



SKRIPSI - ME 141502

**STUDI KEKUATAN LENGAN TURBIN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA
ARUS LAUT SUMBU VERTIKAL BERBASIS FINITE ELEMENT**

M RIZKY

NRP: 04211745000005

Dosen Pembimbing :

Ir. Tony Bambang Musriyadi, PGD., M.MT

Achmad Baidowi, ST., MT

DEPARTEMEN TEKNIK SISTEM PERKAPALAN

FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2019



SKRIPSI - ME 141502

**STUDI KEKUATAN LENGAN TURBIN PEMBANGKIT LISTRIK
TENAGA ARUS LAUT SUMBU VERTIKAL BERBASIS FINITE
ELEMENT**

M Rizky

NRP: 04211745000005

Dosen Pembimbing :

Ir. Tony Bambang Musriyadi, PGD., M.MT

Achmad Baidowi, ST., MT

**DEPARTEMEN TEKNIK SISTEM PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2019**

“Halaman ini sengaja dikosongkan”



FINAL PROJECT - ME 141502

**STUDY THE STRENGTH OF TURBINE ARM VERTICAL AXIS SEA
FLOW POWER PLANT FINITE ELEMENT METHOD**

M Rizky

NRP: 04211745000005

Supervisor :

Ir. Tony Bambang Musriyadi, PGD., M.MT

Achmad Baidowi, ST., MT

**MARINE ENGINEERING DEPARTMENT
FACULTY OF MARINE TECHNOLOGY
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2019**

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LEMBAR PENGESAHAN

STUDI KEKUATAN LENGAN TURBIN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA ARUS LAUT SUMBU VERTIKAL BERBASIS FINITE ELEMENT

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada

Bidang Studi *Marine Manufacturing and Design* (MMD)
Program Studi S-1 Departemen Teknik Sistem Perkapalan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

M RIZKY

NRP 0421 17 4500 0005

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir:

1. Ir. Tony Bambang Musriyadi, PGD., M.MT
NIP. 195904101987011001
2. Achmad Baidowi, ST., MT
NIP.



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LEMBAR PENGESAHAN

STUDI KEKUATAN LENGAN TURBIN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA ARUS
LAUT SUMBU VERTIKAL BERBASIS FINITE ELEMENT

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada

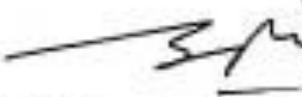
Bidang Studi *Marine Manufacturing and Design* (MMD)
Program Studi S-1 Departemen Teknik Sistem Perkapalan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

M RIZKY

NRP. 04211745000005

Disetujui Oleh Kepala Departemen
Teknik Sistem Perkapalan


Dr. Eng. Muhammad Badrus Zulfan, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 197708022008011007



SURABAYA, JULI 2019

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

STUDI KEKUATAN LENGAN TURBIN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA ARUS LAUT SUMBU VERTIKAL BERBASIS FINITE ELEMENT

Nama : M Rizky
NRP : 04211745000005
Dosen Pembimbing : Ir. Tony Bambang Musriyadi, PGD., M.MT
Achmad Baiodowi, ST., MT

Abstrak

Abstrak - Potensi pemanfaatan sumber daya alam di Indonesia sangat banyak, dengan salah satunya yaitu arus laut. Salah satu letak yang strategis dalam memanfaatkan energi arus laut yaitu di selat toyapakeh. Setelah menentukan letak potensi pemanfaatan energi arus laut, maka dibuatlah perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Arus Laut berupa desain yang telah direncanakan sebelumnya. Dengan kecepatan arus laut rata-rata 0.2 m/s sampai 0.7 m/s yang terjadi di selat toyapakeh terdapat gaya yang timbul pada lengan turbin yang bekerja. Permasalahan yang timbul dari pemanfaatan arus laut pada pembangkit listrik tenaga arus laut yaitu ketika adanya gaya gelombang dan arus yang diberikan secara berulang dan dapat menimbulkan fatigue. Posisi lengan turbin yang dianalisa yaitu pada kondisi vertikal (beroperasi). Permasalahan tersebut diselesaikan dengan metode *finite element* dan dibantu dengan perangkat lunak *Finite Element*. Sebelum dilakukan analisa dengan metode tersebut harus mengetahui nilai beban gelombang dan beban arus sesuai dengan data yang diperoleh menggunakan teori morison. Hasil analisa berdasarkan metode tersebut yaitu tegangan tertinggi terdapat pada *frame* poros dengan pembebanan gelombang dari arah 90^0 bernilai 37,9 MPa. Sedangkan *safety factor*, deformasi dan regangan juga memiliki nilai tertinggi ketika diberikan beban lingkungan dari arah 90^0 . Kelelahan struktur *frame* poros lengan turbin paling rendah umurnya yaitu 55 tahun dengan asumsi beban dari arah 90^0 . Service life *frame* poros utama dengan beroperasi maksimal 5 tahun. Untuk penyangga lengan turbin memiliki umur 9.8×10^6 tahun dengan arah beban dari 90^0 .

Kata Kunci : *Finite Element, lengan turbin, fatigue*

“Halaman sengaja dikosongkan”

STUDY THE STRENGTH OF TURBINE ARM VERTICAL AXIS SEA FLOW POWER PLANT FINITE ELEMENT METHOD

Name : M Rizky
NRP : 04211745000005
Supervisor : Ir. Tony Bambang Musriyadi, PGD., M.MT
Achmad Baiodowi, ST., MT

Abstract

Abstract— The potential for utilizing natural resources in Indonesia is very large, with one of them being ocean currents. One strategic location in utilizing ocean current energy is the Toyapakeh strait. After determining the location of potential ocean current energy utilization, a plan for a Sea Flow Power Plant was made in the form of a design that had been planned previously. With ocean currents averaging 2,5 m / s to 3 m / s which occur on the Toyapakeh strait there is a force arising on the turbine arm that works. Problems arising from the use of ocean currents in ocean currents are when there are waves and currents that are given repeatedly and can cause fatigue. The position of the turbine arm analyzed is in vertical conditions (operating). These problems were solved by the finite element method and assisted with finite element software. Before analyzing with this method must know the value of the wave load and current load in accordance with the data obtained using morison theory. The results of the analysis based on the method, namely the highest stress is found on the shaft frame with wave loads from the 90⁰ direction valued at 37.9 MPa. Whereas the safety factor, deformation and strain also have the highest value when given the environmental load of the direction of 90⁰. The fatigue of the turbine sleeve shaft frame structure is at least 55 years with the assumption of the load from 90⁰. The main shaft service life frame operates for a maximum of 5 years. The buffer for the turbine arm has a 9.8 x 10⁶ year age with a load direction of 90⁰.

Kata Kunci : Finite Element, lengan turbin, faitgue

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah segala puji bagi Allah subhanahu wa ta'ala yang mana masih diberikan kesempatan kepada penulis untuk menyelesaikan tugas akhir sebagai salah satu syarat kelulusan program sarjana Departemen Teknik Sistem Perkapalan Fakultas Teknologi Kelautan Institut Teknologi Sepuluh Nopember dengan judul “Studi Kekuatan Lengan Turbin Pembangkit Listrik Tenaga Arus Laut Sumbu Vertikal Berbasis Finite Element”. Selain itu, ada beberapa pihak penulis berterima kasih dalam lancarnya pengerjaan tugas akhir diantaranya.

1. Bapak Dr. Eng Muhammad Badrus Zaman S.T. M.Eng. selaku Kepala Departemen Teknik Sistem Perkapalan Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
2. Bapak Ir. Hari Prastowo M.Sc selaku dosen wali akademik yang telah memberikan banyak saran kepada penulis dalam mengambil topik tugas akhir.
3. Bapak Ir. Tony Bambang Musriyadi PGD, M.MT selaku Dosen Pembimbing I Tugas Akhir yang telah memberikan banyak saran agar lancarnya proses pengerjaan tugas akhir
4. Bapak Achmad Baidowi S.T.,M.T selaku dosen pembimbing II tugas akhir yang telah banyak memberikan saran dan masukan selama proses pengerjaan tugas akhir.
5. Seluruh dosen dan staf Departemen Teknik Sistem Perkapalan ITS yang telah memberikan fasilitas dan bantuan selama proses pengerjaan tugas akhir berlangsung.
6. Orangtua ayahanda Drs. M. Jakfar M.Pd dan ibunda Zamiatul Azma S.Sos beserta saudara kandung Furqan S.T.,M.T dan Sareza Hafis S.T yang telah memberikan dukungan dalam menyelesaikan laporan tugas akhir.
7. Saudara Zaqa Usail S.T yang telah memberikan beberapa data terkait tugas akhir
8. Semua teman – teman dan staf Laboratorium Marine Manufacturing and Design Teknik Sistem Perkapalan ITS yang banyak memberikan dukungan serta beberapa fasilitas agar lancarnya pengerjaan laporan tugas akhir.
9. Semua teman-teman di ruang lingkup kampus maupun di luar ruang lingkup kampus yang telah memberikan dukungan dalam menyelesaikan laporan tugas akhir

Maka dari itu, penulis menyadari bahwa masih banyak terdapat kekurangan dalam menyelesaikan laporan tugas akhir ini. Untuk itu penulis minta maaf atas segala kekurangan yang terdapat pada laporan tugas akhir ini. Penulis berharap semoga laporan ini bermanfaat bagi pembaca umumnya.

Surabaya, 17 Juli 2019

Penulis

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....	vi
KATA PENGANTAR.....	xiv
DAFTAR ISI.....	xvi
DAFTAR GAMBAR.....	xxi
DAFTAR TABLE.....	xxiii
BAB I.....	1
PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang.....	1
Gambar 1.1. Lokasi Selat Toyapakeh.....	1
Gambar 1.2. Grafik Hasil Pengukuran Arus Tahun 2008.....	2
Gambar 1.3. Desain PLTAL ESDM P3GL dan LPPM-ITS.....	3
1.2. Rumusan Masalah.....	3
Gambar 1.4. <i>Frame</i> Poros Lengan Turbin.....	3
1.3. Tujuan.....	4
1.4. Batasan Masalah.....	4
1.5. Manfaat.....	4
BAB II.....	5
TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....	5
2.1. Pembangkit Listrik Tenaga Arus Laut.....	5
2.2. Turbin Arus Laut.....	5
Gambar 2.1. Macam-macam Turbin Laut.....	6
Gambar 2.2. Contoh turbin sumbu horizontal.....	6
Gambar 2.3. Contoh Turbin jenis darrieus.....	6
2.3. Struktur Lengan Turbin PLTAL.....	6
Gambar 2.4. Struktur Lengan Turbin Bagian Atas[1].....	7
Gambar 2.5. Struktur Lengan Turbin Bagian Bawah.....	7

2.4.	Metode Elemen Hingga (<i>finite element</i>).....	8
2.5.	Kurva S-N	8
	Gambar 2.6. Kurva S-N [11]	8
	Tabel 2.1. Formulasi fatigue S-N Curve	10
2.6.	Fatigue (Kelelahan).....	10
	Tabel Jenis Material dan Nilai k S-N Curve in Seawater.....	11
	Gambar 2.7. Grafik <i>calculate probability of fatigue failure as function of calculate damage</i>	12
	Gambar 2.8. Grafik <i>cumulated probability of through wall fatigue crack as function of service life for 20 years calculated fatigue life</i>	12
2.7.	Tegangan	13
	Gambar 2.9. Pembebanan aksial pada batang turbular (Popov, 1993).....	13
	Tabel 2.2. Tegangan dan <i>Elongation Minimum</i> pada <i>Normal Steel</i> [12].....	14
2.8.	Regangan.....	14
2.9.	Konsep Pembebanan	14
2.10.	Beban Lingkungan Pada Struktur <i>Offshore Cylinder</i>	15
2.10.1.	Teori <i>Morison</i>	16
2.10.2.	Beban Gelombang dan Beban Arus	17
2.10.3.	Beban Arus	17
2.11.	Teori Gelombang Airy	17
	2.11. Skets Definisi Gelombang.....	18
	Tabel 2.3. Klasifikasi gelombang menurut teori gelombang airy	19
BAB III.....		21
METODE PENELITIAN		21
3.1.	Flowchart Penelitian.....	21
	Gambar 3.1. <i>Flow Chart</i> Penelitian.....	21
3.1.	1. Identifikasi Permasalahan	22
3.1.2.	Studi Literatur.....	22
3.1.3.	Pengumpulan Data	22
3.1.4.	Perhitungan Gaya Gelombang dan Gaya <i>Drag Force</i> pada Arus	22
3.1.5.	Pemodelan	22
3.1.6.	Simulasi dan Analisis	23
3.2.	Jenis Penelitian	23
3.3.	Tempat dan Alat Penelitian	23

3.4.	Metode Pengumpulan Data	23
3.5.	Data Yang dibutuhkan.....	23
3.5.1.	Data Gelombang.....	23
	Tabel 3.1. Tinggi Gelombang Selat Toyopakeh Nusa Penida, Bali [6]	23
	Tabel 3.2. Data Lingkungan pada Nilai Maksimal [6]	24
	Tabel 3.3. Data tinggi Gelombang Signifikan Tiap Arah Pembebanan [6].....	24
3.5.2.	Data Arus.....	24
	Gambar 3.2. <i>Current Lose</i> di Lokasi PLTAL [1].....	25
	Gambar 3.3. Arah pembebanan Lengan Turbin Berdasarkan Arah Pembebanan ..	25
	Gambar 3.4. Letak Geografis dari PLTAL.....	26
3.5.3.	Data Struktur Lengan Turbin Sumbu Vertikal	26
	Gambar 3.5. Desain <i>Frame</i> Poros [1].....	26
	Gambar 3.6. <i>Chuck</i> dan Pengunci	27
3.5.4.	Data Berat Komponen Lengan Turbin	27
	Gambar 3.7. Turbin Pembangkit listrik tenaga arus laut.....	27
	Gambar 3.8. Generator dan Gearbox PLTAL	28
	Tabel 3.4. Data Berat Komponen Pendukung Lengan Turbin [1].....	28
3.5.5.	Data Beban Arus	28
	Tabel 3.5. Hasil Gaya <i>drag force</i> dengan variasi Arus [1].....	28
BAB IV		29
ANALISA DAN PEMBAHASAN		29
4.1.	Arah Pembebanan Pembangkit Listrik Tenaga Arus Laut	29
	Gambar 4.1. Arah Pembebanan <i>Frame</i> Poros	29
	Gambar 4.2. Arah Pembebanan <i>Chuck</i> Lengan Turbin.....	29
4.2.	Menghitung Kecepatan Partikel Gelombang Horizontal.....	29
	Tabel 4.1. Kecepatan Partikel Gelombang terhadap Arah Pembebanan	31
4.3.	Menghitung Percepatan Partikel Gelombang Horizontal.....	31
	Tabel 4.2. Variasi Percepatan Gelombang dari Arah Pembebanan.....	32
4.4.	Menghitung Gaya Gelombang dengan Teori <i>Morison</i>	32
4.4.1.	Menghitung <i>drag force</i> dari beban gelombang	32
	Tabel 4.3. Variasi Nilai <i>drag force</i> terhadap arah pembebanan.....	33
4.4.2.	Menghitung <i>Inertia Force</i> dari Beban Gelombang	33
	Tabel 4.4. Variasi <i>Inertia Force</i> terhadap Arah Pembebanan.....	34

4.4.3.	Menghitung Gaya Gelombang dengan Variasi Titik Distribusi Lengan Turbin	34
	Tabel 4.5. Variasi Gaya <i>Morison</i> terhadap Arah Pembebanan pada Titik Normal ($Z = 0$)	34
	Gambar 4.3. Gambaran Distribusi Gelombang Antar Titik Lengan Turbin.....	35
	Tabel 4.6. Nilai Gaya <i>Morison</i> terhadap Variasi Nilai Z	35
4.5.	Menghitung <i>Drag Force</i> dari beban arus pada kondisi normal.....	35
4.6.	Simulasi Tegangan dengan <i>Finite Element Method</i> Menggunakan Perangkat Lunak <i>Finite Element</i>	36
4.6.1.	Simulasi Tegangan <i>Frame</i> Poros Utama	36
	Gambar 4.4. Arah Pembebanan <i>Frame</i> Poros dari 0^0	37
	Gambar 4.5. Arah Pembebanan <i>Frame</i> Poros Dari 225^0	37
	Gambar 4.6 Arah Pembebanan <i>Frame</i> Poros dari 45^0	38
	Gambar 4.7. Arah Pembebanan <i>Frame</i> poros dari 0^0	38
	Tabel 4.7. Hasil Tegangan <i>Frame</i> Poros dari Setiap Arah Pembebanan.....	39
	Gambar 4.8. Grafik Hubungan Tegangan dengan Ketinggian Gelombang.....	39
4.6.2.	Simulasi Tegangan Penyangga dan Pengunci <i>Frame</i> Poros	40
	Gambar 4.9. Arah Pembebanan <i>Chuck</i> dari 90^0	40
	Gambar 4.10. Arah Pembebanan <i>Chuck</i> dari 45^0	40
	Gambar 4.11. Hasil Simulasi Tegangan Pengunci Penyangga <i>Frame</i> Poros dari Pembebanan Arah 225^0	41
	Tabel 4.8. Nilai Tegangan <i>Chuck</i> dan Pengunci dari Setiap Arah Pembebanan....	41
4.7.	Simulasi Fatigue Menggunakan <i>Finite Element Method</i> Menggunakan Perangkat Lunak <i>Finite Element</i>	42
4.7.1.	Simulasi <i>Fatigue</i> pada <i>Frame</i> Poros Utama.....	42
	Tabel 4.9. Hasil Simulasi <i>safety factor</i> dari keseluruhan arah pembebanan	42
4.8.	Simulasi Deformasi dengan <i>Finite Element Method</i> Menggunakan Perangkat Lunak <i>Finite Element</i>	43
4.8.1.	Simulasi Deformasi Pada <i>Frame</i> Poros Utama	43
	Gambar 4.13 Hasil Simulasi Deformasi <i>Frame</i> Poros Utama dari Arah 90^0	43
	Tabel 4.10. Hasil Simulasi Deformasi <i>frame</i> Poros	43
4.9.	Simulasi <i>Strain</i> Dengan <i>Finite Element Method</i> Menggunakan Perangkat Lunak <i>Finite Element</i>	44
4.9.1.	Simulasi <i>Strain</i> Pada <i>Frame</i> Poros Utama	44
	Tabel 4.11. Hasil Simulasi Regangan <i>frame</i> Poros dari Arah Tertentu.....	44

