

214/FT.01/TESIS/01/2011



UNIVERSITAS INDONESIA

**ANALISA STABILITAS TURBIN ANGIN TERAPUNG
LEPAS PANTAI TIPE SISTEM TENSION LEG PLATFORM**

TESIS

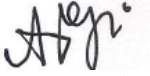
**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Magister Teknik**

**HENDI
0806423564**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
DEPOK
JANUARI 2011**

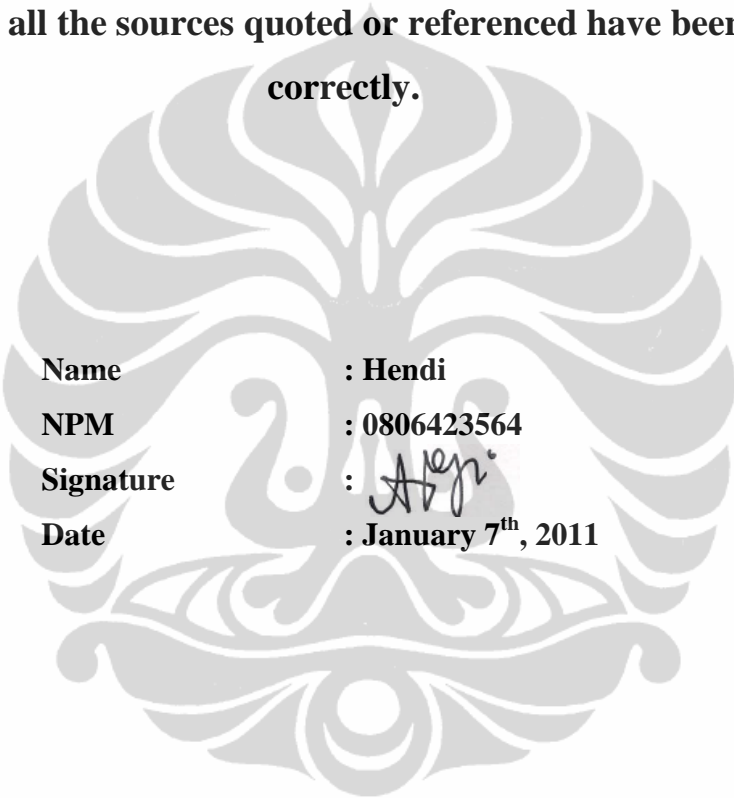
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

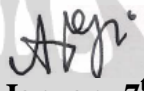
**Tesis ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.**

Nama : Hendi
NPM : 0806423564
Tanda Tangan : 
Tanggal : 7 Januari 2011

ORIGINALITY DECLARATION PAGE

I hereby declare that this thesis is the result of my own individual work, and all the sources quoted or referenced have been stated correctly.



Name : Hendi
NPM : 0806423564
Signature : 
Date : January 7th, 2011

HALAMAN PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh:

Nama : Hendi

NPM : 0806423564

Program Studi : Teknik Sipil

Judul Tesis : Analisa Stabilitas Turbin Angin Terapung Lepas Pantai Tipe
Sistem Tension Leg Platform

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Ir. Iwan Renadi S., MSCE., Ph.D.

Iwan Renadi
(.....)

Penguji : Ir. Sjahril A. Rahim, M.Eng.

Sjahril A. Rahim
(.....)

Penguji : Dr.-Ing. Josia Irwan R., ST., MT.

Josia Irwan R.
(.....)

Penguji : Ir. Sunaryo Ph.D.

Sunaryo
(.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 7 Januari 2011

LEGITIMATION PAGE

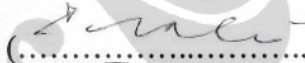
This thesis is submitted by:

Name : Hendi
NPM : 0806423564
Study Program : Civil engineering
Thesis Title : Stability Analysis of Floating Offshore Wind Turbine
Tension Leg Platform System Type

Has been successfully defended in front of the board of Examiners and accepted as part of the requirements to obtain an Engineering Master Degree in Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Indonesia.

BOARD OF EXAMINERS

Advisor : Ir. Iwan Renadi S., MSCE., Ph.D.  (.....)

Examiner : Ir. Sjahril A. Rahim, M.Eng.  (.....)

Examiner : Dr.-Ing. Josia Irwan R., ST., MT.  (.....)

Examiner : Ir. Sunaryo Ph.D.  (.....)

Defined at : Depok

Date : January 7th, 2011

KATA PENGANTAR/UCAPAN TERIMA KASIH

Puji dan syukur saya panjatkan pada Tuhanku Terkasih YESUS atas berkat dan kesehatan yang melimpah sampai saat ini . Penulisan tesis ini ditujukan sebagai salah satu persyaratan untuk mencapai gelar Magister Teknik Program Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bimbingan dan dukungan dari berbagai pihak, akan mustahil penulisan tesis dapat terselesaikan. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada :

1. Bapak Ir. Iwan Renadi Soedigdo, MSCE., Ph.D. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan waktu, tenaga, pemikiran, ilmu dan buku-bukunya selama masa penulisan tesis ini yang menjadikan semangat yang sangat berarti bagi penulis.
2. Para dosen penguji : Ir. Sjahril A. Rahim, M.Eng., Dr.-Ing. Josia Irwan R., ST., MT., Ir. Sunaryo Ph.D. yang sudah meluangkan waktu dan pikirannya untuk membantu memberikan waktu, masukan, ilmu, dan saran.
3. Kedua orang tua, kakak, dan kedua adik penulis yang telah sangat mendukung untuk menyelesaikan tesis ini.
4. Teman-teman Magister Teknik angkatan 2008 yang telah mau bekerja sama dan membagi ilmunya kepada saya.
5. Pengelola tempat-tempat nyaman dan indah untuk belajar. Walaupun usahanya tidak begitu ramai dikunjungi tetapi sangat membantu saya.
6. Para *uploader* buku-buku yang begitu melimpah di internet, sehingga memungkinkan saya untuk mendapatkan pengetahuan yang sangat berharga.
7. Catharina Mila Y. Guritno yang telah banyak meluangkan waktu untuk mendengarkan, memberi semangat, dan mencintai penulis.

Akhir kata, dengan selesainya penulisan tesis ini, penulis berharap semoga tesis ini dapat memberi manfaat bagi penulis pada khususnya dan bagi pembaca pada umumnya. Semoga Tuhan Yang Maha Kuasa senantiasa mencurahkan rahmat dan karunia-Nya kepada kita semua. Amin.

Depok, 7 Januari 2011

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Hendi
NPM : 0806423564
Program Studi : Struktur
Departemen : Teknik Sipil
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Tesis

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif** (*Non-exclusive Royalty-Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul:

**ANALISA STABILITAS TURBIN ANGIN TERAPUNG LEPAS PANTAI
TIPE SISTEM TENSION LEG PLATFORM**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di: Depok
Pada tanggal : 7 Januari 2011
Yang menyatakan



(Hendi)

ABSTRAK

Nama : Hendi
Program Studi : Magister Teknik Sipil (Struktur)
Judul : Analisa Stabilitas Turbin Angin Terapung Lepas Pantai Tipe Sistem tension Leg Platform

Stabilitas struktur turbin angin terapung lepas pantai diperlukan agar turbin angin bisa bekerja di laut lepas. Pembatasan pergerakan rotasi pitch bisa dijadikan kategori stabilitas struktur. Stabilitas struktur bisa ditentukan apabila respon struktur terhadap gaya eksitasi diketahui. Analisa untuk mengetahui respon struktur bisa dilakukan dengan *coupled* atau *uncoupled*. Analisa *coupled* memakan banyak waktu dan biaya. Untuk menganalisa respon struktur juga bisa dilakukan dengan analisa *uncoupled* dengan analisa frekuensi domain yang cukup efisien dan murah.

Pada penelitian ini dilakukan tiga simulasi untuk mengetahui pengaruh parameter tersebut terhadap respon struktur. Simulasi pertama adalah simulasi model struktur *tension leg platform* MIT dan NREL, kedua adalah simulasi kondisi lingkungan laut atau *sea state*, dan ketiga adalah simulasi kedalaman laut.

Analisa *coupled* dengan metode frekuensi domain menunjukkan hasil yang cukup akurat untuk kondisi laut normal. Pada simulasi pertama menunjukkan *tension leg platform* NREL mempunyai stabilitas yang lebih baik dari *tension leg platform* MIT. Semakin meningkat *sea state*, pengaruh gaya gelombang terhadap stabilitas rotasi *pitch* semakin besar sedangkan pengaruh gaya angin semakin kecil. Stabilitas *tension leg platform* NREL dapat dikategorikan sangat baik, Hal ini dilihat dari semua simulasi dan variasi, kategori stabilitas *tension leg platform* NREL masuk dalam kategori operating, kecuali pada variasi *sea state* 8 yang dalam kategori survival.

Kata Kunci : Analisa Stabilitas, Frekuensi Domain, tension leg platform NREL, Analisa uncoupled

ABSTRACT

Name : Hendi
Course : Structural Engineering (Civil Engineering)
Title : Analysis of Stability Floating Offshore Wind Turbine Tension Leg Platform System Type

Structure's stability is needed by floating offshore wind turbine so its can be operated in the open sea. Limitation in pitch motion can be the categorization of structure stability. The stability of structure can be defined by knowing the structural responses. Analysis for structural responses can be done by coupled or uncoupled. Coupled analysis will consume more time and cost. So, uncoupled analysis with frequency domain can be choosen to make the analysis efficient and cheaper.

In this research, uncoupled analysis with frequency domain will be used in the calculation of structural responses. The first simulation is tension leg platform MIT and NREL structure model. Second, simulation of sea state , and the last one is simulation of depth of sea.

Uncoupled analysis with frequency domain method have good accuracy for normal sea state. In the first simulation, tension leg platform NREL have more stability in pitch than tension leg platform MIT. Increasing sea state affected the increase influence of wave force on pitch, and the decrease the influence of wind and current force on pitch. Tension leg platform NREL have good stability in pitch. This can be seen from the result of all simulation and variation, the tension leg platfrom NREL in operating category beside the variation of sea state 8 which ic catagorized as survival.

Keywords : Stabily analysis, frequency domain, tension leg platform NREL, Uncoupled Analysis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
ORIGINALITY DECLARATION PAGE.....	iii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iv
LEGITIMATION PAGE.....	v
KATA PENGANTAR/UCAPAN TERIMAKASIH.....	vi
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS.....	vii
ABSTRAK.....	viii
ABSTRACT.....	ix
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR GAMBAR.....	xv
DAFTAR TABEL.....	xix
DAFTAR SIMBOL.....	xxi
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 LATAR BELAKANG.....	1
1.2 PERMASALAHAN.....	3
1.3 TUJUAN PENELITIAN.....	4
1.4 PEMBATASAN MASALAH.....	5
1.5 SISTEMATIKA PENULISAN.....	6
BAB 2. DASAR TEORI	7
2.1 STRUKTUR TURBIN ANGIN LEPAS PANTAI	7
2.1.1 Struktur Pendukung	9
2.1.2 Tiang	14
2.1.3 Turbin	14
2.2 BEBAN PADA STRUKTUR	14

2.2.1	Beban Permanen	15
2.2.2	Beban Variabel Fungsional	15
2.2.3	Beban Lingkungan	15
2.3	STABILITAS BENDA TERAPUNG	16
2.3.1	Gaya Bouyancy	16
2.3.2	Tinggi Metacentrik	17
2.4	TEORI GELOMBANG	18
2.4.1	Parameter Gelombang	19
2.4.2	Teori Gelombang Linear	19
2.4.3	Teori Gelombang Non Linear	22
2.4.3.1	Teori Trochoidal	22
2.4.3.2	Teori Cnoidal	22
2.4.3.3	Teori Stokes	23
2.4.3.4	Teori Solitary	23
2.4.4	Validitas Teori Gelombang	24
2.4.5	Energi Gelombang	24
2.4.5.1	Energi Potensial (PE)	25
2.4.5.2	Energi Kinetik (KE)	26
2.4.5.3	Total Energi Gelombang	26
2.4.6	Spektrum Gelombang Laut	27
2.4.6.1	Konsep Tinggi Signifikan Gelombang	27
2.4.6.2	Hubungan antara Tinggi Gelombang dengan Spektrum Gelombang	27
2.4.6.3	Model Spektrum	28
2.4.7	Respon spektral Gelombang	30
2.4.8	Respon secara Statistik pada Struktur Linear SDOF akibat Beban Gelombang	30
2.4.8.1	Hubungan antara Spektrum Gelombang dengan Spektra Beban Gelombang	31
2.4.8.2	Hubungan antara Spektra Beban Gelombang dengan Spektra Respon Struktur	32
2.5	RESPONSE AMPLITUDE OPERATOR	33

2.6	TAHAPAN ANALISA FREKUENSI DOMAIN	34
2.7	GAYA HIDRODINAMIK	34
2.10.1	Gaya Inersia	35
2.10.2	Gaya Hambat	35
2.10.3	Gaya Angkat atau Transversal	35
2.8	KOEFISIEN HIDRODINAMIK	36
2.9	ANGIN DAN ARUS	40
2.10.1	Angin	40
2.10.2	Arus	41
2.10	SISTEM MOORING DENGAN TENDON/TETHERS	42
2.10.1	Detail Sistem Tendon	42
2.10.2	Kekakuan Horizontal dan Vertikal Tethers	42
2.11	KRITERIA STABILITAS STRUKTUR TURBIN ANGIN ...	45
2.12	KOMPONEN TURBIN ANGIN	46
BAB 3.	ANALISA TURBIN ANGIN TERAPUNG LEPAS PANTAI	47
3.1	SISTEM KOORDINAT DAN DERAJAT KEBEBASAN (DOF)	47
3.2	PERSAMAAN GERAK SISTEM	48
3.3	MASSA STRUKTUR	48
3.4	GAYA PEMBALIK ATAU KEKAKUAN STRUKTUR	49
3.5	REDAMAN STRUKTUR	53
3.6	GAYA EKSITASI PADA STRUKTUR TERAPUNG	54
3.6.1	Gaya Angin	54
3.6.2	Gaya Arus	57
3.6.3	Gaya Gelombang	58
3.6.3.1	Gaya Hambat	59
3.6.3.2	Gaya Inersia	59
3.6.3.3	Gaya Transversal atau Gaya Angkat	60
3.7	RESPONSE AMPLITUDE OPERATOR	60
3.7.1	Fungsi RAO untuk Derajat Kebebasan Surge	60
3.7.2	Fungsi RAO untuk Derajat Kebebasan Sway	62

3.8	PERPINDAHAN STRUKTUR	63
3.8.1	Perpindahan untuk Derajat Kebebasan Surge	63
3.8.2	Perpindahan untuk Derajat Kebebasan Sway	64
3.8.3	Perpindahan untuk Derajat Kebebasan Heave	64
3.8.4	Perpindahan untuk Derajat Kebebasan Roll	65
3.8.5	Perpindahan untuk Derajat Kebebasan Pitch	66
3.8.6	Perpindahan untuk Derajat Kebebasan Yaw	66
3.9	GAYA TARIK PADA TETHERS	66
3.10	DIAGRAM ALIR PADA MATLAB	67
BAB 4. SIMULASI DAN ANALISA		69
4.1	MODEL STRUKTUR	69
4.1.1	Properti Turbin Angin	69
4.1.2	Model Tension Leg Platform MIT	70
4.1.3	Model Tension Leg Platform NREL	72
4.2	KONFIGURASI SIMULASI	73
4.3	KONDISI LAUT (SEA STATE)	75
4.4	PERBEDAAN ANALISA COUPLED DAN UNCOUPLED.	75
4.5	SIMULASI MODEL STRUKTUR	76
4.5.1	Frekuensi Alami Struktur	76
4.5.2	Kekakuan Struktur	77
4.5.3	Spektrum Gelombang	78
4.5.4	Fungsi Transfer Beban Gelombang	78
4.5.5	Response amplitude Operator	80
4.5.6	Spektra Respon Struktur	81
4.5.7	Perpindahan Translasi dan Rotasi Struktur	82
4.5.8	Gaya Tarik Tethers	83
4.6	SIMULASI KONDISI LINGKUNGAN LAUT	83
4.6.1	Frekuensi Alami Struktur	84
4.6.2	Kekakuan Struktur	84
4.6.3	Spektrum Gelombang	84
4.6.4	Fungsi Transfer Beban Gelombang	85

4.6.5	Response amplitud Operator	86
4.6.6	Spektra Respon Struktur	87
4.6.7	Perpindahan Translasi dan Rotasi Struktur	88
4.6.8	Gaya Tarik Tethers	91
4.7	SIMULASI KEDALAMAN LAUT	91
4.7.1	Frekuensi Alami Struktur	92
4.7.2	Kekakuan Struktur	92
4.7.3	Spektrum Gelombang	94
4.7.4	Fungsi Transfer Beban Gelombang	94
4.7.5	Response amplitud Operator	95
4.7.6	Spektra Respon Struktur	97
4.7.7	Perpindahan Translasi dan Rotasi Struktur	98
4.7.8	Gaya Tarik Tethers	101
BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN		103
5.1	KESIMPULAN	103
5.2	SARAN	105
DAFTAR REFERENSI.....		106
LAMPIRAN		

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1.1. Kapasitas Terpasang Pembangkit Listrik Tenaga Angin di Dunia	1
Gambar 1.2. Teknologi Energi Angin untuk Komersial di Amerika	2
Gambar 1.3. Komposisi Biaya untuk Proyek Pembangkit Listrik Tenaga angin (Turbin Angin) di Laut Dangkal	3
Gambar 2.1. Komponen Turbin angin Lepas Pantai	7
Gambar 2.2. Perkembangan Teknologi Turbin Angin Lepas Pantai	8
Gambar 2.3. Biaya Substruktur Turbin Angin Lepas Pantai dengan kedalaman Laut	8
Gambar 2.4. Jenis Struktur Pendukung di Laut Transisional	9
Gambar 2.5. Struktur Pendukung pada Laut Dalam	10
Gambar 2.6. Mekanisme Gaya Pembalik dan Struktur yang Mewakili .	11
Gambar 2.7. Sistem Mooring	11
Gambar 2.8. Hubungan Diameter Rotor dengan Kapasitas Daya Listrik	14
Gambar 2.9. Elevasi Kapal	16
Gambar 2.10. Kondisi Stabilitas Awal	18
Gambar 2.11. Bagan Pendekatan Teori Gelombang Permukaan	18
Gambar 2.12. Parameter-parameter pada Gelombang Progresif Sederhana	19
Gambar 2.13. Kecepatan dan Percepatan Lokal Fluida	21
Gambar 2.14. Perpindahan Partikel Air untuk Laut Dalam, Transisional, dan Dangkal	21
Gambar 2.15. Bentuk Profil dari Beberapa Teori gelombang	23
Gambar 2.16. Rentang Kesesuaian dari Beberapa Teori Gelombang	24
Gambar 2.17. Sketsa Gambar untuk Menentukan Energi Potensial Gelombang	25
Gambar 2.18. Analisa Pendekatan Frekuensi Domain	31
Gambar 2.19. Tipe Aliran Berdasarkan Bilangan Reynold	37

Gambar 2.20. Koefisien Massa	38
Gambar 2.21. Koefisien Hambat	39
Gambar 2.22. Koefisien Angkat	39
Gambar 2.23. Detail Sistem Tendon	42
Gambar 2.24. Perpindahan pada TLP	43
Gambar 2.25. Kriteria Stabilitas Derajat Kebebasan Pitch	45
Gambar 2.26. Komponen Turbin Angin	46
Gambar 3.1. Sistem Koordinat dan Mode Sistem Gerak	47
Gambar 3.2. Mekanisme Gaya Pembalik Waterplane Area	50
Gambar 3.3. Mekanisme Gaya Pembalik Ballast	51
Gambar 3.4. Mekanisme Gaya Pembalik dari Tethers	52
Gambar 3.5. Tampak Atas dan Konfigurasi Tethers	52
Gambar 3.6. Penampang Tiang yang Tegak Lurus dengan Arah Angin	55
Gambar 3.7. Grafik Karakteristik Operasional Turbin Angin	56
Gambar 3.8. Set-down akibat Translasi Arah Surge	65
Gambar 3.9. Diagram Alir untuk Membuat Subroutine pada MATLAB	68
Gambar 4.1. Model Tension Leg Platform MIT	70
Gambar 4.2. Model Tension Leg Platform NREL	72
Gambar 4.3. Arah Gelombang Datang	73
Gambar 4.4. Frekuensi Angular Alami	77
Gambar 4.5. Spektrum Gelombang Tension Leg Platform MIT dan NREL	78
Gambar 4.6. Fungsi Transfer Beban Gelombang Surge Tension Leg Platform MIT dan NREL	79
Gambar 4.7. Fungsi Transfer Beban Gelombang Sway Tension Leg Platform MIT dan NREL	79
Gambar 4.8. Response Amplitude Operator Surge Tension Leg Platform MIT dan NREL	80
Gambar 4.9. Response Amplitude Operator Sway Tension Leg Platform MIT dan NREL	80
Gambar 4.10. Spektra Respon Struktur Surge Tension Leg Platform MIT dan NREL	81

Gambar 4.11. Spektra Respon Struktur Sway Tension Leg Platform MIT dan NREL	81
Gambar 4.12. Gaya Tarik Tethers Simulasi 1	83
Gambar 4.13. Spektrum Gelombang Simulasi 2	84
Gambar 4.14. Fungsi Transfer Beban Gelombang Surge Simulasi 2	85
Gambar 4.15. Fungsi Transfer Beban Gelombang Sway Simulasi 2	85
Gambar 4.16. Response Amplitude Operator Surge Simulasi 2	86
Gambar 4.17. Response Amplitude Operator Sway Simulasi 2	86
Gambar 4.18. Spektra Respon Struktur Surge Simulasi 2	87
Gambar 4.19. Spektra Respon Struktur Sway Simulasi 2	87
Gambar 4.20. Offset Tension Leg Platform NREL Simulasi 2	88
Gambar 4.21. Set-down Tension Leg Platform NREL Simulasi 2	88
Gambar 4.22. Stabilitas Turbin angin Terapung Lepas Pantai Tipe NREL Simulasi 2	89
Gambar 4.23. Komposisi Pengaruh Beban pada DOF Pitch Simulasi 2 ..	89
Gambar 4.24. Gaya Tarik Tethers Simulasi 2	91
Gambar 4.25. Kekakuan Surge dan Sway Simulasi 3	93
Gambar 4.26. Kekakuan Heave Simulasi 3	93
Gambar 4.27. Kekakuan Roll dan Pitch Simulasi 3	93
Gambar 4.28. Spektrum Gelombang Simulasi 3	94
Gambar 4.29. Fungsi Transfer Beban Gelombang Surge Simulasi 3	95
Gambar 4.30. Fungsi Transfer Beban Gelombang Sway Simulasi 3	95
Gambar 4.31. Response Amplitude Operator Surge Simulasi 3	96
Gambar 4.32. Response Amplitude Operator Sway Simulasi 3	96
Gambar 4.33. Spektra Respon Struktur Surge Simulasi 3	97
Gambar 4.34. Spektra Respon Struktur Sway Simulasi 3	97
Gambar 4.35. Offset Tension Leg Platform NREL Simulasi 3	98
Gambar 4.36. Set-down Tension Leg Platform NREL Simulasi 3	98
Gambar 4.37. Stabilitas Turbin angin Terapung Lepas Pantai Tipe NREL Simulasi 3	99
Gambar 4.38. Komposisi Pengaruh Beban pada DOF Pitch Simulasi 3 ..	99
Gambar 4.39. Gaya Gelombang Simulasi 3	100



