.
9. GPS, berfungsi untuk mengetahui dan melacak lokasi *buoy*.
10. Lampu sel surya, sebagai sumber energi cadangan sehingga bisa tetap menyala pada waktu malam.

2.2.2 Jenis-Jenis Penambatan

Secara umum jenis-jenis sistem penambatan (*mooring system)* yang digunakan kapal tanker atau FSO/FPSO antara lain:

1. *Spread Mooring*

Pada sistem ini digunakan satu set *Anchor Legs* dan *Mooring Lines* yang biasanya terletak pada posisi *bow* dan *stern* kapal. Sistem ini tidak memungkinkan kapal untuk bergerak/berputar agar mencapai posisi dimana beban lingkungan (angin, arus dan gelombang) relative kecil.

Sistem penambatan juga sangat penting untuk keselamatan laut. Hal ini dimungkinkan untuk menghindari kecelakaan tubrukan dengan memiliki sistem penambatan yang andal. Ada tiga jenis pengaturan untuk sistem penambatan *spread mooring* yang dikenal dengan *taut mooring*, *catenary mooring* dan *catenary mooring with buoyancy*. Komponen pengaturan penambatan yang digunakan seperti di bawah ini [4].

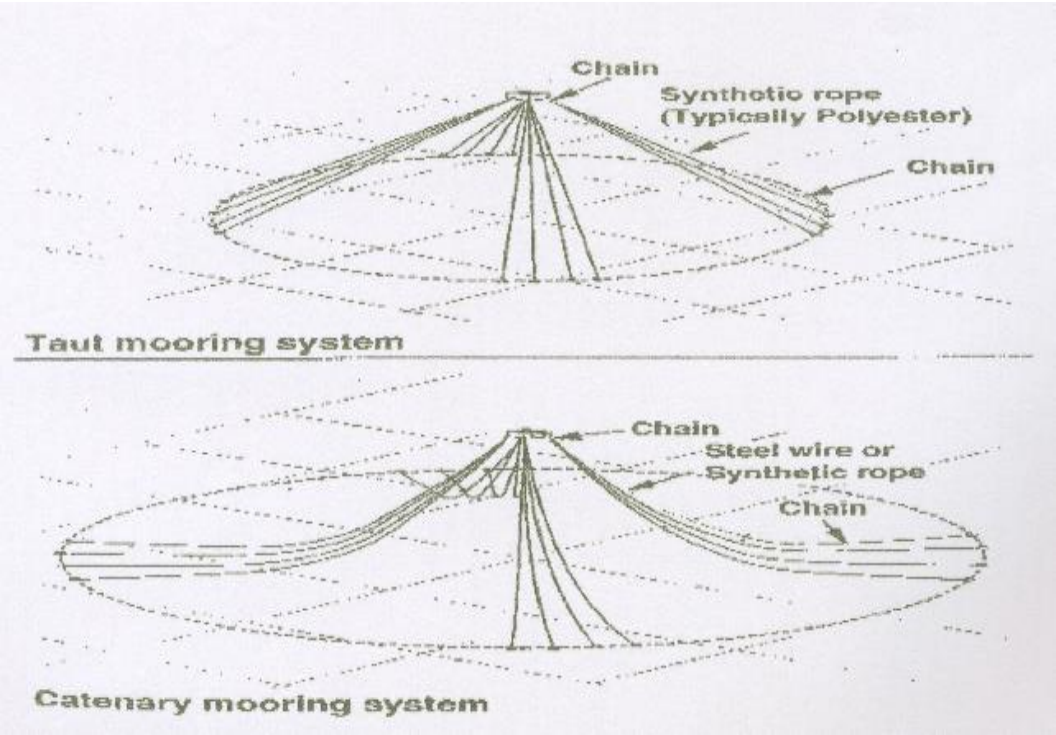
a. Taut *mooring* terdiri dari *chain - synthetic fiber ropes* atau *polyesterchain.*
b. *Catenary mooring* terdiri *dari chain-steel rope-chain.*

c. *Catenary mooring with buoyancy* terdiri dari *chain-steel wire ropebuoysteel wire rope –chain.*

Ketika ekstraksi minyak dan gas dilakukan di perairan dangkal ke perairan laut dalam, sistem catenary lebih populer namun dengan diperkenalkannya produksi di perairan yang dalam ke ultra *deepwater*, *mooring line* menjadi faktor pembatas. Untuk mengatasi masalah ini, solusi baru dikembangkan sebagai sistem taut leg *mooring* system [7].

Perbedaan utama antara sistem ini adalah bahwa di mana dalam jalur sistem *catenary* tiba di dasar laut secara *horizontal*, sementara taut *mooring* bertambat yang kencang sampai membentuk sebuah sudut. Ini berarti titik jangkar taut *mooring* yang kencang mampu menahan gaya horizontal dan vertikal, sementara titik jangkar tambat catenary hanya dikenai gaya horizontal.

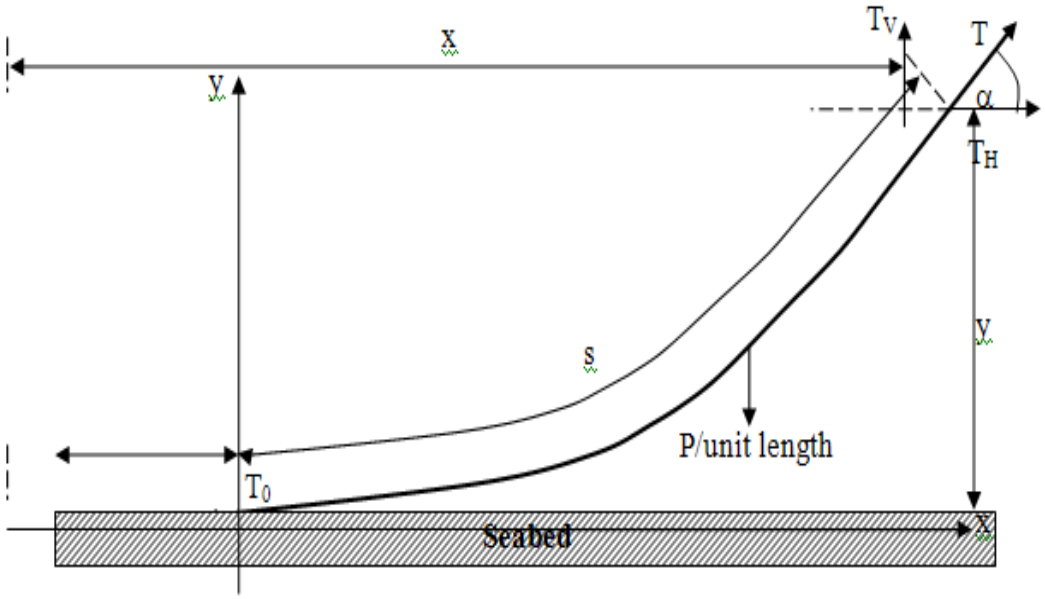
Kata *Catenary* sebenarnya berasal dari rumus yang dipakai untuk perencanaan sistem tersebut. Rumus *Catenary* menjelaskan sebuah tali yang ditambat pada kedua ujungnya, satu pada dasar laut dan yang lainnya pada FPSO, penyebab bentuk mooring line yang landai adalah beratnya. Sehingga bentuk bentangan *mooring line* dari struktur apung (FPSO) hingga ke jangkar (*seabed*) tidak tegang tetapi renggang. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 2.1 berikut ini.