4.10.	Pembahasan Simulasi <i>Finite Element Method</i>	44
	Gambar 4.15. Bagian <i>Frame</i> Poros dengan Tegangan Paling Tinggi	45
4.11.	Menghitung fatigue pada Struktur Lengan Turbin	45
	Tabel 4.14 Hasil <i>Fatigue Damage Accumulation</i> Dari Arah Tertentu	47
	Gambar 4.16. Grafik Potensi Kegagalan Struktur Berdasarkan DNVGL [11]	48
	Gambar 4.17. Grafik <i>Time in Service</i> Terhadap Kemungkinan <i>Fatigue</i> [11]	48
	Tabel 4.15. Hasil <i>Fatigue Life</i> pada <i>frame</i> poros	49
	Tabel 4.16. Hasil <i>fatigue life</i> pada Penyangga Lengan Turbin	49
4.11.	Perbandingan Nilai <i>Cycle</i> Berdasarkan Perhitungan Standar DNVGL dengan <i>Finite Element Method</i>	49
	Tabel 4.16. Hasil Validasi Nilai <i>Cycle / Fatigue Life</i>	50
4.12.	Perbandingan Hasil Penelitian Sebelumnya	50
	Tabel 4.17. Perbandingan Hasil Penelitian dengan Penelitian Sebelumnya	50
BAB V		51
KESIMPULAN dan SARAN		51
	5.1. Kesimpulan.....	51
	5.2. Saran.....	51
DAFTAR PUSTAKA.....		53
BIODATA PENULIS.....		60

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Lokasi Selat Toyapakeh.....	1
Gambar 1.2. Grafik Hasil Pengukuran Arus Tahun 2008.....	2
Gambar 1.3. Desain PLTAL ESDM P3GL dan LPPM-ITS.....	3
Gambar 1.4. <i>Frame</i> Poros Lengan Turbin.....	3
Gambar 2.1. Macam-macam Turbin Laut	6
Gambar 2.2. Contoh turbin sumbu horizontal	6
Gambar 2.3. Contoh Turbin jenis darrieus	6
Gambar 2.4. Struktur Lengan Turbin Bagian Atas[1]	7
Gambar 2.5. Struktur Lengan Turbin Bagian Bawah	7
Gambar 2.6. Kurva S-N [11]	8
Gambar 2.7. Grafik <i>calculate probability of fatigue failure as function of calculate damage</i>	12
Gambar 2.8. Grafik <i>cumulated probability of through wall fatigue crack as function of service life for 20 years calculated fatigue life</i>	12
Gambar 2.9. Pembebanan aksial pada batang turbular (Popov, 1993)	13
Gambar 3.1. <i>Flow Chart</i> Penelitian.....	21
Gambar 3.2. <i>Current Lose</i> di Lokasi PLTAL [1]	25
Gambar 3.3. Arah pembebanan Lengan Turbin Berdasarkan Arah Pembebanan	25
Gambar 3.4. Letak Geografis dari PLTAL.....	26
Gambar 3.5. Desain <i>Frame</i> Poros [1].....	26
Gambar 3.6. <i>Chuck</i> dan Pengunci	27
Gambar 3.7. Turbin Pembangkit listrik tenaga arus laut	27
Gambar 3.8. Generator dan Gearbox PLTAL	28
Gambar 4.1. Arah Pembebanan <i>Frame</i> Poros	29
Gambar 4.2. Arah Pembebanan <i>Chuck</i> Lengan Turbin.....	29
Gambar 4.3. Gambaran Distribusi Gelombang Antar Titik Lengan Turbin.....	35
Gambar 4.4. Arah Pembebanan <i>Frame</i> Poros dari 0 ⁰	37
Gambar 4.5. Hasil Simulasi Tegangan <i>Frame</i> Poros dari Arah 0 ⁰ Error! Bookmark not defined.	
Gambar 4.6. Arah Pembebanan <i>Frame</i> Poros Dari 225 ⁰	37
Gambar 4.7. Hasil Simulasi Tegangan <i>Frame</i> Poros dari arah 225 ⁰ Error! Bookmark not defined.	
Gambar 4.8 Arah Pembebanan <i>Frame</i> Poros dari 45 ⁰	38
Gambar 4.9 Hasil Simulasi Tegangan <i>Frame</i> Poros dari Arah 45 ⁰ Error! Bookmark not defined.	

Gambar 4.10. Arah Pembebanan <i>Frame</i> poros dari 0°	38
Gambar 4.11. Hasil Simulasi Tegangan <i>frame</i> poros dari 0°	Error! Bookmark not defined.
Gambar 4.12. Grafik Hubungan Tegangan dengan Ketinggian Gelombang	39
Gambar 4.13. Arah Pembebanan <i>Chuck</i> dari 90°	40
Gambar 4.14. Hasil Simulasi Tegangan Penyangga <i>Frame</i> Poros	Error! Bookmark not defined.
Gambar 4.15. Arah Pembebanan <i>Chuck</i> dari 45°	40
Gambar 4.16. Hasil Simulasi Tegangan Penyangga Poros dari Arah 45°	Error! Bookmark not defined.
Gambar 4.17. Hasil Simulasi Tegangan Pengunci Penyangga <i>Frame</i> Poros dari Pembebanan Arah 225°	41
Gambar 4.18. Hasil Simulasi Tegangan Pengunci <i>Chuck</i> dari Arah 0°	Error! Bookmark not defined.
Gambar 4.20. Hasil Simulasi <i>fatigue safety factor frame</i> poros dari arah 0°	Error! Bookmark not defined.
Gambar 4.21. Hasil Simulasi <i>fatigue safety factor frame</i> poros dari arah 90°	Error! Bookmark not defined.
Gambar 4.22. Hasil Simulasi <i>fatigue safety factor frame</i> poros dari arah 225°	Error! Bookmark not defined.
Gambar 4.23. Hasil Simulasi <i>fatigue safety factor frame</i> poros dari arah 45°	Error! Bookmark not defined.
Gambar 4.24 Hasil Simulasi Deformasi <i>Frame</i> Poros Utama dari Arah 90°	43
Gambar 4.24. Hasil Simulasi Deformasi <i>Frame</i> Poros dari Arah 45°	Error! Bookmark not defined.
Gambar 4.25. Hasil Simulasi Deformasi <i>Frame</i> Poros Utama dari Arah 225°	Error! Bookmark not defined.
Gambar 4.26. Hasil Simulasi Deformasi <i>Frame</i> Poros Utama dari Arah 0°	Error! Bookmark not defined.
Gambar 4.27. Hasil Simulasi <i>Strain Frame</i> Poros Utama dari Arah 45°	Error! Bookmark not defined.
Gambar 4.28. Hasil Simulasi <i>Strain Frame</i> Poros Utama dari Arah 225°	Error! Bookmark not defined.
Gambar 4.29. Hasil Simulasi <i>Strain Frame</i> Poros dari Arah 0°	Error! Bookmark not defined.
Gambar 4.30. Bagian <i>Frame</i> Poros dengan Tegangan Paling Tinggi	45
Gambar 4.31. Grafik Potensi Kegagalan Struktur Berdasarkan DNVGL [11]	48
Gambar 4.32. Grafik <i>Time in Service</i> Terhadap Kemungkinan <i>Fatigue</i> [11]	48

DAFTAR TABLE

Tabel 2.1. Formulasi fatigue S-N Curve.....	10
Tabel Jenis Material dan Nilai k S-N Curve in Seawater.....	11
Tabel 2.2. Tegangan dan <i>Elongation Minimum</i> pada <i>Normal Steel</i> [12]	14
Tabel 3.1. Tinggi Gelombang Selat Toyopakeh Nusa Penida, Bali [6].....	23
Tabel 3.2. Data Lingkungan pada Nilai Maksimal [6]	24
Tabel 3.3. Data tinggi Gelombang Signifikan Tiap Arah Pembebanan [6].....	24
Tabel 3.4. Data Berat Komponen Pendukung Lengan Turbin [1]	28
Tabel 3.5. Hasil Gaya <i>drag force</i> dengan variasi Arus [1].....	28
Tabel 4.1. Kecepatan Partikel Gelombang terhadap Arah Pembebanan	31
Tabel 4.2. Variasi Percepatan Gelombang dari Arah Pembebanan	32
Tabel 4.3. Variasi Nilai <i>drag force</i> terhadap arah pembebanan	33
Tabel 4.4. Variasi <i>Inertia Force</i> terhadap Arah Pembebanan	34
Tabel 4.5. Variasi Gaya <i>Morison</i> terhadap Arah Pembebanan pada Titik Normal ($Z = 0$) .	34
Tabel 4.6. Nilai Gaya <i>Morison</i> terhadap Variasi Nilai Z.....	35
Tabel 4.7. Nilai Tegangan <i>Frame</i> Poros dari Setiap Arah Pembebanan	39
Tabel 4.8. Nilai Tegangan <i>Chuck</i> dan Pengunci dari Setiap Arah Pembebanan	41
Tabel 4.9. Hasil Simulasi <i>safety factor</i> dari keseluruhan arah pembebanan.....	42
Tabel 4.10. Hasil Simulasi Deformasi <i>frame</i> Poros	43
Tabel 4.11. Hasil Simulasi Regangan <i>frame</i> Poros dari Arah Tertentu	44
Tabel 4.14 Hasil <i>Fatigue Damage Accumulation</i> Dari Arah Tertentu	47
Tabel 4.15. Hasil <i>fatigue life</i> pada Penyangga Lengan Turbin.....	49
Tabel 4.16. Hasil Validasi Nilai <i>Cycle / Fatigue Life</i>	50
Tabel 4.17. Perbandingan Hasil Penelitian dengan Penelitian Sebelumnya.....	50

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Sumber daya alam di Indonesia banyak yang dapat dimanfaatkan untuk memperoleh energi. Salah satu yang dapat dimanfaatkan yaitu arus laut. Dengan adanya potensi sumber daya alam yang dapat dimanfaatkan seperti arus laut tersebut maka dibuatlah pembangkit listrik tenaga arus laut. Pembuatan PLTAL (Pembangkit Listrik Tenaga Arus Laut) tersebut telah diterapkan di selat topayakeh Nusa Penida Bali. Letak selat topayakeh berada di kabupaten klungkung kecamatan Nusa Penida Propinsi Bali. Namun untuk beberapa potensi energy laut ini berlokasi di laut dalam. Selat Toyopakeh tersebut memiliki kedalaman 100m.



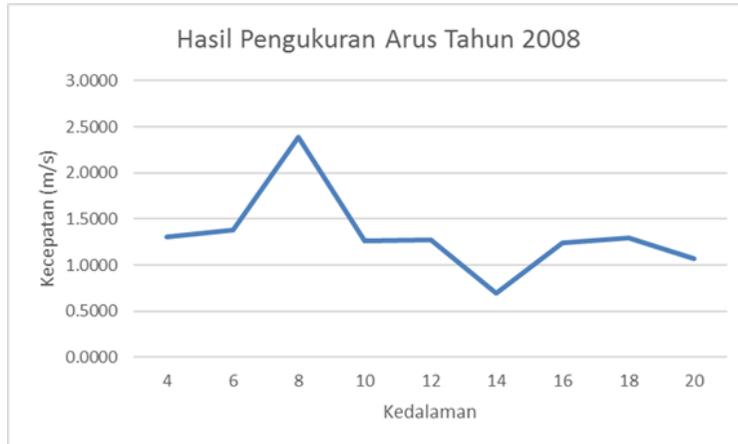
Gambar 1.1. Lokasi Selat Toyapakeh

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, terdapat potensi pada Selat Toyapakeh untuk dimanfaatkan arus lautnya. Setelah dilakukan beberapa penelitian dapat disimpulkan bahwa kecepatan arus laut berbanding lurus dengan curamnya morfologi bawah laut. Semakin curam morfologi dasar laut akan menghasilkan arus laut yang sangat kencang. Dilihat dari aspek pada selat Toyapakeh, dapat diaplikasikan PLTAL karena semakin ke bagian tengah selat kondisi curam semakin dalam. Secara umum distribusi kecepatan arus hasil pengukuran stasioner di lokasi terpilih adalah sebagai berikut (Yuningsih 2004) :

1. Pada saat kedudukan air rendah (neap tide) kecepatan arus minimum adalah 0,0249 m/s pada kedalaman 8 meter, sedangkan kecepatan maksimum 2,4615 m/s pada kedalaman 10 meter.

2. Pada saat kedudukan air tinggi (spring tide) kecepatan arus minimum adalah 0,0158 m/s pada kedalaman 6 meter, sedangkan kecepatan maksimum 3,2855 m/s pada kedalaman 12 meter

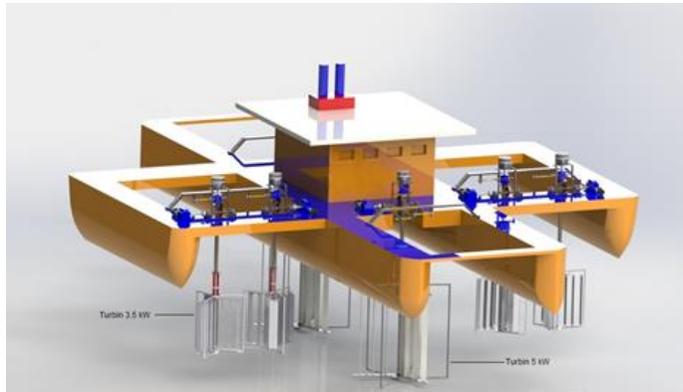
Penilaian pada aspek hidroceanografi di selat Toyapakeh diperoleh dari hasil pengukuran yang dilaksanakan Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi Kelautan (PPPGL) pada tahun 2008 (Yuningsih drr., 2008) Hasil pengukuran sebagai berikut :



Gambar 1.2. Grafik Hasil Pengukuran Arus Tahun 2008

Berdasarkan hasil pengukuran dan pemodelan yang dilakukan di Selat Toyapakeh diketahui bahwa selat ini mempunyai potensi praktis energy arus laut mencapai 320 MW. Hasil pengukuran amplitude pasang-surut Selat Toyapakeh menyentuh nilai 2,6 meter. Sebagaimana daerah lain di Indonesia, tipe pasang surut semi diurnal – dua kali pasang dan dua kali surut terjadi dalam sehari. Kecepatan arus laut ini megikuti perubahan ketinggian permukaan laut dengan arah arus ke baratdaya atau Tenggara laut. Pada saat perbani atau bulan mati mencapai 2,46 m/detik dan saat purnama dapat mencapai 3,40 m/detik dengan durasi waktu berkisar antara 10-14 jam per hari.

Dengan adanya potensi pemanfaatan arus laut di Selat Toyapakeh, maka dilakukan perencanaan pembuatan desain PLTAL berupa jenis katamaran. Kemudian untuk pembuatan desain tersebut juga telah dilakukan oleh pihak kerja sama antara ESDM P3GL dan LPPM-ITS.



Gambar 1.3. Desain PLTAL ESDM P3GL dan LPPM-ITS

Berdasarkan desain yang telah dibuat sebelumnya, maka perlu dikaji tentang bagian lengan turbin PLTAL pada saat menerima beban siklik. Pada kesempatan ini penulis melakukan analisa tentang fatigue (kelelahan) pada lengan turbin tersebut dengan tujuan untuk mengetahui umur yang layak digunakan pada desain yang telah dibuat sebelumnya.

1.2. Rumusan Masalah

Perumusan masalah dari topik tugas akhir ini yaitu adanya beban siklik yang diterima oleh lengan turbin Pembangkit Listrik Tenaga Arus Laut dari lingkungan yaitu beban arus, beban gelombang dan beban angin. Dengan adanya beban siklik pada lengan turbin, maka terdapat potensi terjadinya fatigue pada *Frame* poros lengan turbin. Struktur lengan turbin dapat dilihat pada gambar 1.4 sebagai berikut.



Gambar 1.4. *Frame* Poros Lengan Turbin

Frame poros tersebut bertumpu pada *chuck* yang ditunjukkan pada tanda merah yang bertujuan untuk mempertahankan posisi dalam kondisi stabil pada saat lengan turbin sumbu vertikal menerima beban lingkungan. Dengan adanya beban siklik dari

gelombang maupun arus, maka terdapat potensi terjadi fatigue pada *chuck*. Untuk metode yang digunakan dalam menyelesaikan masalah ini yaitu dengan metode elemen hingga (*finite element method*).

1.3.Tujuan

Adapun tujuan dari penelitian ini yaitu :

1. Mengetahui nilai gaya distribusi beban gelombang pada lengan turbin PLTAL ketika beroperasi dari arah tertentu di Selat Toyapakeh
2. Mengetahui lamanya umur struktur *Frame* poros lengan turbin akibat beban aksial dan beban lingkungan yang bekerja selama PLTAL beroperasi

1.4.Batasan Masalah

Adapun Batasan masalah dari penelitian ini sebagai berikut.