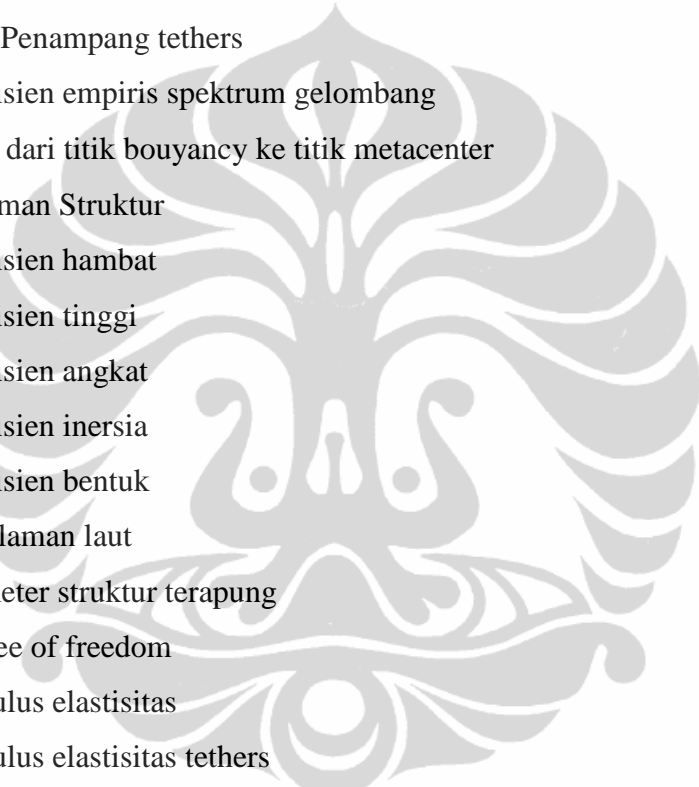
DAFTAR TABEL

		Halaman
Tabel 2.1.	Tabel Resume Rumus Teori Gelombang Linear	20
Tabel 2.2	Nilasi C_s	41
Tabel 2.3	Nilai C_h	41
Tabel 4.1.	Properti Turbin Angin	70
Tabel 4.2.	Properti Platform Tension Leg Platform MIT	71
Tabel 4.3.	Properti Operasional Platform Tension Leg Platform MIT	71
Tabel 4.4.	Properti Platform Tension Leg Platform NREL	73
Tabel 4.5.	Properti Operasional Platform Tension Leg Platform NREL	73
Tabel 4.6.	Parameter Simulasi 1	74
Tabel 4.7.	Parameter Simulasi 2	74
Tabel 4.8.	Parameter Simulasi 3	74
Tabel 4.9.	Kondisi Laut (Sea State)	75
Tabel 4.10.	Frekuensi Angular Tension Leg Platform Analisa Coupled dan Uncoupled	75
Tabel 4.11.	Perbedaan Hasil Akhir Analisa Coupled dan Uncoupled Variasi Kondisi Laut (Sea State)	76
Tabel 4.12.	Perbedaan Hasil Akhir Analisa Coupled dan Uncoupled Variasi Kedalaman Laut	76
Tabel 4.13.	Frekuensi Alami Alami Tension Leg Platform	77
Tabel 4.14.	Kekakuan Tension Leg Platform MIT dan NREL	78
Tabel 4.15.	Translasi dan Rotasi Struktur Tension Leg Platform MIT..	82
Tabel 4.16.	Translasi dan Rotasi Struktur Tension Leg Platform NREL	82
Tabel 4.17.	Translasi dan Rotasi Tension Leg Platform NREL pada Sea State 2	90
Tabel 4.18.	Translasi dan Rotasi Tension Leg Platform NREL pada Sea State 4	90

Tabel 4.19.	Translasi dan Rotasi Tension Leg Platform NREL pada Sea State 6	90
Tabel 4.20.	Translasi dan Rotasi Tension Leg Platform NREL pada Sea State 8	90
Tabel 4.21.	Frekuensi Angular Alami Tension Leg Platform NREL Simulasi 3	92
Tabel 4.22.	Kekakuan 5 Derajat Kebebasan pada Simulasi 3	92
Tabel 4.23.	Translasi dan Rotasi Tension Leg Platform NREL pada Kedalaman Laut 62.5 m	101
Tabel 4.24.	Translasi dan Rotasi Tension Leg Platform NREL pada Kedalaman Laut 100 m	101
Tabel 4.25.	Translasi dan Rotasi Tension Leg Platform NREL pada Kedalaman Laut 200 m	101
Tabel 4.26.	Translasi dan Rotasi Tension Leg Platform NREL pada Kedalaman Laut 300 m	101

DAFTAR SIMBOL

ROMAWI



a	: Amplitudo gelombang
a_x	: Percepatan horizontal partikel
A	: Koefisien empiris spektrum gelombang
A_c	: Luasan yang tegak lurus arah arus
A_T	: Luas Penampang tethers
B	: Koefisien empiris spektrum gelombang
\overline{BM}	: Jarak dari titik bouyancy ke titik metacenter
C	: Redaman Struktur
C_D	: Koefisien hambatan
C_h	: Koefisien tinggi
C_L	: Koefisien angkat
C_M	: Koefisien inersia
C_s	: Koefisien bentuk
d / h	: Kedalaman laut
D_f	: Diameter struktur terapung
DOF	: Degree of freedom
E	: Modulus elastisitas
E_T	: Modulus elastisitas tethers
F	: Gaya pretension
F_a	: Gaya arus
F_b	: Gaya bouyancy
F_D	: Gaya hambatan
F_g	: Gaya gelombang
F_h	: Komponen horizontal gaya pretension
F_I	: Gaya Inersia
F_T	: Gaya pretension total tethers
F_{thrust}	: Gaya lateral yang diterima struktur
F_v	: Komponen vertikal gaya pretension

$F(\omega)$: Fungsi pembebanan
g	: Percepatan gravitasi
\overline{GM}	: Jarak dari titik pusat gravitasi ke titik metacenter
$G(\omega)$: Fungsi transfer beban gelombang
H	: Tinggi gelombang
H_s	: Tinggi signifikan
H_{rms}	: Rata-rata akar kuadrat dari rekaman data tinggi gelombang
$H(\omega)$: Fungsi respon harmonik
k	: Wave number
K	: Kekakuan struktur
\overline{KB}	: Jarak dari keel ke titik pusat bouyancy
KC	: Bilangan Keulegan-Carpenter
KE	: Energi kinetik
\overline{KG}	: Jarak dari keel ke titik pusat gravitasi
$K_{H\&I}$: Kekakuan dari mekanisme hidrostatis dan inersia
K_T	: Kekakuan dari mekanisme tethers
L	: Panjang gelombang
L_T	: Panjang tethers
L_{leg}	: Panjang Leg
M	: Massa struktur
mks	: Sistem satuan internasional (meter-kilogram-second)
M_{thrust}	: Momen yang diterima struktur
PE	: Energi potensial
$p(t)$: Gaya eksitasi harmonik
r	: Jari-jari girasi
RAO	: Response Amplitude Operator
Re	: Reynold number
$S(\omega)$: Spektrum Gelombang
$S_p(\omega)$: Spektra beban gelombang
$S_u(\omega)$: Spektra respon struktur
SDOF	: Single degree of freedom
T	: Periode gelombang

T_w	: Periode aliran yang berosilasi
u	: Kecepatan horizontal partikel
U_m	: Kecepatan maksimum
U_r	: Ursell number
u_{wc}	: Perpindahan akibat angin dan arus
$u(h)$: Kecepatan angin referensi
$u(z)$: Kecepatan angin pada ketinggian tertentu
ν	: Viskositas kinematik
V	: Volume yang dipindahkan Benda Terapung
VBA	: Visual Basic Application
V_c	: Kecepatan arus
VIV	: Vortek Induce Vibration
V_w	: Kecepatan angin di ketinggian tertentu
w	: Kecepatan vertikal partikel
X	: Gaya eksitasi
z_1	: Koordinat z awal
z_2	: Koordinat z akhir
z_f	: Tinggi struktur terapung yang terbenam

SIMBOL YUNANI

γ_w	: Berat jenis benda cair
ε	: Regangan
σ	: Simpangan baku
ϕ	: Potensial gelombang
η_1	: Translasi surge
η_2	: Translasi sway
η_3	: Translasi heave
η_4	: Rotasi roll
η_5	: Rotasi pitch
η_6	: Rotasi Yaw
ξ	: Perpindahan horizontal partikel air
ζ	: Perpindahan vertikal partikel air

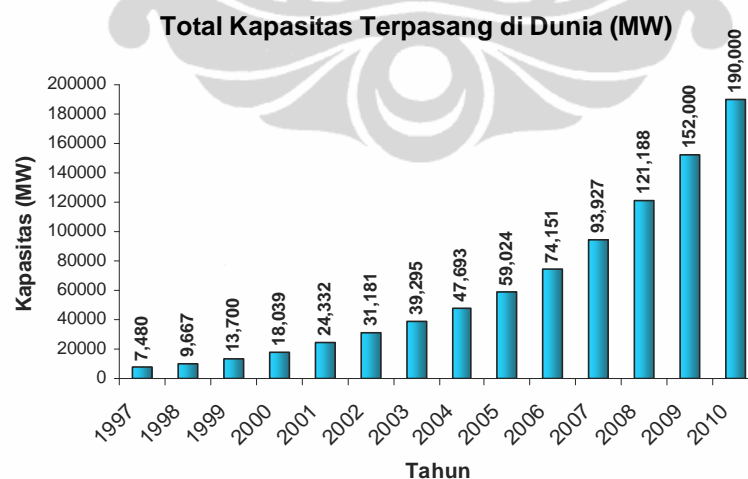
- ρ_w : Densitas / berat jenis air lautnifikan gelombang
 θ : Sudut antara sumbu vertikal dengan tethers
 ω : Frekuensi angular alami
 ω_m : Frekuensi angular maksimum pada spektrum



BAB 1 PENDAHULUAN

1.1. LATAR BELAKANG

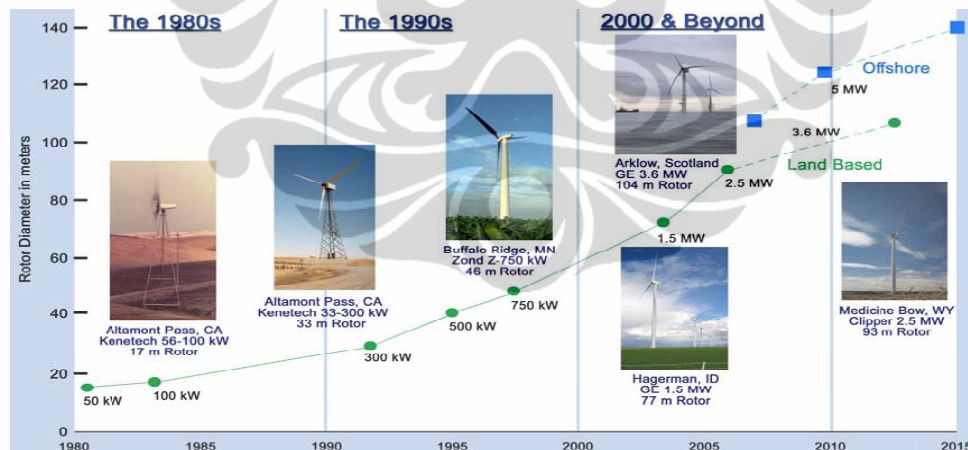
Angin merupakan salah satu sumber energi yang dapat diperbaharui. Pada tahun awal 2000, angin mulai menjadi sumber energi pembangkit tenaga listrik yang sangat diminati. Biaya produksi yang semakin murah menjadikan energi angin mempunyai daya tarik tinggi. Di tahun 1979, biaya produksi untuk mengkonversi energi angin menjadi energi listrik adalah 40 cents/kWh. Perkembangan beberapa faktor yang mempengaruhi biaya produksi seperti ukuran turbin, perkembangan manufaktur, penelitian, dan pengembangan energi angin, menurunkan biaya produksi menjadi 4 – 6 cents/kWh pada tahun 2000. Ditahun 2004, biaya produksinya menjadi 3 – 5 cents/kWh^[19]. Kapasitas energi listrik yang dihasilkan dari turbin angin yang telah dibangun di seluruh dunia pada tahun 2008 adalah 121.188 MW, kapasitas ini meningkat sebesar 29 % dari tahun sebelumnya. Gambar 1.1 merupakan grafik yang menggambarkan peningkatan total energi listrik tenaga angin yang terjadi setiap tahunnya.



Gambar 1.1 Kapasitas Terpasang Pembangkit Listrik Tenaga Angin di Dunia ^[21]
(Catatan: telah diolah kembali)

Amerika Utara dan Asia mempunyai tingkat pembangunan yang tinggi. Khususnya di Asia, Cina mempunyai perkembangan cukup dinamis di tahun 2008, pembangunan turbin angin meningkat dua kali lipat dalam 3 tahun sebelumnya. Saat ini Indonesia berada di posisi ke 66 (enam puluh enam) dalam daftar negara-negara yang membangun instalasi pembangkit listrik tenaga angin di dunia, tertinggal jauh oleh Cina, India, dan Australia yang berada di posisi 4, 5, dan 14. India dan Australia adalah negara-negara yang berdekatan dengan Indonesia secara geografis, sehingga memungkinkan sekali bila Indonesia mempunyai sumber energi angin yang berlimpah seperti negara-negara di atas.

Di Amerika, evolusi teknologi energi angin sebagai pembangkit energi listrik untuk komersial diawali pada tahun 1980-an yaitu dengan dibangunnya Kenetech di Altamont Pass, CA. Diameter *rotor* dari turbin angin adalah 17 m. Evolusi teknologi angin sebagai pembangkit energi listrik secara jelas terlihat pada gambar 1.2. Pada grafik tersebut terlihat turbin angin lepas pantai merupakan teknologi terkini yang sedang dikembangkan untuk menjadi sumber energi pembangkit energi listrik komersial baru.

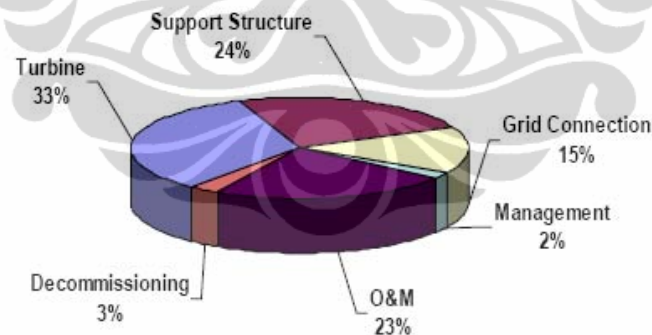


Gambar 1.2 Teknologi Energi Angin untuk Komersial di Amerika^[14].

Pembangunan turbin angin lepas pantai memberikan keuntungan yang dapat menjawab masalah-masalah yang sering terjadi pada turbin angin di daratan. Keuntungan tersebut antara lain :

1. Kecepatan angin lebih tinggi dan variabel penghalang lebih sedikit dibandingkan dengan daratan. Variabel penghalang yang dimaksud adalah bukit, gedung, hutan, dll.
2. Dampak lingkungan dan sosial ke masyarakat lebih kecil dibandingkan dengan turbin angin di daratan, seperti: kebisingan, gelombang elektromagnetik, dan benturan dengan aktivitas dari masyarakat.
3. Ketersediaan area yang luas di daerah lepas pantai dan laut, dibandingkan dengan di daratan.
4. Ketersediaan teknologi laut dalam yang sudah terbukti keandalannya pada industri lepas pantai atau industri minyak dan gas.

Selain dari keuntungan-keuntungan tersebut, keuntungan yang lain adalah turbin angin terapung lepas pantai diharapkan dapat mengurangi biaya yang dikeluarkan untuk struktur pendukung turbin angin di laut dalam dibandingkan dengan tipe *fixed*. Pada gambar 1.3 biaya untuk struktur pendukung mengambil bagian 24 % dari proyek turbin angin.



Gambar 1.3 Komposisi Biaya untuk Proyek Pembangkit Listrik Tenaga Angin (Turbin Angin) di Laut Dangkal [sumber : Laporan CA-OWEE, 2001]

1.2. PERMASALAHAN

Komponen pemicu biaya dalam pembangunan turbin angin terapung lepas pantai antara lain adalah:

- Kriteria desain

- Kondisi angin di lokasi
- Batasan pergerakan turbin angin
- Sifat karakteristik tanah dasar laut
- Kondisi gelombang dan arus
- Variasi pembebanan pada turbin

Salah satu hal yang ditinjau dalam stabilitas adalah pergerakan yang terjadi pada struktur, untuk itu batasan pergerakan turbin angin merupakan komponen yang penting ketika mendesain struktur keseluruhan turbin angin terapung. Batasan pergerakan turbin angin ini harus diakomodasi oleh struktur terapung yang mendukung turbin angin. Pergerakan struktur turbin angin terapung dipengaruhi oleh kondisi angin, arus, dan angin di laut. Untuk itu, perlu menganalisa kategori stabilitas yaitu mengetahui apakah struktur itu bisa beroperasi atau dipindahkan ketika menerima beban dari kondisi lingkungan laut sehingga struktur turbin angin lepas pantai tidak mengalami kerusakan bila kondisi lingkungan laut menjadi ekstrim.

Gaya atau beban lingkungan seperti gelombang, arus, angin, *marine growth*, dll bekerja pada struktur turbin angin terapung lepas pantai perlu di analisa pengaruhnya terhadap struktur. Analisa respon struktur terhadap beban-beban bisa dilakukan dengan cara *coupled* ataupun *uncoupled*. Analisa secara *coupled* adalah analisa dilakukan secara menyeluruh pada komponen-komponen struktur turbin angin secara bersamaan. Komponen-komponen untuk struktur turbin angin lepas terapung yang menggunakan sistem *tension leg platform* adalah turbin angin dan tiang, hull, dan tethers. Analisa *coupled* merupakan analisa *time dependent* (ketergantungan waktu) sedangkan analisa *uncoupled* adalah analisa *time independent* (tidak tergantung oleh waktu) sehingga analisa *coupled* ini cukup mengkonsumsi waktu dan biaya. Analisa *uncoupled* diharapkan dapat menjadikan analisa yang lebih efisien namun mendapatkan hasil yang cukup akurat dan terpercaya.

1.3. TUJUAN PENELITIAN

Tujuan dari penelitian yang ingin dicapai oleh penulis adalah sebagai berikut:

- Merangkum teori-teori perkembangan teknologi turbin angin terapung lepas pantai dan menggunakannya sebagai referensi untuk membuat analisa stabilitas pada turbin angin terapung lepas pantai yang sedang dikembangkan ataupun yang sudah dibuat prototipenya.
- Mempelajari analisa dinamis dengan metode frekuensi domain pada struktur turbin angin terapung lepas pantai akibat pembebanan gelombang.
- Membuat program perhitungan sehingga membantu penulis untuk menganalisa respon struktur dengan metode frekuensi domain.
- Melakukan simulasi model struktur, kondisi lingkungan laut (*sea state*), dan kedalaman laut untuk mengetahui karakteristik respon struktur turbin angin terapung lepas pantai. Simulasi kondisi lingkungan laut dan kedalaman laut menggunakan model turbin angin terapung lepas pantai dengan respon struktur terbaik dari simulasi pertama.
- Menganalisa stabilitas dengan meninjau respon strukturnya, terutama derajat kebebasan arah *pitch*. Teori yang digunakan untuk kriteria pergerakan atau stabilitas adalah kriteria pergerakan yang diusulkan Rick Mercier.

1.4. PEMBATASAN MASALAH

Pada penulisan ini dilakukan pembatasan masalah untuk melakukan analisa stabilitas turbin angin terapung lepas pantai. Batasan-batasan pada penulisan antara lain:

- Struktur terapung adalah tipe *tension leg platform* dengan tethers/tendon.
- Beban lingkungan yang akan dianalisa adalah beban angin, arus, dan gelombang.
- Analisa yang dilakukan pada beban angin dan arus adalah analisa statik.
- Respon struktur *tension leg platform* masih linear.
- Spektrum gelombang yang digunakan adalah *single non-directional*.
- Eksitasi gelombang bersifat *stationary*.
- Analisa dinamis pada struktur turbin angin terapung lepas pantai menggunakan analisa frekuensi domain.

- Gaya eksitasi gelombang, tinggi gelombang dan respon struktur terdistribusi mengikuti teori Gaussian dimana probabilitas variabel yang melewati batasan 3σ hanya 0.26 %.
- Analisa vortek (*vortex induce vibration*) akibat beban angin dan arus tidak dilakukan pada pemodelan ini.
- Permodelan menggunakan bantuan MS.Excel dengan *Visual Basic Application* (VBA) dan *MATLAB release R2009a*.