Gambar 2.1 Taut dan *Catenary Mooring* [8]

Kata *Catenary* sebenarnya berasal dari rumus yang dipakai untuk perencanaan sistem tersebut. Rumus *Catenary* menjelaskan sebuah tali yang ditambat pada kedua ujungnya, satu pada dasar laut dan yang lainnya pada *FPU*, penyebab bentuk *mooring line* yang landai adalah beratnya. Sehingga bentuk bentangan *mooring line* dari struktur apung *FPU* hingga ke jangkar (*seabed*) tidak tegang tetapi renggang [8].

Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 2.2 berikut ini.



Gambar 2.2 Sketsa *Catenary Mooring* [8]

dimana:

y = Jarak vertikal antara permukaan laut dan dasar laut (m)

x = Jarak horizontal antara jangkar dan FPSO (m)

T = Tegangan pada *mooring line* (N/m^2)

T_v = Tegangan pada *mooring line* dalam arah vertical (N/m^2)

T_h = Tegangan pada *mooring line* dalam arah horizontal (N/m^2)

S = Panjang keseluruhan *mooring line* diukur dari FPSO ke jangkar (m)

α = Sudut yang dibentuk *mooring line* dengan permukaan laut (°)

P = berat *moring line* per meter (kg)

Persamaan umum *catenary mooring* sebagai berikut:

$$y = \frac{T_0}{p}\left[\cosh\left(\frac{Px}{T_0}\right) - 1\right] \quad \text{.....(2.1)}$$

Tegangan yang terjadi pada *mooring line* dirumuskan:

$$T = \sqrt{T_h^{\,2} - T_v^{\,2}} \quad \text{.....(2.2)}$$

Tegangan horizontal dirumuskan:

$$T_h = T\cos\alpha \quad \text{.....(2.3)}$$

Tegangan awal pada *mooring line* dirumuskan:

$$T_h = \sqrt{T^2 - (ps)^2} \quad \text{.....(2.4)}$$

Panjang tali dirumuskan:

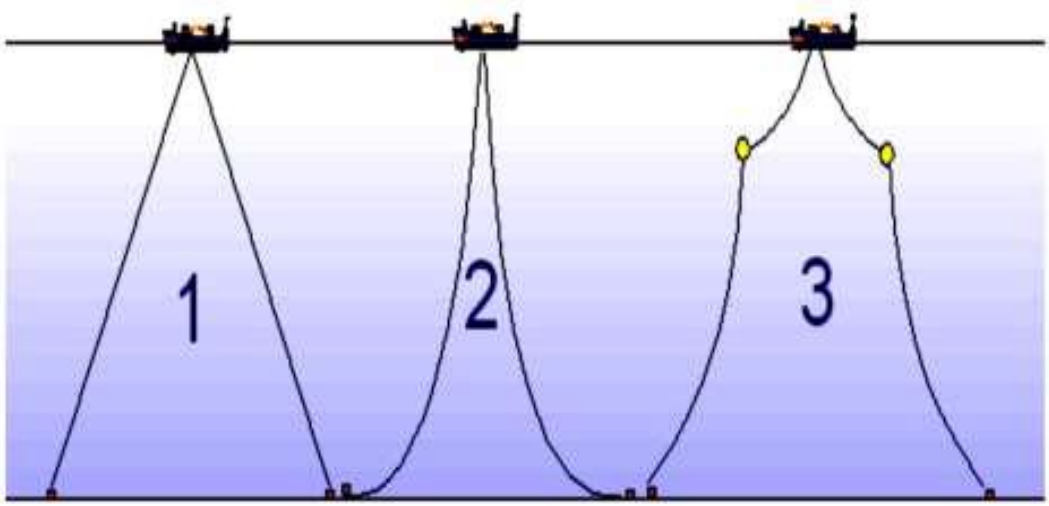
$$s = \frac{T_o}{P} = \left[\sinh\left(\frac{Px}{T_o}\right)\right] \quad \text{.....(2.5)}$$

Kemudian pada sumbu x dirumuskan:

$$\mathrm{x} = \frac{T_o}{P}\ \sinh^{-1}\left(\frac{P_s}{T_o}\right) \quad \text{.....(2.6)}$$

Perbedaan penting lainnya adalah bahwa kekuatan pemulihan pada tambatan catenary dihasilkan oleh bobot komponen sedangkan kekuatan taut *mooring* yang kencang berasal dari elastisitas tali tambat [9].

Pada Gambar 2.3 ditunjukkan mengenai pengaturan sistem *mooring* line yang berbeda beda [4].



Gambar 2.3 Jenis Pengaturan Sistem Penambatan [4]

Tension yang terjadi pada *mooring line* dapat dibedakan menjadi dua, yaitu *mean tension* dan *maximum tension*. *Mean tension* adalah *tension* pada *mooring line* yang berkaitan dengan *mean offset* dari vessel. Sedangkan *maximum tension*

adalah *mean tension* yang mendapat pengaruh dari kombinasi frekuensi gelombang dan *low- frequency tension* [10].

Batasan *tension* pada *mooring line* dan faktor keamanan (*safety factor*) yang direkomendasikan oleh API-RP2SK dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Kriteria *Tension* Limit dan Faktor Keamanan *Mooring*

	Analysis Method	***Tension of Liimit* (*Percent of* MBS)**	***Equivalent Factor of Safety***
Intact	*Quasi-static*	50	2.0
Intact	*Dynamic*	60	1.67
Damaged	*Quasi-static*	70	1.43
Damaged	*Dynamic*	80	1.25

2. *Turret Mooring*

Pada *turret mooring*, kapal dihubungkan dengan *turret* dilengkapi *bearing* sehingga memungkinkan kapal untuk dapat berputar. Terdapat dua macam *turret mooring*, yaitu:

a. *External Turret*, dapat diletakkan pada posisi *bow atau stern* kapal, di luar lambung kapal. Sistem ini memungkinkan kapal untuk berputar 360° dan beroperasi pada cuaca normal maupun ekstrim. Sistem *external turret* biasanya digunakan di perairan yang tidak terlalu dalam. *Chain Leg* ditanam di dasar laut dengan *anchor* atau *piles*. Biaya produksi *external turret* relative lebih murah dibandingkan dengan *internal turret*. *Chain table* pada *external turret* terletak di atas *water level*.

b. *Internal Turret*, keunggulan utama dari sistem ini adalah dapat terpasang secara permanen atau tidak (*dis-connectable*). *Internal turret* dapat digunakan pada kondisi lingkungan yang moderat sampai ekstrim dan dapat disesuaikan dengan kedalaman air laut.

3. *Tower Mooring*

Pada sistem ini kapal tanker/FSO/FPSO dihubungkan ke *Tower* menggunakan *Permanent Wishbone* atau *Temporary/Permanent Hawser*. Sesuai untuk laut dangkal hingga sedang dengan arus yang cukup kuat. Keunggulan dari sistem ini

ialah transfer fluida yang sederhana dengan menggunakan *jumper hoses* dari tower ke kapal, akses langsung dari kapal ke *Tower*, modifikasi yang tidak terlalu banyak pada kapal dan semua *mechanical equipment* terletak di *atas sea level*.

4. *Buoy Mooring*

Pada sistem ini *buoy* digunakan sebagai *Mooring Point* kapal dan untuk *Offloading* fluida. Tujuan utamanya adalah untuk proses pengisian dan transfer fluida dari daratan atau ke fasilitas *offshore* lainnya ke kapal yang sedang tertambat.

5. *Dynamic Positioning*

Sistem ini adalah yang paling fleksibel karena dapat menyesuaikan dengan arah datang dan puncak gelombang sehingga dapat memperoleh posisi paling aman dalam proses operasi. Namun biaya sistem ini sangat mahal sehingga menjadi sebuah pilihan yang belum realistis secara ekonomi.