1. Penelitian hanya menggunakan parameter beban arus dan gelombang dengan teori *morison*
2. Desain lengan turbin yang dilakukan penelitian yaitu lengan turbin 5 Kw
3. Penelitian hanya fokus pada *Frame* poros dan *chuck* lengan turbin
4. *Software* yang digunakan untuk simulasi hanya *Finite Element*

1.5.Manfaat

Dari hasil analisa yang didapat dari penelitian ini diharapkan memiliki gambaran struktur desain yang handal dan optimal untuk digunakan sebagai PLTAL. Selain itu, hasil analisa fatigue ini juga dapat sebagai referensi jangka waktu yang optimal untuk digunakan sebagai *Frame* poros lengan turbin PLTAL.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1. Pembangkit Listrik Tenaga Arus Laut

Pembangkit listrik tenaga arus laut yaitu memanfaatkan arus laut menjadi sumber energi, yang mana merupakan konversi dari pergerakan atau perputaran turbin yang diputar oleh arus laut menjadi energi listrik. Prinsip pengembangan energi tersebut pada dasarnya berasal dari teknologi turbin yang digerakkan oleh angin. Pembangkit listrik tenaga arus laut pada dasarnya tidak menimbulkan emisi selama beroperasi, tetapi perlu adanya pertimbangan dalam mendesain PLTAL yang digunakan sesuai dengan keadaan lingkungan yang akan ditempatkan. Permasalahan yang sering timbul untuk membuat struktur bangunan lepas pantai atau kapal yang telah direncanakan diantaranya pengeluaran biaya yang tidak signifikan, desain yang tidak standar, dan kondisi lingkungan yang kurang maksimal dalam memanfaatkan energi.

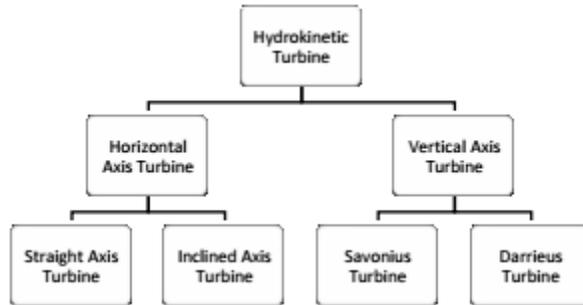
Sedangkan untuk arus laut yaitu pergerakan massa air secara vertikal dan horisontal sehingga menuju keseimbangannya, atau gerakan air yang sangat luas yang terjadi di seluruh lautan dunia. Arus juga merupakan gerakan mengalir suatu massa air yang dikarenakan tiupan angin atau perbedaan densitas atau pergerakan gelombang panjang.

Secara global, laut mempunyai sumber energi arus laut yang sangat besar yaitu sebesar $2,8 \times 10^{14}$ (280 triliun) Watt-jam (Duxbury dkk., 2000). Selain itu arus laut ini menarik untuk dikembangkan sebagai pembangkit listrik karena sifatnya yang relative stabil dan dapat diprediksi. Jika ditinjau dari letaknya arus laut dibedakan menjadi 3, yaitu :

1. Arus Permukaan
Arus laut jenis ini terletak di permukaan laut, dengan kedalaman $< 20\text{m}$
2. Arus Sedang
Arus sedang berda pada kedalaman $20\text{-}40\text{m}$
3. Arus Dalam
Arus dalam berada pada kedalaman $> 40\text{m}$

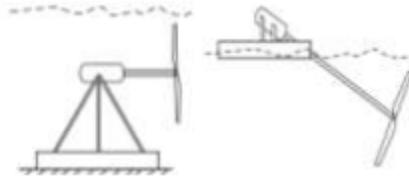
2.2. Turbin Arus Laut

Turbin arus laut merupakan bagian dari PLTAL yang bekerja untuk menghasilkan energi listrik. Bagian ini salah satu dari bagian utama didalam membangun struktur PLTAL karena arus laut yang bergerak akan mendorong sudu turbin tersebut. Turbin yang diputar oleh arus laut akan membangkitkan generator yang dapat menghasilkan listrik. Ada beberapa jenis turbin arus laut yang dapat digunakan pada PLTAL sebagai berikut.



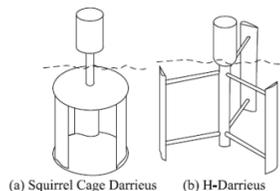
Gambar 2.1. Macam-macam Turbin Laut

Secara umum, turbin laut terbagi 2 jenis yaitu turbin sumbu horizontal dan turbin sumbu vertikal. Turbin sumbu horizontal berputar pada posisi secara sumbu horizontal. Turbin sumbu horizontal terbagi lagi menjadi 2 jenis yaitu *straight axis turbine* dan *incline axis turbine*. *Straight axis turbine* yaitu turbin yang bekerja sejajar dengan sumbu x dan *incline axis turbine* bekerja dengan adanya sudut kemiringan terhadap sumbu x.



Gambar 2.2. Contoh turbin sumbu horizontal

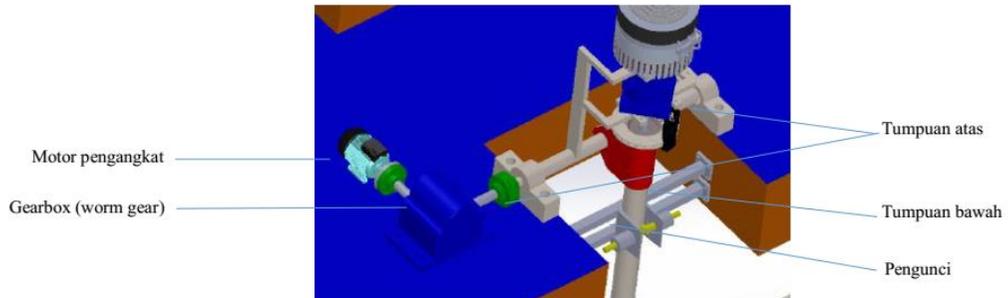
Sedangkan untuk turbin sumbu vertikal yaitu turbin yang bekerja pada posisi secara vertikal. Turbin sumbu vertikal dibagi lagi menjadi 2 yaitu *sarvonius turbine* dan *darrieus turbine*. Jenis turbin tersebut dikelompokkan berdasarkan jenis blade nya.



Gambar 2.3. Contoh Turbin jenis darrieus

2.3. Struktur Lengan Turbin PLTAL

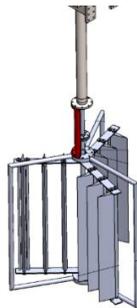
Pada penelitian ini penulis melakukan analisa pada bagian struktur lengan turbin PLTAL yang telah direncanakan sebelumnya. Pada struktur lengan turbin terdapat *Frame* poros/selongsong poros yang berfungsi untuk melindungi poros yang berputar selama beroperasi. *Frame* poros dikaitkan dengan tumpuan bagian atas platform dan tumpuan pada bagian bawahnya.



Gambar 2.4. Struktur Lengan Turbin Bagian Atas[1]

Tumpuan atas terhubung dengan 2 buah housing berfungsi sebagai penahan *Frame* poros engselnya, sedangkan tumpuan bawah berfungsi untuk mengurangi getaran pada saat diberi beban arus. Tumpuan bawah terdapat mekanisme pengunci otomatis secara mekanik. Selain itu pada pengunci tumpuan bawah terdapat spring yang bekerja ketika posisi lengan turbin akan menuju horizontal (pada saat tidak beroperasi).

Sedangkan struktur lengan turbin bagian bawah terdapat turbin dan bushing yang menghubungkan *Frame* turbin dengan *Frame* poros turbin. Berikut merupakan gambar struktur lengan turbin bagian bawah.



Gambar 2.5. Struktur Lengan Turbin Bagian Bawah

Berdasarkan gambar 2.5 menunjukkan bahwa hubungan *Frame* turbin dengan *Frame* poros lengan turbin tidak terhubung. *Frame* poros hanya terhubung dengan bagian atas, tanpa adanya hubungan dengan bagian turbin yang bekerja, Jenis turbin yang digunakan pada PLTAL ini yaitu jenis darrieus.

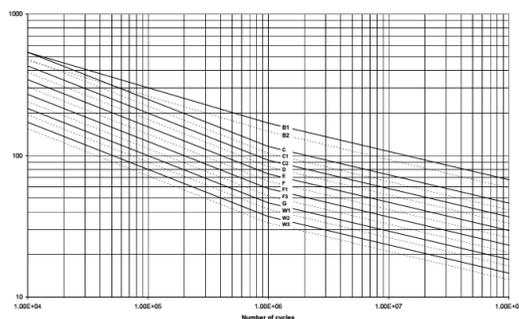
2.4. Metode Elemen Hingga (*finite element*)

Metode elemen hingga atau biasa disebut dengan *finite element* yaitu merupakan suatu metode pemodelan dan analisa struktur yang lebih kompleks dan detail. Metode ini menjadikan bentuk fisik model struktur sebagai suatu sistem linier yang berkesinambungan dengan jalan membagi bentuk fisik struktur menjadi kelompok elemen yang lebih kecil. Perpindahan setiap struktur tertentu dalam bentuk jumlah terhingga dari koordinat perpindahan diskrit, yang menggabungkan beberapa ciri dari kedua prosedur, massa tergroupal dan koordinat tergeneralisasi, kini menjadi populer. Pendekatan ini yang merupakan dasar dari metode elemen hingga.

Langkah pertama dalam idealisasi elemen hingga dari setiap struktur adalah membagi suatu struktur menjadi elemen-elemen yang lebih kecil. Ukurannya sembarang, bisa semuanya berukuran sama atau semua berbeda-beda. Pada ujung-ujung bagian dimana mereka saling dihubungkan disebut titik-titik simpul. Perpindahan titik-titik simpul ini kemudian menjadi koordinat tergeneralisasi dari struktur. Lendutan struktur dapat dinyatakan dengan koordinat tergeneralisasi dengan menggunakan kumpulan yang sesuai dari fungsi perpindahan yang diasumsikan.

2.5. Kurva S-N

Kurva S-N digunakan untuk karakteristik fatigue pada material yang mengalami pembebanan yang berulang pada magnitude konstan. Dimana N adalah jumlah cycle pada tegangan S yang menyebabkan kerusakan pada struktur. Kurva S-N memberikan banyak informasi sifat fatik karena pada saat pengujian, dimasukkan faktor geometri, perlakuan permukaan, kondisi pembebanan, temperatur dan proses perlakuan material. Kekurangan kurva S-N adalah tidak dapat memprediksi deformasi plastis lokal dan efek dari tegangan rata-rata[4]. Contoh kurva S-N diperlihatkan pada Gambar 2.6.

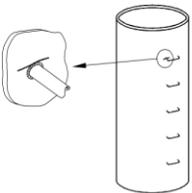
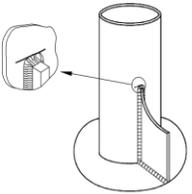
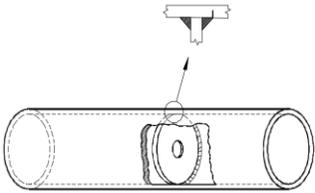


Gambar 2.6. Kurva S-N [11]

Gambar 2.6 menunjukkan bahwa terdapat sumbu x sebagai *Number of Cycle* dan sumbu y *stress range* yang mana digunakan untuk menentukan nilai N maksimum ketika timbul tegangan tertentu. Untuk jenis garis yang terdapat pada gambar 2.6 dapat

digunakan sesuai dengan karakteristik jenis sambungan las lasan yang digunakan pada struktur. Jenis garis yang terdapat pada kurva tersebut dapat dilihat sesuai dengan standar yang digunakan, yaitu standar DNV-GL. Pada standar tersebut telah disediakan pengelompokan karakteristik jenis sambungan yang tepat untuk digunakan. Klasifikasi tersebut dapat dilihat di DNVGL-RP-C203 pada section 10 [11].

Tabel 2.1. Klasifikasi Jenis Sambungan Turbular [11]

Detail category	Constructional details	Description	Requirement
T		1. Parent material adjacent to the toes of full penetration welded tubular joints.	1. <ul style="list-style-type: none"> — The design should be based on the hot spot stress.
F1	2. 	2. Welded rungs.	
D	3. and 4. 	3. Gusseted connections made with full penetration welds.	3. <ul style="list-style-type: none"> — The design stress must include the stress concentration factor due to the overall form of the joint.
F		4. Gusseted connections made with fillet welds.	4. <ul style="list-style-type: none"> — The design stress must include the stress concentration factor due to the overall form of the joint.
	5. 	5. Parent material at the toe of a weld attaching a diaphragm to a tubular member.	The nominal design stress for the inside may be determined from section [3.3.8].
E	$t \leq 25$ mm		
F	$t > 25$ mm		

Berdasarkan tabe 2.1 dapat dilihat bahwa terdapat beberapa klasifikasi tentang jenis struktur yang akan dianalisa. Tabel tersebut merupakan klasifikasi dari jenis sambungan turbular yang mana sambungan tersebut lebih cocok dengan bentuk struktur *Frame* poros.

Pada formulasi fatigue S-N Curves American Petroleum Institute Recommended Practice 2A-Working Stress Design (API RP 2A-WSD) untuk menganalisa umur kelelahan struktur bangunan lepas pantai akibat tegangan kerja yang dialami menggunakan persamaan :

$$N = 2 \times 10^6 \left(\frac{\Delta\sigma}{\Delta\sigma_{ref}} \right)^{-m} \quad (2.1)$$

dimana N adalah nilai siklus yang di izinkan untuk peng $\Delta\sigma$, dengan $\Delta\sigma_{ref}$ dan m seperti pada penjelasan Tabel 2.2 di bawah :

Tabel 2.1. Formulasi fatigue S-N Curve

Curve	$\Delta\sigma_{ref}$	M	Endurance limit at 200 million Cycles
	Stress range at 2 million Cycles	inverse log-log slope	
X	14.5 ksi (100 MPa)	4.38	5.07 ksi(35 MPa)
X'	11.4 ksi (79 MPa)	3.74	3.33 ksi (23 MPa)

Sumber : API RP 2A-WSD 2002

Kurva X dapat di gunakan untuk profil las terkontrol (with weld profile control) dan memiliki ketebalan cabang sambungan kurang dari 25 mm. Untuk profil las terkontrol yang sama tetapi ketebalannya lebih besar, perlu menggunakan efek skala. Kurva X' dapat digunakan untuk profil las tanpa kontrol (without weld profile control), tetapi sesuai dengan profil dasar standar pelat (ANSI/AWS) dan memiliki ketebalan cabang sambungan kurang dari 16 mm. Dalam penelitian ini terfokus dengan menggunakan kurva X dimana semua profil las dalam kondisi terkontrol.

2.6. Fatigue (Kelelahan)

Fatigue atau biasa disebut kelelahan pada struktur material yaitu kondisi yang mana struktur material yang diberikan beban siklik (beban ber-ulang) akan melemah. Biasanya struktur material yang mengalami fatigue ditandai dengan mulainya retak (*crack*), dilanjutkan dengan penjaralan (*propagation*), dan akhirnya dapat terjadi kerusakan (*failure*) (Soedjono, JJ 1989). Analisa fatigue sangat penting didalam merencanakan desain struktur bangunan lepas pantai untuk memprediksi besar relatif dari fatigue life pada sambungan yang kritis.

Sejak tahun 1830 telah diketahui bahwa baja yang mengalami tegangan berulang akan rusak pada tegangan yang jauh lebih rendah dibanding tegangan yang diperlukan untuk menimbulkan perpatahan pada penerapan beban tunggal. Fenomena ini disebut dengan fatigue (kelelahan). Umumnya kerusakan akibat fatigue terjadi setelah periode penggunaan yang cukup lama.

Fatigue secara sederhana dapat diartikan sebagai kelelahan suatu struktur setelah menerima beban yang berulang-ulang (*cyclic loading*). Batas dari fatigue didefinisikan sebagai Stress (tegangan) dimana material atau sambungannya dapat menahan beban yang berulang dalam jumlah tertentu, yang nilainya didapat dari kurva S-N (Stress vs jumlah siklus pembebanan yang diizinkan).

Berdasarkan standar DNVGL-RP-C203 terdapat grafik yang menunjukkan bahwa untuk menentukan potensi adanya kegagalan struktur diperlukan menghitung *Fatigue Damage Accumulation*. Formula yang dapat digunakan untuk menghitung *Fatigue Damage Accumulation* sebagai berikut.

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n}{N}$$

Dimana :

D : *Fatigue Damage Accumulation*

k : *Thickness Exponent*

n : *number of stress cycle*

N : *Number of cycle failure based on S-N Curve*

Untuk nilai k ditentukan berdasarkan tabel yang telah ditetapkan pada standar DNVGL sesuai dengan jenis sambungan yang telah ditetapkan sebelumnya. Berikut merupakan tabel dari nilai k berdasarkan jenis material yang dianalisa.

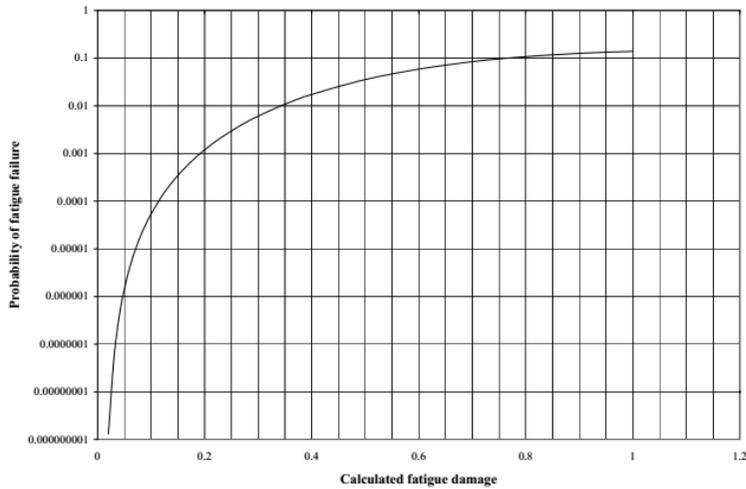
Tabel Jenis Material dan Nilai k S-N Curve in Seawater

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 (MPa) *)	Thickness exponent k	Structural stress concentration embedded in the detail (S-N class), see also equation (2.3.2)
	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	0.05	
C1	3.0	12.049	16.081	65.50	0.10	
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

*) see also [2.11]

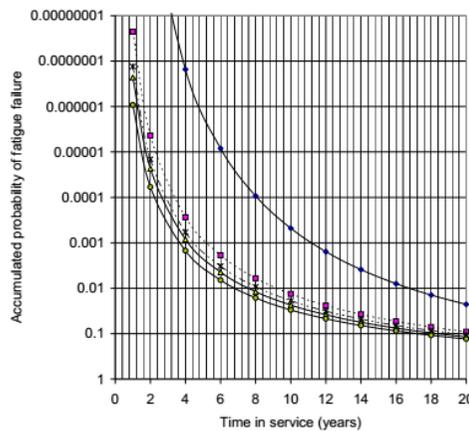
Setelah menentukan nilai *fatigue damage calculation*, parameter lain yang digunakan yaitu grafik *calculate fatigue damage* terhadap *probability fatigue failure*

sesuai dengan standar *DNVGL- RP – C203*. Berikut merupakan grafik dari standar tersebut.