1.5. SISTEMATIKA PENULISAN

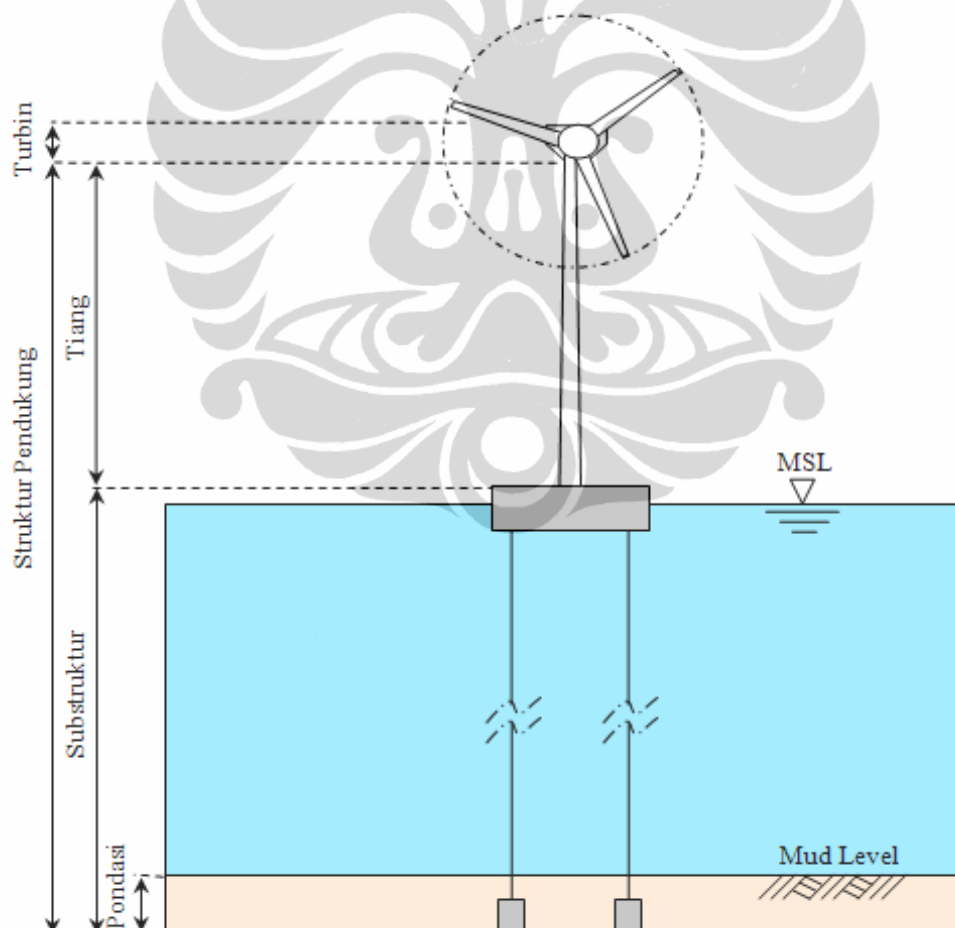
Laporan penelitian ini terdiri atas lima bab dan diharapkan dapat menjelaskan secara jelas dan menyeluruh mengenai studi : **ANALISA STABILITAS TURBIN ANGIN TERAPUNG LEPAS PANTAI TIPE SISTEM TENSION LEG PLATFORM.**

- BAB 1 : Pendahuluan terdiri dari latar belakang, permasalahan, tujuan penelitian, pembatasan masalah, dan sistematika penulisan.
- BAB 2 : Dasar teori terdiri dari struktur turbin angin terapung lepas pantai, beban lingkungan pada struktur, teori gelombang, model spektrum gelombang, analisa frekuensi domain, RAO, spektra beban gelombang.
- BAB 3 : Analisa stabilitas struktur turbin angin terapung lepas pantai. Pada bab tiga membahas penurunan rumus dan persamaan yang akan digunakan pada bab empat.
- BAB 4 : Studi kasus dan hasil dari simulasi di komputer dengan MS Excel dan MATLAB.
- BAB 5 : Kesimpulan dan saran terdiri dari kesimpulan analisa stabilitas yang telah dilakukan.

BAB 2 DASAR TEORI

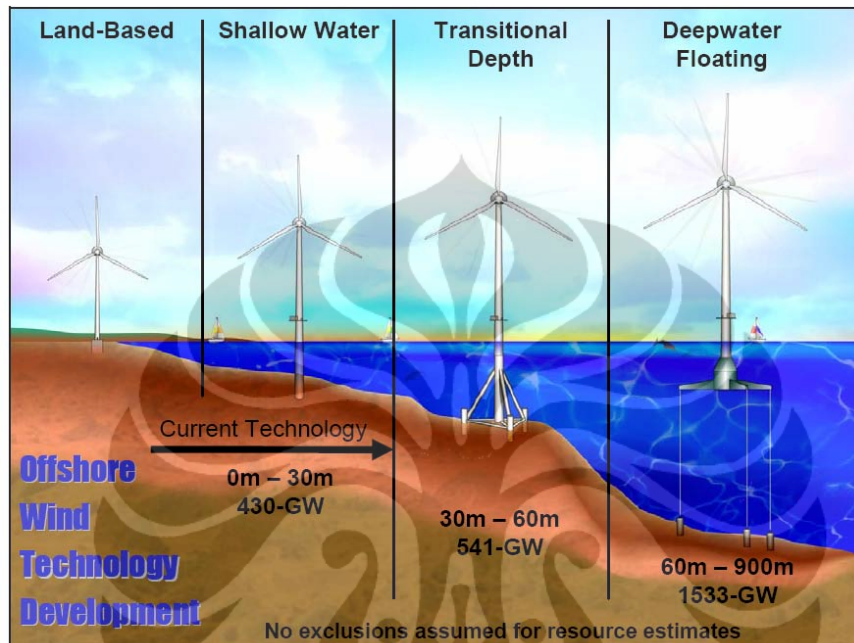
2.1. STRUKTUR TURBIN ANGIN LEPAS PANTAI

Komponen struktur turbin angin lepas pantai dapat dibagi menjadi 2 bagian yaitu struktur pendukung dan turbin, kemudian struktur pendukung dapat dibagi lagi menjadi 2 bagian yaitu tiang dan substruktur. Turbin angin lepas pantai dikategorikan turbin angin terapung lepas pantai jika bagian substrukturnya merupakan struktur terapung. Gambar 2.1 merupakan komponen turbin angin yang telah dijelaskan sebelumnya.

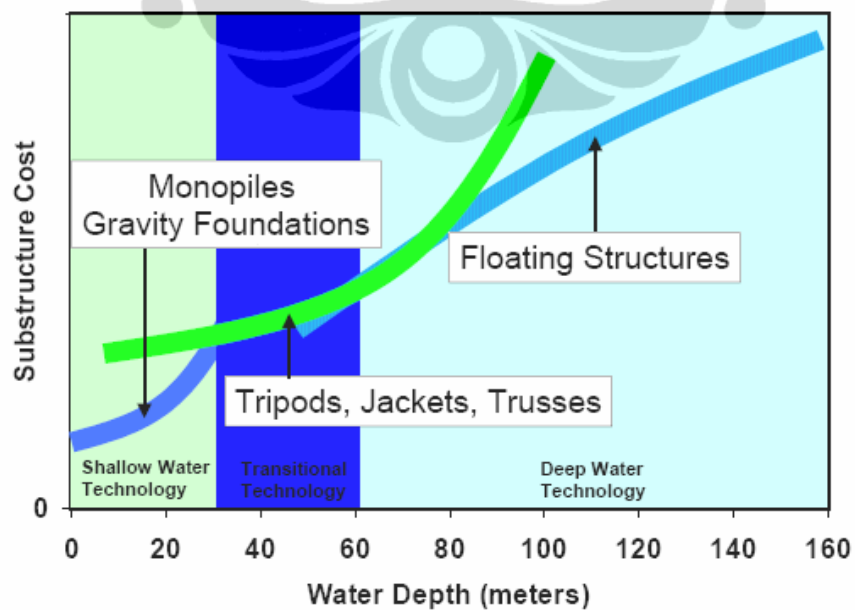


Gambar 2.1 Komponen Turbin Angin Lepas Pantai ^[4].
(Catatan telah diolah kembali)

Secara umum, perkembangan teknologi turbin angin lepas pantai dapat dilihat pada gambar 2.2. Pada awalnya, turbin angin banyak dibangun di daratan, kemudian berkembang di laut dangkal, transisional, dan akhirnya di laut dalam. Semakin ke tengah laut, potensi energi angin akan semakin besar.



Gambar 2.2 Perkembangan Teknologi Turbin Angin Lepas Pantai ^[3].



Gambar 2.3 Biaya Substruktur Turbin Angin Lepas Pantai dengan Kedalaman Laut ^[14].

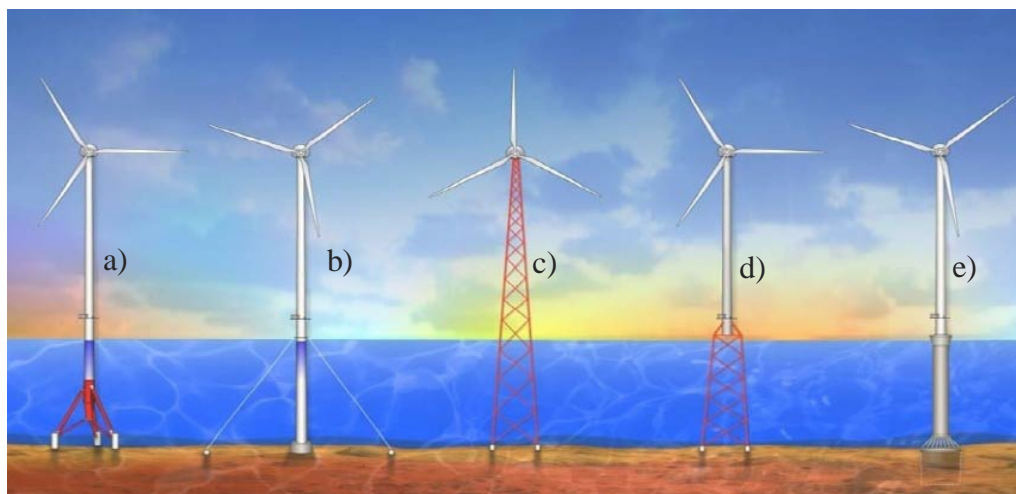
Batasan utama untuk menggunakan tipe struktur tertentu adalah biaya yang diperlukan untuk membangun struktur tersebut. Salah satu komponen yang cukup besar biaya konstruksinya adalah bagian sub struktur. Gambar 2.3 adalah grafik yang menjelaskan bahwa pada kedalaman laut 0 – 30 m, struktur pondasi gravitasi *monopile* lebih dipilih karena dari segi biaya substruktur lebih murah. Kedalaman laut 30 – 60 m dapat dipilih substruktur *tripod*, *jacket*, atau rangka baja. Sedangkan pada kedalaman laut lebih besar dari 60 m mulai menggunakan struktur terapung. Kategori kedalaman laut yang digunakan turbin angin terapung lepas pantai berbeda pada aplikasi industri minyak bumi dan gas alam.

2.1.1. Struktur Pendukung.

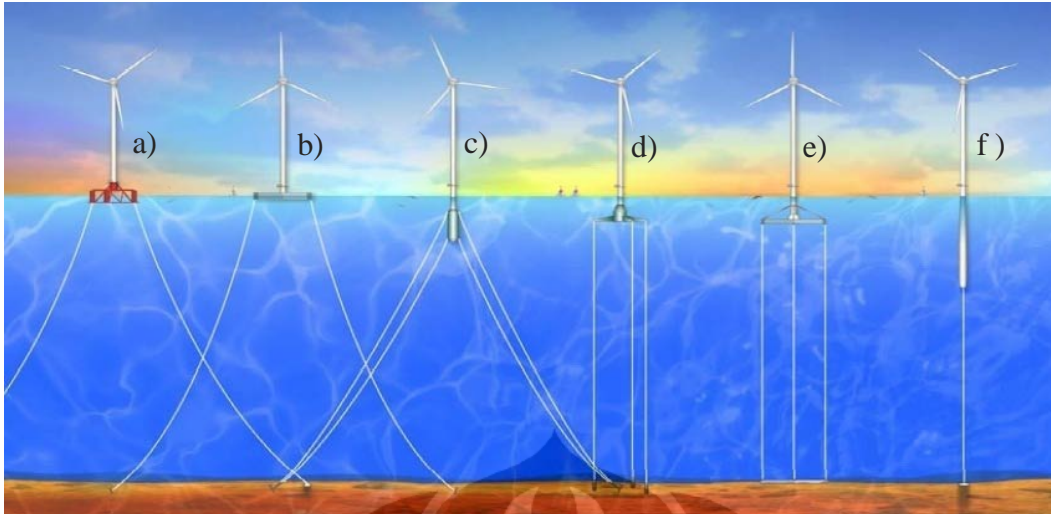
Konfigurasi struktur pendukung dapat dikategorikan menjadi 5 tipe dasar yaitu ^[6] :

1. Struktur *Monopile*.
2. Struktur *Tripod*.
3. Struktur Gravitasi.
4. Struktur *Lattice* (rangka baja).
5. Struktur Terapung.

Struktur pendukung juga bisa merupakan kombinasi dari ke 5 (lima) tipe dasar di atas sehingga didapatkan struktur yang ekonomis dan efisien. Pertimbangan awal untuk pemilihan tipe dasar dari struktur pendukung yang digunakan adalah kedalaman laut.



Gambar 2.4 Jenis Struktur Pendukung di Laut Transisional ^[14].



Gambar 2.5 Struktur Pendukung pada Laut Dalam^[14].

Gambar 2.4 menunjukkan gambar struktur pendukung turbin angin lepas pantai di daerah transisional. Sedangkan gambar 2.5 adalah beberapa contoh pondasi turbin angin terapung lepas pantai. Pada gambar 2.5 (d) dan (e) merupakan turbin angin terapung lepas pantai dengan sistem *tension leg platform* dengan tendons atau tendon.

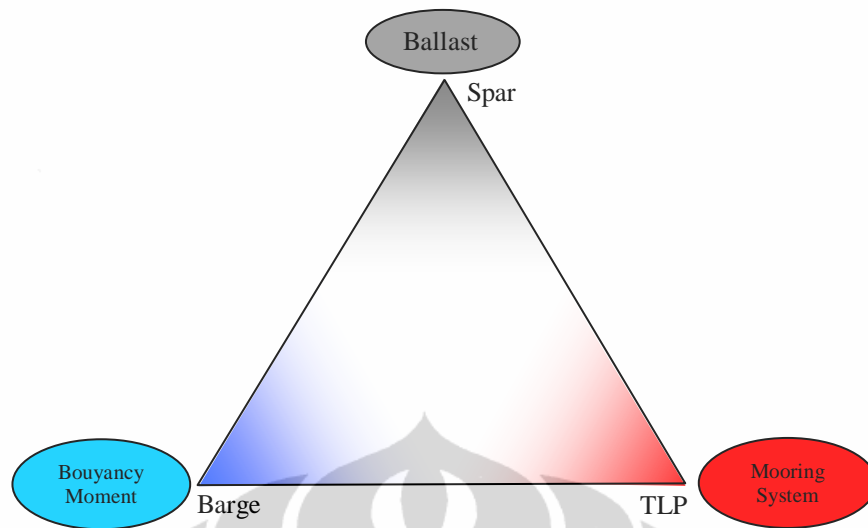
Struktur pendukung turbin angin terapung lepas pantai terdiri dari 3 bagian yaitu struktur terapung (*floating structure*), sistem *mooring*, dan pondasi. Pada poin-poin selanjutnya akan dibahas ketiga bagian tersebut secara detail.

a. Struktur Terapung

Struktur turbin angin terapung lepas pantai dapat di kategorikan berdasarkan mekanisme gaya pembalikannya (*restoring force*). Mekanisme tersebut dibagi menjadi tiga tipe, yaitu^[19]:

1. Momen Luasan penampang basah (*Bouyancy Moment*)
2. *Ballast*
3. *Mooring*

Metode gaya pembalik dan contoh struktur yang menggunakan metode tersebut dapat dilihat pada gambar 2.6 dibawah ini.

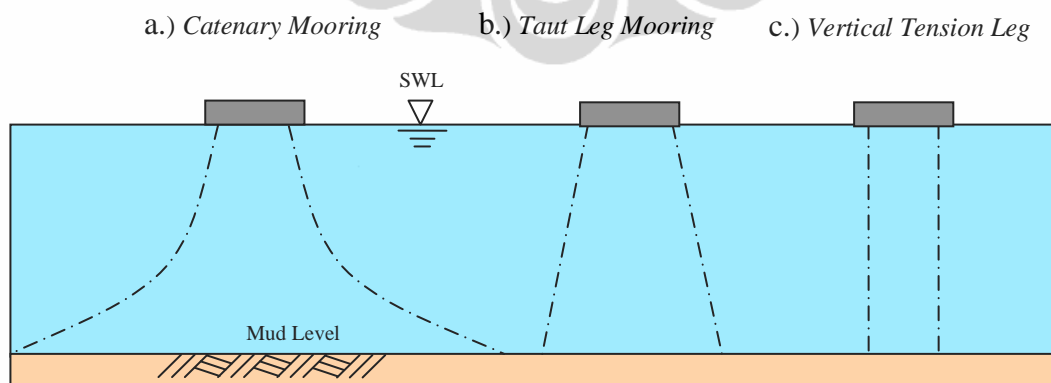


Gambar 2.6 Mekanisme Gaya pembalik dan Struktur yang Mewakili.

Pada gambar 2.6, mekanisme *Ballast* diwakili oleh struktur *spar*, mekanisme *Bouyancy Moment* oleh *barge*, dan mekanisme sistem *mooring* diwakili oleh struktur *tension leg platform*.

b. Mooring

Sistem *mooring* dapat dibagi menjadi tiga tipe yaitu: sistem *catenary*, sistem *taut leg*, dan *vertical tension leg*.



Gambar 2.7 Sistem *Mooring*

- **Sistem *Catenary***

Keuntungan menggunakan sistem ini adalah biaya angkut yang relatif lebih murah. Sedangkan masalah yang sering dihadapi adalah gaya tarik

vertikal tidak memadai untuk menjaga stabilitas struktur di atasnya untuk melawan *overturning*. Pusat berat dan gaya lateral yang bekerja pada struktur turbin angin terapung berada jauh di atas pusat dari *bouyancy*, maka perlu *ballast* untuk ditambahkan dibawah pusat *bouyancy*. Selain itu, *bouyancy* dapat disebar secara merata untuk mendapatkan stabilitas yang baik.

- **Sistem Taut Leg Mooring**

Penggunaan *Taut leg* pada laut dalam akan lebih menguntungkan dibandingkan *catenary mooring*. Hal ini dikarenakan trase kaki *taut leg mooring* lebih pendek sehingga lebih sedikit material *mooring* yang digunakan.

- **Sistem Vertical Tension Leg**

Sistem ini menyediakan stabilitas yang baik bagi struktur atasnya. Struktur atas dapat ditenggelamkan di bawah muka air untuk mengurangi efek beban gelombang bekerja pada struktur tersebut. Sistem ini membutuhkan sistem pengankuran (pondasi) yang dapat menahan gaya vertikal besar. Namun, kekurangan sistem ini adalah biaya pengankuran sistem yang besar.

c. Sistem Pengankuran (Pondasi)

Sistem pengankuran yang umum digunakan pada struktur lepas pantai adalah :

1. *Gravity-Base Anchor*

Angkur ini mengandalkan berat sendiri untuk menahan gaya vertikal dan horizontal. Kapasitas menahan beban adalah perbedaan antara berat sendiri dan *bouyancy*. *Gravity base anchor* dapat digunakan di TLP (*Tension Leg Platform*).

2. *Drag-Embended Anchor*

Angkur ini sesuai untuk penggunaan pada struktur yang memperbolehkan terjadinya pergerakan ankur (*creep*) atau *creep* tidak menjadi faktor kritis. Angkur ini sering digunakan di sistem *catenary mooring* dimana penempatan akurat ankur tidak diperlukan dan tahanan terhadap gaya

horizontal diperlukan. *Vertical-load anchors* (VLA's) adalah Pengembangan *drag embended anchor* dimana angkur dapat menerima beban vertikal besar. Sehingga, VLA's sesuai digunakan untuk turbin angin terapung lepas pantai.

3. *Tiang Pancang (Driven Pile Anchor)*

Tiang pancang merupakan angkur yang sering digunakan di unit produksi minyak dan gas lepas pantai. Tiang pancang di pancang dengan mesin penggetar atau dengan *hammer* sampai ke tanah keras (*sea floor*). Tiang pancang tidak mengalami *creep*, permanen, dan dapat dengan akurat dilokasikan pada suatu titik.

4. *Suction Anchor*

Angkur ini digunakan sebagai alternatif penggunaan *driven-pile embended anchor*. *Suction anchor* efektif digunakan pada sistem *catenary* dan efektif untuk pembebanan vertikal daripada *drag embended anchor*.

5. *Driven Anchor Plate*

Driven anchor plate menggunakan prinsip hampir sama dengan *suction anchor* tetapi menggunakan material lebih sedikit sehingga angkur ini menjadi lebih murah. Keuntungan lain dari angkur ini adalah ketika menerima gaya tarik, *plate* akan berotasi di tanah, sehingga menambah daya dukungnya. Angkur bisa dilokasikan pada titik rencana secara akurat, dapat menahan gaya vertikal besar, tidak mengalami *creep*, proses pemancangan bisa menggunakan *suction anchor*, digetarkan (*vibrated*), dan dipukul (*hammer*).

6. *Torpedo Embended Anchor*

Torpedo embended anchor adalah tiang yang dijatuhkan ke dasar laut dengan menggunakan energi kinetik yang dihasilkan oleh tiang tersebut. Kombinasi dengan ujung *driven plate* akan meningkatkan daya dukung. Biaya menjadi lebih murah untuk digunakan pada turbin angin lepas pantai yang menggunakan sistem *mooring*.