2.3 Beban Lingkungan

Terdapat beberapa gejala alam yang merupakan bagian dari beban lingkungan yang dialami oleh struktur bangunan apung di lokasi operasi, yang paling utama adalah beban gelombang, arus, dan angin.

2.3.1 Beban Gelombang

Gelombang merupakan manifestasi dari suatu rambatan energi yang memiliki frekuensi dan periode. Gelombang dapat disebabkan oleh angin, gerhana kapal, gempa atau gaya gravitasi dari matahari dan bulan. Jika gelombang yang merambat mengenai struktur yang berada diperairan akan dikenai gaya yang ditimbulkan oleh gelombang. Setiap gelombang dilaut dibebani oleh gaya gelombang, untuk menghitung gaya tersebut maka diperlukan penerapan mekanika gelombang. Dalam perhitungan gaya gelombang dapat digunakan beberapa rumusan dimana didasarkan pada perbandingan antara *D* (diameter struktur) dengan *L* (panjang gelombang) sebagai berikut [12]:

1. Untuk struktur yang berukuran kecil "*small body*" ($D/L \leq 0$ dapat digunakan persamaan *Morison*.
2. Jika struktur ($0.2 < D/L \leq 0.5$) maka dapat digunakan persamaan *Froude Krylov*.

3. Sedangkan jika struktur memiliki ukuran yang besar "*large body*" (D/L > 0.5) dapat digunakan teori difraksi.

Untuk perhitungan *FPU* sendiri karena memiliki ukuran struktur yang begitu besar maka digunakanlah toeri difraksi. Akibat dari adanya struktur maka gelombang akan terdifraksi dan terjadi perubahan pada pola aliran. Akibat terjadinya perubahan pola aliran maka terdapat potensi kecepatan yang baru. Gaya difraksi pada struktur terapung perlu dilakukan peninjauan syarat batas dari setiap kasus dan memerlukan pendekatan matematis yang kompleks. Potensial kecepatan yang baru didapat dengan menggunakan prinsip super posisi, namun secara umum dapat disajikan dalam bentuk matematis:

$$\phi = \phi I + \phi D \quad \text{(2.12)}$$

Dimana:

ϕ = Potensial kecepatan total (m/s)

ϕI = Potensial kecepatan gelombang datang (m/s)

ϕD = Potensial keceaptan yang menyebar (scattered) (m/s)

2.3.2 Beban Arus

Arus mempunyai kondisi lingkungan yang penting untuk diperhitungkan dalam perancangan karena mempunyai pengaruh pada beberapa hal, yaitu:

1. Letak dan arah kedudukan sandaran kapal dan dampra tongkang
2. Gaya yang diderita anjungan

Arus pada umumnya dikategorikan sebagai berikut :

1. Arus pasut (terkait dengan pasut astronomis)
2. Arus sirkulasi (terkait dengan pola sirkulasi laut)
3. Arus yang ditimbulkan oleh badai/angin

Hasil penjumlahan vektor dari ketiga arus tersebut merupakan arus total. Besaran relatif dari semua komponen vektor ini sangat bergantung pada kondisi lepas pantai setempat. Arus laut pada dasarnya dapat memberikan pengaruh pada beban dinamis, yaitu pada gaya *drag* dalam Persamaan Morison.

Besar dan arah dari arus pasut pada permukaan air umumnya diperoleh dengan mengukur besarnya arus pada daerah setempat.

Adapun variasi kecepatan arus dapat dihitung dengan persamaan:

$$U_T = U_0 \left(\frac{y}{h} \right)^{1/7} \quad \text{.....(2.13)}$$

dengan:

U_T = Kecepatan arus pada ketinggian y dari permukaan (m/s)

U_0 = Kecepatan arus di permukaan laut (m/s)

h = Kedalaman laut (m)

y = Kedalaman yang ditinjau (m)

2.3.3 Beban Angin

Gaya angin yang bekerja pada sebuah struktur bangunan lepas pantai merupakan penjumlahan gaya-gaya yang diterima oleh masing-masing komponen struktur. Gaya angin tersebut timbul akibat adanya hambatan kekentalan udara dan adanya perbedaan distribusi tekanan di sisi komponen yang menghadap ke arah angin dan sisi-sisi komponen lainnya.

Besarnya gaya angin tergantung pada kecepatan hembusan angin dan ukuran serta bentuk dari struktur.

Dalam buku *Offshore Structural Engineering*, hal 93, diberikan persamaan untuk menghitung gaya angin (N) yang bekerja pada suatu obyek [13]

$$F = \frac{1}{2} \rho \cdot C_w \cdot A \cdot v^2 \quad \text{..... (2.14)}$$

Dimana:

ρ = massa jenis udara; (1,29 kg/m^3)

C_w = koefisien gaya angin

A = luas bidang tangkap angin (m^2)

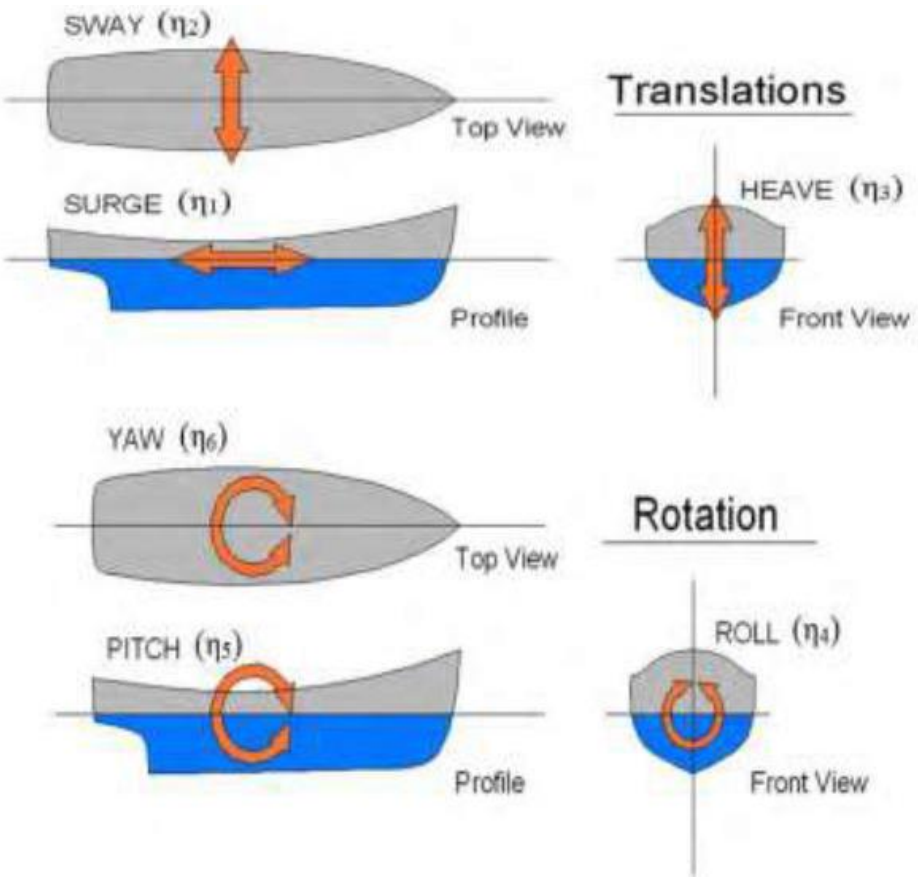
v = kecepatan angin (m/s)

2.4 Teori Gerak Kapal

Bangunan apung memiliki enam mode gerakan bebas (*Six Degree of Freedom*) yang terbagi menjadi dua kelompok, yaitu 3 mode gerakan translasional dan tiga mode gerakan rotasional dalam tiga arah sumbu.