Gambar 2.7. Grafik *calculate probability of fatigue failure as function of calculate damage*

Setelah diketahui nilai *probability of fatigue failure*, dapat diketahui *time service year* sesuai dengan grafik lainnya yang terdapat pada standar *DNVGL – RP – C203*.



Gambar 2.8. Grafik *cumulated probability of through wall fatigue crack as function of service life for 20 years calculated fatigue life*

2.7. Tegangan

Setiap material adalah elastis pada keadaan alaminya. Karena itu jika gaya luar bekerja pada benda, maka benda tersebut akan mengalami deformasi (Arif, 2014). Ketika benda tersebut mengalami deformasi, molekulnya akan membentuk tahanan terhadap deformasi. Tahanan ini per satuan luas dikenal dengan istilah tegangan. Secara matematik tegangan bisa didefinisikan sebagai gaya per satuan luas.

Secara umum tegangan terdapat beberapa jenis diantaranya tegangan normal, tegangan tekan, tegangan tarik, dan sebagainya. Namun untuk peneitian ini hanya berkaitan dengan tegangan normal. Tegangan normal dapat diakibatkan menjadi 2 hal yaitu beban aksial dan beban lenturan.

Beban aksial yaitu beban yang bila gaya-gaya luar yang bekerja pada suatu batang sejajar terhadap sumbu utamanya dan potongan penampang batang tersebut konstan, tegangan internal yang dihasilkan adalah sejajar terhadap sumbu tersebut.



Gambar 2.9. Pembebanan aksial pada batang turbular (Popov, 1993)

Pada gambar 2.5 batang mengalami pembebanan aksial akibat gaya tarik. Akibat gaya ini, batang akan mengalami tegangan aksial (Popov, 1993). Tegangan menunjukkan kekuatan gaya yang menyebabkan perubahan bentuk benda. Maka tegangan dapat didefinisikan sebagai gaya/beban total (F) pada suatu penampang dibagi dengan luas penampang yang dikenainya. Tegangan biasanya dinyatakan dengan σ . Oleh karena itu, formula yang dapat digunakan berdasarkan gambar 2.5 yaitu :

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.2)$$

Dimana :

F : Gaya Tarik (N)

A : Luas Penampang Lintang (m^2)

Selain itu, penelitian ini menggunakan *offshore standard rules DNV – OS – B101* diantaranya menentukan standar *yield strength* yang diijinkan sesuai dengan material tertentu. Berikut merupakan standar *DNVGL* yang telah ditetapkan.

Tabel 2.2. Tegangan dan *Elongation Minimum* pada *Normal Steel* [12]

Grade	Yield stress R_{eH} minimum (MPa)	Tensile strength R_m (MPa)	Elongation A_5 minimum (%)	Impact energy, longitudinal minimum (J)			
				Temperature (°C)	$t \leq 50$ (mm)	$50 < t \leq 70$ (mm)	$70 < t \leq 150$ (mm)
NV A	235	400-520	22 ³⁾	+20	-	34 ²⁾	41 ²⁾
NV B				0	27 ¹⁾	34	41
NV D				-20	27	34	41
NV E				-40	27	34	41

1) Impact tests are not required for grade B steel with thickness of 25 mm or less.
 2) Impact tests for grade A over 50 mm thickness are not required when the material is produced using fine grain practice and supplied in either N or TM conditions.
 3) For full thickness flat test pieces with width 25 mm and gauge length 200 mm, the minimum elongation (%) is reduced to the following values:

2.8. Regangan

Perubahan pada ukuran sebuah benda karena gaya-gaya atau kopel dalam kesetimbangan dibandingkan dengan ukuran semula disebut regangan. Regangan juga disebut derajat deformasi, (Sarojo, 2002:321). Regangan dalam batang yang berada dalam keadaan tarik didefinisikan sebagai perpanjangan dari batang dibagi dengan panjang batang semula. Regangan dinyatakan dengan ε .

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2.3)$$

Dimana :

$\varepsilon = \text{Regangan}$

$\Delta l = \text{perubahan panjang (m)}$

$l_0 = \text{panjang mula - mula (m)}$

Untuk standar yang digunakan sama seperti sebelumnya yaitu standar elongation pada normal *steel* seperti tabel 2.2 yang mengacu pada standar *offshore standard rules DNV – OS – B101*

2.9. Konsep Pembebanan

Pada suatu proses perancangan bangunan lepas pantai, untuk menentukan kemampuan kerja suatu struktur akan dipengaruhi oleh beban yang terjadi pada bangunan tersebut. Dalam merencanakan struktur bangunan lepas pantai juga harus menentukan akurasi atau ketepatan beban yang akan diterapkan dalam perancangan. Adapun beban-beban yang harus dipertimbangkan dalam perancangan bangunan lepas pantai adalah sebagai berikut (Soedjono, J.J., 1999):

1. Beban Mati

Beban mati (dead load) adalah beban dari komponen-komponen kering serta beban-beban dari peralatan, perlengkapan dan permesinan yang tidak berubah dari mode operasi pada suatu struktur. Adapun beban mati tersebut dapat dikelompokkan sebagai berikut :

- a. Berat dari struktur bangunan lepas pantai, seperti tiang pancang, bangunan atas, jacket, deck, railing, grout, paint, stiffeners dan lainlain.
- b. Berat peralatan dan permesinan yang tidak digunakan untuk pengeboran atau proses pengeboran.
- c. Berat perlengkapan tambahan lain yang dipasang permanen pada struktur, seperti boad landing, risers, barge bumper.

2. Beban Hidup

Beban hidup (*live load*) adalah beban yang terjadi pada platform atau bangunan lepas pantai selama operasi masih berlangsung dan tidak ada perubahan terhadap fungsinya. Adapun yang termasuk beban hidup (*live load*) dapat digolongkan sebagai berikut:

- a. Berat peralatan pengeboran (*drilling*)
- b. Berat peralatan produksi
- c. Berat akomodasi , living quarter, dan peralatan pendukung lainnya
- d. Berat cairan yang terdapat dalam tangki-tangki
- e. Beban akibat gaya-gaya yang terjadi pada struktur dari operasi

3. Beban Lingkungan

Beban lingkungan (*Environmental Load*) adalah beban yang terjadi pada suatu struktur yang disebabkan oleh lingkungan atau kejadian alam. Beban lingkungan yang biasanya digunakan dalam perancangan adalah:

1. Beban gelombang
2. Beban angin
3. Beban arus

2.10. Beban Lingkungan Pada Struktur *Offshore Cylinder*

Sarpkaya (1981) telah memberikan gambaran garis besar dalam menganalisa gaya gelombang pada suatu struktur. Dimana untuk menghitung gaya gelombang dibutuhkan model dari kondisi gelombang yang didapat dari pencatatan data gelombang, arus dan angin dari lokasi yang direncanakan. Gaya gelombang yang bekerja pada silinder sumbu vertikal merupakan penjumlahan langsung dari *drag force* dan *inertia force*. Sedangkan gaya inersia merupakan penjumlahan antara gaya *froude-krylov* dengan gaya yang disebabkan oleh massa tambah.

2.10.1. Teori Morison

Dalam perhitungan gaya gelombang bangunan lepas pantai maka persamaan Morison sering dipakai (Chakrabarti, 1987). Untuk dapat memakai rumusan Morison ini maka perlu lebih dahulu mengetahui batasan - batasan yang digunakan oleh Morison dalam menghitung gaya yang ditimbulkan oleh gelombang. Secara lengkap syarat - syarat yang dimaksud adalah sebagai berikut :

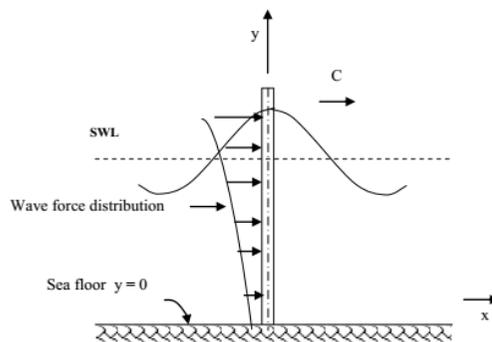
- D/L > 1 : pada kondisi ini gelombang mendekati pemantulan murni
- D/L > 0,2 : penambahan gaya gelombang oleh difraksi gelombang perlu diperhatikan
- D/L < 0,2 : Penggunaan Morison Valid

Persamaan yang diberikan morison untuk menghitung beban gelombang sebagai berikut.

$$F = \frac{1}{2} C_d \rho D u |u| + C_m \rho A \alpha \quad (2.4)$$

Dimana :

- Cd : Koefisien Drag
- ρ : Massa Jenis Air
- D : diameter silinder
- u : kecepatan partikel gelombang (m/s)
- Cm : Koefisien Inersia
- A : luas penampang silinder (m²)
- α : Percepatan partikel gelombang sumbu horizontal (m/s²)



Gambar 2.10. Gaya gelombang pada silinder tegak (dawson,1983)

Gambar 2.10 menunjukkan bahwa pembebanan yang terjadi pada silinder vertikal memiliki variasi gaya gelombang. Bagian yang paling besar distribusi gaya

gelombang terdapat pada titik teratas sesuai dengan ketinggian maksimum gelombang. Variasi distribusi beban gelombang tersebut tergantung dari formula kecepatan dan percepatan arus yang digunakan pada titik yang didistribusikan tersebut.

2.10.2. Beban Gelombang dan Beban Arus

Dengan adanya kecepatan arus dapat ditambahkan dengan kecepatan partikel gelombang sehingga menjadi total kecepatan tersebut menjadi parameter dalam mencari gaya *morison*. Jika arus tersebut dalam jenis *inline*, maka nilainya dapat ditambahkan sebagai total gaya. Sedangkan untuk jenis *non-collinear*, komponen arus dan gelombang dapat digunakan. Berikut merupakan modifikasi dari formula teori *morison* sebagai berikut [10].

$$F = \frac{1}{2} \rho C_d x |U + u|(U + u) + C_m x \rho x A x \alpha \quad (2.5)$$

2.10.3. Beban Arus

Tidak hanya pada beban gelombang, beban arus juga dapat mempengaruhi kekuatan struktur bangunan lepas pantai. Arus akibat pasang surut memiliki kecepatan yang semakin berkurang seiring dengan bertambahnya kedalaman sesuai fungsi non-linier. Sedangkan arus yang disebabkan oleh angin memiliki karakter yang sama, tetapi dalam fungsi linier.

Gaya akibat dari pembebanan arus untuk struktur silinder dapat dihitung berdasarkan *drag force* yang diterima dengan formula sebagai berikut.

$$f_d = \frac{\rho x v^2 x C_d x A}{2} \quad (2.6)$$

Dimana :

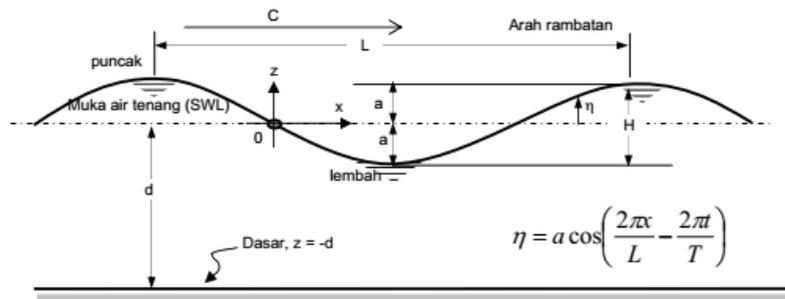
- Cd : Koefisien Drag
- ρ : Massa Jenis Air (m³/kg)
- D : diameter silinder (m)
- A : luas penampang silinder (m²)
- v : kecepatan arus (m/s)

2.11. Teori Gelombang Airy

Dalam perhitungan beban gelombang, ada beberapa teori gelombang yang dapat digunakan misalnya teori gelombang Airy atau Stokes. Dari ketentuan yang

berlaku pada teori gelombang tersebut, kemudian dilakukan analisa terhadap kondisi perairan dari struktur yang akan dibangun untuk memperoleh kecepatan dan percepatan secara vertikal maupun horisontal partikel fluida untuk setiap kedalaman. Kecepatan dan percepatan merupakan fungsi dari tinggi gelombang (H), periode gelombang (T), kedalaman perairan (d), jarak partikel dari dasar laut (z), dan waktu (t). Penentuan teori gelombang disesuaikan dengan grafik validitas teori gelombang dengan berdasarkan parameter H/gT^2 dan d/gT^2 (Chakrabarti, 1987).

Konsep gelombang yang digunakan pada penelitian ini yaitu teori gelombang airy. Teori gelombang airy diturunkan dari persamaan laplace untuk aliran tak rotasi dengan batas di dasar dan di permukaan laut.



2.11. Skets Definisi Gelombang

Gambar 2.7. menunjukkan bahwa gelombang berada pada koordinat x dan y. Gelombang tersebut menjalar dengan arah sumbu x. Beberapa notasi yang digunakan untuk menghitung teori gelombang airy sebagai berikut.

- d : jarak antara muka air rerata dan dasar laut (kedalaman laut) (m)
- $\eta(x,t)$: fluktuasi muka air terhadap muka air diam = $\eta = a \cos(kx - \sigma t)$
- a : amplitudo gelombang
- H : tinggi gelombang = 2a (m)
- L : panjang gelombang, yaitu jarak antara dua puncak gelombang yang Berurutan (m)
- T : Periode gelombang, yaitu interval waktu yang diperlukan oleh partikel air untuk kembali pada kedudukan yang sama dengan kedudukan sebelumnya (s)
- C : Kecepatan rambat gelombang = L/T
- k : angka gelombang = $2\pi / L$
- ω : frekuensi gelombang = $2\pi / T$
- g : gravitasi = 9,81 (m/s²)

Untuk menghitung gaya gelombang menggunakan parameter kecepatan dan percepatan horisontal. Berikut merupakan formula untuk menghitung kecepatan dan percepatan.

(2.8)

(2.9)

$$u = \frac{gHk \cosh k(d+y)}{2\omega \cosh kd} \cos[k(x-ct)]$$

$$\alpha = \frac{w^2 H}{2} \frac{\cosh k(d+z)}{\sinh kd} \sin[k(x-ct)]$$

Dimana :

u = Kecepatan Partikel Gelombang Horizontal (m/s)

α = Percepatan Partikel Gelombang Horizontal (m/s²)

Berdasarkan kedalaman relative laut, yaitu perbandingan antara kedalaman air dan panjang gelombang laut (d/L), gelombang dapat diklasifikasikan menjadi 3 macam sebagai berikut.

Tabel 2.3. Klasifikasi gelombang menurut teori gelombang airy

Keterangan	Gelombang dilaut dangkal	Gelombang di laut transisi	Gelombang di laut dalam
d/L	$d/L \geq 1/2$	$1/20 < d/L < 1/2$	$d/L \leq 1/20$
Tanh ($2\pi d/L$)	$\approx 2\pi d/L$	Tanh ($2\pi d/L$)	≈ 1
Cepat rambat gelombang	$C = \frac{L}{T} = \sqrt{gd}$	$C = \frac{L}{T} = \frac{gT}{2\pi} \tanh\left[\frac{2\pi d}{L}\right]$	$C = C_o = \frac{L}{T} = \frac{gT}{2\pi}$
Panjang Gelombang	$L = T\sqrt{gd}$	$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left[\frac{2\pi d}{L}\right]$	$L = L_o = \frac{gT^2}{2\pi} = 1,56T^2$

(Nur Yuwono, 1982)

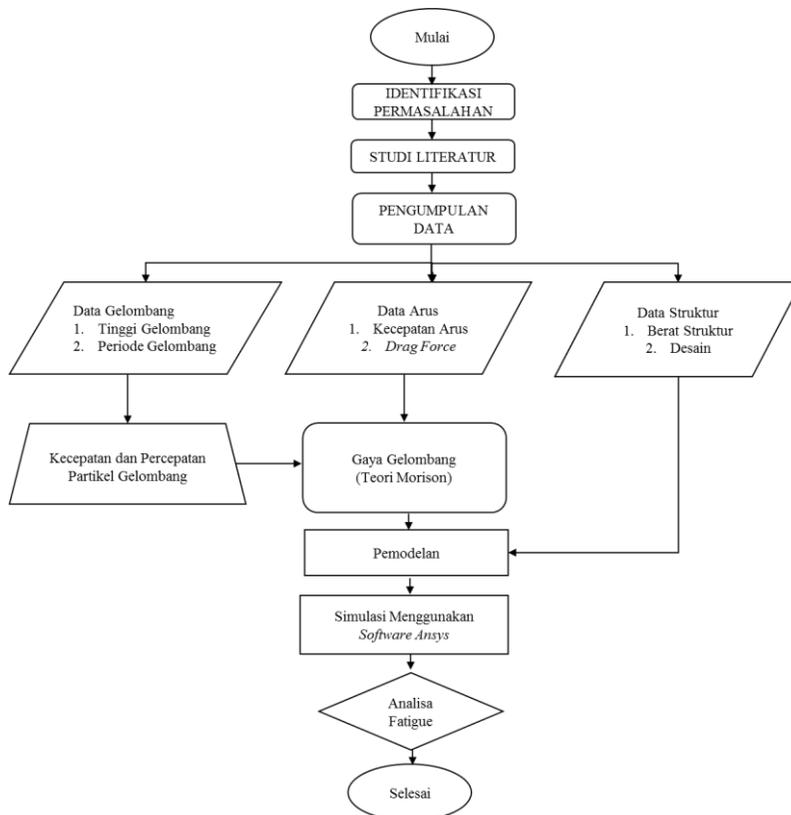
Table 2.3 menunjukkan terdapat beberapa keterangan dari klasifikasi gelombang tergantung dari kondisi perairan laut. Klasifikasi kondisi laut yang dipertimbangkan untuk mencari beberapa formula yaitu gelombang laut dangkal, gelombang laut transisi, dan gelombang di laut dangkal.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB III METODE PENELITIAN

3.1. Flowchart Penelitian

Agar dilakukan penelitian secara terstruktur, maka hal yang dapat dibuat yaitu *flow chart* penelitian. *Flow chart* dibuat dengan tujuan mengetahui urutan pengerjaan penelitian dari awal hingga memperoleh kesimpulan. Berikut merupakan *flow chart* dari penelitian ini sebagai berikut.