7. *Drilled & Grouted Pile*

Pada pembahasan sebelumnya, angkur-ankur tersebut diasumsikan dapat dipancang ke dasar laut. Namun jika tanah dasar laut adalah batuan, maka

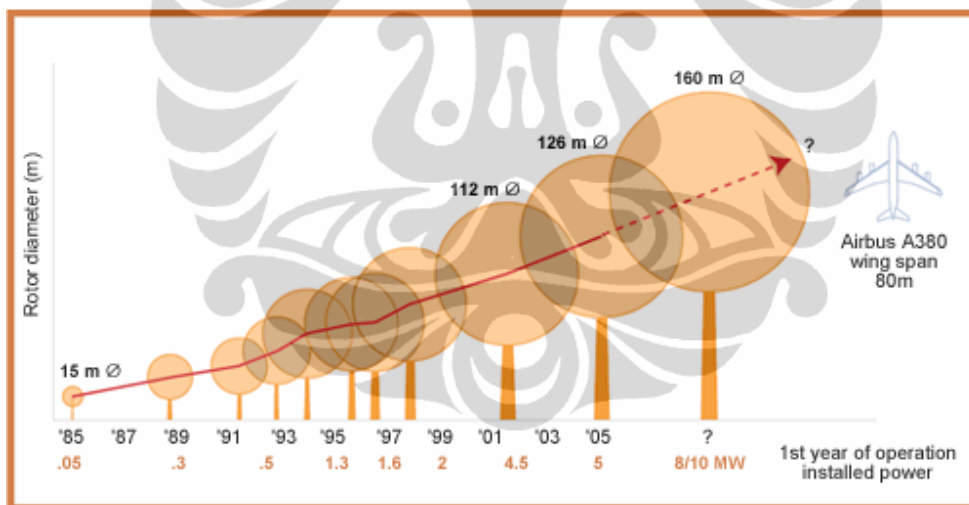
pre-boring perlu dilakukan pada lapisan batuan kemudian di-*grouting* setelah tiang diposisikan pada lubang pengeboran. Jenis tiang ini lebih dapat dipercaya dan diandalkan karena dapat menerima beban vertikal lebih besar daripada tiang pancang. Namun penggunaan tiang ini lebih mahal biayanya karena memerlukan peralatan berat untuk proses instalasi.

2.1.2. Tiang

Pada gambar 2.4, tiang dapat dibagi menjadi 2 tipe yang umum digunakan yaitu tipe *lattice* (rangka batang) dan silinder.

2.1.3. Turbin

Besarnya diameter *rotor* mempengaruhi besarnya kapasitas daya listrik yang dibangkitkan oleh turbin (Gambar 2.6). Sebagai contoh: dengan menggunakan *rotor* yang berdiameter 112 m diharapkan menghasilkan daya listrik 4.5 MW.



Gambar 2.8 Hubungan Diameter Rotor dengan Kapasitas Daya Listrik

2.2. BEBAN PADA STRUKTUR

Pada subbab ini akan membahas beban-beban yang diterima oleh struktur turbin angin terapung lepas pantai. Beban struktur pada Offshore Standard DNV-OS-J101 mengenai “*Design Of Offshore Wind Turbine Structures*” dapat dibagi menjadi :

1. Beban Permanen (G).
2. Beban Variabel Fungsional
3. Beban Lingkungan

2.2.1. Beban Permanen (G)

Beban permanen adalah beban yang tidak berubah besar, posisi, dan arahnya pada periode yang ditentukan. Contoh dari beban ini adalah:

- Massa struktur
- Massa permanen dari *ballast* dan peralatan lainnya
- Tekanan hidrostatis internal dan eksternal dari kondisi alam yang mempunyai sifat permanen
- Gaya reaksi

2.2.2. Beban Variabel Fungsional

Beban variabel fungsional adalah beban yang mungkin bervariasi besarnya, posisi, dan arahnya pada periode waktu yang ditentukan. Contoh dari beban ini adalah :

- Beban orang
- Beban operasional *crane*
- Tumbukan kapal
- Beban dari *fendering*
- Beban yang berhubungan dengan proses instalasi
- Beban dari variabel *ballast* dan peralatan.
- *Lifeboats*

2.2.3. Beban lingkungan

Beban lingkungan adalah beban yang dapat bervariasi besar, posisi, dan arahnya pada waktu tertentu yang berhubungan dengan kondisi operasional dan kerja pada kondisi normal dari struktur. Contoh beban-beban yang dikategorikan sebagai beban lingkungan adalah sebagai berikut :

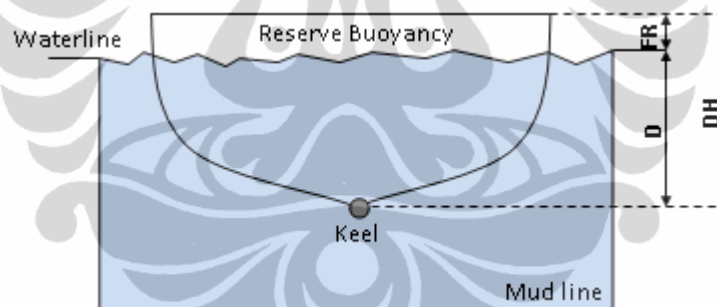
- Beban angin
- Beban hidrodinamik yang terdiri dari gelombang dan arus, termasuk gaya hambat dan inersia.

- Beban gempa
- Beban arus
- Beban pasang surut (*Tidal Effect*)
- *Marine Growth*
- Beban salju dan es

Beban angin dan hidrodinamik akan dibahas secara detail dan jelas, karena digunakan pada analisa stabilitas yang akan dilakukan pada bab selanjutnya, sedangkan beban lain tidak diperhitungkan.

2.3. STABILITAS BENDA TERAPUNG ^[3]

Stabilitas diartikan sebagai kemampuan benda untuk tetap terapung. Mempelajari stabilitas awal adalah mempelajari posisi keseimbangan suatu benda terapung. Untuk itu, konsep Bouguer mengenai metacenter perlu diketahui. Setiap benda terapung mempunyai satu titik pusat *buoyancy* dan satu titik metacenter.



Gambar 2.9 Elevasi Kapal

Pada gambar 2.9 dapat dilihat kondisi kapal yang terapung. Beberapa parameter yang ada adalah : *draft* kapal (D), *freeboard* (FR), dan kedalaman *hull* (*Depth of Hull*, DH) atau tinggi dari kapal tersebut yang termasuk di dalamnya *draft* dan *freeboard* dari kapal.

2.3.1. Gaya Bouyancy

Gaya *Bouyancy* adalah gaya yang dihasilkan volume benda cair yang dipindahkan oleh benda terapung. Gaya *buoyancy* ini bekerja jika :

- Benda tenggelam mempunyai bagian permukaan bawah bisa dimasuki oleh benda cair.
- Bagian bawah benda terapung tidak padat sehingga tekanan cairan dapat bekerja pada bagian tersebut.

Secara sederhana, gaya *bouyancy* dihitung dengan menggunakan persamaan 2.1.

$$F_b = \gamma_w \cdot V \quad (2.1)$$

Dimana:

F_b = Gaya *Bouyancy*

γ_w = Berat jenis benda cair

V = Volume yang dipindahkan oleh benda terapung

Ketika gaya atau momen bekerja sehingga menyebabkan rotasi kecil pada benda terapung dalam keadaan seimbang, tiga kondisi yang mungkin terjadi adalah:

1. Benda kembali ke posisi awal (stabil)
2. Posisi benda terus berubah (tidak stabil)
3. Benda tetap pada posisi perubahannya (*neutral equilibrium*)

2.3.2. Tinggi Metacentrik

Benda terapung dikategorikan stabil bila posisi titik metacenter diatas titik pusat gravitasi. Untuk melakukan perhitungan tinggi metacentrik, maka persamaan 2.2 dapat digunakan.

$$\overline{GM} = \overline{KB} + \overline{BM} - \overline{KG} \quad (2.2)$$

Dan kondisi stabilitas awal stabil apabila:

$$\overline{GM} > 0$$

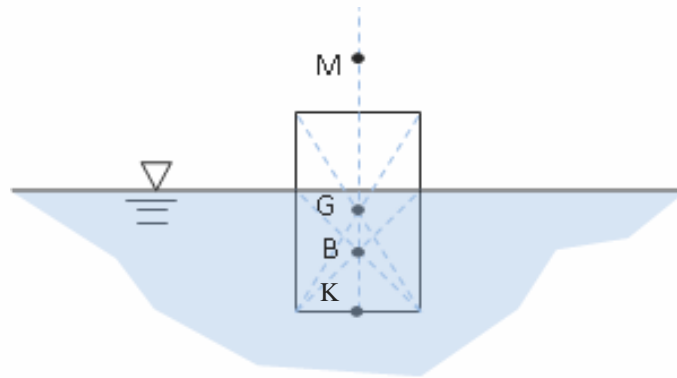
Dimana:

\overline{GM} = Jarak dari titik pusat gravitasi ke titik metacenter (Tinggi Metacentrik)

\overline{KB} = Jarak dari *Keel* ke titik pusat *bouyancy*

\overline{BM} = Jarak dari titik *bouyancy* ke titik metacenter

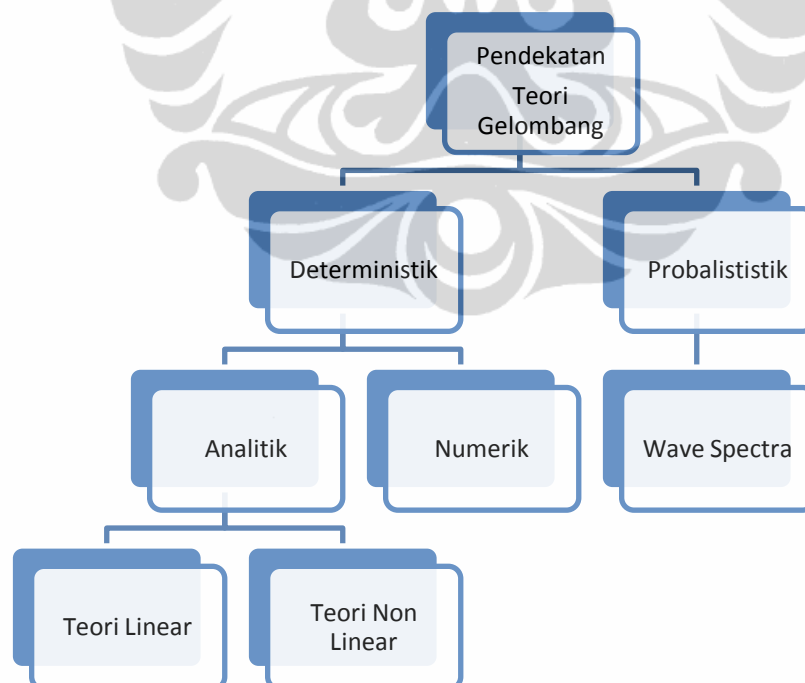
\overline{KG} = Jarak dari *keel* ke titik pusat gravitasi



Gambar 2.10 Kondisi Stabilitas Awal

2.4. TEORI GELOMBANG

Pada subbab sebelumnya dijelaskan bahwa beban gelombang termasuk beban yang diperhitungkan didalam analisa struktur lepas pantai. Pada subbab ini akan menguraikan beberapa teori gelombang secara detail. Beberapa pendekatan teori gelombang khususnya gelombang permukaan (*surface gravity waves*) dapat dilihat pada bagan dibawah ini ^[21].

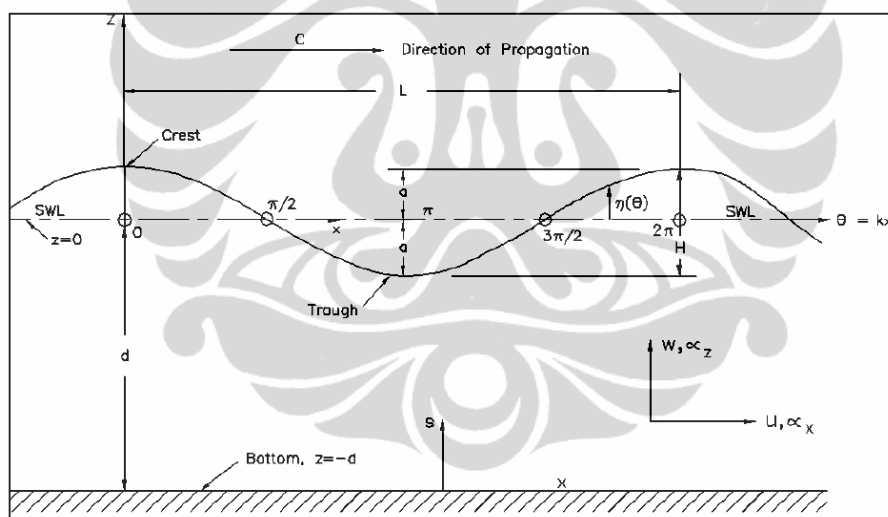


Gambar 2.11 Bagan Pendekatan Teori Gelombang Permukaan

Definisi gelombang laut adalah gerakan osilasi permukaan laut akibat superposisi dari berbagai gaya eksitasi luar seperti angin, efek pasang-surut, seismik, dan gerakan benda di permukaan laut.

2.4.1. Parameter Gelombang

Gelombang progresif dapat ditinjau dengan variabel x (spasial), t (temporal), atau kombinasi (fase) gelombang tersebut. *Crest* adalah istilah yang digunakan untuk puncak gelombang, sedangkan *trough* adalah lembah (titik terendah) pada gelombang. C adalah *wave celerity* atau *phase velocity* $C = L/T$. L adalah panjang gelombang antar 2 *crest* atau *trough* pada posisi yang sama. T adalah periode gelombang. ω adalah frekuensi angular ($\omega = 2\pi/T$). k adalah nomor gelombang (*wave number*) dimana $k = 2\pi/L$. a adalah amplitude gelombang ($a = H/2$).



Gambar 2.12 Parameter-parameter pada Gelombang Progresif Sederhana

2.4.2. Teori Gelombang Linear^[2]

Teori gelombang linear atau teori Airy (*Small amplitude theory, first-order theory*) dikembangkan oleh Airy (1845) dan Laplace (1816). Teori gelombang linear merupakan teori klasik yang penting dan juga mudah digunakan. Teori ini merupakan dasar dari deskripsi spektral probabilitas dari gelombang. Sembilan asumsi pada teori linear adalah:

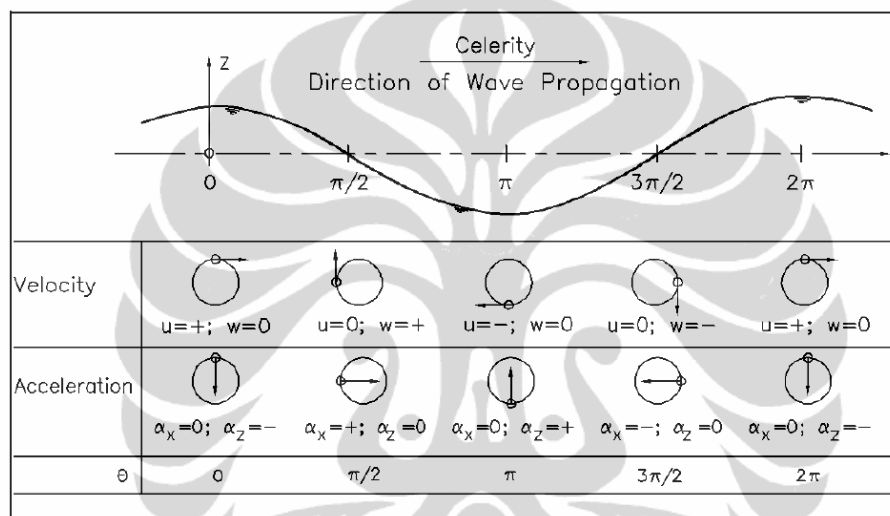
1. Amplitudo (a) sangat kecil dibandingkan dengan panjang gelombang (λ) dan kedalaman air (d).
2. *Velocity Head* (u^2+w^2) / $2g$ lebih kecil dibandingkan dengan tekanan hidrostatis $\rho g z$. u dan w adalah kecepatan partikel air horizontal dan vertikal.
3. Kedalaman air (d) seragam.
4. *Nonviscous* dan irrotational.
5. *Incompressible* dan *nonstratified* (homogeny).
6. Gaya koriolis akibat rotasi bumi diabaikan.
7. Tegangan tarik dipermukaan diabaikan.
8. Permukaan dasar laut halus dan *impermeable*.
9. Level tekanan atmosfer laut (P_0) seragam.

Tabel 2.1 Tabel Resume Rumus Teori Gelombang Linear

Relative Depth	Shallow Water $\frac{d}{L} < \frac{1}{20}$ $kd < \frac{\pi}{10}$	Transitional Water $\frac{1}{20} < \frac{d}{L} < \frac{1}{2}$ $\frac{\pi}{10} < kd < \frac{\pi}{2}$	Deep Water $\frac{d}{L} > \frac{1}{2}$ $kd > \frac{\pi}{2}$
1. Wave profile	Same As >	$\eta = \frac{H}{2} \cos \left[\frac{2\pi x}{L} - \frac{2\pi t}{T} \right] = \frac{H}{2} \cos \theta$	< Same As
2. Wave celerity	$C = \frac{L}{T} = \sqrt{gd}$	$C = \frac{L}{T} = \frac{gT}{2\pi} \tanh \left(\frac{2\pi d}{L} \right)$	$C = C_0 = \frac{L}{T} = \frac{gT}{2\pi}$
3. Wavelength	$L = T\sqrt{gd} = CT$	$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \left(\frac{2\pi d}{L} \right)$	$L = L_0 = \frac{gT^2}{2\pi} = C_0 T$
4. Group velocity	$C_g = C = \sqrt{gd}$	$C_g = nC = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{4\pi d/L}{\sinh(4\pi d/L)} \right] C$	$C_g = \frac{1}{2} C = \frac{gT}{4\pi}$
5. Water particle velocity			
(a) Horizontal	$u = \frac{H}{2} \sqrt{\frac{g}{d}} \cos \theta$	$u = \frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{\cosh[2\pi(z+d)/L]}{\cosh(2\pi d/L)} \cos \theta$	$u = \frac{\pi H}{T} e^{\left(\frac{2\pi z}{L}\right)} \cos \theta$
(b) Vertical	$w = \frac{H\pi}{T} \left(1 + \frac{z}{d} \right) \sin \theta$	$w = \frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{\sinh[2\pi(z+d)/L]}{\cosh(2\pi d/L)} \sin \theta$	$w = \frac{\pi H}{T} e^{\left(\frac{2\pi z}{L}\right)} \sin \theta$
6. Water particle accelerations			
(a) Horizontal	$a_x = \frac{H\pi}{T} \sqrt{\frac{g}{d}} \sin \theta$	$a_x = \frac{g\pi H}{L} \frac{\cosh[2\pi(z+d)/L]}{\cosh(2\pi d/L)} \sin \theta$	$a_x = 2H \left(\frac{\pi}{T} \right)^2 e^{\left(\frac{2\pi z}{L}\right)} \sin \theta$
(b) Vertical	$a_z = -2H \left(\frac{\pi}{T} \right)^2 \left(1 + \frac{z}{d} \right) \cos \theta$	$a_z = -\frac{g\pi H}{L} \frac{\sinh[2\pi(z+d)/L]}{\cosh(2\pi d/L)} \cos \theta$	$a_z = -2H \left(\frac{\pi}{T} \right)^2 e^{\left(\frac{2\pi z}{L}\right)} \cos \theta$
7. Water particle displacements			
(a) Horizontal	$\xi = -\frac{HT}{4\pi} \sqrt{\frac{g}{d}} \sin \theta$	$\xi = -\frac{H}{2} \frac{\cosh[2\pi(z+d)/L]}{\sinh(2\pi d/L)} \sin \theta$	$\xi = -\frac{H}{2} e^{\left(\frac{2\pi z}{L}\right)} \sin \theta$
(b) Vertical	$\zeta = \frac{H}{2} \left(1 + \frac{z}{d} \right) \cos \theta$	$\zeta = \frac{H}{2} \frac{\sinh[2\pi(z+d)/L]}{\sinh(2\pi d/L)} \cos \theta$	$\zeta = \frac{H}{2} e^{\left(\frac{2\pi z}{L}\right)} \cos \theta$
8. Subsurface pressure	$p = \rho g(\eta - z)$	$p = \rho g\eta \frac{\cosh[2\pi(z+d)/L]}{\cosh(2\pi d/L)} - \rho g z$	$p = \rho g\eta e^{\left(\frac{2\pi z}{L}\right)} - \rho g z$

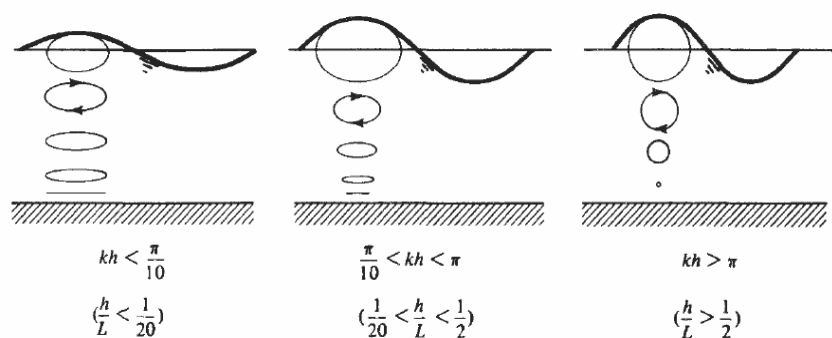
Secara singkat teori linear ini dapat dilihat pada tabel 2.1 yang merangkum persamaan-persamaan mencari parameter gelombang yang ada di teori linear.

u adalah kecepatan horizontal partikel dan w adalah kecepatan vertikal partikel. u dan w adalah *local fluid velocities*. Besar dan arah dari kecepatan lokal fluida ini bervariasi/berperiodik terhadap nilai x atau t . Percepatan dan kecepatan lokal fluida pada gelombang sederhana dapat digambarkan seperti pada gambar 2.13 di bawah ini.



Gambar 2.13 Kecepatan dan Percepatan Lokal Fluida

ξ adalah perpindahan horizontal partikel air, sedangkan ζ adalah perpindahan vertikal partikel air dari posisi rata-ratanya (*mean level*). Pada laut dangkal, partikel air bergerak dengan pada lintasan yang berbentuk elips.



Gambar 2.14 Perpindahan Partikel Air untuk Laut Dalam, Transisional, dan Dangkal.

Pada laut dalam, partikel bergerak pada lintasan berbentuk lingkaran. Gambar lintasan partikel air laut dangkal dan dalam dapat dilihat pada gambar 2.14.

2.4.3. Teori Gelombang Non Linear

Beberapa teori non linear yang penting untuk diketahui adalah trochoidal, cnoidal, stokes, solitary, dan numerical theories. Untuk pembahasan secara detail teori non-linear lainnya dapat dilihat Sarpkaya & Isaacson (1981).

2.4.3.1 Teori Trochoidal

Gerstner (1802) dan Rankine (1863) mengembangkan teori gelombang trochoidal. Tiga perbedaan pada teori gelombang ini dari teori gelombang linear adalah *rotational* fluida, orbit melingkar partikel dan profil gelombang permukaan berbentuk throchoidal. Pentingnya teori gelombang ini adalah menghubungkan antara teori linear dengan teori *finite amplitude oscillatory* yang dikembangkan oleh stokes (1845), Levi-Civita (1925), Struik (1926), dan Havelock (1914).