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4, berikut adalah penjelasan keenam mode Gerakan tersebut: [14].

1. Model Gerak Translasional
   a. *Surge*, gerakan transversal arah sumbu x
   b. *Sway*, gerakan transversal arah sumbu y
   c. *Heave*, gerakan transversal arah sumbu z
2. Model Gerak Rotasional
   a. *Roll*, gerakan rotasional arah sumbu x
   b. *Pitch*, gerakan rotasional arah sumbu y
   c. *Yaw*, gerakan rotasional arah sumbu z



Gambar 2.4 llustrasi Gerakan *Six Degrees of Freedom* pada *FPU* [14]

Menurut teori klasik gerakan kapal di atas gelombang reguler secara matematis dapat diformulasikan dengan mengacu pada hukum *Newton* ke II, yang selanjutnya memberikan korelasi antara gaya aksi oleh gelombang insiden dan gaya reaksi berupa respons gerakan kapal. Selanjutnya persamaan umum gerakan kapal dalam 6-derajat kebebasan dengan memakai konvensi sistem sumbu tangan kanan yang terdiri dari *surge, sway, heave, roll, pitch* dan *yaw*. Definisi gerakan kapal dalam enam derajat kebebasan dapat dijelaskan dengan Gambar 2.4. Tiga gerakan translasi pada arah sumbu x, y dan z, adalah masingmasing *surge* (ζ1), *sway* (ζ2) dan *heave* (ζ3), sedangkan untuk gerakanrotasi terhadap ketiga sumbu adalah *roll* (ζ4), *pitch* (ζ5) dan *yaw* (ζ6) [15].

Menurut hukum kedua *Newton*, persamaan *manuvering* FPSO dalam kondisi beban angin dan gelombang ditulis sebagai berikut [16].

$$(m+m_x)(v_u - v_v v_r) = XH + XC + XA + XW \quad \text{.....(2.15)}$$

$$(m+m_y)(v_u - v_v v_r) = YH + YC + YA + YW \quad \text{.....(2.16)}$$

Dimana:

m = Massa kapal (kg)

m_x= Massa kapal saat kondisi *surge* (kg)

m_y= Massa kapal saat kondisi *sway* (kg)

v_u = Kondisi *surge*

v_v = Kondisi *sway*

v_r = Kondisi *yaw*

H = *Hull* (lambung kapal)

A = *Wind* (angin)

W = *Wave* (gelombang laut)

C = *Current* (arus laut)

Sementara itu persamaan murni tiap gerakan *six degree of freedom* untuk bangunan apung secara bersamaan atau saling interaksi antara gerakan seperti pada penjelasan berikut: [17]

2.4.1 Gerakan *Surge* (x) Murni

Persamaan murni gerakan *surge* pada banguan apung sebagai berikut:

$$(m+m_x)(v_u - v_v v_r) + b_1\dot{x} = F_1 \cos\omega_e t \quad \text{.....(2.17)}$$

$(m+m_x)$ adalah koefisien dari komponen gaya inersia dan penjumlahan dari massa bangunan apung dan massa tambahnya untuk gerakan *surge*. Sebagai ilustrasi ketika kapal bergerak dan displacementnya berubah maka seolah-olah adanya penambahan massa benda akibat terdorongnya partikel fluida di sekitarnya dalam jumlah massa tertentu karena bergeraknya kapal itu sendiri. Hal ini yang disebut sebagai massa tambah (*added mass*) akibat gerakan *surge* yang didapatkan hasil experiment atau pendekatan berdasarkan geometri bangunan apung.

($F_1 \cos\omega_e t$) adalah komponen gaya penggetar atau eksitasi sedangkan F_1 adalah amplitude dari gaya penggetar yang menyebabkan terbentuknya gerakan *surge* akibat gaya eksitasi berupa tekanan hidrostatis dan dinamis gelombang. Adanya $(\cos\omega_e\ t)$ menunjukkan gaya penggetarnya bersifat *periodic* dan regular. Komponen gaya eksitasi didapatkan berdasarkan penggunaan metode strip/panel. Sistem gerakan *surge* tidak memiliki unsur kekakuan (*stiffness*) sehingga komponen gaya pengembalinya tidak ada.

2.4.2 Gerakan *Sway* (y) Murni

Persamaan murni gerakan *surge* pada bangunan apung sebagai berikut:

$$(m+m_y)(v_u - v_v v_r) + b_2\dot{y} = F_2 \cos\omega_e t \quad \text{.....(2.18)}$$

$(m+m_y)$ adalah koefisien dari komponen gaya inersia dan penjumlahan dari massa bangunan apung dan massa tambahnya untuk gerakan *sway* sementara adalah koefisien dari gaya redaman (*damping*) akibat gerakan *sway* yang dihasilkan dari eksperimen atau pendekatan berdasarkan geometri bangunan apung F_2 adalah amplitude dari gaya penggetar yang menyebabkan terbentuknya gerakan sway akibat gaya eksitasi berupa tekanan hidrostatis dan dinamis gelombang. Komponen gaya eksitasi didapatkan berdasarkan penggunanaan metode strip/panel. Sistem gerakan sway tidak memiliki unsur kekakuan (*stiffness*) sehingga komponen gaya pengembalinya tidak ada.

2.4.3 Gerakan *Heave* (z) Murni

Persamaan murni gerakan *surge* pada banguan apung sebagai berikut:

$$(m+m_z)+b_3\dot{z}+\rho g(A_{wp})z=F_3\cos\omega_e t \quad \text{.....(2.19)}$$

$(m+m_z)$ adalah koefisien dari komponen gaya inersia dan penjumlahan dari massa bangunan apung dan massa tambahnya untuk gerakan heave sementara adalah koefisien dari gaya redaman (*damping*) akibat gerakan heave yang didapatkan dari eksperimen atau pendekatan berdasarkan geometri bangunan apung. ($\rho\ g\ A_{wp}$) adalah koefisien dari komponen gaya pengembali (*stiffness*) yang menyebabkan gerakan osilasi naik turun (*heading*) karena fungsinya untuk mengembalikan ke posisi setimabang (*equilibrium*).

Hal ini juga disebabkan karena adanya gaya penggetar eksternal sehingga ada kecenderungan yang berasal dari penambahan gaya apung saat bangunan apung bergerak secara vertical dan membentuk perubahan pada saratnya. F_3 adalah amplitude dari gaya penggetar yang menyebabkan terbentuknya gerakan heave akibat gaya eksitasi berupa tekanan hidrostatis dan dinamis gelombang. Komponen gaya eksitasi didapatkan berdasarkan penggunanaan metode strip/panel dan dapat dihitung berdasarkan kemampuan komputasi atau software berbasis *finite element method* yang tersedia.

2.4.4 Gerakan *Roll* (φ) Murni

Persamaan murni gerakan *surge* pada banguan apung sebagai berikut:

$$(mk_{xx}^{\ 2}+m'_4k'^{\ 2}_{xx})\ddot{\varphi}+b_4\dot{\varphi}+mg\overline{GM_T}\ \varphi=F_4\cos\omega_e t \quad \text{.....(2.20)}$$

$(I_{xx}+I'_{xx})$ atau $\left(mk_{xx}^{\ 2}+m'_4k'^{\ 2}_{xx}\right)$ adalah koefisien dari komponen gaya inersia dan penjumlahan dari momen inersia bangunan apung dan momen inersia dari massa tambah untuk gerakan *roll* sementara adalah jari-jari girasi gerakan *roll* terhadap sumbu x. b_4 adalah koefisien dari gaya redaman (*damping*) akibat gerakan *roll* yang dihasilkan dari eksperimen atau pendekatan berdasarkan geometri dari bangunan apung. ($mg\overline{GM_T}$) adalah koefisien dari komponen gaya pengembali atau penunjukkan sifat kekakuannya karena adanya tambahan gaya apung akibat

gerakan *roll*. Sifat kekakuannya dapat diilustrasikan sebagaimana pada pegas spiral yang jika diberi gaya ke kanan atau kiri maka terdapat perlawanan untuk kesetimbangan pegas tersebut. $\overline{GM_T}$ adalah massa bangunan apung, adalah percepatan gravitasi, dan adalah radius metasentrik transversal bangunan apung.