Gambar 3.1. *Flow Chart* Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan dengan sistematis agar memperoleh hasil yang maksimal. Urutan pengerjaan skripsi ini pada awalnya yaitu mengidentifikasi permasalahan yang muncul dari penelitian sebelumnya hingga mendapatkan kesimpulan yang diinginkan

3.1.1. Identifikasi Permasalahan

Sebelum mengambil topik tugas akhir, penulis mengidentifikasi permasalahan dari penelitian sebelumnya. Permasalahan yang muncul dari penelitian sebelumnya yaitu setelah dilakukan perancangan desain pembangkit listrik tenaga arus laut jenis katamaran terdapat gaya yang timbul selama beroperasi, yaitu gaya akibat dari beban lingkungan. Dengan adanya beban siklik dari lingkungan berpotensi terjadinya fatigue, maka penulis mengambil pokok permasalahan tersebut.

3.1.2. Studi Literatur

Setelah mengetahui permasalahan yang akan dianalisa, dilakukan studi literatur yaitu mempelajari tentang dasar teori yang sesuai dengan penelitian ini. Beberapa teori yang dipelajari diantaranya tentang mekanisme lengan turbin saat beroperasi dan saat standby, cara menentukan fatigue pada lengan turbin, dan prinsip dasar gaya gelombang yang muncul. Selain itu juga dipelajari tentang perangkat lunak *Finite Element* untuk mempermudah pada saat melakukan simulasi untuk menemukan hasil yang dibutuhkan.

3.1.3. Pengumpulan Data

Seiring dengan studi literatur, penulis juga melakukan pengumpulan data dari penelitian sebelumnya. Data yang dikumpulkan untuk dilakukan analisa fatigue berupa data lingkungan yaitu data gelombang dan data arus yang terdapat di Selat Toyapakeh. Untuk data gelombang diperlukan ketinggian dan periode signifikan dari arah pembebanan tertentu. Sedangkan data arus dikumpulkan dari kecepatan dan *drag force* maksimum yang telah dihitung sebelumnya [1]. Dari kedua data tersebut diperoleh nilai gaya yang mendorong lengan turbin selama beroperasi. Selain itu, data yang dikumpulkan berupa data struktur yang berhubungan dengan lengan turbin seperti berat komponen lainnya seperti berat turbin, berat gearbox dan generator.

3.1.4. Perhitungan Gaya Gelombang dan Gaya Drag Force pada Arus

Gaya gelombang dapat dihitung berdasarkan parameter kecepatan gelombang, percepatan gelombang dan kecepatan arus. Kecepatan dan percepatan partikel gelombang dapat dihitung terlebih dahulu setelah dilakukan pengumpulan data gelombang. Setelah menghitung kecepatan dan percepatan, dapat dilakukan perhitungan gaya gelombang dengan persamaan *morison*. Kecepatan arus juga dimasukkan sebagai parameter untuk menghitung gaya gelombang tersebut. Selain itu juga diperlukan kondisi arus normal yang digunakan untuk pemanfaatan kecepatan arus yang terjadi untuk menghitung *drag force* pada gaya arus.

3.1.5. Pemodelan

Setelah mendapatkan nilai gaya gelombang dan beberapa berat komponen, dilakukan pemodelan ke perangkat lunak *Finite Element*. Pemodelan dilakukan dengan memasukkan (*import*) desain dalam bentuk *solidwork* ke *Finite Element*. Bagian yang digunakan untuk pemodelan yaitu *Frame* poros dan penyangga lengan turbin. Setelah

pemodelan secara akurat, maka dapat memasukkan data yang telah dikumpulkan sebelumnya.

3.1.6. Simulasi dan Analisis

Setelah memasukkan data yang diperlukan, maka dapat dilakukan simulasi menggunakan perangkat lunak *Finite Element* tersebut. Hasil dari simulasi berupa tegangan maksimal, dan fatigue atau umur kelelahan pada struktur lengan turbin. Selain dilakukan simulasi, untuk menghitung fatigue juga dapat dilakukan secara manual sesuai dengan standar. Setelah dilakukan perhitungan maka dapat dilakukan validasi apakah sesuai dengan simulasi *Finite Element*. Hasil dari fatigue pada lengan turbin dapat dilakukan pembahasan dan ditarik kesimpulan yang dapat diambil.

3.2. Jenis Penelitian

Metode yang digunakan pada penelitian ini yaitu deskriptif kualitatif, yaitu hasil analisa yang diuraikan dalam suatu karya ilmiah berbentuk narasi, dari analisis tersebut dapat diambil kesimpulan.

3.3. Tempat dan Alat Penelitian

Penelitian dilakukan di Laboratorim *Marine Manufacturing and Design* jurusan Teknik Sistem Perkapalan Fakultas Teknologi Kelautan ITS. Penelitian tersebut dilakukan menggunakan perangkat lunak *Finite Element* 2019 yang mana perangkat lunak tersebut digunakan untuk analisa fatigue pada *Frame* poros utama.

3.4. Metode Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan dengan metode studi pustaka, yang mana penulis melakukan pengumpulan data dari buku penelitian/skripsi sebelumnya. Data tersebut lebih banyak diambil dari judul Tugas Akhir *Studi Kekuatan Mekanisme Penahan Lengan Turbin Pada Floating Platform PLTAL* [1].

3.5. Data Yang dibutuhkan

Sebelum dilakukan simulasi dengan perangkat lunak *Finite Element*, diperlukan beberapa data yang mendukung. Berikut merupakan data yang diperlukan untuk dilakukan penelitian sebagai berikut.

3.5.1. Data Gelombang

Data lingkungan didapat dari penelitian yang telah dilakukan sebelumnya berupa tinggi gelombang dan periode gelombang yang terjadi di Selat Toyopakeh. Data arah pembebanan yang diperoleh hanya pada barat, barat laut dan Tenggara :

Tabel 3.1. Tinggi Gelombang Selat Toyopakeh Nusa Penida, Bali [6]

Arah Pembebanan	Tinggi Gelombang Signifikan (m)	Periode Gelombang Signifikan (s)
-----------------	---------------------------------	----------------------------------

Barat (90^0)	0.9	3.77
Barat Laut (45^0)	1.58	4.85
Tenggara (225^0)	2.4	5.93

Selain data tinggi dan periode gelombang, terdapat data lingkungan dari nilai tertinggi sebagai berikut.

Tabel 3.2. Data Lingkungan pada Nilai Maksimal [6]

Sig Wave Height	Wind Speed	Current	Water Depth
2.4 m	22 knot	2.4 m/s	100 m

Setelah diperoleh data lingkungan maksimal, maka terdapat juga data tinggi gelombang signifikan dari tiap arah pembebanan

Tabel 3.3. Data tinggi Gelombang Signifikan Tiap Arah Pembebanan [6]

Tahun	10	25	50	100
Hs	0.74	0.97	1.14	1.32

Menurut hasil perhitungan dari survey met-ocean, menunjukkan, tinggi gelombang yang terjadi berkisar antara 0.5 - 2.5 m dengan periode 3 - 7 detik. Tinggi gelombang tertinggi terjadi pada bulan Juli dengan tinggi gelombang mencapai 2.5 m dan periode 6-7 detik. Arah dominan gelombang datang dari Tenggara.

Berdasarkan data gelombang tersebut, dapat digunakan :

1. Tinggi gelombang signifikan 0,9 m dengan periode 3,77 s dari arah barat (90^0)
2. Tinggi gelombang signifikan 2 m dengan periode 6,5 s dari arah barat laut (45^0)
3. Tinggi gelombang signifikan 2.5 m dengan periode 7 s dari arah tenggara (225^0)

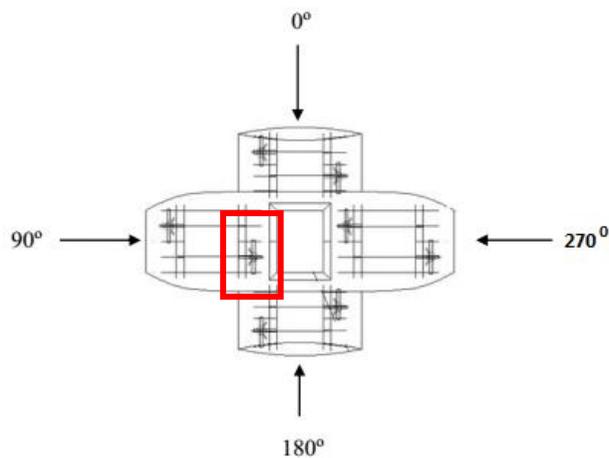
3.5.2. Data Arus

Data kecepatan arus didapat berdasarkan pengukuran pada dua titik lokasi yang berbeda dan dilaksanakan dari tanggal 12 Agustus 2015 sampai 8 September 2015. Dua Lokasi pengambilan arus pada titik 1 berada di $08^{\circ} 40' 29.6''$ LS dan $115^{\circ} 30' 53.6''$ BT pada kedalaman $\pm 25,5$ meter yaitu posisi MWL (Mean Water Level). Sedangkan untuk titik 2 berada pada $08^{\circ} 40' 25.2''$ LS dan $115^{\circ} 29' 16.2''$ BT pada Kedalaman $\pm 33,5$ meter yaitu posisi MWL (Mean Water Level). Berdasarkan pengukuran kecepatan data arus, didapatkan hasil sebagai berikut [7] :



Gambar 3.2. *Current Lose* di Lokasi PLTAL [1]

1. Kecepatan arus maksimal adalah 3 m/s dari arah utara dengan koordinat 0° .
2. Kecepatan arus rata-rata antara 2.5 m/s s/d 3 m/s dengan durasi 9 – 18 jam/hari
3. Kecepatan arus tertinggi 5.1 m/s diukur dari ketinggian 2m dapat terjadi dari arah Tenggara dengan koordinat 225°



Gambar 3.3. Arah pembebanan Lengan Turbin Berdasarkan Arah Pembebanan

Arah pembebanan platform PLTAL ditunjukkan pada gambar 3.3 dengan lengan turbin yang dianalisa yaitu turbin 5 Kw yang terdapat di bagian tengah seperti ditunjukkan pada tanda merah tersebut.

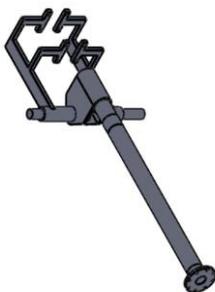
Untuk posisi pembangkit listrik tenaga arus laut terletak di bagian barat dari pulau Nusa Penida, Tenggara dari pulau Nusa Lembangan, dan Tenggara Laut dari Pulau Ceningan seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.4 sebagai berikut.



Gambar 3.4. Letak Geografis dari PLTAL

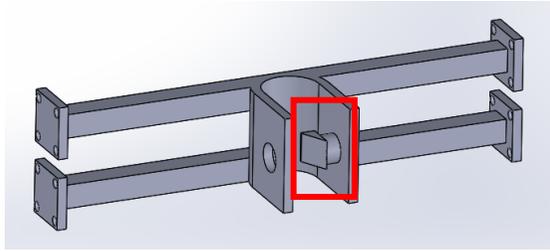
3.5.3. Data Struktur Lengan Turbin Sumbu Vertikal

Untuk menganalisa lengan turbin pembangkit listrik tenaga arus laut, maka diperlukan desain terlebih dahulu. Desain yang digunakan berasal dari perangkat lunak *solidwork* yang telah dibuat oleh peneliti sebelumnya. Bagian komponen lengan turbin yang difokuskan untuk dianalisa yaitu pada *Frame* poros / selubung poros.



Gambar 3.5. Desain *Frame* Poros [1]

Selain *Frame* poros lengan turbin, diperlukan desain dari *chuck* atau penyangga poros sumbu vertikal. *Chuck* memiliki fungsi sebagai tempat bertumpunya lengan turbin saat beroperasi.



Gambar 3.6. *Chuck* dan Pengunci

Gambar 3.5 menunjukkan desain yang telah dirancang sebelumnya terkait penyangga *Frame* poros agar pada saat beroperasi dalam kondisi stabil ketika menerima beban. Bagian persegi merah menunjukkan pengunci *Frame* poros agar tetap bertumpu pada *chuck*.

Untuk spesifikasi material pada struktur lengan turbin dan penyangga dijabarkan sebagai berikut.

Jenis Material	: AISI 4130
<i>Density</i>	: 7,68 Kg/m ²
<i>Tensile strength, ultimate</i>	: 560 MPa
<i>Tensile strength, yield</i>	: 460 MPa
<i>Modulus of Elasticity</i>	: 190 – 210 GPa
<i>Thermal Conductivity</i>	: 42,7 W/mK

3.5.4. Data Berat Komponen Lengan Turbin

Berat komponen lengan turbin didapatkan dari perhitungan penelitian sebelumnya. Bagian komponen yang melengkapi penelitian terkait *Frame* poros lengan turbin berupa turbin beserta porosnya, generator dan gearbox. Berikut merupakan komponen – komponen pelengkap tersebut .



Gambar 3.7. Turbin Pembangkit listrik tenaga arus laut



Gambar 3.8. Generator dan Gearbox PLTAL

Pada gambar 3.5 dan gambar 3.6 merupakan komponen lain yang memiliki berat tertentu dengan menompang pada *Frame* poros lengan turbin. Berikut merupakan hasil dari perhitungan berat beberapa komponen yang berhubungan dengan *Frame* poros lengan turbin sebagai berikut.

Tabel 3.4. Data Berat Komponen Pendukung Lengan Turbin [1]

No	Komponen	Berat (N)
1	Turbin dan Poros	12770,21
2	Generator	784,532
3	Gear Box	171,62

3.5.5. Data Beban Arus

Penelitian sebelumnya telah dilakukan perhitungan beban arus, yaitu *drag force* yang terjadi pada lengan turbin. Bagian lengan turbin yang dijadikan sebagai acuan untuk menghitung *drag force* yaitu pada turbin, bushing, dan *Frame* poros. Total perhitungan *drag force* tersebut dijadikan sebagai distribusi beban arus pada lengan turbin. berikut merupakan data yang telah diperoleh dari penelitian sebelumnya.

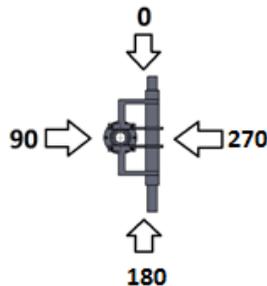
Tabel 3.5. Hasil Gaya *drag force* dengan variasi Arus [1]

No	Variasi Kecepatan Arus (m/s)	<i>Drag Force</i> yang dihasilkan (N)
1	2,4	30,34
2	3,5	64,54
3	4,5	106,69
4	5,5	154,31

BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

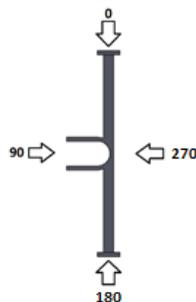
4.1. Arah Pembebanan Pembangkit Listrik Tenaga Arus Laut

setelah diketahui data arah datanya gelombang dan arus, maka dapat menentukan posisi PLTAL disaat menerima beban. Parameter yang digunakan untuk menunjukkan arah pembebanan dengan sumbu tertentu.



Gambar 4.1. Arah Pembebanan *Frame* Poros

Untuk arah 0° diasumsikan dari arah utara, arah 90° diasumsikan dari arah barat, arah 180° diasumsikan dari arah selatan dan dari arah 270° merupakan dari arah timur. Selain itu terdapat *chuck* yang berfungsi sebagai penahan lengan turbin. Berikut merupakan gambaran dari arah pembebanan *chuck*.



Gambar 4.2. Arah Pembebanan *Chuck* Lengan Turbin

4.2. Menghitung Kecepatan Partikel Gelombang Horizontal

Untuk menghitung kecepatan partikel gelombang, digunakan persamaan dari teori gelombang *airy*. Kecepatan yang dihitung yaitu kecepatan partikel gelombang secara horizontal. Kecepatan partikel gelombang dihitung untuk mendapatkan nilai dari

dragforce. Sebelum dilakukan perhitungan kecepatan partikel gelombang, harus terdapat data periode gelombang lokasi. Berikut merupakan beberapa perhitungan untuk mencari nilai kecepatan partikel gelombang dengan nilai periode 3.77 dari arah barat.