2.4.3.2 Teori Cnoidal

Teori Cnoidal lebih sesuai diaplikasikan pada laut dangkal. Pertama kali dikembangkan oleh Korteweg dan De Vries (1895) kemudian dilanjutkan oleh Masch dan wiegel (1961). Seperti disarankan oleh Sarpkaya dan Isaacson (1981), parameter gelombang Cnoidal dirumuskan dalam fungsi eliptikal cosinus. Dari sinilah nama Cnoidal berasal. Rentang validitas teori ini adalah $d/L < 1/8$ dimana Ursell number $Ur > 20$. Ur dapat dicari dengan persamaan dibawah ini.

$$U_r = \left(\frac{L}{d}\right)^2 \frac{H}{d} = \frac{L^2 H}{d^3} \quad (2.3)$$

Dimana :

L = Panjang gelombang

d = Kedalaman laut

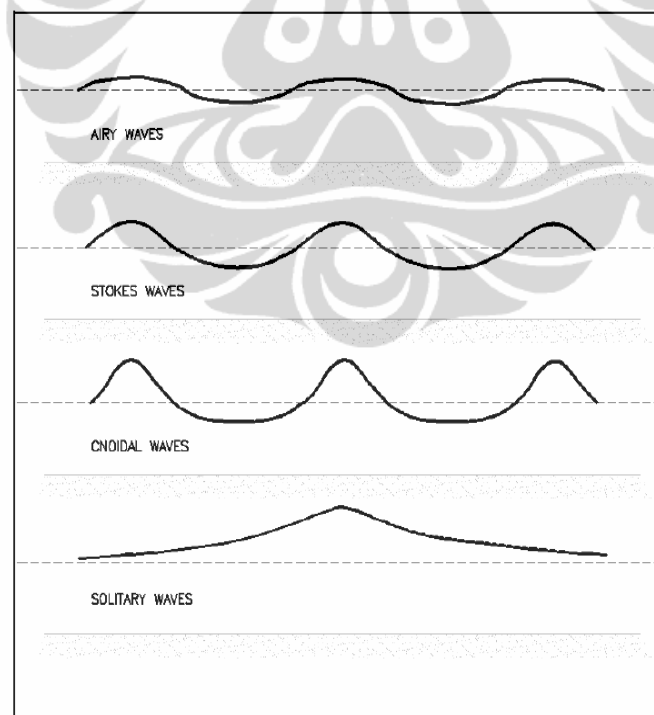
H = Tinggi Gelombang

2.4.3.3 Teori Stokes

Asumsi dasar dari teori ini adalah pergerakan fluida *irrotational*. Teori stokes order kelima banyak digunakan pada laut dangkal dan laut dalam. Prediksi tekanan dan kinematik yang dihasilkan oleh teori Stokes order kelima lebih akurat dibandingkan dengan teori non linear lainnya jika dibandingkan dengan percobaan di labotarium dan pengukuran dilapangan.

2.4.3.4 Teori Solitary

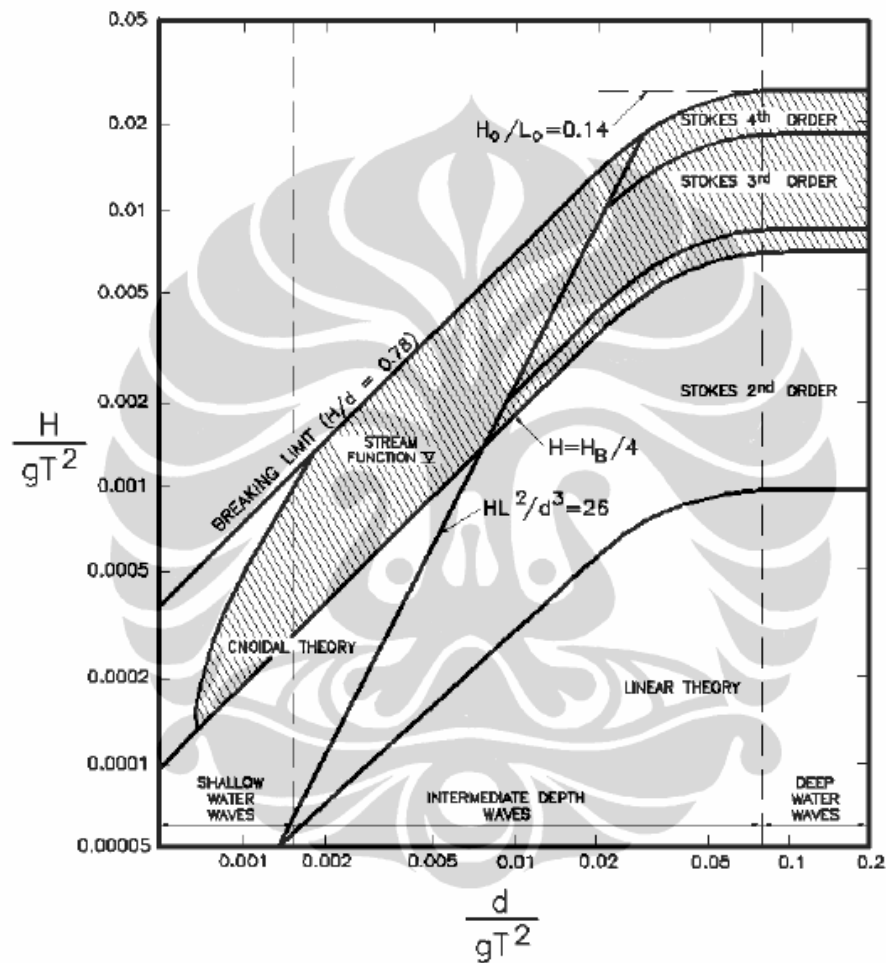
Teori ini mendeskripsikan gelombang yang mempunyai panjang gelombang tidak terhingga dan merambat di air yang mempunyai kedalaman yang seragam. Gelombang ini tidak mempunyai *trough* karena profilnya tidak pernah di bawah *still water level*. Pada gambar 2.15 dapat dilihat dengan jelas perbedaan bentuk profil dari beberapa teori gelombang yang telah dibahas sebelumnya. Bentuk dari profil teori linear Airy juga dimasukkan pada gambar ini sehingga dapat dengan mudah dibedakan dengan bentuk teori non linear lainnya.



Gambar 2.15 Bentuk Profil dari Beberapa Teori Gelombang

2.4.4. Validitas Teori Gelombang

Teori gelombang non linear lebih banyak digunakan untuk menjelaskan fenomena transportasi massa, *wave breaking*, *shoaling*, *reflection*, *transmission*, dan karakteristik non linear lainnya. Kurva pada gambar 2.16 sering digunakan untuk menentukan validitas dari teori-teori gelombang.



Gambar 2.16 Rentang Kesesuaian dari Beberapa Teori Gelombang.

2.4.5. Energi Gelombang

Total energi gelombang terdiri dari 2 jenis energi yaitu energi potensial dan energi kinetik. Energi potensial berasal dari perpindahan pada permukaan bebas. Sedangkan energi kinetik dihasilkan dari pergerakan partikel air melalui fluida.

2.4.5.1 Energi Potensial (PE)

Penurunan dari energi potensial gelombang sinusoidal sederhana adalah sebagai berikut. Energi potensial dari kolom kecil fluida yang ditunjukkan pada gambar 2.17 dengan massa dm yang relatif terhadap dasar adalah^[4].

$$d(PE) = dm g \bar{z} \quad (2.4)$$

Dimana \bar{z} adalah tinggi ke pusat gravitasi dari massa dan bisa dituliskan sebagai

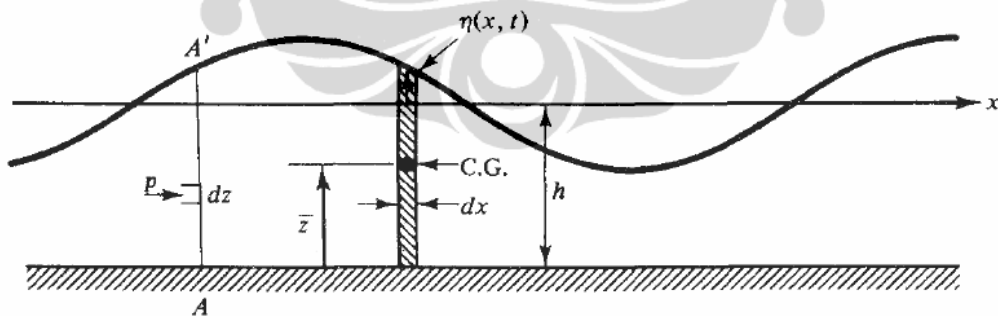
$$\bar{z} = \frac{h+\eta}{2} \quad (2.5)$$

Massa diferensial per satuan lebar adalah

$$dm = \rho(h + \eta)dx \quad (2.6)$$

Rata-rata energi potensial pada satu panjang gelombang progresif dengan tinggi h menjadi:

$$\begin{aligned} (\overline{PE})_T &= \frac{1}{L} \int_x^{x+L} d(PE) = \frac{1}{L} \int_x^{x+L} \rho g \frac{(h + \eta)^2}{2} dx \\ &= \frac{\rho g}{L} \int_x^{x+L} \left[\frac{1}{2} (h^2 + 2\eta h + \eta^2) \right] dx \end{aligned} \quad (2.7)$$



Gambar 2.17 Sketsa Gambar untuk Menentukan Energi Potensial Gelombang^[4]

Hasil dari integrasi persamaan 2.7 adalah energi potensial gelombang:

$$(\overline{PE})_T = \rho g \frac{h^2}{2} + \rho g \frac{H^2}{16} \quad (2.8)$$

Energi gelombang akibat gelombang adalah selisih antara energi potensial dengan hadirnya gelombang dengan keadaan tidak ada gelombang.

$$(\overline{PE})_{waves} = (\overline{PE})_T - (\overline{PE})_{w/o} \quad (2.9)$$

Atau

$$(\overline{PE})_{waves} = \rho g \frac{H^2}{16} \quad (2.10)$$

2.4.5.2 Energi Kinetik (KE)

Energi kinetik adalah energi yang disebabkan oleh pergerakan partikel air. Energi kinetik diasosiasikan dengan sebagian kecil fluida dengan massa dm adalah:

$$d(KE) = dm \frac{u^2 + w^2}{2} = \rho dx dz \frac{u^2 + w^2}{2} \quad (2.11)$$

Untuk mendapatkan energi kinetik rata-rata per satuan luasan permukaan, $d(KE)$ harus diintegrasikan terhadap kedalaman dan dirata-ratakan terhadap panjang gelombang.

$$(\overline{KE}) = \frac{1}{L} \int_x^{x+L} \int_{-h}^{\eta} \rho \frac{u^2 + w^2}{2} dz dx \quad (2.12)$$

Dengan melihat tabel 2.1 untuk mendapatkan parameter u dan v , dan kemudian diintegrasikan dan disederhanakan. Maka didapatkan rumusan energi kinetik seperti dibawah ini.

$$(\overline{KE}) = \frac{1}{16} \rho g H^2 \quad (2.13)$$

2.4.5.3 Total Energi Gelombang

Total energi gelombang adalah total dari energi potensial dan energi kinetik. Total energi rata-rata per satuan luas permukaan (E) adalah

$$E = \overline{PE} + \overline{KE} = \frac{1}{8} \rho g H^2 \quad (2.14)$$

Sedangkan total energi per gelombang per satuan lebar gelombang adalah

$$E_L = \frac{1}{8} \rho g H^2 L \quad (2.15)$$

2.4.6. Spektrum Gelombang Laut

Spektrum gelombang mendeskripsikan kandungan energi dalam gelombang laut dan distribusinya terhadap rentang frekuensi dari gelombang acak. Oleh karena itu, disain dengan menggunakan metode gelombang acak mungkin menjadi penting khususnya ketika mendisain struktur terapung. Gelombang acak biasanya dideskripsikan dengan parameter-parameter statistik, seperti yang terlihat pada tabel 2.1.

2.4.6.1 Konsep Tinggi Signifikan Gelombang

Konsep tinggi signifikan pertama kali dikembangkan oleh Svedrup dan Munk (1947). Kemudian dibahas kembali oleh Wiegel (1949), Bretschneider (1959), dan Kinsman (1965). Tinggi signifikan adalah parameter yang sangat berguna untuk mendeskripsikan gelombang permukaan laut acak dan spektrum gelombang. Tinggi gelombang signifikan didefinisikan sebagai tinggi rata-rata aritmatika dari sepertiga bagian gelombang yang terekam pada data gelombang.

Tinggi signifikan menjadi penting pada mekanika gelombang karena kebanyakan analisa spektrum energi dihubungkan dengan tinggi signifikan gelombang.

2.4.6.2 Hubungan antara Tinggi Gelombang dengan Spektrum Gelombang

Deskripsi gelombang permukaan acak yang dikerjakan oleh Pierson (1952) adalah mengabungkan konsep utama dari mekanika klasik dan teori stokastik menjadi spektrum energi untuk memprediksi perilaku gelombang di laut lepas.

Data tinggi gelombang dianalisa dengan menggunakan fungsi probabilitas densitas Rayleigh yaitu:

$$p(H) = \frac{2H}{H_{rms}^2} e^{-H^2/H_{rms}^2} \quad (2.16)$$

Dimana H_{rms} adalah rata-rata akar kuadrat dari rekaman data tinggi gelombang

Dengan fungsi tersebut didapatkan histogram distribusi dari tinggi gelombang. Hubungan antara tinggi dan spektrum gelombang dapat dilihat dari

hubungan antara energi suatu gelombang dan tinggi gelombang yang ada. Bentuk persamaan untuk gelombang sinusoidal sederhana adalah:

$$\eta(x, t) = A \cos(kx - \omega t) \quad (2.17)$$

Total energi per satuan luas area dari gelombang di atas adalah :

$$E = \frac{1}{2} \rho g A^2 = \frac{1}{2} \rho g H^2 \quad (2.18)$$

Dimana $H = (2A)$.

2.4.6.3 Model Spektrum^[21]

Banyak formula spektrum dikembangkan untuk digunakan dalam mendisain struktur lepas pantai. Formula yang sering digunakan adalah formula spektrum Model Pierson-Moskowitz, Bretschneider, ISSC, dan JONSWAP. Bentuk umum persamaan dari spektrum gelombang adalah sebagai berikut:

$$S(\omega) = A_0 \omega^{-m} e^{-B\omega^{-n}} \quad (2.19)$$

Dimana, A_0 , B , m , dan n adalah koefisien empiris yang mendefinisikan spektrum. Secara umum, nilai $m = 5$ dan $n = 4$ digunakan pada persamaan sedangkan A_0 dan B didapatkan secara empiris.

A. Model Spektrum Pierson Moskowitz

Model spektrum ini dikenal juga sebagai spektrum kecepatan angin karena secara langsung memasukkan variabel kecepatan angin dalam fungsi spektrum. Spektrum kecepatan angin dengan *fetch* yang tidak terbatas mempunyai bentuk umum seperti persamaan dibawah ini:

$$S(\omega) = 0.0081 \frac{g^2}{\omega^5} e^{-B/\omega^4} \quad (\text{m}^2\text{-s/rad}) \quad (2.20)$$

Dimana:

g = Percepatan gravitasi (m^2/s)

ω = frekuensi angular gelombang (rad/s)

$B = 0.74 \left(\frac{g}{V_w}\right)^4$, V_w = Kecepatan angin di ketinggian 19.5 m dari SWL (m/s)

B. Model Spektrum Bretschneider

Model spektrum Bretschneider dikenal juga sebagai spektrum tinggi signifikan-periode gelombang. Spektrum ini menggunakan tinggi signifikan gelombang daripada kecepatan angin sebagai variabel pada fungsi spektrum gelombang. Persamaan fungsinya seperti persamaan 2.20 tetapi variabel B nya merupakan fungsi dari tinggi signifikan seperti pada persamaan 2.21.

$$B = \frac{3.11}{H_s^2} \quad (2.21)$$

Dimana:

H_s = Tinggi signifikan Gelombang (m)

C. Model Spektrum Ochi dan Hubble (1976)

Model spektrum Ochi dan Hubble merupakan pengembangan dari model spektrum Bretschneider (1959). Persamaan model spektrumnya dapat dilihat pada persamaan 2.22.

$$S(\omega) = \frac{1.25 \omega_m^4}{4 \omega^5} H_s^2 e^{-1.25(\omega_m/\omega)^4} \quad (\text{m}^2\text{-s/rad}) \quad (2.22)$$

Dimana:

ω_m = frekuensi angular maksimum pada spektrum (rad/s)

D. Model Spektrum JONSWAP (Joint North Sea Wave Observation Project)

Model spektrum JONSWAP adalah hasil dari eksperimen internasional yang dilakukan di North Sea. Bentuk persamaan dari JONSWAP sangat berbeda dengan persamaan Pierson-Moskowitz. Persamaannya adalah sebagai berikut:

$$S(\omega) = \alpha g^2 e^{[-1.25(\frac{\omega}{\omega_m})]} \cdot \gamma e^{[-(\omega - \omega_m)^2 / 2\sigma^2 \omega_m^2]} \quad (\text{m}^2\text{-s/rad}) \quad (2.23)$$

Dimana :

γ = 3.3 untuk mean data JONSWAP

γ = 7.0 untuk spektrum yang mempunyai puncak yang curam

σ = 0.07 untuk $\omega \leq \omega_m$

σ = 0.09 untuk $\omega > \omega_m$

$\omega_m = 2\pi(3.5)(g/V_w)(\bar{X})^{-0.33}$ (Frekuensi Puncak)

$$\begin{aligned}\alpha &= 0.076 (\bar{X})^{-0.22} \text{ atau } 0.0081 \\ \bar{X} &= gX/V_w^2 \\ X &= \text{Panjang } Fetch, \\ V_w &= \text{Kecepatan angin}\end{aligned}$$

2.4.7. Respon Spektra Gelombang

Respon spektra gelombang adalah kumpulan frekuensi acak yang digunakan untuk menggambarkan variasi sementara hubungan antar gelombang. Hal ini dilakukan dengan analisa spektra dan membuat respon spektra gelombang dari gelombang $x(t)$.

Spektrum gelombang dapat dibentuk dengan deret fourier dimana komponennya mempunyai frekuensi ω_o dapat ditulis dalam bentuk fungsi bilangan kompleks.

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n e^{-in\omega_o t} \quad (2.24)$$

Dimana a_n adalah koefisien fourier dalam bentuk kompleks.

$$a_n = \frac{1}{T} \int_{-r/2}^{r/2} x(t) e^{-in\omega_o t} dt \quad (2.25)$$

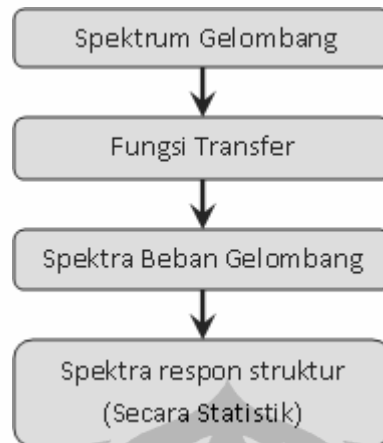
Dimana T adalah periode dari gelombang.

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (2.26)$$

2.4.8. Respon secara Statistik pada Struktur Linear SDOF akibat Beban Gelombang

Ada 3 metode yang biasa digunakan untuk menghitung respon dinamis pada struktur offshore terhadap gelombang yaitu;

1. Analisa Time Domain untuk beban harmonik sederhana
2. Analisa Time Domain untuk beban harmonik banyak
3. Analisa Frekuensi Domain



Gambar 2.18 Analisa Pendekatan Frekuensi Domain^[21]

Pembahasan lebih lanjut difokuskan pada analisa frekuensi domain yang digunakan untuk menganalisa respon struktur pada struktur turbin angin terapung lepas pantai sistem *tension leg platform*. Proses pendekatan frekuensi domain dapat dilihat pada gambar 2.18.

2.4.8.1 Hubungan antara Spektrum Gelombang dengan Spektra Beban Gelombang

Hubungan antara spektrum gelombang dengan spektra beban gelombang didapat dengan menggunakan transformasi Fourier yang hasil akhirnya adalah sebagai berikut:

$$S_p(\omega) = |G(\omega)|^2 S(\omega) \quad (2.27)$$

Dimana :

$S_p(\omega)$ = Spektra beban gelombang

$G(\omega)$ = Fungsi transfer beban gelombang

$S(\omega)$ = Spektrum gelombang

Hubungan antara fungsi pembebanan dengan dengan fungsi transfer beban adalah sebagai berikut:

$$G(\omega) = \frac{\text{Fungsi Pembebanan}}{\text{Tinggi Gelombang}} = \frac{F(\omega)}{H_s} \quad (2.28)$$

2.4.8.2 Hubungan antara Spektra Beban Gelombang dengan Spektra Respon Struktur

Hubungan antara spektra beban gelombang dengan spektra respon struktur dapat dilihat pada persamaan dibawah ini:

$$S_u(\omega) = \frac{1}{k^2} |H(\omega)|^2 S_p(\omega) \quad (2.29)$$

Dimana:

$S_u(\omega)$ = Spektra respon struktur

$H(\omega)$ = Fungsi respon harmonik

$S_p(\omega)$ = Spektra beban gelombang

- Fungsi Respon Beban Harmonik

Persamaan gerak untuk struktur linear adalah seperti persamaan 2.30 berikut.