Ruas kanan adalah komponen momen penggetar eksternal berupa gaya tekanan hidrostatis dan tekanan dinamis gelombang dengan adalah amplitude momen penggetarnya untuk gerakan *roll*.

2.4.5 Gerakan *Pitch* (θ) Murni

Persamaan murni gerakan *surge* pada banguan apung sebagai berikut:

$$(mk_{yy}{}^2 + m'_5 k'_{yy}{}^2)\ddot{\theta} + b_5\dot{\theta} + mg\overline{GM_L}\theta = F_5 \cos\omega_e t \quad \text{.....(2.21)}$$

$(I_{yy} + I'_{yy})$ atau $\left(mk_{yy}{}^2 + m'_5 k'_{yy}{}^2\right)$ koefisien dari komponen gaya inersia dan penjumlahan dari momen inersia bangunan apung dan momen inersia massa tambah untuk gerakan *pitch* sementara adalah jari-jari girasi gerakan *pitch* terhadapat sumbu y. b_5 adalah koefisien dari gaya redaman (*damping*) akibat gerakan *pitch* yang dihasilkan dari eksperimen atau pendekatan berdasarkan geometri bangunan apung.

$(mg\overline{GM_L})$ adalah koefisien dari komponen gaya pengembali atau penunjukkan sifat kekakuannya karena adanya tambahan gaya apung akibat gerakan *pitch* dengan $\overline{GM_L}$ adalah radius metasentris longitudinal bangunan apung. Sifat kekakuannya dapat diilustrasikan sebagaimana pada pegas yang jika diberi gaya ke depan atau belakang maka terdapat perlawanan untuk kesetimbangan pegas tersebut.

Ruas kanan adalah komponen momen penggetar eksternal berupa gaya tekanan hidrostatis dan tekanan dinamis gelombag dengan adalah amplitude momen penggetarnya untuk gerakan *pitch*.

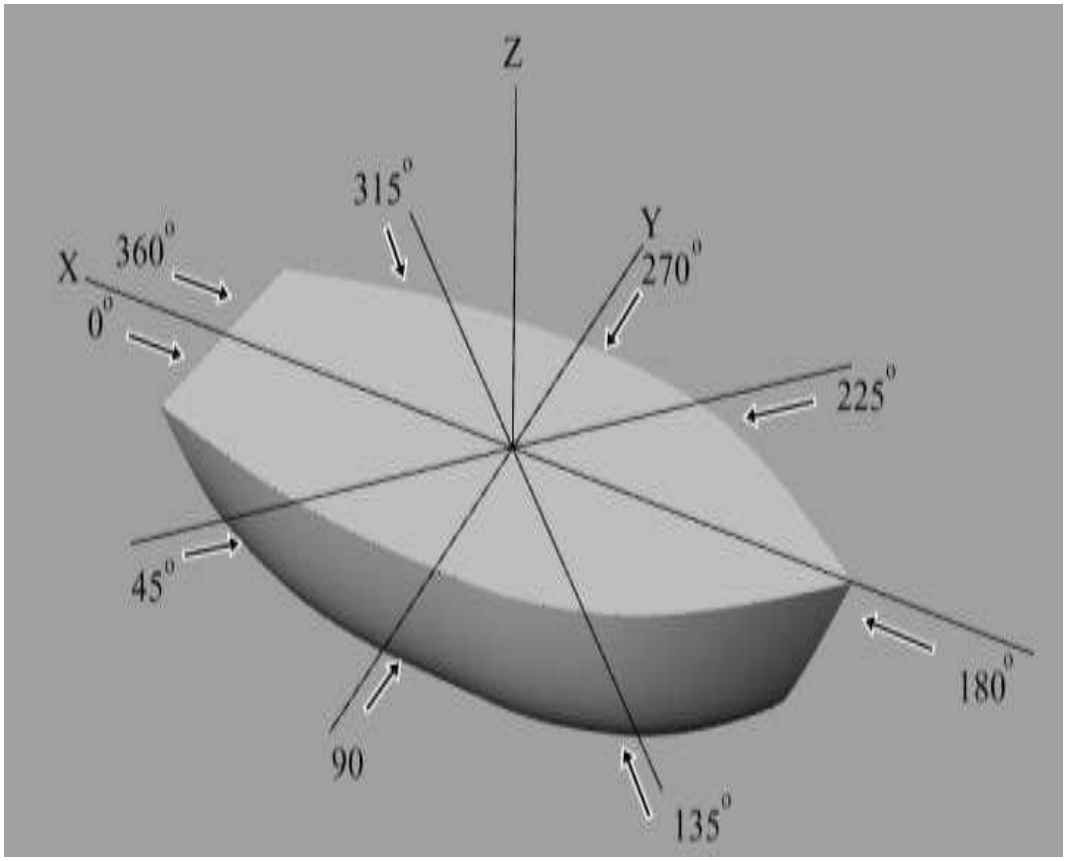
2.4.6 Gerakan *Yaw* (ψ) Murni

Persamaan murni gerakan *surge* pada banguan apung sebagai berikut:

$$(mk_{zz}{}^2 + m'_6 k'_{zz}{}^2)\ddot{\psi} + b_6\dot{\psi} + = F_6 \cos\omega_e t \quad \text{.....(2.22)}$$

$(I_{zz} + I'_{zz})$ atau $\left(mk_{zz}^{2} + m'_{6}k'^{2}_{zz}\right)$ adalah koefisien dari komponen gaya inersia dan penjumlahan dari momen inersia bangunan apung dan momen inersia massa tambah untuk gerakan *yaw* sementara k_{zz} adalah jari-jari girasi gerakan *pitch* terhadapat sumbu z. b_6 adalah koefisien dari gaya redaman (*damping*) akibat gerakan *yaw* yang dihasilkan dari eksperimen atau pendekatan berdasarkan geometri bangunan apung.

Ruas kanan adalah komponen momen penggetar eksternal berupa gaya tekanan hidrostatis dan tekanan dinamis gelombang dengan F_6 adalah amplitude momen penggetar untuk gerakan *yaw*. Sistem gerakan *yaw* tidak memiliki unsur kekakuan (*stiddness*) sehingga komponen gaya pengembalinya tidak ada. Arah datangnya gelombang memengaruhi sudut *heading* , (μ) yaitu sudut antar arah pergerakan gelombang (*wave travel*) dan arah laju kapal. Pengaturan sudut masuk gelombang (*Wave Heading*) pada *software ansys aqwa* dapat dilihat pada ilustrasi Gambar 2.5 dan Tabel 2.2 di bawah ini [18]



Gambar 2.5 Arah *Heading* Gelombang pada *Ansys* [10]

Tabel 2.2 Arah *Heading* Gelombang pada *Ansys*

No.	Heading	Deskripsi
1	0º	*Following Seas*
2	45º	*Stern Quartering Seas*
3	90º	*Beam Seas*
4	135º	*Bow Quartering Seas*
5	180º	*Head Seas*
6	225º	*Bow Quartering Seas*
7	270º	*Beam Seas*
8	315º	*Stern Quartering Seas*
9	360º	*Following Seas*

Sudut masuk gelombang adalah arah datang gelombang yang diukur di semua sudut bagian kapal yang secara garis besar mempresentasikan arah gelombang ketika menerpa bagian kapal saat beroperasi di perairan.