Rumus kecepatan partikel gelombang horizontal berdasarkan teori gelombang airy.

$$u = \frac{gHk \cosh k(d + y)}{2\omega \cosh kd} \cos[k(x - ct)]$$

Maka dari rumus tersebut diperlukan beberapa data .

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{3.77} = 1.66$$

$$L_o = 1.58 \times T^2 = 1.58 \times 3.77^2 = 22.45$$

$$L = L_o \left[\tanh\left(\frac{2\pi d}{L_o}\right) \right]^{1/2} = 22.45 \left[\tanh\left(\frac{2\pi d}{22.45}\right) \right]^{1/2} = 11.22$$

$$k = \frac{2\pi}{L} = 2 * \frac{3.14}{11.22} = 0.559$$

$$H = 0.9 \text{ m}$$

$$d = 250 \text{ m}$$

$$\text{Cosh } kd = 2.83$$

$$c = \frac{w}{k} = \frac{1.66}{0.559} = 2.96$$

$$y = 0 \text{ m (diasumsikan pada titik SWL)}$$

$$\cosh k(y+d) = 1.6 \text{ (diasumsikan } y=0, d \text{ yaitu kedalaman laut)}$$

untuk $\cos[k(x - ct)]$ diasumsikan pada ketinggian gelombang maksimum sehingga bernilai 1.

Setelah diketahui beberapa data yang dibutuhkan mencari nilai kecepatan partikel gelombang, maka dapat dihitung sebagai berikut.

$$u = \frac{gHk \cosh k(d + z)}{2\omega \cosh kd} \cos[k(x - ct)]$$

$$u = \frac{9.81 \times 0.9 \times 0.559}{2 \times 1.66} \frac{4.3}{2.46}$$

$$u = 4.1 \text{ m/s}$$

Maka didapatkan kecepatan partikel gelombang dengan periode 3.77 s dan ketinggian gelombang 0.9 m yaitu 4.1 m/s. Untuk kecepatan partikel gelombang lainnya dapat dilihat dari table sebagai berikut.

Tabel 4.1. Kecepatan Partikel Gelombang terhadap Arah Pembebanan

No	Arah Pembebanan	Tinggi Gelombang (m)	Periode Gelombang (s)	Kecepatan Partikel Gelombang (m/s)
1	90 ⁰	0.9	3.77	4.1
2	45 ⁰	1.58	6.5	1.6
3	225 ⁰	2.4	7	1.6

Pada table 4.1 menunjukkan bahwa kecepatan partikel gelombang memiliki nilai yang berbeda – beda. Nilai kecepatan gelombang tertinggi terdapat dari arah 90⁰ yaitu 4.1 m/s. Oleh karena itu, nilai kecepatan partikel gelombang dapat diambil dengan nilai 4.1 m/s.

4.3.Menghitung Percepatan Partikel Gelombang Horizontal

Untuk menghitung pecepatan partikel gelombang horizontal, digunakan persamaan teori gelombang *airy*. Percepatan partikel gelombang horizontal dihitung untuk memenuhi keperluan mencari nilai *inertia force*. Seperti menghitung kecepatan, data yang diperlukan untuk mencari percepatan berupa periode signifikan dan data gelombang. Berikut merupakan formula mencari percepatan partikel gelombang.

$$\alpha = \frac{w^2 H}{2} \frac{\cosh k(d+z)}{\sinh kd} \sin[k(x - ct)]$$

Yang mana $\sin[k(x - ct)]$ diasumsikan pada titik sejajar dengan *sea waterline* gelombang sehingga bernilai 1. Berdasarkan formula tersebut hanya diperlukan nilai $\sinh kd$ karena untuk data lainnya sudah dihitung sebelumnya.

$$\sinh kd = 1.6$$

$$\cosh k(z+d) = 1.6 \text{ (diasumsikan } z = 0, \text{ d yaitu kedalaman laut)}$$

Sehingga percepatan partikel gelombang dengan tinggi gelombang 0,9 dan periode 3,77 sebagai berikut.

$$\alpha = \frac{w^2 H}{2} \frac{\cosh k(d + z)}{\sinh kd}$$

$$\alpha = \frac{1.66^2 \cdot 0.9}{2} \frac{1.6}{1.6} = 1.2 \text{ m/s}^2$$

Setelah dilakukan perhitungan percepatan partikel gelombang dari arah barat, didapatkan hasil dari arah barat dengan nilai 1.2 m/s². Selain itu dapat dilakukan

perhitungan lainnya dari arah barat laut dan Tenggara dan dijabarkan dengan table sebagai berikut.

Tabel 4.2. Variasi Percepatan Gelombang dari Arah Pembebanan

No	Arah Pembebanan	Tinggi Gelombang (m)	Periode Gelombang (s)	Percepatan Partikel Gelombang (m/s ²)
1	90 ⁰	0.9	3.77	1.2
2	45 ⁰	1.58	6.5	0.93
3	225 ⁰	2.4	7	1

Berdasarkan table 4.2. dapat dilihat bahwa percepatan partikel gelombang tertinggi terdapat dari arah barat dengan nilai 1.2 m/s² dan yang terkecil terdapat pada barat laut yaitu 0,93 m/s². Oleh karena itu, percepatan yang digunakan yaitu dari arah barat dengan nilai 1.2 m/s².

4.4. Menghitung Gaya Gelombang dengan Teori Morison

Untuk menghitung gaya gelombang dapat dilakukan dengan menggunakan teori *morison* yang mana teori ini merupakan jumlah dari *drag force* dan *inertia force* dari *offshore structure*. Berikut merupakan perhitungan *drag force* dan *inertia force* dari lengan turbin dengan menggunakan data dari arah barat sebagai berikut.

4.4.1. Menghitung *drag force* dari beban gelombang

Untuk menghitung *drag force* menggunakan parameter kecepatan arus dan kecepatan partikel gelombang. Sebelum menghitung *drag force* pada lengan turbin, diperlukan beberapa data yang telah dihitung sebelumnya. Data yang digunakan sebagai berikut.

Kecepatan Partikel Gelombang (u)	: 2 m/s
Kecepatan Arus (u)	: 5.5 m/s (diasumsikan pada arus tertinggi)
Massa Jenis Air Laut (ρ)	: 1.025 kg/m ³
Koefisien Drag (Cd)	: 1.05

Drag force gabungan dari kecepatan arus dan kecepatan partikel gelombang dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$Fd = \frac{1}{2} \times Cd \times \rho \times |U + u|(U + u)$$

$$Fd = \frac{1}{2} \times 1,05 \times 1,025 \times |5,5 + 2|(5,5 + 2)$$

$$Fd = 50.27 N$$

Drag force yang dihitung bahwa keseluruhan bagian lengan turbin ketika beroperasi menerima beban gelombang. Nilai *drag force* yang didapatkan hanya

didistribusikan ke lengan turbin pada bagian sejajar dengan *SWL*. Pada data sebelumnya telah didapatkan bahwa nilai *drag force* terhadap beban arus tertinggi yaitu bernilai 154,31 N. Nilai *drag force* tersebut dapat dijumlahkan dengan *drag force* beban gelombang yang telah dihitung sebelumnya.

$$F_d \text{ total} = F_d \text{ gelombang} + F_d \text{ Arus}$$

$$F_d = 50,27 + 154,31 = 204,58 \text{ N}$$

Untuk *drag force* dari arah lainnya dapat dijabarkan dengan table sebagai berikut.

Tabel 4.3. Variasi Nilai *drag force* terhadap arah pembebanan

No	Arah Pembebanan	Tinggi Gelombang (m)	Periode Gelombang (s)	Kecepatan Partikel Gelombang (m/s)	<i>Drag Force</i> (N)
1	90 ⁰	0.9	3.77	1.2	204,58
2	45 ⁰	1.58	6.5	0.93	183
3	225 ⁰	2.4	7	1	183

Sehingga berdasarkan perhitungan gaya yang diperoleh, dapat diambil dari arah Barat.

4.4.2. Menghitung *Inertia Force* dari Beban Gelombang

Untuk menghitung *inertia force* juga menggunakan teori *morison* untuk memenuhi gaya yang diberikan dari beban gelombang. Sebelum menghitung *inertia force* berikut merupakan data yang diperlukan.

Percepatan Partikel Gelombang (α)	: 1,24 m/s ²
<i>Inertia coefficient</i> (C_m)	: 1.2
Luas Penampang (A)	: Turbin : 8,7 m ²
	: Bushing : 0,54 m ²
	: <i>Frame</i> Poros : 1,5 m ²

1. Menghitung gaya inersia pada turbin

$$F_i = C_m \times \rho \times A \times \alpha$$

$$F_i = 1,2 \times 1,025 \times 8,7 \times 1,24$$

$$F_i = 13,36 \text{ N}$$

2. Menghitung Gaya Inersia pada Bushing

$$F_i = C_m \times \rho \times A \times \alpha$$

$$F_i = 1,2 \times 1,025 \times 0,54 \times 1,24$$

$$F_i = 0,84 \text{ N}$$

3. Menghitung Gaya Inersia pada *Frame* Poros

$$F_i = C_m \times \rho \times A \times \alpha$$

$$F_i = 1,2 \times 1,025 \times 1,5 \times 1,24$$

$$F_i = 2,31 \text{ N}$$

Dari ketiga bagian tersebut dapat dijumlahkan sehingga nilainya menjadi 16,5 N. Variasi dari nilai *inertia force* dapat diuraikan pada table sebagai berikut.

Tabel 4.4. Variasi *Inertia Force* terhadap Arah Pembebanan

No	Arah Pembebanan	Tinggi Gelombang (m)	Periode Gelombang (s)	Percepatan Partikel Gelombang (m/s^2)	<i>Inertia Force</i> (N)
1	90 ⁰	0.9	3.77	1.2	16,5
2	45 ⁰	1.58	6.5	0.93	12,35
3	225 ⁰	2.4	7	1	13,31

Berdasarkan table 4.4 terdapat beberapa variasi dari *inertia force* dari masing – masing arah pembebanan yang memberikan suatu nilai tinggi dan periode gelombang. *Inertia force* tertinggi terdapat dari arah barat yaitu 16,5 N dan gaya terendah diperoleh dari arah barat laut yaitu 12,35 N.

4.4.3. Menghitung Gaya Gelombang dengan Variasi Titik Distribusi Lengan Turbin

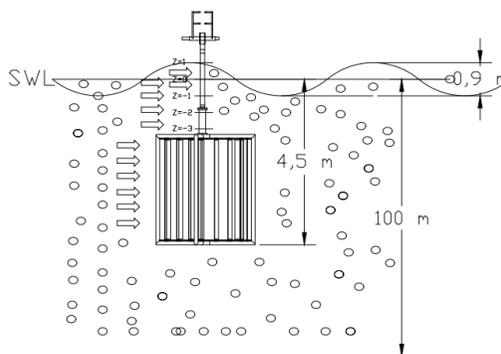
Setelah dihitung dari *inertia force* dan *drag force* didapatkan total keseluruhan dari beban gelombang yang diterima oleh lengan turbin PLTAL. Namun untuk perhitungan *drag force* dan *inertia force* sebelumnya dilakukan pada titik normal ($z = 0$). Berikut merupakan hasil dari total gaya gelombang dengan persamaan *morison*.

Tabel 4.5. Variasi Gaya *Morison* terhadap Arah Pembebanan pada Titik Normal ($Z = 0$)

No	Arah Pembebanan	Tinggi Gelombang (m)	Periode Gelombang (s)	<i>Drag Force</i> (N)	<i>Inertia Force</i> (N)	Gaya <i>Morison</i> (N)
1	90 ⁰	0.9	3.77	204,58	16,5	221,10
2	45 ⁰	1.58	6.5	183	12,35	189,88
3	225 ⁰	2.4	7	183	13,31	195,26

Pada table 4.5. dapat dilihat bahwa gaya *morison* yang dihasilkan tergantung dari tinggi dan periode gelombang tertentu. Pada kondisi ini diasumsikan bahwa gaya *morison* yang mendistribusikan titik vertikal lengan turbin pada ($Z = 0$).

Lengan turbin yang diberikan beban gelombang dapat dilihat dari beberapa titik yang didistribusikan oleh gaya gelombang, sehingga dapat dilihat nilai gaya paling besar dari titik tersebut. Berikut merupakan gambaran dari titik lengan turbin yang menerima beban gelombang.



Gambar 4.3. Gambaran Distribusi Gelombang Antar Titik Lengan Turbin

Untuk mendapatkan variasi dari titik vertikal (y) dapat dihitung pada formula mencari nilai kecepatan dan percepatan partikel gelombang. Berikut merupakan variasi dari nilai z terhadap beban gelombang yang dihasilkan pada ketinggian gelombang dari arah barat ($H = 0.9$, $T = 3,77$ s)

Tabel 4.6. Nilai Gaya *Morison* terhadap Variasi Nilai Z

Z (m)	Cosh k ($y+d$)	Drag Force (N)	Inertia Force (N)	Force Morison (N) (90^0)	Force Morison (N) (45^0)	Force Morison (N) (225^0)
0.45	2,06	217,95	21,31	239,27	191,72	197,28
0	1.6	204,58	16,52	221,10	189,88	195,26
-0.45	1,24	195,3	12,8	208,1	188,21	193,29
-0.9	9,59	188,7	9,92	198,68	186,70	191,67

Berdasarkan table 4.3. dapat dilihat bahwa semakin kebawah bagian titik lengan turbin yang didistribusikan maka nilai gaya *morison* yang diberikan semakin kecil. Oleh karena itu, untuk penelitian ini digunakan gaya *morison* tertinggi yaitu pada saat puncak gelombang maksimum memberikan gaya ke lengan turbin dari arah 90^0 . Nilai Z yang digunakan berupa 0.45 m dari *SWL* dengan nilai gaya 239,27 N.

4.5. Menghitung *Drag Force* dari beban arus pada kondisi normal

Berdasarkan data yang telah diperoleh sebelumnya, PLTAL selama beroperasi menerima kecepatan arus dari arah 0^0 dengan nilai 2.5 m/s s/d 3 m/s. berikut merupakan perhitungan dari *drag force* sebagai berikut.

Kecepatan arus	: 2.5 m/s
<i>Drag coefficient</i> (Cd)	: 1.5
Luas Penampang (A)	: Turbin : 8.7 m ²
	: Bushing : 0,54 m ²

Massa Jenis Air Laut (ρ) : *Frame* Poros : 1,5 m²
: 1.025 kg/m³

a. *Drag Force Frame* Poros

$$fd = \frac{\rho \times v^2 \times Cd \times A}{2}$$

$$fd = \frac{1.025 \times 2.5^2 \times 1.05 \times 1,5}{2}$$

$$fd = 5,04 \text{ N}$$

b. *Drag Force Turbin*

$$fd = \frac{\rho \times v^2 \times Cd \times A}{2}$$

$$fd = \frac{1.025 \times 2.5^2 \times 1.05 \times 8.7}{2}$$

$$fd = 29,26 \text{ N}$$

c. *Drag Force Bushing*

$$fd = \frac{\rho \times v^2 \times Cd \times A}{2}$$

$$fd = \frac{1.025 \times 2.5^2 \times 1.05 \times 0,54}{2}$$

$$fd = 1,81 \text{ N}$$

Sehingga total dari keseluruhan *drag force* yaitu 36,12 N dari arah utara.

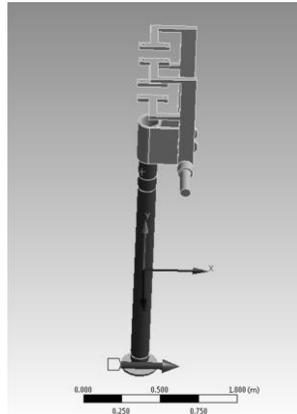
4.6. Simulasi Tegangan dengan *Finite Element Method* Menggunakan Perangkat Lunak *Finite Element*

Sebelum dilakukan simulasi, struktur yang telah didesain dengan perangkat lunak *solidwork* di *import* ke perangkat lunak *finite element Finite Element*. Setelah di *import*, dapat dilakukan *meshing* terlebih dahulu sebelum dilakukan *running*. Variasi *meshing* yang dilakukan dengan 3 jenis pada perangkat lunak *Finite Element*, yaitu pada kualitas *coarse*, *medium* dan *fine*.

4.6.1. Simulasi Tegangan *Frame* Poros Utama

Parameter yang digunakan sebelum dilakukan simulasi yaitu beban persamaan morison, berat turbin, berat gearbox, dan berat generator. Berat generator dan berat gearbox terdapat pada bagian atas sebagai penompang dari *Frame* poros tersebut. Nilai

berat generator 784.53 N dan berat gearbox 171,42 N. Untuk parameter beban gelombang dan arus digunakan pada simulasi tergantung dari arah pembebanan. *Meshing* yang digunakan pada simulasi ini yaitu pada maksimal dengan nodes 51430.



Gambar 4.4. Arah Pembebanan *Frame* Poros dari 0°

Pada gambar 4.4 menunjukkan bahwa arah pembebanan dari 0° menuju Tenggara dengan parameter beban gelombang morison 239.27 N.



Gambar 4.5. Arah Pembebanan *Frame* Poros Dari 225°

Gambar 4.5 menunjukkan arah pembebanan *Frame* poros dari arah 225° dengan nilai beban gelombang 195.26 N.



Gambar 4.6 Arah Pembebanan *Frame* Poros dari 45°

Gambar 4.6 menunjukkan arah pembebanan *Frame* poros dari 45° dengan nilai gaya morison 189.88 N.



Gambar 4.7. Arah Pembebanan *Frame* poros dari 0°

Berdasarkan gambar 4.7 menunjukkan bahwa arah pembebanan *frame* poros dari 0° dengan nilai kecepatan arus rata – rata 2.5 m/s dengan *drag force* 36,12 N.

Setelah dilakukan simulasi dari ketiga arah pembebanan didapatkan masing – masing nilai tegangan maksimal. Tegangan maksimal yang terjadi dari arah 90° yaitu $3,79 \times 10^7$ Pa.