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p(t) \quad (2.30)$$

$p(t)$ adalah gaya Eksitasi harmonik yang merupakan fungsi konstan dari P_0 dan frekuensi angular (ω).

$$p(t) = p_0 e^{j\omega t} \quad (2.31)$$

Solusi harmonik dari persamaan 2.31 didapatkan dengan metode integrasi Duhamel atau penyelesaian klasik adalah sebagai berikut;

$$u(t) = \frac{P_0}{k} H(\omega) e^{j\omega t} \quad (2.32)$$

Kemudian mensubstitusikan persamaan 2.31 dan 2.32 ke persamaan 2.30, sehingga didapatkan persamaan 2.33, dimana $u(t)$ didifferensiasikan terlebih dahulu menjadi komponen kecepatan dan percepatan.

$$(j^2 m \omega^2 + j c \omega + k) e^{j\omega t} H(\omega) = k e^{j\omega t} \quad (2.33)$$

Karena $j^2 = -1$ maka fungsi respon harmonik menjadi

$$H(\omega) = k(-m\omega^2 + j c \omega + k)^{-1} \quad (2.34)$$

Dalam bentuk mutlak, persamaannya dapat ditulis kembali seperti persamaan dibawah ini;

$$|H(\omega)| = [H(\omega)H^*(\omega)]^{-1/2} = k[(k - m\omega^2)^2 + c^2\omega^2]^{-1/2} \quad (2.35)$$

Dengan mensubstitusi persamaan 2.35 ke persamaan 2.29 maka didapatkan persamaan berikut:

$$S_u(\omega) = \frac{|G(\omega)|^2 S(\omega)}{(k - m\omega^2)^2 + c^2\omega^2} \quad (2.36)$$

Kemudian dari persamaan di atas, didapatkan varians dari respon yaitu:

$$\sigma_v^2 = 2 \int_0^\infty \frac{|G(\omega)|^2 S(\omega)}{(k - m\omega^2)^2 + c^2\omega^2} d\omega \quad (2.37)$$

Persamaan 2.36 dapat ditulis kembali dengan mensubstitusi $G(\omega)$ sehingga didapatkan persamaan di bawah ini :

$$S_u(\omega) = \left(\frac{|F(\omega)/H_s|}{k - m\omega^2 + c\omega} \right)^2 S(\omega) \quad (2.38)$$

2.5. RESPONSE AMPLITUDE OPERATOR

Response amplitude operator adalah amplitudo dari respon struktur per satuan unit amplitudo gelombang. Dari persamaan 2.38 atau persamaan spektra respon struktur bisa didapatkan fungsi transfer yang dinamakan RAO. Hubungan antara RAO dan spektra respon struktur untuk persatuan unit amplitudo adalah:

$$S_u(\omega) = (RAO(\omega))^2 S(\omega) \quad (2.39)$$

Pada persamaan 2.38, fungsi transfer respon struktur untuk per satuan unit tinggi signifikan (H_s). Untuk per satuan unit amplitudo gelombang persamaan fungsi RAO (Response Amplitude Operator) menjadi sebagai berikut, dimana, amplitudo (A) = $H_s/2$:

$$RAO = \frac{|F(\omega)/(H_s/2)|}{k - m\omega^2 + c\omega} \quad (2.40)$$

2.6. TAHAPAN ANALISA FREKUENSI DOMAIN

Analisa yang akan dilakukan adalah dengan mengambil beberapa asumsi yaitu:

- Keenam Derajat Kebebasan dianalisa secara terpisah.
- Respon struktur *tension leg platform* adalah respon yang linear.
- Spektrum gelombang yang digunakan adalah *single-nondirectional*.
- Eksitasi gelombang bersifat *stationary*.
- Gaya eksitasi $p(t)$, tinggi gelombang $\eta(t)$, respon struktur $u(t)$ mengikuti distribusi Gaussian, sehingga probabilitas $u(t)$ melewati batasan $\pm 3\sigma$ adalah 0.26 % atau mempunyai tingkat keyakinan 99.74 %.

Setelah melakukan asumsi-asumsi tersebut, Tahapan analisa frekuensi domain yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Menentukan parameter model yaitu kekakuan (k), massa (m), dan redaman struktur (c) bila diperhitungkan.
2. Menghitung fungsi transfer beban gelombang $G(\omega)$ dengan mengasumsikan teori linear small-amplitude gelombang berlaku.
3. Menghitung spektrum gelombang $S(\omega)$
4. Menghitung varian dari respon struktur (σ) dengan mengganti limit integrasi dari $0 - \infty$ menjadi rentang yang disederhanakan sesuai dengan kurva distribusi yang dihasilkan (contoh = $0 - 2 \text{ rad/s}$).
5. Respon struktur didapatkan dengan persamaan $u = 3\sigma$

2.7. GAYA HIDRODINAMIK

Gaya hidrodinamik terbentuk akibat perubahan nilai momentum yang disebabkan oleh penyebaran gelombang secara mendadak ketika partikel gelombang terhambat oleh benda padat. Sesuai dengan prinsip persamaan Morison bahwa setiap benda yang terapung dan mempunyai massa, apabila dibebani gelombang maka benda akan terkena gaya hidrodinamik (gaya inersia, gaya hambat, dan gaya angkat. Total gaya hidrodinamik horizontal adalah superposisi $F_H = F_I + F_D$.

2.7.1. Gaya Inersia

Gaya inersia adalah gaya dalam aliran fluida yang terjadi akibat adanya partikel fluida^[1]. Gaya inersia diturunkan dari persamaan Newton. Untuk benda silinder yang terapung gaya inersianya adalah sebagai berikut:

$$F_I = m \cdot a \quad (2.41)$$

$$F_I = \rho_w C_M \frac{\pi D_f^2}{4} \int_{-z/2}^{-z/1} \frac{\partial u}{\partial t} dz \quad (2.42)$$

Dimana:

- ρ_w = Densitas air laut
- C_M = Koefisien massa atau inersia
- u = Kecepatan horizontal partikel air
- D_f = Diameter Silinder Terapung

2.7.2. Gaya Hambat

Gaya hambat adalah gaya yang berlawanan dengan arah aliran fluida. Gaya ini terjadi akibat adanya gesekan dan efek hambatan pada partikel yang dipengaruhi oleh faktor bentuk geometri, kekasaran obyek, bilangan reynold, viskositas, dan intensitas turbulensi pada aliran fluida. Persamaan gaya hambat untuk benda silinder yang terapung sebagai berikut:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_w C_D D_f \int_{-z/2}^{-z/1} |u|u dz \quad (2.43)$$

Dimana:

- C_D = Koefisien Hambat
- D_f = Diameter Silinder Terapung

2.7.3. Gaya Angkat atau Transversal

Gaya angkat yang terjadi silinder pada gelombang acak adalah gaya dalam arah transversal dari arah gelombang yang disebabkan oleh *vortex shedding* pada saat gelombang menjalar dalam arah longitudinal. Persamaannya sebagai berikut:

$$F_L = \frac{1}{2} \rho_w C_L D_f \int_{-z/2}^{-z/1} |u|u \partial z \quad (2.44)$$

Dimana:

C_L = Koefisien angkat dan

u = kecepatan horizontal partikel air

Untuk Silinder horizontal, gaya ini bekerja seperti gaya angkat, sedangkan di silinder vertikal gaya ini merupakan gaya transversal yang tegak lurus dengan gaya hambat.

2.8. KOEFISIEN HIDRODINAMIK ^[10]

Secara umum, mempelajari koefisien hidrodinamik adalah mempelajari perilaku dari vortex yaitu formasi, perkembangan, dan bentuk dari vortex. Parameter koefisien hidrodinamik terdiri dari koefisien massa, hambat, dan angkat. Ketiga variabel itu juga dipengaruhi oleh karakter fisik bentuk geometri struktur, properti air laut yang terdiri dari kecepatan viskositas partikel, bilangan Reynolds, dan bilangan Keulegan-Carpenter. Penjelasan parameter-parameter tersebut sebagai berikut:

1. Viskositas

Viskositas di laut menggunakan viskositas Eddy yang merupakan fungsi dari waktu. namun dalam perhitungan, variabel waktu dihilangkan dan kemudian diasumsikan viskositas kinematik konstan sepanjang waktu. Definisi dari viskositas adalah ukuran kekentalan dari cairan atau friksi internal yang timbul ketika fluida mengalir. Semakin pekat suatu cairan semakin tinggi kemampuannya untuk menahan aliran dan semakin tinggi viskositasnya. Viskositas disebut juga rasio tegangan geser terhadap gradien geser. Viskositas terdiri dari dua jenis yaitu dinamik dan kinematik. Viskositas dinamik adalah standar yang digunakan untuk mengukur kekentalan air laut. Satuan dari viskositas ini adalah centipoises (cP). Sedangkan viskositas kinematik adalah rasio viskositas dinamik terhadap berat jenis fluida. Satuan dari viskositas kinematik adalah centistokes (cSt).

2. Bilangan Reynold

Bilangan reynold adalah bilangan yang tidak mempunyai satuan yang menunjukkan bentuk aliran fluida. Jika Nilai R_e rendah maka aliran akan

berbentuk laminar dan efek gaya hambat yang akan menentukan. Bilangan reynold pada struktur silinder dapat dicari dengan persamaan berikut ini :






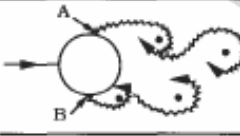
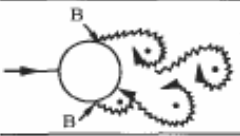

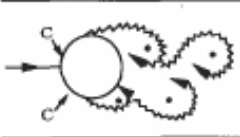
$$R_e = \frac{DU}{\nu} \quad (2.45)$$

Dimana:

D = Diameter silinder

U = Kecepatan fluida

ν = viskositas kinematik

a)		No separation. Creeping flow	$Re < 5$
b)		A fixed pair of symmetric vortices	$5 < Re < 40$
c)		Laminar vortex street	$40 < Re < 200$
d)		Transition to turbulence in the wake	$200 < Re < 300$
e)		Wake completely turbulent. A: Laminar boundary layer separation	$300 < Re < 3 \times 10^5$ Subcritical
f)		A: Laminar boundary layer separation B: Turbulent boundary layer separation; but boundary layer laminar	$3 \times 10^5 < Re < 3.5 \times 10^5$ Critical (Lower transition)
g)		B: Turbulent boundary layer separation; the boundary layer partly laminar partly turbulent	$3.5 \times 10^5 < Re < 1.5 \times 10^6$ Supercritical
h)		C: Boundary layer comple- tely turbulent at one side	$1.5 \times 10^6 < Re < 4 \times 10^6$ Upper transition
i)		C: Boundary layer comple- tely turbulent at two sides	$4 \times 10^6 < Re$ Transcritical

Gambar 2.19 Tipe aliran Berdasarkan Bilangan Reynold

3. Bilangan Keulegan-Carpenter

Bilangan Keulegan-Carpenter merupakan indikasi variabel untuk menunjukkan apakah ada gerakan transversal yang terjadi akibat *vortex shedding*. Eksperimen dari Sarpkaya menunjukkan kemungkinan 90 % terjadi *vortex shedding* apabila nilai $K > 5$. Sumber lain yaitu Summer pada bukunya “hydrodynamics around cylindrical structures “ merangkum berbagai nilai KC dan *regime* dari fluida dengan nilai bilangan reynold = 10^3 . Persamaan 2.46 dapat digunakan untuk mencari bilangan KC .

$$KC = \frac{U_m T_w}{D} \quad (2.46)$$

Dimana :

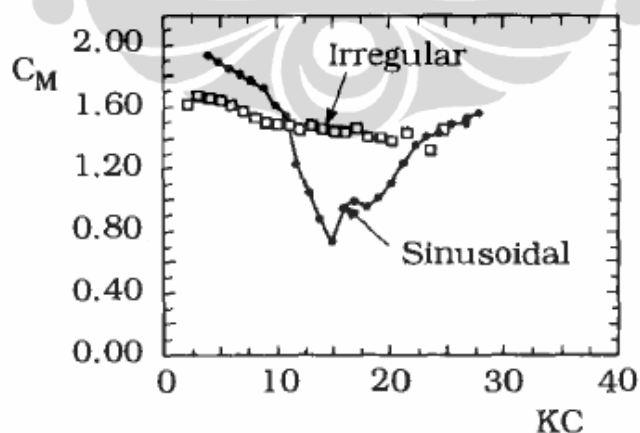
U_m = Kecepatan maksimum

T_w = Periode aliran yang berosilasi

D = Diameter Silinder

4. Koefisien Massa

Sebuah benda terapung yang bergerak akibat beban harmonik maka ada bagian dari air yang ikut bergerak. Komponen ini diperhitungkan sebagai massa tambahan pada struktur.



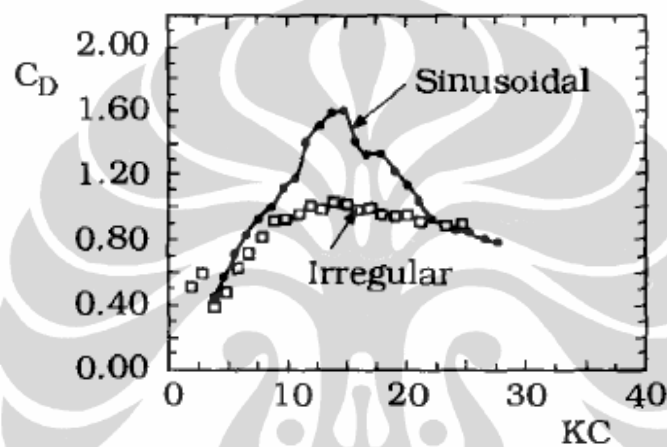
Gambar 2.20 Koefisien Massa (Longoria 1991)

Massa tersebut diperhitungkan sesuai dari geometri struktur, properti air laut, dan merupakan fungsi dari koefisien massa yang digambarkan sebagai fungsi dari bilangan Reynolds dan bilangan Keulegan-Carpenter. Gambar 2.20 menunjukkan

koefisien massa dari benda berbentuk silinder pada gelombang acak dan sinusoidal.

5. Koefisien Hambat

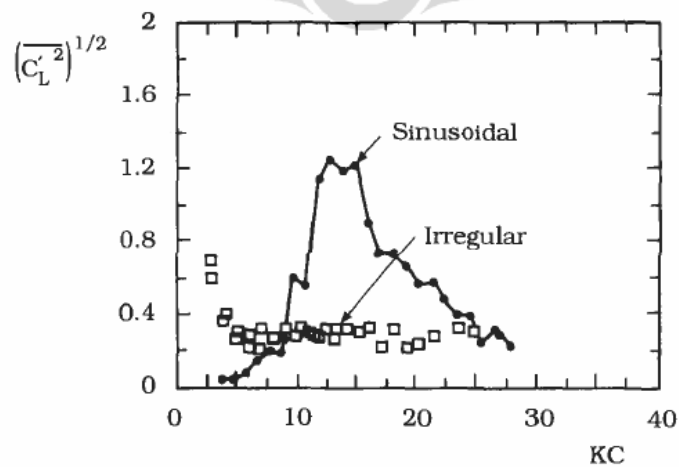
Pada Gelombang yang menjalar dan berinteraksi dengan struktur, partikel fluida akan terbentuk gaya hambat. Gaya hambat dipengaruhi oleh koefisien hambat yang merupakan fungsi bilangan Keulegan-Carpenter dan bilangan Reynold. Pada gambar 2.21 dapat dilihat koefisien hambat pada gelombang acak atau sinusoidal.



Gambar 2.21 Koefisien Hambat (Sarpkaya dan Justensen)

6. Koefisien Angkat

Gaya angkat dipengaruhi oleh variabel koefisien angkat yang merupakan fungsi dari bilangan Reynolds dan bilangan Keulegan-Carpenter.



Gambar 2.22 Koefisien Angkat (C_L)

2.9. ANGIN DAN ARUS

2.9.1. Gaya Angin

Kecepatan angin adalah parameter penting dalam menghitung gaya angin yang bekerja pada struktur. Kecepatan rata-rata angin pada ketinggian tertentu dari kecepatan angin referensi dapat dihitung dengan rumusan dibawah ini:

$$\bar{u}(z) = \left(\frac{z}{h}\right)^{\frac{1}{n}} \bar{u}(h) \quad (2.47)$$

Dimana:

$\bar{u}(h)$ = Kecepatan angin referensi

z = Tinggi kecepatan angin yang dicari

h = Tinggi angin referensi

$\bar{u}(z)$ = Kecepatan angin yang di cari

n = faktor n ($n = 3$ untuk *rough coastal areas*, $n = 7 - 6$ untuk area yang tidak ada gangguan, $n = 12 - 13$ untuk *gust*).

Variabel n yang akan digunakan pada perhitungan adalah $n = 7$, karena turbin angin terapung berada di daerah lepas pantai yang diasumsikan tidak banyak gangguan yang terdapat di daerah tersebut.

Gaya angin dapat dihitung setelah mendapatkan kecepatan angin pada ketinggian tertentu (kecepatan angin referensi). Persamaan DNV dan ABS yang sering digunakan adalah seperti yang terlihat pada persamaan 2.48.

$$F_w = f \cdot C_h \cdot C_s \cdot u(z)^2 \text{ N/m}^2 \text{ (kgf/m}^2, \text{ lbf/ft}^2) \quad (2.48)$$

Dimana:

f = 0.611 (0.0623, 0.00338)

$u(z)$ = Kecepatan angin dalam m/s (m/s, kn)

C_s = Koefisien bentuk (Gambar 2.21)

C_h = Koefisien tinggi (lihat tabel 2.3)

Tabel 2.2 Nilai C_s

NO	Bentuk Struktur	C_s
1	Spherical	0.40
2	Silinder	0.50
3	Hull (Tipe Permukaan)	1.00
4	Deck	1.00
5	Bentuk Struktur yang terisolasi (Crane, Angles, Channels, Balok)	1.50
6	Area di bawah deck (Permukaan Halus)	1.00
7	Area di bawah deck (Balok dan Girder)	1.30
8	Rig Derrick	1.25

Tabel 2.3 Nilai C_h

Ketinggian (m)	C_h
0.0 - 15.3	1
15.3 - 30.5	1.1
30.5 - 46.0	1.2
46.0 - 61.0	1.3
61.0 - 76.0	1.37
76.0 - 91.5	1.43
91.5 - 106.5	1.48
106.5 - 122.0	1.52
122.0 - 137.0	1.56
137.0 - 152.5	1.6
152.5 - 167.5	1.63
167.5 - 183.0	1.67
183.0 - 198.0	1.7
198.0 - 213.5	1.72
213.5 - 228.5	1.75
228.5 - 244.0	1.77
244.0 - 259.0	1.79
259.0	1.8

2.9.2. Gaya Arus

Gaya arus bervariasi terhadap kedalaman. Gaya arus dapat diestimasi menggunakan pendekatan quasi statik yaitu dengan menjumlahkan gaya yang terjadi pada potongan horizontal bidang yang langsung terkena gelombang.

$$F_c = \frac{1}{2} \rho_w C_D A_C V_C^2 \quad (2.49)$$

Dimana:

A_c = Luasan yang tegak lurus arah arus

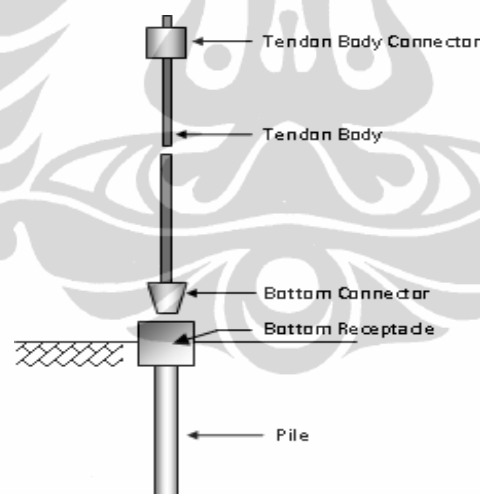
V_c = Kecepatan arus

2.10. SISTEM MOORING DENGAN TENDON / TETHERS

Sistem tethers tergantung pada kekakuan dan tarikan untuk membuat suatu gaya pembalik (*restoring force*) sehingga struktur dalam kondisi stabil.

2.10.1. Detail Sistem Tendon

Sistem tendon terdiri dari *tendon body connector*, *tendon Body*, *Bottom Connector*, dan *bottom receptacle*. Pada gambar 2.23 dapat dilihat dengan jelas sistem tendon.



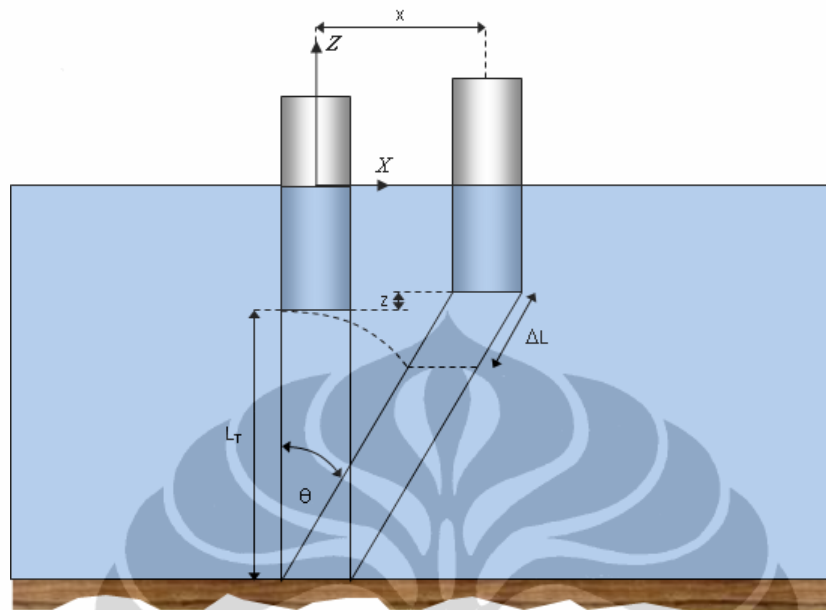
Gambar 2.23 Detail Sistem Tendon

Tendon untuk *mooring* turbin angin terapung lepas pantai dapat menggunakan beberapa bahan material seperti rantai, *wire rope*, atau *synthetic (fibre) rope*.

2.10.2. Kekakuan Horizontal dan Vertikal Tethers^[11]

Kekakuan horizontal dari TLP dengan tethers vertikal dipengaruhi oleh gaya prategang tethers dan panjang dari tethers, sedangkan kekakuan vertikal dari

tethers tergantung pada luas penampang tethers yang digunakan, modulus elastisitas tethers, dan panjang dari tethers.