2.5 Response Amplitude Operator (RAO)

Sebelum mencari nilai *Response Amplitude Operator* suatu sistem *mooring* semestinya dianalisa berdasarkan suatu batasan desain kriteria diformulasikan dalam tiga batasan atau *Limit State* yang telah ditetapkan, yaitu [19]:

1. *Ultimate Limit State (ULS*), untuk memastikan bahwa sebuah *mooring line* cukup kuat untuk bertahan terhadap efek beban yang ditimbulkan oleh beban lingkungan pada kondisi ekstrem.
2. *Accidental Limit State* (*ALS*), untuk memastikan bahwa suatu sistem *mooring* memiliki kapasitas yang cukup untuk bertahan pada kegagalan sebuah *mooring* line yang dimana penyebab dari terjadinya kegagalan tidak diketahui.
3. *Fatigue Limit State* (FLS), untuk memastikan bahwa sebuah *mooring lines* memiliki kapasitas [20].

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

luar (gelombang) dalam bentuk response pada suatu struktur. Bentuk umum dari persamaan *RAO* dalam fungsi frekuensi [21] adalah sebagai berikut:

Response $(\omega) = (RAO)\eta(\omega\ )$…….……...…..…..(2.23)

Dimana:

η : amplitudo gelombang

Menurut [21], persamaan *RAO* dapat dicari dengan rumus sebagai berikut:

$$RAO(\omega) = \frac{X_p(\omega)}{\eta(\omega)}$$ …...……...……..…..……(2.24)

Dimana:

$X_p\ (\omega)$: Amplitudo gerakan struktur (m)

$\eta(\omega)$: Amplitudo gelombang (m)

Menurut [17], respon gerakan *RAO* terbagi menjadi dua, yaitu:

1. Respons gerakan *RAO* untuk gerakan translasi (*surge, sway, heave*) merupakan perbandingan langsung antara amplitudo gerakan dibanding dengan amplitudo gelombang insiden (keduanya dalam satuan panjang).
2. Respons gerakan *RAO* untuk gerakan rotasi (*roll, pitch, yaw*) merupakan perbandingan antara amplitudo gerakan rotasi (dalam radian) dengan kemiringan gelombang, yakni yang merupakan perkalian antara gelombang $\left(kw = \frac{\omega^2}{g}\right)$ dengan amplitudo gelombang insiden.

2.6 Spektrum Gelombang

Pada tahun 1967 T.P Barnett dan J.C Wilkerson pertama kali menyempurnakan spektrum gelombang dalam satu dimensi dengan modal data radar *altimetry*. Pada pengamatan tersebut mereka hanya menggunakan dua profil angin saja. Setelah itu, Synder dan Cox dapat menemukan exponensial pertumbuhan gelombang.

Dengan menggunakan Pendekatan Kitaigorodskii dan Hipotesis Philips, pendekatan yang sama digunakan oleh Pierson dan Moskowits. Hasselmann dkk

(1973) mengusulkan satu model spektrum yang baru berdasar pada *Joint North Sea Wave Project* (JONSWAP) dengan mempertimbangkan *fetch* dengan luas yang tidak terbatas. Spektrum JONSWAP berlaku untuk *not fully developed sea states* dan juga digunakan pada *fully developed sea states* [22].

Persamaan spektrum JONSWAP merupakan modifikasi dari persamaan spektrum Pierson-Morkowitz untuk keadaan perairan tertutup di laut utara. Selain itu, spektrum JONSWAP juga dapat diaplikasikan di lingkungan perairan yang kondisi *fetch*-nya terbatas dan *shallow water*. Dari penjelasan di atas, maka spektrum JONSWAP cocok diaplikasikan di Indonesia karena karakteristik Perairan Indonesia yang tertutup/kepulauan, namun harus menyesuaikan kondisi lingkungan perairan tempat di mana struktur terapung tersebut beroperasi [20].

Pada DNV RP C205 juga dijelaskan bahwa spektrum JONSWAP diaplikasikan pada perairan dengan [23]:

$$3.6 < \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} < 5 \quad \text{(2. 25)}$$

Dimana:

T_p = Periode puncak gelombang (s)

H_s = Tinggi gelombang signifikan (m)

Formulasi spektra JONSWAP merupakan modifikasi dari spektra P-M, dengan memasukkan parameter-parameter yang akan mengakomodasi karakteristik gelombang perairan tertutup atau kepulauan. Persamaan spektra JONSWAP ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$S_{\zeta}(\omega) = ag^2\omega^{-5}\exp\left\{-1.25\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)\right\}\gamma^{EXP\left[\frac{-\omega-\omega o^2}{2\tau^2\tau-\omega o^2}\right]} \quad \text{(2. 26)}$$

Dimana:

a = 0.076 $(X_0)^2$

$X_0 = \frac{gx^2}{\cup w}$

x = Panjang *fetch* (m)

U_w = Kecepatan angin (m/s)

a = 0.00081 jika X tidak diketahui

γ = Parameter ketinggian atau *peakedness parameter*, dimana harganya dapat bervariasi amtara 1.0 sampai 7.0, untuk Laut Utara sendiri harganya ditentukan 3.3

τ = Parameter bentuk atau *shape* parameter

$\tau = 0.07\ \omega \leq \omega_0$

$\tau = 0.09\ \omega > \omega_0$

$\omega_0 = 2\pi\ (\frac{g}{U_\omega})(X_0)^{-0.33}$

Sedangkan, untuk mencari nilai dari parameter puncak (γ) gelombang penulis dapat mengetahui nilainya dengan menggunakan persamaan seperti di bawah berikut:

$$\gamma = \exp\left[3.4843\left(1 - 0.1975\left(0.036 - 0.0056\frac{T_P}{\sqrt{H_s}}\right)\frac{T_P^{\ 4}}{\sqrt{H_s}^{\ 2}}\right)\right] \quad \text{…….....…...….(2. 27)}$$

dengan:

T_P = Periode puncak spectra (s)

H_s = Tinggi gelombang signifikan (m)

2.7 *Tension* pada *Mooring Line*

Tension yang terjadi pada *mooring line* dapat dibedakan menjadi 2, yaitu:

1. *Mean Tension.*

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

2. *Maximum Tension.*

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

Menurut API RP 2SK 2nd edition, tarikan maksimum (*maximum tension*) dapat ditentukan dengan prosedur dibawah ini: [11]

a. Jika $Tlf_{max} > Twf_{max}$, maka:

$T_{max} = T_{mean} + Tlf_{max} + Twf_{sig}$ ……..……...…….……(2.28)

b. Jika $Tlf_{max} < Twf_{max}$, maka:

$T_{max} = T_{mean} + Twf_{max} + Tlf_{sig}$ …….....……..(2.29)

dengan:

T_{mean} = *mean tension*

T_{max} = *maximum tension*

Twf_{max} = *maximum wave frequency tension*

Twf_{sig} = *significant wave frequency tension*

Tlf_{max} = *maximum low-frequency tension*

Tlf_{sig} = *significant low-frequency tension*

Untuk mengetahui desain sistem tambat aman atau tidak, harus dilakukan pengecekan. Salah satunya pengecekan dapat dilakukan pada nilai *tension* pada masing-masing rantai jangkar. Tension pada rantai jangkar harus sesuai dengan kriteria *safety factor* yang terdapat pada *rules*. Pada tugas akhir ini *rule*s yang dipakai sebagai acuan adalah ABS.