Hasil tegangan maksimal, perlu adanya pengecekan standarisasi dengan *rules* yang digunakan. Berdasarkan *OFFSHORE STANDARD DET NORSKE VERITAS*

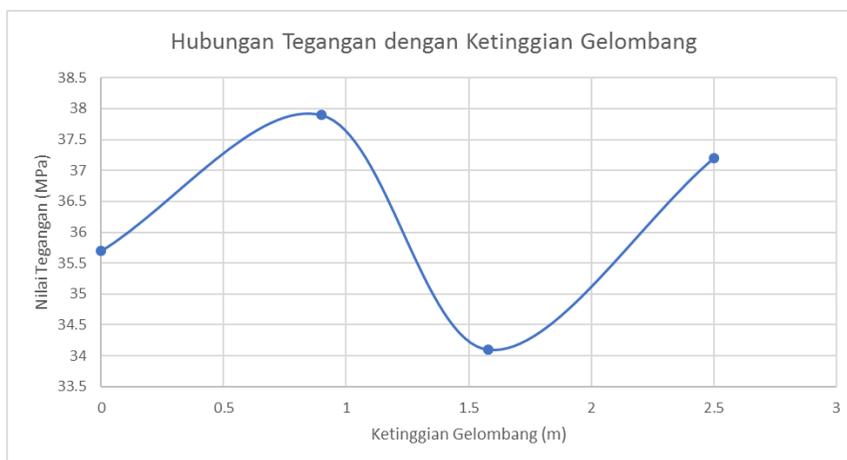
(DNV-OS-C201) - STRUCTURAL DESIGN OF OFFSHORE UNITS (WSD METHOD), nilai tegangan minimal yang diizinkan untuk *normal strength Steel* yaitu 235 N/mm² (MPa).

Tabel 4.7. Hasil Tegangan *Frame* Poros dari Setiap Arah Pembebanan

Arah Pembebanan	Tegangan Maksimal (MPa)	Tegangan Minimal (MPa)	Standar DNV (MPa)	Keterangan
90 ⁰	37.9	39.37 x 10 ⁻⁶	235	Memenuhi
45 ⁰	34.1	42,02 x 10 ⁻⁶		Memenuhi
225 ⁰	37.2	35.02 x 10 ⁻⁶		Memenuhi
0 ⁰	35,7	37,8 x 10 ⁻⁶		Memenuhi

Berdasarkan table 4.7 dapat dilihat bahwa nilai tegangan maksimal terjadi dari arah barat dan memenuhi standard DNV yang telah ditetapkan.

Setelah diperoleh tegangan secara keseluruhannya, dapat dilakukan perbandingan tegangan dengan variasi arah pembebanan sesuai dengan ketinggian gelombang tertentu. Berikut merupakan grafik dari tegangan terhadap beban yang diterima.

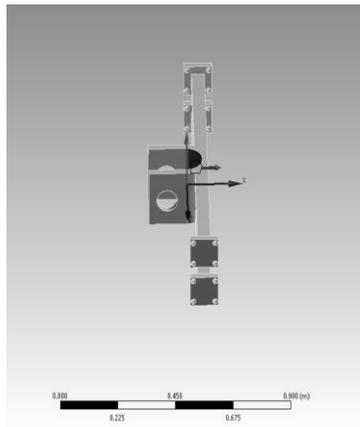


Gambar 4.8. Grafik Hubungan Tegangan dengan Ketinggian Gelombang

Berdasarkan gambar 4.8 menunjukkan bahwa nilai tegangan dan distribusi ketinggian gelombang tertentu menghasilkan ketidakteraturan, sehingga nilai tegangan yang dihasilkan tergantung dari arah distribusi dan bentuk struktur lengan turbin.

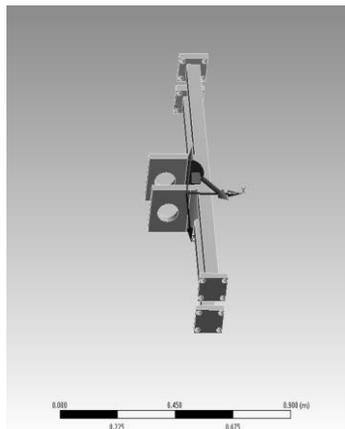
4.6.2. Simulasi Tegangan Penyangga dan Pengunci *Frame* Poros

Simulasi sebelumnya telah dilakukan hanya pada *Frame* poros saja, tetapi dalam desain pembangkit listrik tenaga arus laut pada sumbu vertikal terdapat penyangga yang berfungsi sebagai penompang dari lengan turbin. Parameter yang digunakan pada penyangga *Frame* poros lengan turbin yaitu beban yang diterima bernilai beban maksimal yaitu.



Gambar 4.9. Arah Pembebanan *Chuck* dari 90°

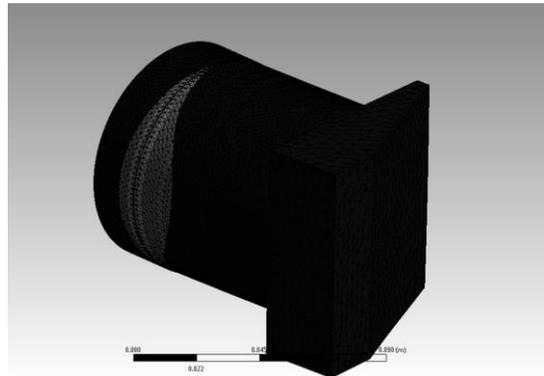
Gambar 4.9 menunjukkan arah pembebanan *chuck* dari 90° dengan parameter gaya morison 239.27 N.



Gambar 4.10. Arah Pembebanan *Chuck* dari 45°

Berdasarkan gambar 4.10 menunjukkan bahwa arah pembebanan penyangga *Frame* poros dengan nilai gaya sebesar 189.88 N.

Untuk pembebanan dari arah 225° tidak dilakukan simulasi *chuck* / penyangga poros dikarenakan arah pembebanan dari Tenggara *Frame* poros bertumpu pada pengunci *chuck*. Oleh karena itu, dilakukan simulasi pengunci poros penyangga berdasarkan nilai pembebanan dari arah Tenggara.



Gambar 4.11. Hasil Simulasi Tegangan Pengunci Penyangga *Frame* Poros dari Pembebanan Arah 225°

Setelah dilakukan simulasi pada *chuck* dan pengunci, dapat dilihat bahwa nilai tegangan maksimal yang terjadi yaitu pembebanan dari arah 90° dengan nilai $1,38 \times 10^6$ Pa. Hasil tegangan maksimal, perlu adanya pengecekan standarisasi dengan *rules* yang digunakan. Berdasarkan OFFSHORE STANDARD DET NORSKE VERITAS (DNV-OS-C201) - STRUCTURAL DESIGN OF OFFSHORE UNITS (WSD METHOD), nilai tegangan minimal yang diizinkan untuk *normal strength Steel* yaitu 235 N/mm^2 (MPa).

Tabel 4.8. Nilai Tegangan *Chuck* dan Pengunci dari Setiap Arah Pembebanan

Arah Pembebanan	Tegangan Maksimal (MPa)	Tegangan Minimal (MPa)	Standar DNV (MPa)	Keterangan
90°	1,38	$28,68 \times 10^{-6}$	235	Memenuhi
45°	0,81	$11,98 \times 10^{-6}$		Memenuhi
225°	1,06	$14,78 \times 10^{-6}$		Memenuhi
0°	$1,4 \times 10^{-2}$	$5,4 \times 10^{-6}$		Memenuhi

Berdasarkan table 4.8 dapat dilihat bahwa tegangan maksimal yang terjadi masih dalam memenuhi standar DNVGL.

Setelah diketahui nilai tegangan secara keseluruhannya, dapat dijabarkan dengan grafik agar mengetahui kondisi tegangan maksimal ketika menerima beban gelombang dari arah tertentu.

4.7. Simulasi Fatigue Menggunakan *Finite Element Method* Menggunakan Perangkat Lunak *Finite Element*

Simulasi fatigue terdapat pada perangkat lunak *Finite Element* dengan parameter *stress* yang dihasilkan sebelumnya. Metode *fatigue* yang digunakan yaitu goodman. Menurut hendrawan [15], metode goodman memiliki keunggulan pada material getas, sehingga cocok untuk *frame* poros maupun *chuck* atau penyangga poros ketika beroperasi.

4.7.1. Simulasi *Fatigue* pada *Frame* Poros Utama

Setelah mengetahui nilai tegangan dengan metode *finite element* menggunakan perangkat lunak *Finite Element*, *frame* poros utama dapat dilakukan simulasi *fatigue* dengan metode tersebut. Berikut merupakan beberapa hasil simulasi fatigue dengan *finite element method*.



Gambar 4.12. Hasil Simulasi *Fatigue Damage* dari Setiap arah Pembebanan

Setelah dilakukan simulasi dengan keseluruhan arah pembebanan yang diberikan, dapat dilihat pada gambar 4.19 bahwa nilai *cycle* pada *frame* poros yaitu 1×10^6 *cycle*. Simulasi *fatigue life* pada *frame* poros utama telah dilakukan dengan arah pembebanan keseluruhan, namun untuk hasilnya tetap sama dengan nilai aman.

Setelah diketahui semua *safety factor* dari semua arah pembebanan, maka dapat dijabarkan dengan tabel sebagai berikut.

Tabel 4.9. Hasil Simulasi *safety factor* dari keseluruhan arah pembebanan

Arah Pembebanan	Tegangan Maksimum (MPa)	<i>Safety Factor</i>
0°	35,7	2,41

90 ⁰	37.9	2,57
225 ⁰	34.1	2.30
45 ⁰	35.01	2.49

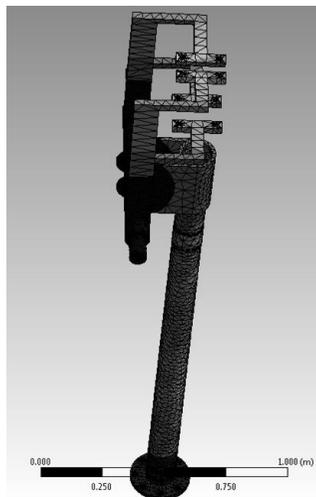
Berdasarkan tabel 4.9 menunjukkan bahwa nilai *safety factor* tertinggi terdapat dari arah 90⁰ dengan nilai 2,57.

4.8. Simulasi Deformasi dengan *Finite Element Method* Menggunakan Perangkat Lunak *Finite Element*

Nilai deformasi perlu diketahui dikarenakan potensi struktur material lengan turbin dan *chuck* maupun pengunci menerima beban secara dinamik dapat terjadi *fatigue*. Oleh karena itu, dilakukan simulasi deformasi dengan masing – masing arah gelombang tertentu.

4.8.1. Simulasi Deformasi Pada *Frame* Poros Utama

Berikut merupakan beberapa hasil simulasi deformasi dari arah datangnya gelombang tertentu dan kondisi normal saat beroperasi sebagai berikut.



Gambar 4.13 Hasil Simulasi Deformasi *Frame* Poros Utama dari Arah 90⁰

Setelah dilakukan simulasi potensi deformasi pada *frame* poros utama, dapat dijabarkan dengan tabel sebagai berikut.

Tabel 4.10. Hasil Simulasi Deformasi *frame* Poros

Arah Pembebanan	Tegangan Maksimum	Deformasi Maksimal
0 ⁰	35,7	1,33 x 10 ⁻³

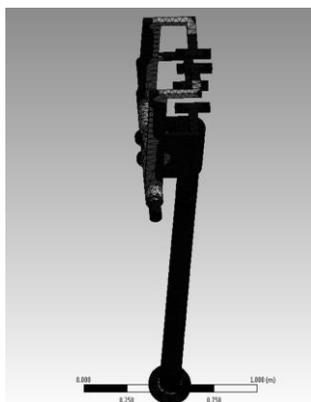
90 ⁰	37.9	1,12 x 10 ⁻³
225 ⁰	34.1	1,4 x 10 ⁻³
45 ⁰	35.01	1,2 x 10 ⁻³

4.9. Simulasi *Strain* Dengan *Finite Element Method* Menggunakan Perangkat Lunak *Finite Element*

Simulasi *strain* pada *frame* poros dan *chuck* atau pengunci pada *frame* poros dilakukan agar mengetahui nilai maksimal *strain* yang terjadi pada komponen tersebut. Selain itu, nilai *strain* perlu didapatkan karena adanya potensi elongasi pada struktur material *frame* poros ketika menerima beban gelombang dari beberapa arah tertentu.

4.9.1. Simulasi *Strain* Pada *Frame* Poros Utama

Berikut merupakan beberapa hasil simulasi *strain* pada *frame* poros utama dengan arah pembebanan tertentu.



Gambar 4.14. Hasil Simulasi *Strain* *Frame* Poros Utama dari Arah 90⁰

Setelah dilakukan simulasi *frame* poros berupa *strain*, dapat dijabarkan dengan tabel sebagai berikut.

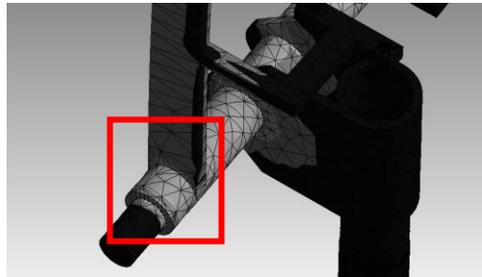
Tabel 4.11. Hasil Simulasi Regangan *frame* Poros dari Arah Tertentu

Arah Pembebanan	Tegangan Maksimum (MPa)	Regangan Maksimal (m/m)
0 ⁰	35,7	2,6 x 10 ⁻⁴
90 ⁰	37.9	2,49 x 10 ⁻⁴
225 ⁰	34.1	2,7 x 10 ⁻⁴
45 ⁰	35.01	2,5 x 10 ⁻⁴

4.10. Pembahasan Simulasi *Finite Element Method*

Setelah dilakukan simulasi sesuai dengan yang dibutuhkan, didapatkan hasil berupa tegangan, regangan, *life cycle*, dan deformasi. Berdasarkan hasil simulasi dengan *finite*

element method, tegangan tertinggi terjadi dari arah 90^0 dengan nilai 37,9 MPa dengan ketinggian gelombang 0,9 dan periode 3,77s. Sedangkan *safety factor* paling aman dapat terjadi dengan arah pembebanan 225^0 yaitu 2,30. Untuk regangan paling tinggi terjadi dari arah 90^0 dengan nilai $2,49 \times 10^{-4}$ m/m dan deformasi tertinggi dari arah yang sama yaitu bernilai $1,12 \times 10^{-3}$.



Gambar 4.15. Bagian *Frame* Poros dengan Tegangan Paling Tinggi

Berdasarkan gambar 4.31. dapat dilihat bahwa bagian yang paling tinggi berpotensi *fatigue* dapat terjadi seperti yang ditunjukkan dengan tanda merah.

4.11. Menghitung *fatigue* pada Struktur Lengan Turbin

Untuk menghitung *fatigue* pada struktur lengan turbin harus diketahui tegangan maksimal pada saat menerima beban lingkungan. *Fatigue* yang dihitung hanya pada saat lengan turbin beroperasi. Parameter awal yang digunakan untuk mencari nilai umur kelelahan yaitu nilai *N*. Nilai *N* didapat pada dasarnya dari kurva S-N, sehingga untuk memperoleh nilai tersebut harus membaca kurva yang telah ditentukan oleh standar DNVGL – RP – C203 *Section 2.4.5*.

Tabel 4.12. Hasil Pembacaan Kurva S-N

Arah Pembebanan	Tegangan Maksimal (MPa)	Nilai N (Cycle)
0^0	35,7	$2,4 \times 10^7$
90^0	37.9	1.7×10^7
45^0	34.1	$3,2 \times 10^7$
225^0	35.01	$2,8 \times 10^7$

Berdasarkan tabel 4.12 dapat dilihat bahwa nilai *N* terendah yaitu terdapat pada arah pembebanan dari Barat memiliki nilai 1.7×10^7 cycle dan nilai tertinggi terdapat dari arah 90^0 dengan nilai 3.2×10^7 cycle.

Untuk mencari nilai *N* pada *chuck* tidak dapat dilakukan menggunakan kurva S-N dikarenakan terbatasnya nilai tegangan yang timbul pada kurva. Nilai tegangan pada *chuck* hanya dibawah 10 Mpa. Mencari nilai *N* pada *chuck* dapat menggunakan formula 2.1 berdasarkan

$$N = 2 \times 10^6 \left(\frac{\Delta\sigma}{\Delta\sigma_{ref}} \right)^{-m}$$

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma_{\max} - \Delta\sigma_{\min}$$

$$\Delta\sigma = 1,38 - 28,68 \times 10^{-6} = 1,37 \text{ MPa}$$

$$N = 2 \times 10^6 \left(\frac{1,37}{100} \right)^{-3}$$

$$N = 7,6 \times 10^{11}$$

Sehingga *chuck* dapat dijabarkan dari masing – masing sesuai dengan arah pembebanan sebagai berikut.

Tabel 4.13. Nilai N pada *chuck* dan pengunci

Arah Pembebanan	Tegangan Maksimal (MPa)	Nilai N (Cycle)
90 ⁰	1,38	7,6 x 10 ¹¹
45 ⁰	0,31	6,7 x 10 ¹³
225 ⁰	1,06	1,6 x 10 ¹²
0 ⁰ (Arus Normal)	1,4 x 10 ⁻²	7,29 x 10 ¹⁷

Berdasarkan tabel 4.13 menunjukkan bahwa nilai N pada *chuck* memiliki terkecil dari arah barat dan terbesar dari arah barat laut. Sedangkan arah dari ²²⁵⁰ merupakan pengunci *chuck* dengan nilai 8.9 x 10¹⁴.