Gambar 2.24 Perpindahan pada TLP

Pada gambar 2.24 dapat dilihat kondisi sebelum dan sesudah terjadinya perpindahan. Dengan melihat kondisi tersebut, Beberapa persamaan akan diturunkan untuk mendapatkan persamaan kekakuan horizontal dan vertikal dari tether.

$$\sin(\theta) = \frac{x}{L+\Delta L} \quad (2.50)$$

$$\cos(\theta) = \frac{L+z}{L+\Delta L} \quad (2.51)$$

$$\sigma = E \cdot x \cdot \varepsilon \quad (2.52)$$

$$F = E \cdot A \cdot \frac{\Delta L}{L} \quad (2.53)$$

Untuk komponen gaya pretension searah sumbu x

$$F_h = F \sin(\theta) \quad (2.54)$$

$$F_h = F \frac{x}{L+\Delta L} \quad (2.55)$$

Dengan mengasumsikan gaya prategang pada sebelum dan sesudah terjadi perpindahan tidak berubah, maka penambahan tegangan akibat penambahan panjang tether diabaikan ($\Delta L \approx 0$). Persamaannya menjadi

$$F_h = \left(\frac{F}{L}\right) x = K_h \cdot x \quad (2.56)$$

Sehingga Kekakuan untuk komponen horizontal adalah

$$K_h = \frac{F}{L} \quad (2.57)$$

Untuk komponen gaya pretension searah sumbu z (vertikal);

$$F_v = F \cos(\theta) \quad (2.58)$$

$$F_v = (E A) \left(\frac{\Delta L}{L}\right) \cos(\theta) \quad (2.59)$$

Dimana ΔL

$$(L + \Delta L) \cdot \cos(\theta) = L + z \quad (2.60)$$

$$\Delta L = \frac{L+z-L \cos(\theta)}{\cos(\theta)} \quad (2.61)$$

Dengan mensubstitusi persamaan (2.61) ke (2.59) dan mengasumsikan sudut (θ) kecil sehingga $\cos \theta \approx 1$ maka persamaannya menjadi

$$F_v = \left(\frac{E A}{L}\right) \cdot z = K_v \cdot z \quad (2.62)$$

Sehingga kekakuan vertikal dari tethers adalah sebagai berikut;

$$K_v = \frac{E \cdot A}{L} \quad (2.63)$$

Dimana:

F = Gaya Prategang (N)

E = Modulus Elastisitas Tethers (N/mm²)

A = Luas Penampang Tethers (mm²)

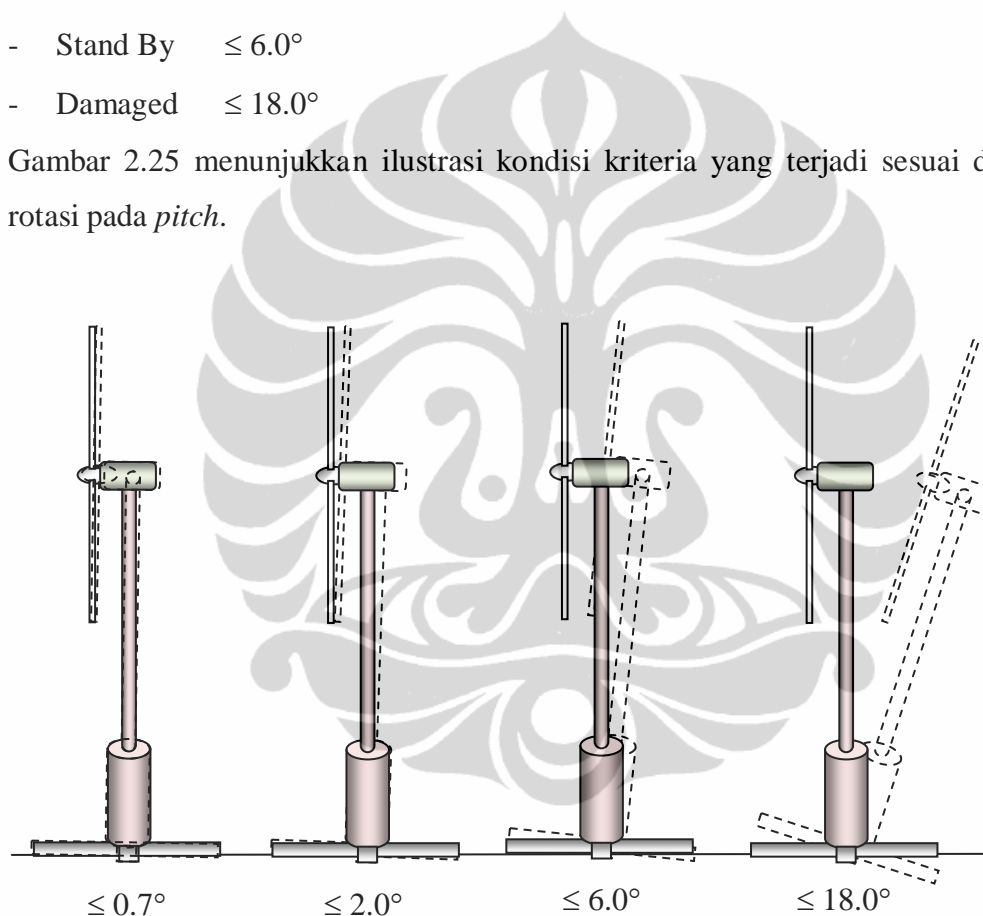
L = Panjang Tethers (m)

2.11. KRITERIA STABILITAS STRUKTUR TURBIN ANGIN^[12]

Rick Mercier (2004) menyatakan bahwa kriteria stabilitas pada turbin angin terapung lepas pantai agar bisa bekerja dapat dilihat dari besarnya *pitch* yang terjadi pada struktur. Kriteria stabilitas struktur turbin angin terapung lepas pantai sebagai berikut:

- Operating $\leq 0.7^\circ$
- Survival $\leq 2.0^\circ$
- Stand By $\leq 6.0^\circ$
- Damaged $\leq 18.0^\circ$

Gambar 2.25 menunjukkan ilustrasi kondisi kriteria yang terjadi sesuai dengan rotasi pada *pitch*.



Gambar 2.25 Kriteria Stabilitas Derajat Kebebasan Pitch

Pada kategori operating, Struktur turbin angin terapung lepas pantai masih dapat beroperasi normal. Kategori survival adalah kondisi stabilitas satu tingkat di atas operating dimana turbin angin terapung lepas pantai masih selamat atau dapat bekerja. Pada saat turbin angin terapung lepas pantai dalam kategori stand by adalah kondisi dimana turbin angin terapung dihentikan operasinya atau di posisi

stand by. Kategori damaged adalah kondisi yang dapat menyebabkan kerusakan pada struktur turbin angin terapung lepas pantai.

2.12. KOMPONEN TURBIN ANGIN

Pengetahuan komponen-komponen pada turbin angin perlu diketahui untuk menyamakan persepsi dan istilah yang digunakan. Pada gambar 2.26 dapat dilihat istilah komponen-komponen yang ada di turbin angin terapung lepas pantai, komponen-komponen tersebut tidak dibahas secara detail pada penulisan ini.



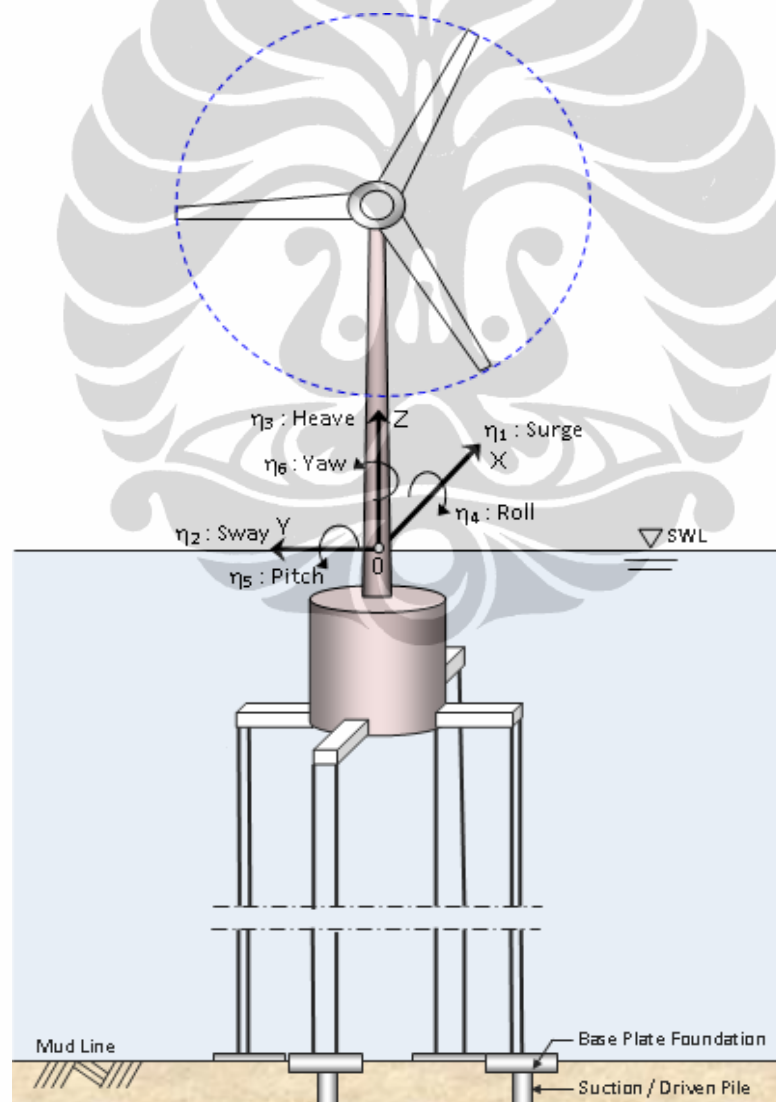
Gambar 2.26 Komponen Turbin Angin

BAB 3

ANALISA TURBIN ANGIN TERAPUNG LEPAS PANTAI

3.1. SISTEM KOORDINAT DAN DERAJAT KEBEBASAN (DOF)

Derajat kebebasan dari struktur dibagi menjadi 2 tipe yaitu translasi dan rotasi. Derajat kebebasan translasi *Surge*, *Sway*, dan *Heave* mewakili gerak translasi pada sumbu x, y, dan z.



Gambar 3.1 Sistem Koordinat dan Derajat Kebebasan .

Derajat kebebasan rotasi *roll*, *pitch*, dan *yaw* mewakili rotasi di sumbu x, y, dan z. Pusat dari sistem koordinat x dan y adalah titik pusat gravitasi pada struktur dan $z = 0$ pada SWL (still water level). Sumbu x positif selalu searah dengan angin dan gelombang. Pada gambar 3.1 dapat dilihat secara jelas koordinat sistem dan derajat kebebasan yang telah dijelaskan sebelumnya^[14]. Turbin angin terapung lepas pantai mempunyai 6 derajat kebebasan yang terdiri dari 3 derajat kebebasan translasi dan 3 derajat kebebasan rotasi. Sistem koordinat akan berubah mengikuti kaidah tangan kanan ketika sudut serangan dari angin atau gelombang berubah.

3.2. PERSAMAAN GERAK SISTEM

Persamaan gerak untuk sistem *rigid body* dari benda terapung dapat ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$(M + m)\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = Xe^{i\omega t} \quad (3.1)$$

Dimana:

u = perpindahan translasi atau rotasi dari 6 DOF

\dot{u} = Kecepatan dari 6 DOF

\ddot{u} = Percepatan dari 6 DOF

ω = Frekuensi gelombang

M = Massa atau massa momen inertia

m = Massa Tambahan

C = Redaman

K = Kekakuan.

X = Gaya dan momen eksitasi yang diterima oleh sistem.

3.3. MASSA STRUKTUR

Massa struktur terdiri dari massa struktur sendiri dan massa tambahan. Massa struktur untuk turbin angin terapung lepas pantai tipe *tension leg platform* adalah sebagai berikut:

1. Massa untuk derajat kebebasan translasi

Massa untuk tranlasi arah *surge* (x), *sway* (y), dan *heave* (z) mempunyai besaran yang sama yaitu:

$$M = m_{turbin} + m_{baja} + m_{beton} \quad (3.2)$$

2. Massa momen inersia untuk derajat kebebasan rotasi

Massa momen inersia atau kelembaman rotasi struktur turbin angin dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 3.3.

$$I_i = \sum m_i r_i^2 \quad (3.3)$$

Atau dengan mengintegasi bagian elemen massa yang bermassa dm , sehingga persamaannya menjadi:

$$I_i = \int r^2 \partial m \quad (3.4)$$

3.4. GAYA PEMBALIK ATAU KEKAKUAN STRUKTUR

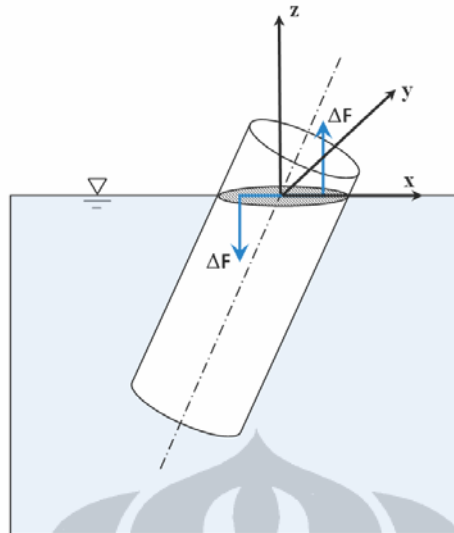
Kekakuan struktur terdiri dari dua mekanisme gaya pembalik. Mekanisme pertama adalah hidrostatis dan inersia $[K_{H+I}]$ dan yang kedua dari mekanisme mooring atau tether $[K_T]$. Gaya pembalik hidrostatis dan inersia adalah gaya pembalik yang dihasilkan dari mekanisme *ballast* dan *waterplane area*.

1. Gaya Pembalik Hidrostatis dan Inersia

Gaya pembalik hidrostatis terdiri dari gaya pembalik luasan permukaan air (*waterplane area*) dan *ballast*.

- **Gaya Pembalik dari Waterplane Area**

Gaya pembalik ini dapat dilihat dari gambar 3.2. Ketika ada gaya eksitasi yang menyebabkan terjadinya rotasi, massa *buoyancy* pada bagian silinder yang tenggelam akan meningkat dan pada bagian yang di atas permukaan air, massa *buoyancy*-nya menjadi berkurang. Kondisi tersebut menyebabkan terjadinya gaya pembalik sebesar ΔF yang terjadi di arah x dan y apabila terjadi perubahan sudut atau rotasi di kedua sumbu.



Gambar 3.2 Mekanisme Gaya Pembalik Waterplane Area

Momen pembalik akibat mekanisme ini diberikan pada persamaan 3.5 dan 3.6 berikut:

$$M_{restoring,WP,x} = (\rho g \iint x^2 dS) \sin \eta_5 \quad (3.5)$$

$$M_{restoring,WP,y} = (\rho g \iint y^2 dS) \sin \eta_4 \quad (3.6)$$

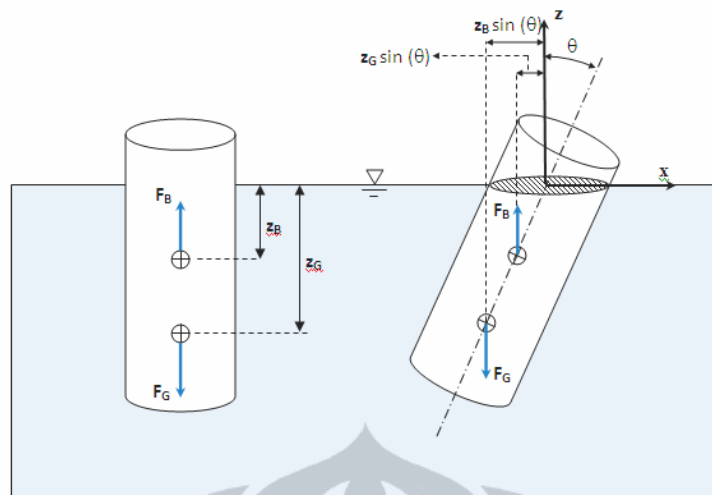
Sudut pada sumbu x digunakan adalah *pitch* dan sumbu y adalah *roll*, dengan mengasumsikan sudut yang terjadi kecil persamaan 3.5 dan 3.6 menjadi:

$$M_{restoring,WP,x} = (\rho g \iint x^2 dS) \eta_5 \quad (3.7)$$

$$M_{restoring,WP,y} = (\rho g \iint y^2 dS) \eta_4 \quad (3.8)$$

▪ Gaya Pembalik dari Ballast

Gaya pembalik didapatkan dengan cara memberikan massa yang besar di bagian bawah struktur sehingga pusat gravitasi struktur berada di bawah pusat *buoyancy*. Ketika struktur mengalami *pitch* atau *roll*, gaya *buoyancy* bekerja di titik pusat *buoyancy* sehingga terjadi momen, kemudian gaya gravitasi bekerja ke arah sebaliknya membuat suatu mekanisme pembalik sistem untuk kembali ke posisi vertikal. Gaya pembalik ini dapat dilihat pada gambar 3.3 di bawah ini.



Gambar 3.3 Mekanisme Gaya Pembalik Ballast

Gaya pembalik dari *ballast* dapat dihitung dengan persamaan 3.9 sebagai berikut.

$$M_{restoring, ballast} = M_B g z_B \sin \eta_5 - M_G g z_G \sin \eta_5 \quad (3.9)$$

Jika sudut yang terbentuk akibat *pitch* diasumsikan kecil seperti telah dijelaskan sebelumnya pada mekanisme *waterplane area*, maka persamaan 3.9 menjadi seperti persamaan berikut.

$$M_{restoring, ballast} = M_B g z_B \eta_5 - M_G g z_G \eta_5 \quad (3.10)$$

Mekanisme gaya pembalik *ballast* pada kenyataannya bekerja bersamaan dengan mekanisme *waterplane area*. Tetapi, untuk memudahkan penjelasan maka mekanisme digambarkan secara terpisah.

Kekakuan dari mekanisme *ballast* dan *waterplane area* terdapat di derajat kebebasan *heave*, *roll*, dan *pitch*. Besar kekakuan dari tethers untuk masing-masing derajat kebebasan didapatkan dengan persamaan di bawah ini:

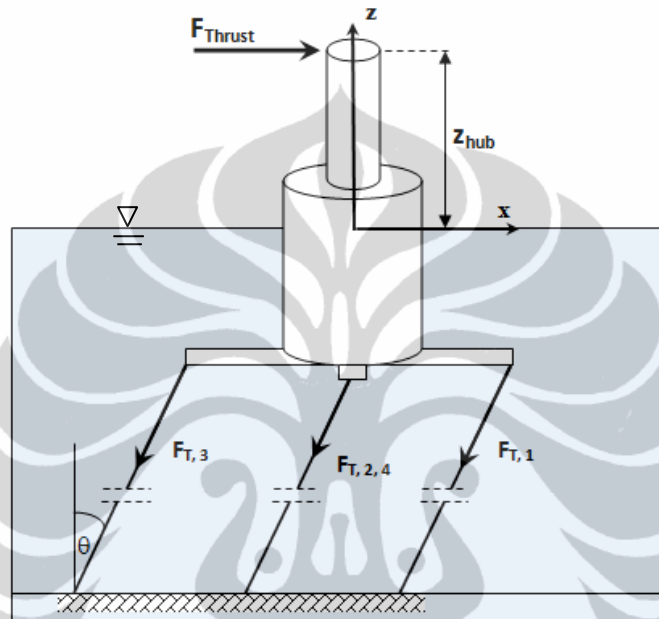
$$K_{heave, H \& I} = \rho g \pi R_f^2 \quad (3.11)$$

$$K_{roll, H \& I} = F_B z_B - M_G g z_G + \frac{\rho g \pi R_f^2}{4} \quad (3.12)$$

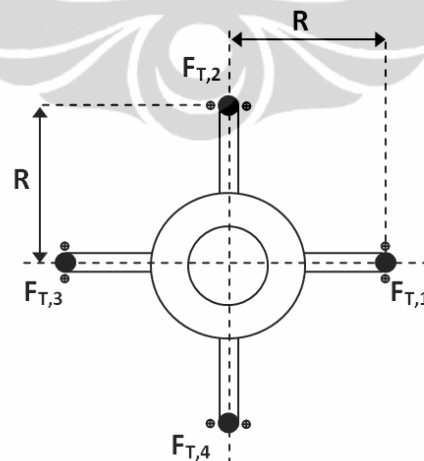
$$K_{pitch, H \& I} = F_B z_B - M_G g z_G + \frac{\rho g \pi R_f^2}{4} \quad (3.13)$$

2. Kekakuan dari Tethers

Gaya pembalik tethers untuk perpindahan vertikal dan horizontal dapat dilihat pada persamaan 2.57 dan 2.63. Mekanisme yang terjadi dapat dilihat pada gambar 3.5 dimana gambar tersebut menunjukkan perpindahan arah *surge*.



Gambar 3.4 Mekanisme Gaya pembalik dari Tethers



Gambar 3.5 Tampak Atas dan Konfigurasi Tethers

Struktur yang akan dibahas adalah *tension leg platform* yang mempunyai 4 kaki atau porch dengan konfigurasi seperti pada gambar 3.5.

Struktur pendukung mempunyai tahanan yang baik terhadap gaya vertikal tetapi tidak terhadap gaya lateral, sehingga perpindahan arah translasi surge pada struktur terapung menjadi dominan. Kekakuan dari sistem *tension leg platform* untuk setiap derajat kebebasan yang ada adalah sebagai berikut:

$$K_{surge,T} = \frac{F_{Total}}{L_T} \quad (3.14)$$

$$K_{sway,T} = \frac{F_{Total}}{L_T} \quad (3.15)$$

$$K_{heave,T} = \frac{E_T A_T}{L_T} \quad (3.16)$$

$$K_{roll,T} = 2 \frac{E_T A_T}{L_T} (R + L_{leg})^2 + (F_B - M_G g) T \quad (3.17)$$

$$K_{pitch,T} = 2 \frac{E_T A_T}{L_T} (R + L_{leg})^2 + (F_B - M_G g) T \quad (3.18)$$

$$K_{yaw,T} = \frac{(R + L_{leg})^2}{L_T} (F_B - M_G g) \quad (3.19)$$

Dimana:

F_{Total} = Gaya Pretension Total (N)

L_T = Panjang Tethers (m)

E_T = Modulus Elastisitas Tethers (N/m²)

A_T = Luas Penampang Tethers (m²)

R = Jari-jari *Platform* (m)

L_{leg} = Panjang Kaki *Platform* (m)

T = Draft (m)

Kekakuan struktur adalah kekakuan atau gaya pembalik dari ketiga mekanisme *ballast*, *waterplane area*, dan tethers.

3.5. REDAMAN STRUKTUR

Redaman pada struktur berhubungan dengan damping rasio, damping rasio untuk sistem struktur dengan eksitasi harmonik adalah sebagai berikut:

$$\zeta = \frac{C}{2\omega(M+m)} \quad (3.20)$$

Dimana:

C = Redaman struktur

M = Massa struktur

m = Massa Tambahan

3.6. GAYA EKSITASI PADA STRUKTUR TERAPUNG

Gaya yang bekerja pada struktur terapung terdiri dari beberapa yaitu gaya angin akibat operasional turbin, gaya angin pada tiang, gaya gelombang, dan gaya arus.