Dengan adanya nilai *tension* maksimum, desain tali tambat dapat diberikan kriteria aman atau tidak dengan cara mengecek nilai *tension* pada masing-masing jangkar harus sesuai dengan kriteria *safety factor*. *Rule* yang akan digunakan adalah ABS, dimana telah menetapkan *safety factor* untuk *mooring line* harus lebih besar dari 1,67 [24].

Persamaan *safety factor* adalah:

$$Safety\ Factor = \frac{Minimum\ Breaking\ Load}{MaximumTension} \quad \text{……..(2.30)}$$

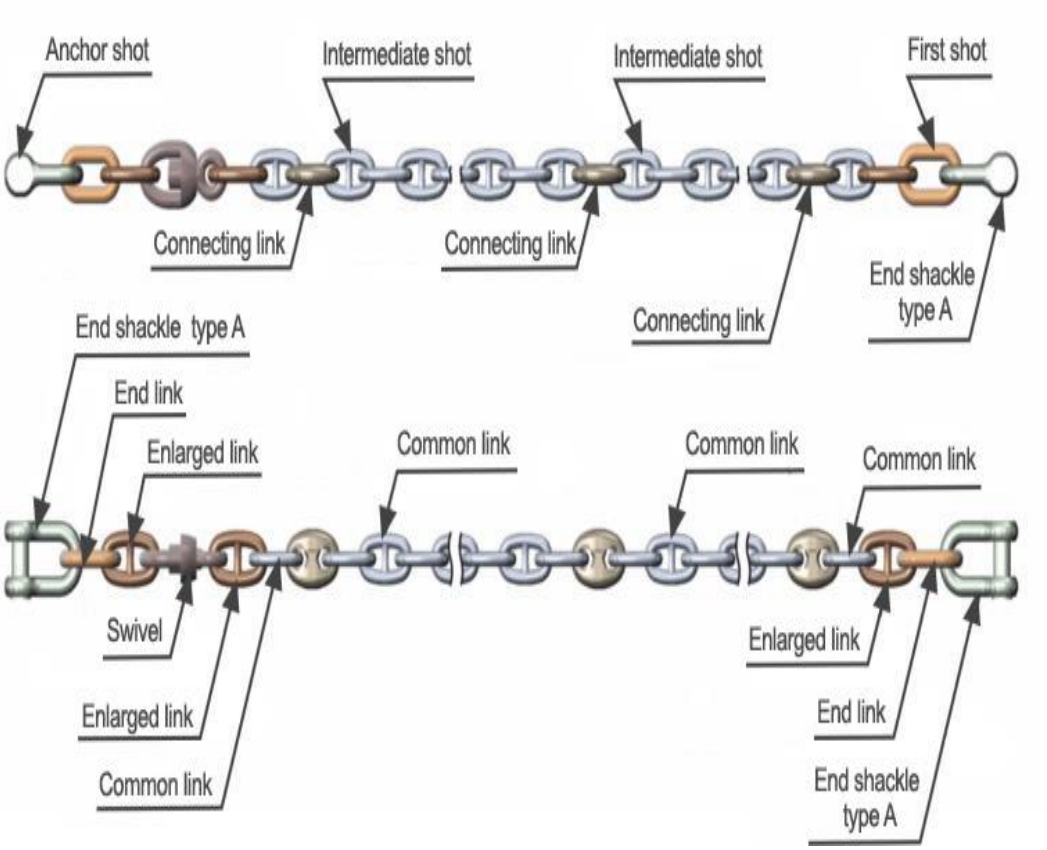
2.8 *Mooring Chain*

Rantai tambat yang digunakan di lepas pantai hanya dapat diproduksi dan dioperasikan berdasarkan dengan acuan terhadap aturan yang telah ditetapkan oleh

class dari masing-masing negara. Rantai jangkar dapat terdiri dari berbagai tingkatan *grade* atau kualitas, diantaranya R3, R3S, R4, R4S, sampai R5, dimana R5 memilihi kekuatan terbesar dan R3 memiliki kekuatan terkecil.

Bagian – bagian dari rantai jangkar terdiri dari potongan satu segel dengan *shackle* sebagai pembatas. Setiap satu segmen Panjangnya adalah 15 *fathoms*, dimana satu *fathoms* sama dengan enam *feet*. Menurut *Lloyd Register*, satu segmen panjangnya 15 *fathoms*, atau sekitar 27,5 meter.

Dalam satu rangkaian rantai (1 segel), rantai terangkai sebagai berikut; 1 buah kanter + 1 buah *endlink* + 1 buah *large link* + beberapa rangkaian *ordinary link / common link* + 1 buah *large link* + 1 buah *end link*, sehingga membentuk rangkaian rantai sepanjang 27,5 m. Setiap kapal, panjang rantai jangkarnya berbeda-beda tergantung dari besarnya kapal, misalkan untuk kapal tanker 6500 Dwt membutuhkan panjang rantai jangkar 495 m atau senilai 18 segel atau untuk setiap jangkar memerlukan rantai sepanjang 247.5 m atau senilai dengan 9 segel rantai. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 2.6 berikut ini.



Gambar 2.6 Jenis *Mooring Lines* Tipe *Chain* [25]

Setiap panjang rantai disambung dengan menggunakan segel (*shackle*). Sedangkan untuk menyambung rantai dengan jangkar digunakan *anchor shackle* yang dilengkapi *swivel*, yang memungkinkan jangkar berputar, tanpa mengakibatkan rantai yang dipasang sebelum atau di belakang jangkar tersebut terpuntir. Sedangkan ujung rantai lainnya diikatkan pada kapal didalam kotak rantai (*chain's locker*) dengan menggunakan segel. Ujung rantai jangkar harus diikatkan pada kapal dengan alasan agar rantai dapat tertahan atau tidak hilang jika jangkar diturunkan terus sampai batas maksimum panjang rantainya. Setiap segel jumlah mata rantainya selalu ganjil supaya sambungan segel harus pada kedudukan rata pada waktu mata spil jangkar. Segel-segel biasa (*normal conecting shackle*) yang menghubungkan setiap 15 *fathoms* panjang rantainya harus dipasang dengan lengkung menghadap ke arah jangkarnya, agar supaya pada waktu lego jangkar licin dan tidak merusakkan mata spil jangkar.

Pada Gambar 2.7 berikut ditampilkan berbagai jenis macam rantai yang biasanya digunakan untuk melakukan tambatan benda apung di laut lepas.