Sedangkan untuk mencari nilai n berupa jumlah siklus kolom interval rentang tegangan dengan harga Stress yang sebenarnya terjadi, dari rentang distribusi tegangan jangka panjang akibat beban eksternal. Parameter yang digunakan berupa frekuensi kejadian tinggi gelombang, periode gelombang, dan jumlah tahunan atau hari dalam 1 tahun. Berikut merupakan perhitungan dari nilai n.

Berdasarkan data yang telah diperoleh sebelumnya, terdapat beberapa jumlah kejadian atau lamanya gelombang terjadi dari arah tertentu. Untuk gelombang dari arah 90⁰ dengan ketinggian 0,9 m dan dari arah 45⁰ dengan ketinggian 1,58 m memiliki waktu kejadian muncul dari bulan Desember – Maret, sedangkan dari arah 0⁰ memiliki waktu kejadian dari bulan Mei – Agustus. Untuk gelombang tertinggi 2.5 m terjadi pada bulan Juni – juli. Namun dengan diketahui lamanya muncul gelombang dengan bulan tertentu, tidak dianggap sebagai 24 jam. Untuk dari arah 90⁰ dan 45⁰ dalam sehari memiliki waktu 12 -20 jam per hari dan gelombang tertinggi dari arah tenggara memiliki waktu 22 jam per hari. Selain itu dari arah 0⁰ pada kondisi normal memiliki waktu 5 – 8 jam per hari.

Berikut merupakan contoh perhitungan dari arah ²²⁵⁰ memiliki tinggi gelombang maksimal dengan nilai 2,4 m dan periode 5,94 s dengan masa waktu 2 bulan atau bisa dihitung dengan 60 hari.

$$n = \frac{3600 \text{ detik} \times \text{jumlah kejadian dalam hari} \times 24 \text{ jam}}{\text{periode gelombang}}$$

$$n = \frac{3600 \text{ detik} \times 60 \text{ hari} \times 22 \text{ jam}}{5,94 \text{ s}}$$

$$n = 801349.07 \text{ siklus}$$

Sehingga nilai n untuk dari arah ²²⁵⁰ yaitu $8,01 \times 10^5$.

Setelah menghitung nilai N dan n pada struktur *Frame* poros, maka dapat dilakukan perhitungan rasio kerusakan kumulatif akibat beban yang diterima/*fatigue damage accumulation* (D) berdasarkan teori palmgren – miner dengan standard DNVGL-RP-C203 Section 2.2 sebagai berikut.

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n}{N}$$

Dimana nilai k merupakan *thickness exponent* adalah 0,25 sesuai dengan DNV – RP – C203 section 2.4.5.

$$D = \sum_{i=1}^{0,25} \frac{8,01 \times 10^5}{3.2 \times 10^7}$$

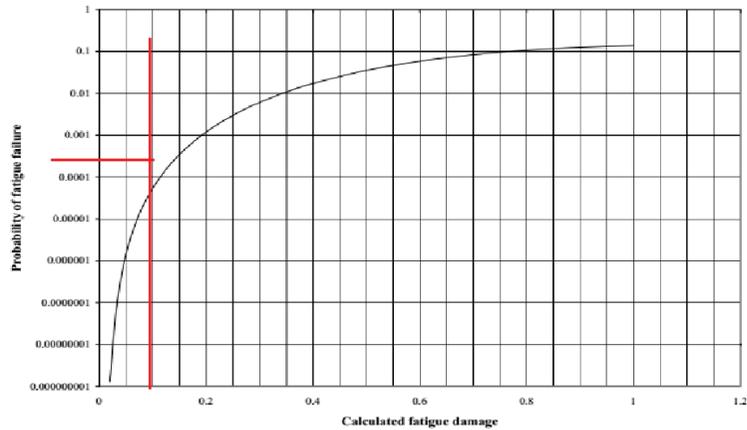
$$D = \sum_{i=1}^{0,25} \frac{8,01 \times 10^5}{3.2 \times 10^7}$$

$$D = 0,006$$

Tabel 4.14 Hasil *Fatigue Damage Accumulation* Dari Arah Tertentu

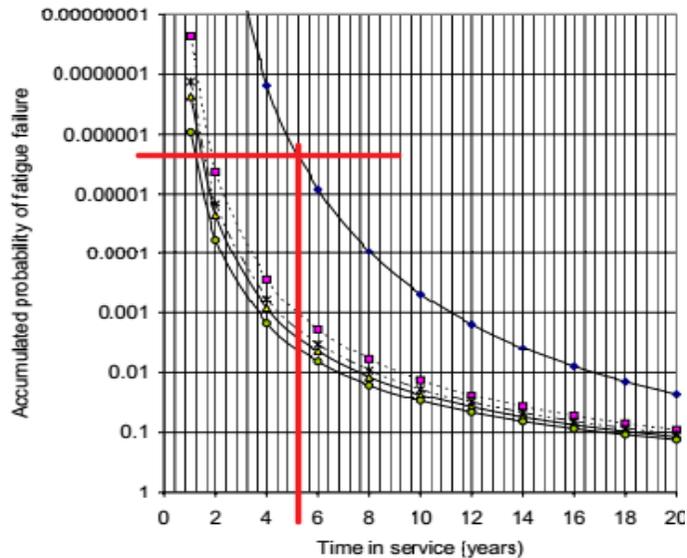
Arah Pembebanan	Wave Period (s)	Waktu Kejadian (Jam)	Jumlah Kejadian (Days)	N	n	D
90°	3.77	18	90	17000000	1546949.60	0.091
45°	4.85	18	60	28000000	801649.48	0.029
225°	5.93	22	60	20000000	801349.07	0.040
0°	(Arus)	24	365	24000000	1314000.00	0.055

Berdasarkan tabel 4.14 menunjukkan bahwa nilai *fatigue damage accumulation* tertinggi terdapat dari arah barat dengan nilai 0,091, sehingga parameter yang digunakan untuk menentukan *service life* 0,091. Selain itu, *fatigue life* sesuai dengan lamanya struktur lengan turbin mengalami kegagalan nilai tercepat yaitu terdapat pada kondisi normal pada saat arus maksimum dan kondisi menerima beban gelombang dengan lamanya 90 hari.



Gambar 4.16. Grafik Potensi Kegagalan Struktur Berdasarkan DNVGL [11]

Setelah diketahui *fatigue damage*, dapat menentukan nilai konstanta potensi kegagalan struktur sesuai dengan standar *DNVGL*. Nilai Konstanta *Probability of Failure based on DNVGL* yaitu 0,00006.



Gambar 4.17. Grafik *Time in Service* Terhadap Kemungkinan *Fatigue* [11]

Sehingga nilai *time to service (Years) / Service Life* yaitu 5 Tahun

Setelah mengetahui nilai *fatigue damage*, dapat menentukan lamanya kelelahan struktur dengan perencanaan desain lengan turbin selama 5 tahun dibagi dengan nilai rasio *fatigue damage*.

$$\text{Fatigue Life} = \frac{\text{Perencanaan Umur Desain Lengan Turbin}}{\text{Ratio Fatigue Damage}}$$

Tabel 4.15. Hasil Fatigue Life pada *frame* poros

Direction Degree	Wave Period (s)	D	Fatigue Life (Years)
90°	3.77	0.091	55
45°	4.85	0.029	175
225°	5.93	0.040	125
0°	(Arus)	0.055	91

Berdasarkan tabel 4.15 menunjukkan bahwa nilai *fatigue life* pada *frame* poros dengan paling terkecil yaitu 55 tahun dengan parameter desain lengan turbin setelah service life 5 tahun, sehingga perencanaan umur desain digunakan dengan nilai tersebut.

Untuk penyangga lengan turbin juga dilakukan perhitungan *fatigue life* dalam satuan tahun. Berikut merupakan hasil dari *fatigue life*.

Tabel 4.16. Hasil *fatigue life* pada Penyangga Lengan Turbin

Arah Mata Angin	Periode Gelombang	n	D	Fatigue Life (Years)
90°	3.77	1546949.60	2.03×10^{-6}	2.46×10^6
45°	4.85	801649.48	1.19×10^{-8}	4.19×10^8
225°	5.93	801349.07	4.77×10^{-7}	1.05×10^7
0°	Arus	1314000.00	1.8×10^{-12}	2.78×10^2

Berdasarkan tabel 4.16 menunjukkan bahwa nilai *fatigue life* masih dalam kondisi lama saat menerima beban gelombang dari arah tertentu ketika beroperasi. Nilai *fatigue life* terendah ditunjukkan dari arah 90° dengan nilai $2,46 \times 10^6$ tahun.

4.11. Perbandingan Nilai Cycle Berdasarkan Perhitungan Standar DNVGL dengan *Finite Element Method*

Sebelumnya telah dilakukan simulasi *fatigue* menggunakan perangkat lunak *Finite Element* dengan nilai *life cycle* 1×10^6 . Setiap simulasi dengan variasi arah pembebanan menghasilkan nilai *life cycle* dan *damage* yang sama, sehingga desain struktur *frame poros* masih kondisi aman. Berikut merupakan hasil validasi dari perhitungan standar DNVGL terhadap simulasi *finite element method* menggunakan

perangkat lunak *Finite Element*. Berikut merupakan contoh perhitungan validasi dari *cycle*.

$$\text{Persentase Cycle FEM dan standar DNVGL} = \frac{\text{Nilai Cycle pada Ansys}}{\text{Nilai Cycle berdasarkan Standar}}$$

$$\text{Persentase Cycle FEM dan standar DNVGL} = \frac{1 \times 10^6}{1,7 \times 10^7} = 6\%$$

Tabel 4.16. Hasil Validasi Nilai *Cycle / Fatigue Life*

Arah Pembebanan	Nilai <i>Cycle</i> Berdasarkan DNVGL	Nilai <i>Cycle</i> pada <i>FEM</i>	Persentase Perbandingan
90 ⁰	1,7 x 10 ⁷	1 x 10 ⁶	6%
45 ⁰	3,2 x 10 ⁷		3%
225 ⁰	22 x 10 ⁷		5%
0 ⁰	2,4 x 10 ⁷		4%

Berdasarkan tabel 4.16 menunjukkan bahwa nilai persentase perbandingan *cycle finite element method* dengan *cycle* standar DNVGL dengan persentase terendah terdapat dari arah 45⁰.

4.12. Perbandingan Hasil Penelitian Sebelumnya

Setelah dilakukan penelitian pada struktur *frame* poros dan penyangga lengan turbin, dapat dilakukan perbandingan dengan penelitian sebelumnya. Penelitian sebelumnya juga melakukan simulasi pada *frame* poros dengan parameter *drag force* kecepatan arus. Berikut merupakan perbandingan dari hasil penelitian sebelumnya dengan parameter beban gelombang dan arus yang telah dibahas sebelumnya sebagai berikut.

Tabel 4.17. Perbandingan Hasil Penelitian dengan Penelitian Sebelumnya

Metode Penelitian	Tegangan Tertinggi (MPa)	Regangan Tertinggi m/m	<i>Safety Factor</i>
<i>FEM</i>	37,9	2,49 x 10 ⁻⁴	2,57
Penelitian Sebelumnya	2,1	5,4 x 10 ⁻⁶	9,2 x 10 ⁶

Berdasarkan tabel 4.17 menunjukkan bahwa hasil penelitian dengan *finite element method* memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan penelitian sebelumnya. Hal tersebut dikarenakan parameter penelitian ini ditambah dengan beban gelombang sehingga tegangan, regangan dan *safety factor* tertinggi terdapat dari penelitian ini. Selain itu untuk penelitian sebelumnya tidak dilakukan perhitungan *fatigue*.

BAB V

KESIMPULAN dan SARAN

5.1. Kesimpulan

Setelah dilakukan pembahasan terkait lengan turbin PLTAL sumbu vertikal, dapat disimpulkan bahwa :

1. Distribusi beban gelombang tertinggi terjadi dari arah barat koordinat 90^0 dengan nilai 221,10 N dengan periode tertentu sehingga terjadi tegangan tertinggi pada *frame* poros utama lengan turbin pembangkit listrik tenaga arus laut dengan nilai 37,9 MPa,
2. *Fatigue* atau kelelahan struktur material *frame* poros utama dengan waktu tercepat yaitu 55 tahun dari arah barat dengan ketinggian gelombang 0,9 dan periode 3,77 s dengan perencanaan desain lengan turbin 20 tahun dan *safety factor* tertinggi memiliki nilai 2,57.
3. *Safety factor* pada *frame* poros utama PLTAL masih dalam kondisi aman dengan nilai maksimal 2,57 dengan kondisi distribusi beban gelombang tertinggi dari arah barat
4. Nilai potensi terjadinya deformasi, regangan dan tegangan maksimal pada *frame* poros yaitu $1,12 \times 10^{-3} \text{m}$, $2,49 \times 10^{-4}$, dan 37,9 MPa pembebanan gelombang dari arah barat.
5. Desain *Frame* Poros yang telah direncanakan cocok untuk pengoperasian pembangkit listrik tenaga arus laut dengan kedalaman 100 m dengan service time maksimal 5 tahun.
6. Nilai kelelahan *chuck* atau penyangga lengan turbin memiliki nilai tertinggi $9,8 \times 10^{-6}$ berdasarkan standar API -RP – 2A- WSD

5.2. Saran

Ada beberapa hal yang perlu ditingkatkan dari penelitian ini diantaranya :

1. Perlu dilakukan penelitian lanjutan dengan sumber data gelombang maupun arus yang lebih valid.
2. *Frame* turbin pembangkit listrik tenaga arus laut sumbu vertikal perlu dilakukan analisa *fatigue* ketika beroperasi
3. Perlu dilakukan analisa *fatigue* dengan metode dan standar *offshore* lainnya.

LAMPIRAN

DAFTAR PUSTAKA

1. Usail, Zaqa, Tugas Akhir Studi Kekuatan Mekanisme Penahan Lengan Turbin Pada Floating Platform PLTAL, Fakultas Teknologi Kelautan ITS, 2018
2. KEISLER J.M, CHOPRA O.K, SHACK W.J., “Statistical models for estimating fatigue strainlife behaviour of pressure boundary materials in light water reactor environments”, Nuclear Engineering and Design 167 p.129-154, Elsevier, 1996.
3. ASM INTERNATIONAL, ASM Metal Handbook, Vol 19 Fatigue and Fracture, 1996.
4. Ridloudin, Ahmad, Tugas Akhir ANALISA PERHITUNGAN UMUR KELELAHAN (FATIGUE LIFE) STRUKTUR HANG TUAH MOgPU PLATFORM DI PERAIRAN NATUNA BARAT, Fakultas Teknologi Kelautan ITS, 2004
5. Arung, Asyer (2016). Analisa Kelelahan Struktur Antar Tiang Pancang Pada Anjungan Lepas Pantai Tipe STS di Selat Makassar dengan Metode Fracture Mechanics. Universitas Sam Ratulangi, Manado.
6. Munib, Ahmadi, Tugas Akhir Analisis Numerik Respon Gerak Pada Lambung Cylindrical Platform PLTAL Laut Dalam, Fakultas Teknologi Kelautan ITS, 2019
7. Yuningsih, A., Masduki, A., Rachmat, B., & Prijantono, A. (2008). Penelitian Potensi Energi Arus Laut Sebagai Pembangkit Listrik Bagi Masyarakat Pesisir di Selat Badung, Nusa Penida, Bali. Puslitbang Geologi Kelautan Bandung. Tidak dipublikasikan.
8. DUXBURY, A; B. ALYN; C. DUXBURY and K.A. SVERDRUP 2002. Fundamentals of Oceanography-4th Ed, McGraw-Hill Publishing, New York.
9. Afandi, Akmal. 2017. PERBANDINGAN UMUR STRUKTUR KAKI JACKET AKIBAT BEBAN AKSIAL DAN BEBAN GELOMBANG. Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin.
10. Chakrabarti, Subrata K. 2005. HANDBOOK OF OFFSHORE ENGINEERING. Vol.I.

11. DNVGL-RP-C203, *Fatigue design of offshore Steel Structures*, Ed. April 2016.
12. DNV – OS – B101, *Offshore Standard, Methalic Material*, Ed April 2009.
13. Dwi Sa'dyah, Mirba H. 2012. Analisis Fatigue Top Side Support Structure Silindris Seastar Tension Leg Platform (TLP) Akibat Beban Lingkungan North Sea. *Jurnal Teknik ITS*. Vol.1 No.1
14. Chakrabarti, Subrata K. 2005. HANDBOOK OF OFFSHORE ENGINEERING. Vol.II.
15. Hendrawan, Jekki., Analisa Kekuatan Struktur Bogie Monorel UTM-125 PT.MBW Menggunakan Analisa Elemen Hingga dengan Bantuan Perangkat Lunak *FINITE ELEMENT* . Depok; Universitas Indonesia, 2013.

LAMPIRAN

BIODATA PENULIS



Saya lahir di Pekanbaru, 19 Januari 1996 dengan nama M Rizky. Saya merupakan saudara laki – laki terakhir dari 3 bersaudara. Pada awalnya saya dibesarkan di Pekanbaru Riau dan disana menempuh jenjang pendidikan selama 12 tahun. Saya sekolah SD Cendana Rumbai Pekanbaru, kemudian melanjutkan MTs Al Ittihadiyah Pekanbaru Riau, dan terakhir saya melanjutkan sekolah di SMA Cendana Rumbai Pekanbaru jurusan IPA. Setelah menempuh jenjang Pendidikan di Pekanbaru, saya melanjutkan studi perkuliahan jenjang diploma 3 Teknik Mesin Universitas Gadjah Mada selama 3 tahun. Kemudian setelah menyelesaikan studi di Yogyakarta, saya melanjutkan jenjang S1 di Teknik Sistem Perkapalan Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Alhamdulillah saya menyelesaikan program lintas jalur selama 2 tahun tepat pada waktunya.