Gambar 2.7 Jenis – Jenis Penyambung Rantai [25]

2.9 Tegangan pada *Anchor Crown Shackle*

Bentuk tegangan yang digunakan adalah v*on mises stress* yang biasanya digunakan untuk memprediksi Batasan kekuatan bahan dalam setiap kondisi pembebanan. Batasan kekuatan tersebut dapat dikatakan sebagai tegangan

maksimum yang terjadi pada struktur yang didapatkan dari penggabungan tegangan yang terjadi searah sumbu x, y, dan z yang dapat digambarkan pada Gambar 2.8. Tegangan *von mises* dapat dirumuskan:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\left(\frac{\left(\sigma_{x-}\sigma_{y}\right)^{2} + \left(\sigma_{y-}\sigma_{z}\right)^{2} + \left(\sigma_{z-}\sigma_{x}\right)^{2}}{2}\right) + 6\left(\tau^{2}xy + \tau^{2}yz + \tau^{2}zx\right)^{2}} \quad \text{.....(2.31)}$$

Dimana:

σ_{eq} = Tegangan ekuivalen (*von mises stress*) (N/m^2)

σ_x = Tegangan normal sumbu x (N/m^2)

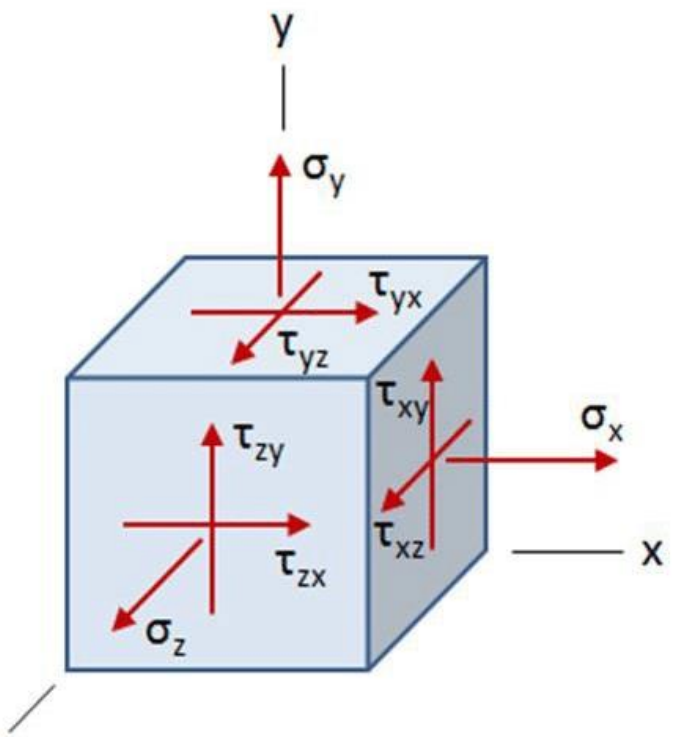
σ_y = Tegangan normal sumbu y (N/m^2)

σ_z = Tegangan normal sumbu z (N/m^2)

τ_{xy} = Tegangan geser bidang xy (N/m^2)

τ_{yz} = Tegangan geser bidang yz (N/m^2)

τ_{zx} = Tegangan geser bidang zx (N/m^2)

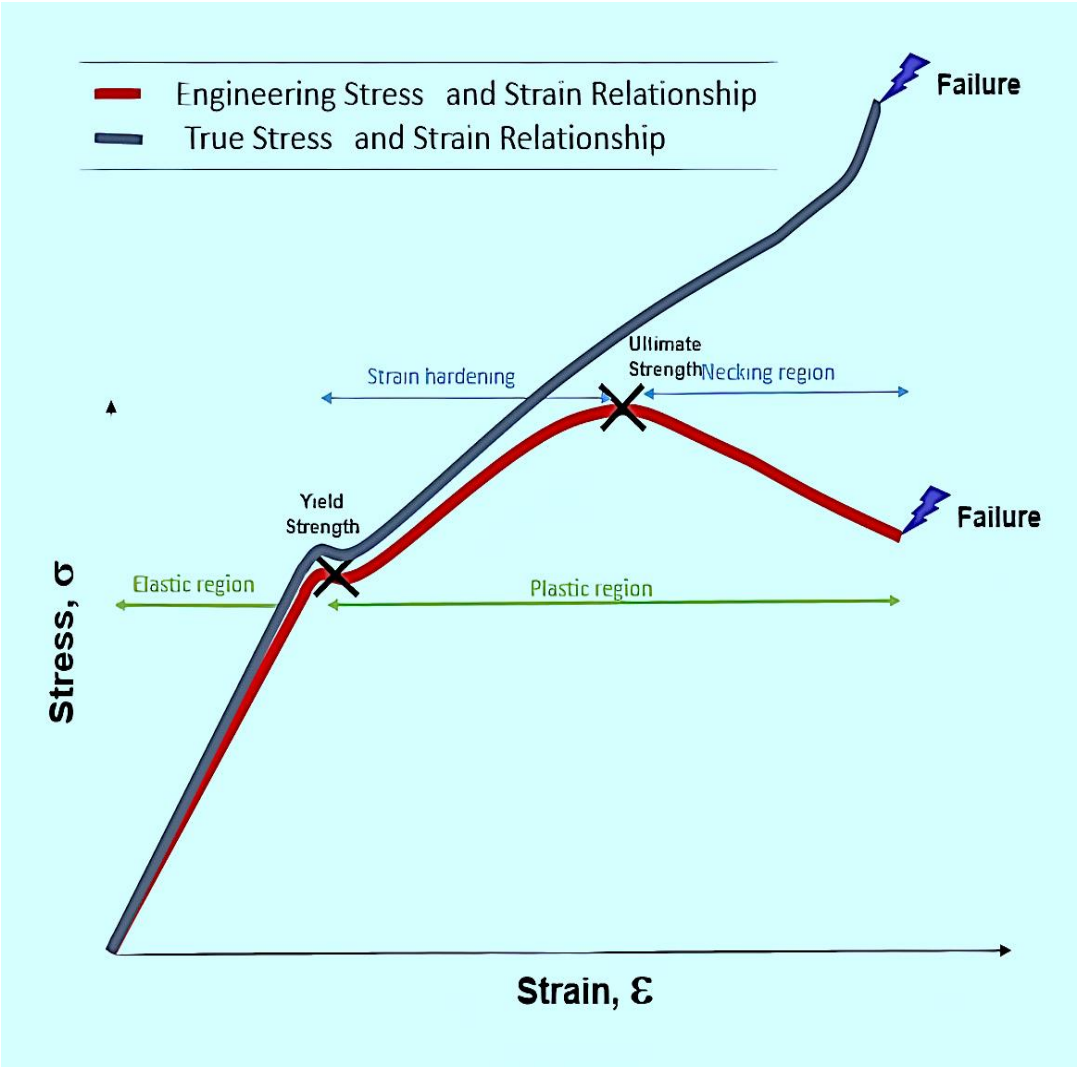


Gambar 2.8 *Von Mises Stress* pada Penampang [20]

Menurut [26] struktur dapat dikatakan aman apabila nilai tegangan maksimumnya tidak melebihi 90% dari nilai total kekuatan luluh (*yield strength*) sesuai dengan material yang digunakan. Sedangkan dalam ketentuan [27] toleransi perubahan dimensi atau deformasinya tidak boleh melebihi angka 5% dari nominal diameter struktur.

2.10 Kurva *True Stress - Strain*

Ketika ingin menganalisa kurva tegangan dan regangan pada *Ansys Mechanical* maka kurva yang akan muncul adalah kurva *true stress-strain*. Perbedaan antara kurva *true stress strain* dan kurva *engineering stress strain* berada pada saat terjadinya *ultimate tensile strength* dimana pada kurva *true stress strain* nilainya akan naik sedangkan dalam kurva *engineering stress strain* bentuk kurvanya akan turun setelah terjadinya *ultimate tensile strength* sampai ke *breaking*



Gambar 2.9 Perbedaan antara *enginering vs true stress strain curve* [28]

point seperti pada Gambar 2.9 di bawah. Jadi, analisa yang penulis akan lakukan adalah bentuk *tensile test* terhadap kekuatan *anchor crown shackle.*

Perbedaan yang dapat dilihat pada gambar di atas terjadi karena padaa saat terjadi *necking* di titik *ultimate tensile strength engineering stress strain* hanya melakukan pendekatan dengan cara membagi gaya terhadap *cross sectional area* awalan atau sebelum terjadinya *necking.* Untuk kurva *true stress strain* sendiri memakai *cross sectional area* yang akan berubah, dimana perubahannya akan semakin kecil seiring meningkatnya gaya yang diberikan, sehingga nilai tegangan akan terus meningkat.