3.6.1. Gaya Angin

Gaya Angin pada tiang dan turbin dapat dihitung dengan persamaan umum yang telah dibahas pada subbab 2.9.1. Gaya angin pada tiang dianalisa secara statik dan gaya transversal akibat vortex tidak diperhitungkan.

Gaya Angin Pada Tiang

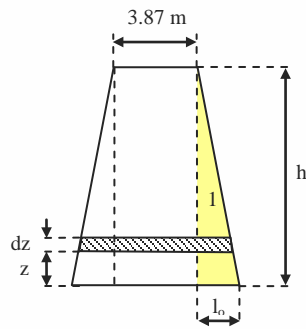
Persamaan untuk menghitung gaya angin pada tiang dapat diperoleh dari persamaan 2.48 dan menggunakan sistem satuan mks, maka persamaan tersebut menjadi persamaan 3.21.

$$F_w = 0.0623 C_s C_H A \bar{u}(z)^2 \quad (3.21)$$

Dimana:

$$\bar{u}(z) = \left(\frac{z}{19.5}\right)^{1/7} \bar{u}(h) \quad (3.22)$$

Bentuk geometri dari tiang adalah kerucut yang terpotong, sehingga luas permukaan gaya angin pada tiang berbentuk trapezium. Luas permukaan tiang merupakan fungsi dari ketinggian (z). Ilustrasi dan persamaan untuk menghitung luas dapat dilihat dibawah ini:



Gambar 3.6 Penampang Tiang yang Tegak Lurus dengan Arah Angin

Persamaan luas penampang yang diarsir:

$$A = \text{Tinggi} \left(\frac{\text{Lebar bawah} + \text{Lebar atas}}{2} \right) \quad (3.23)$$

$$dA = dz \left[\frac{(3.87 + 2l_a) + (3.87 + 2l_b)}{2} \right] \quad (3.24)$$

l_a adalah lebar segitiga 1 (satu) pada ketinggian z dan l_b adalah lebar segitiga pada ketinggian $(z + dz)$. l_a dan l_b dapat dihitung dengan menggunakan persamaan perbandingan segitiga, Persamaan yang didapat sebagai berikut:

$$l_a = l_o - \frac{l_o \cdot z}{h_t} \quad (3.25)$$

$$l_b = l_o - \frac{l_o \cdot z}{h_t} - \frac{l_o \cdot dz}{h_t} \quad (3.26)$$

Luas trapesium yang diarsir dapat diketahui dengan mensubstitusi persamaan 3.25 dan 3.26 ke persamaan 3.24 sehingga didapatkan persamaan 3.27. Persamaan 3.28 didapat dengan mensubstitusikan persamaan 3.22 dan 3.27 kemudian diintegrasikan.

$$dA = \left[3.87 + 2 \cdot l_o - \frac{2 \cdot l_o \cdot z}{h_t} - \frac{l_o \cdot dz}{h_t} \right] dz \quad (3.27)$$

$$F_w = \int_0^{h_t} 0.0267 C_s C_H \bar{u}(h)^2 \left[3.87 + 2 \cdot l_o - \frac{2 \cdot l_o \cdot z}{h_t} - \frac{l_o \cdot dz}{h_t} \right] dz \quad (3.28)$$

$$F_w = 0.0343 C_s C_H \bar{u}(h)^2 \left[3.87 h_t^{9/7} + l_o \cdot h_t \right] \quad (3.29)$$

Dimana:

C_s = Koefisien bentuk

C_h = Koefisien tinggi

$\bar{u}(h)$ = Kecepatan angin pada ketinggian 19.5 m

h_t = Tinggi tiang (m)

l_t = Lebar sisi samping trapesium (gambar 3.6).

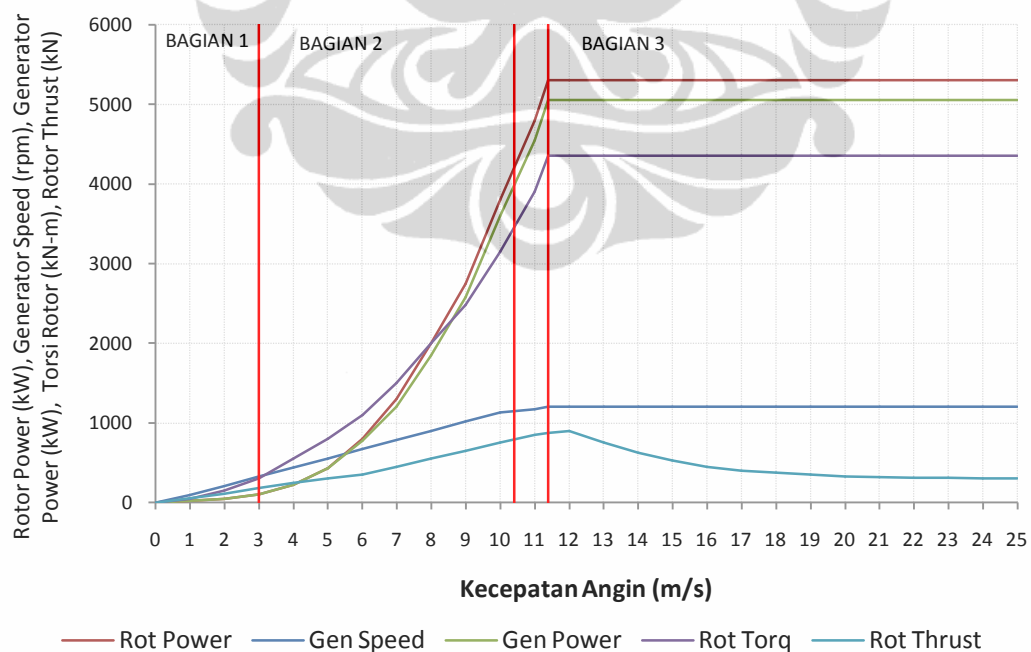
Pusat gaya angin pada tiang turbin angin dapat dihitung dengan mengintegrasikan persamaan 3.30 sehingga menjadi persamaan 3.31.

$$\bar{z} = \int_0^{h_t} \frac{F_w \cdot z}{F_w} \cdot dz \quad (3.30)$$

$$\bar{z} = \frac{1.178 h_t^{9/7} + 0.33 l_o h_t}{1.693 h_t^{2/7} + 0.5 l_o} \quad (3.31)$$

Gaya Angin Pada Turbin:

Turbin angin dengan kapasitas 5 MW dipilih untuk disain struktur turbin angin terapung. Kapasitas 5 MW diperkirakan adalah kapasitas minimum yang harus dihasilkan oleh turbin angin terapung lepas pantai agar sistem ini efektif dari segi biaya^[20].



Gambar 3.7 Grafik Karakteristik Operasional Turbin Angin^[19]

Pada saat operasional, rotor bergerak akibat angin kemudian turbin memberikan aksi ke struktur pendukung berupa gaya lateral (F_{thrust}) dan gaya torsi (F_{torq}).

Dimana :

RotPower = Rotor Power (kW)

GenSpeed = Generator Speed (rpm)

Gen Power = Generator Power (kW)

RotTorq = Rotor Torque (F_{torq} , kN-m)

RotThrust = Rotor Thrust (F_{thrust} , kN)

Pada kecepatan angin 3 m/s grafik terlihat terpotong. Kecepatan angin tersebut merupakan kecepatan minimum turbin angin untuk bisa bekerja. Grafik pada gambar 3.7 terdiri dari 3 (tiga) bagian. Bagian pertama adalah bagian saat kecepatan angin $0 \leq V_w \leq 3$ m/s dimana turbin tidak bekerja. Bagian kedua adalah bagian dimana turbin power meningkat seiring dengan kecepatan angin. Bagian ketiga adalah bagian dimana turbin angin mempertahankan produksi *power* yang sama walaupun kecepatan angin bertambah. Hal ini dilakukan dengan cara mengatur sudut *pitch* dari *blade*. Kecepatan angin 25 m/s adalah *cut off* kecepatan angin maksimum untuk beroperasinya turbin angin.

3.6.2. Gaya Arus

Gaya arus akan dianalisa secara statik. Gaya arus transversal akibat vortex tidak diperhitungkan. Gaya arus *surge* untuk berbagai sudut datang pada struktur menjadi sama dikarenakan luas penampang yang berhadapan dengan arah gaya selalu sama. Pusat gaya arus diasumsikan setengah dari draft. Berikut adalah persamaan untuk menghitung gaya yang diterima oleh struktur:

$$F_c = \frac{1}{2} \rho_w C_D A V_c^2 \quad (3.32)$$

$$F_c = \frac{1}{2} \rho_w C_D D_f z_f V_c^2 \quad (3.33)$$

Dimana:

D_f = Diameter silinder platform

z_f = Tinggi struktur terapung yang terbenam.

3.6.3. Gaya Gelombang

Gaya gelombang terdiri dari gaya hambat, gaya inersia, dan gaya angkat. Persamaan potensial gelombang progresif untuk gelombang linear adalah sebagai berikut.

$$\phi = \frac{\pi H_s}{k T_s} \frac{\cosh[k(d+z)]}{\sinh(kd)} \sin(kx - \omega t) \quad (3.34)$$

Dengan menurunkan persamaan 3.34 terhadap dx, didapatkan kecepatan horizontal partikel fluida.

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (3.35)$$

Jika $T_s = 2\pi/\omega$, maka kecepatan partikel fluida dalam arah x menjadi:

$$u = \frac{H_s g k}{2 \omega} \frac{\cosh k(d+z)}{\cosh kd} \cos(kx - \omega t) \quad (3.36)$$

Dengan menggunakan persamaan dispersi gelombang:

$$\omega^2 = gk \tanh kd \quad (3.37)$$

$$gk = \frac{\omega^2}{\tanh kd} \quad (3.38)$$

Persamaan 3.36 menjadi persamaan berikut:

$$u = \frac{H_s \omega}{2} \frac{\cosh k(d+z)}{\sinh kd} \cos(kx - \omega t) \quad (3.39)$$

Kemudian dengan menurunkan persamaan 3.34 terhadap dz, didapatkan kecepatan vertikal partikel fluida.

$$w = \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (3.40)$$

Jika $T_s = 2\pi/\omega$, maka kecepatan partikel fluida dalam arah z menjadi:

$$w = \frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{H_s g k}{2 \omega} \frac{\sinh k(d+z)}{\cosh kd} \sin(kx - \omega t) \quad (3.41)$$

Dengan mensubstitusi persamaan dispersi gelombang yaitu persamaan 3.38 ke persamaan 3.41, maka persamaan kecepatan vertikal partikel menjadi berikut.

$$w = \frac{H_s \omega}{2} \frac{\sinh k(d+z)}{\sinh kd} \sin(kx - \omega t) \quad (3.42)$$

Setelah mendapatkan kecepatan partikel horizontal, persamaan 3.39 dapat disubstitusikan ke persamaan 2.43 dan 2.44 untuk mendapatkan gaya hambat dan gaya angkat atau transversal pada struktur terapung.

3.6.3.1 Gaya Hambat

Dengan menggunakan persamaan 2.43, didapat gaya hambat dalam arah *surge*.

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_w C_D D \int_{-z_2}^{-z_1} |u|u dz \quad (3.43)$$

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_w C_D D_f \left(\frac{\omega H_s}{2 \sinh kd} \right)^2 \int_{-z_2}^{-z_1} \{\cosh[k(d+z)]\}^2 dz \quad (3.44)$$

$$F_D = \frac{1}{16} \rho_w C_D D_f \omega^2 H_s^2 K_d \quad (3.45)$$

Dimana:

$$K_d = \frac{[\cosh(k(d-z_1)) \sinh(k(d-z_1)) - \cosh(k(d-z_2)) \sinh(k(d-z_2)) - kz_1 + kz_2]}{2k[\sinh kd]^2} \quad (3.46)$$

3.6.3.2 Gaya Inersia

Dengan menggunakan persamaan 2.42 kita akan mendapatkan gaya inersia dalam arah *surge*.

$$F_I = \rho_w C_M \frac{\pi D_f^2}{4} \int_{-z_2}^{-z_1} \frac{\partial u}{\partial t} dz \quad (3.47)$$

Percepatan partikel horizontal fluida merupakan turunan pertama dari kecepatan horizontal partikel fluida terhadap waktu.

$$a_x = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (3.48)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\omega^2 H_s}{2} \frac{\cosh[k(d+z)]}{\sinh kd} \quad (3.49)$$

$$F_I = \rho_w C_M \frac{\pi D_f^2}{4} \frac{\omega^2 H_s}{2 \sinh(kd)} \int_{-z_2}^{-z_1} \cosh[k(d+z)] dz \quad (3.50)$$

$$F_I = \frac{1}{8} \rho_w C_M \pi D_f^2 \omega^2 H_s K_i \quad (3.51)$$

Dimana:

$$K_i = \frac{[\sinh(k(d-z_1)) - \sinh(k(d-z_2))]}{k \sinh(kd)} \quad (3.52)$$

3.6.3.3 Gaya Transversal atau Gaya Angkat

Persamaan gaya transversal atau angkat pada suatu silinder hampir sama dengan gaya hambat, yang membedakan adalah pada gaya angkat menggunakan koefisien angkat (C_L). Dengan mensubstitusikan persamaan 3.39 ke persamaan 2.44 didapatkan persamaan di bawah ini:

$$F_L = \frac{1}{16} \rho_w C_L D_f \omega^2 H_s^2 K_l \quad (3.53)$$

Dimana:

$$K_l = \frac{[\cosh(k(d-z_1)) \sinh(k(d-z_1)) - \cosh(k(d-z_2)) \sinh(k(d-z_2)) - kz_1 + kz_2]}{2k[(\sinh(kd))]^2} \quad (3.54)$$

3.7. RESPONSE AMPLITUDE OPERATOR

Pertama kali yang harus dilakukan untuk mendapatkan response amplitude operator adalah menentukan sistem struktur yang digunakan, sehingga parameter seperti massa, kekakuan atau gaya pembalik, dan redaman struktur diketahui. Kemudian fungsi pembebanan, RAO, dan spektra respon struktur didapat dengan menggunakan spektrum gelombang.

3.7.1. Fungsi RAO untuk Derajat Kebebasan Surge

Bentuk geometri yang akan digunakan untuk studi kasus adalah silinder maka untuk arah *surge* fungsi pembebanan dan RAO adalah sebagai berikut.

1. Fungsi Pembebanan

Fungsi pembebanan didapat dengan menggunakan persamaan Morison dimana gaya gelombang merupakan gabungan dari gaya hambat dan inersia. Dengan menggunakan persamaan 3.45 dan 3.51 didapatkan persamaan berikut:

$$F(\omega) = F_D(\omega) + F_I(\omega) \quad (3.55)$$

$$F(\omega) = \frac{1}{16} \rho_w C_D D_f \omega^2 H_s^2 K_d + \frac{1}{8} \rho_w C_M \pi D_f^2 \omega^2 H_s K_i \quad (3.56)$$

2. Fungsi Transfer Beban Gelombang, $G(\omega)$

Fungsi transfer beban gelombang adalah fungsi pembebanan dibagi dengan tinggi signifikan gelombang.

$$G(\omega) = \frac{F(\omega)}{H_s} \quad (3.57)$$

$$G(\omega) = \frac{1}{16} \rho_w C_D D_f \omega^2 H_s K_d + \frac{1}{8} \rho_w C_M \pi D_f^2 \omega^2 K_i \quad (3.58)$$

3. Spektral Respon Struktur, $S_u(\omega)$

$$S_u(\omega) = \left(\frac{|G(\omega)|}{k - m\omega^2 + c\omega} \right)^2 S(\omega) \quad (3.59)$$

Dengan mensubstitusi persamaan spektrum gelombang Breitschneider yang dikembangkan oleh Ochi dan Hubble 2.22 dan persamaan 3.58 ke dalam persamaan 3.59 didapatkan persamaan untuk spektra respon struktur gelombang.

$$S_u(\omega) = \left(\frac{1}{16} \frac{\rho_w C_D D_f \omega^2 H_s K_d + 2 \rho_w C_M \pi D_f^2 \omega^2 K_i}{k - m\omega^2 + c\omega} \right)^2 \times \frac{1.25}{4} \frac{\omega_m^4}{\omega^5} H_s^2 e^{-1.25(\omega_m/\omega)^4} \quad (3.60)$$

4. Fungsi RAO untuk *Surge*

$$RAO = \frac{1}{8} \frac{\rho_w C_D D_f \omega^2 H_s K_d + 2 \rho_w C_M \pi D_f^2 \omega^2 K_i}{k - m\omega^2 + c\omega} \quad (3.61)$$

3.7.2. Fungsi RAO untuk Derajat Kebebasan Sway

Karena bentuk geometri yang akan digunakan untuk studi kasus adalah silinder vertikal maka untuk arah *sway* diakibatkan oleh gaya transversal atau angkat.

1. Fungsi Pembebanan

Fungsi Pembebanan didapat dengan menggunakan persamaan gaya transversal atau gaya angkat dari gelombang.

$$F(\omega) = F_L(\omega) \quad (3.62)$$

$$F(\omega) = \frac{1}{16} \rho_w C_L D_f \omega^2 H_s^2 K_l \quad (3.63)$$

2. Transfer Fungsi Beban Gelombang, $G(\omega)$

Fungsi transfer beban gelombang adalah fungsi pembebanan dibagi dengan tinggi signifikan gelombang.

$$G(\omega) = \frac{F(\omega)}{H_s} \quad (3.64)$$

$$G(\omega) = \frac{1}{16} \rho_w C_L D_f \omega^2 H_s K_l \quad (3.65)$$

3. Spektral Respon Struktur, $S_u(\omega)$

$$S_u(\omega) = \left(\frac{|G(\omega)|}{k - m\omega^2 + c\omega} \right)^2 S(\omega) \quad (3.66)$$

Dengan mensubstitusi persamaan spektrum gelombang Breitschneider yang dikembangkan oleh ochi dan huble 2.22 dan persamaan 3.65 ke dalam persamaan 3.66 didapatkan persamaan untuk spektral gelombang:

$$S_u(\omega) = \left(\frac{1}{16} \frac{\rho_w C_L D_f \omega^2 H_s K_l}{k - m\omega^2 + c\omega} \right)^2 \times \frac{1.25}{4} \frac{\omega_m^4}{\omega^5} H_s^2 e^{-1.25(\omega_m/\omega)^4} \quad (3.67)$$

4. Fungsi RAO untuk *Sway*

$$RAO = \frac{1}{8} \frac{\rho_w C_L D_f \omega^2 H_s K_l}{k - m\omega^2 + c\omega} \quad (3.68)$$

3.8. PERPINDAHAN STRUKTUR

Perpindahan struktur akibat eksitasi gaya gelombang akan dianalisa secara terpisah dari beban akibat angin dan arus. Perpindahan akibat beban gelombang akan dihitung dengan menggunakan analisa frekuensi domain dimana varian dari respon struktur yang dihasilkan dari spektral respon struktur digunakan untuk menentukan perpindahan yang terjadi.

3.8.1. Perpindahan untuk Derajat Kebebasan Surge

- Perpindahan akibat Gaya Gelombang

Dengan menggunakan persamaan spektra respon struktur yaitu persamaan 3.60 akan didapatkan varian untuk persamaan tersebut yaitu:

$$\sigma_v^2 = 2 \int_0^\infty \left[\left(\frac{1}{16} \frac{\rho_w C_D D_f \omega^2 H_s K_d + 2 \rho_w C_M \pi D_f^2 \omega^2 K_i}{k - m \omega^2 + c \omega} \right)^2 \times \frac{1.25}{4} \frac{\omega_m^4}{\omega^5} H_s^2 e^{-1.25(\omega_m/\omega)^4} \right] d\omega \quad (3.69)$$

Kurva spektra respon struktur akan diplot terlebih dulu untuk menentukan rentang yang digunakan untuk integrasi numerik yang dilakukan. Setelah melakukan integrasi numerik, maka perpindahan pada struktur:

$$u_g = 3\sigma \quad (3.70)$$

- Perpindahan akibat Gaya Angin dan Arus

Gaya angin dan arus yang diterima oleh struktur adalah:

$$F_{Tsu} = F_w + F_{thrust} + F_a \quad (3.71)$$

$$F_{Tsu} = 0.0343 C_s C_H \bar{u}(h)^2 [3.87 h_t^{9/7} + l_o \cdot h_t] + F_{thrust} + \frac{1}{2} \rho_w C_D D_f z_f V_c^2 \quad (3.72)$$

Perpindahan statik yang terjadi akibat gaya F_{Tsu}

$$u_{wc} = \frac{F_{Tsu}}{K_{surge \ T+H \ \& \ I}} \quad (3.73)$$

Sehingga:

$$\eta_1 = u_g + u_{wc} \quad (3.74)$$

3.8.2. Perpindahan untuk Derajat Kebebasan Sway

- Perpindahan akibat Gaya Gelombang

Dengan menggunakan persamaan spektral respon struktur yaitu persamaan 3.67 akan didapatkan varian untuk persamaan tersebut yaitu:

$$\sigma_v^2 = 2 \int_0^\infty \left[\left(\frac{1}{16} \frac{\rho_w C_L D_f \omega^2 H_s K_L}{k - m\omega^2 + c\omega} \right)^2 \times \frac{1.25 \omega_m^4}{4 \omega^5} H_s^2 e^{-1.25(\omega_m/\omega)^4} \right] d\omega \quad (3.75)$$

Kurva spektra respon struktur akan diplot terlebih dulu untuk menentukan rentang yang digunakan untuk integrasi numerik yang dilakukan. Setelah melakukan integrasi numerik, maka perpindahan pada struktur:

$$\eta_2 = v_g = 3\sigma \quad (3.76)$$

- Perpindahan akibat Gaya Angin dan Arus

Perpindahan vertikal akibat beban angin dan arus diabaikan dan diasumsikan Gaya angin dan arus tidak mengalami turbulensi ataupun *vortex* yang menyebabkan terjadinya gaya angkat oleh angin dan arus.

3.8.3. Perpindahan untuk Derajat Kebebasan Heave

Gaya yang dihasilkan oleh cadangan *bouyancy* diasumsikan tidak menyebabkan pertambahan panjang tethers. Perpindahan tranlasi searah *heave* disebabkan oleh adanya perpindahan arah *surge*, karena tethers tidak bertambah panjang maka struktur TLP mengalami *set-down* (η_3).

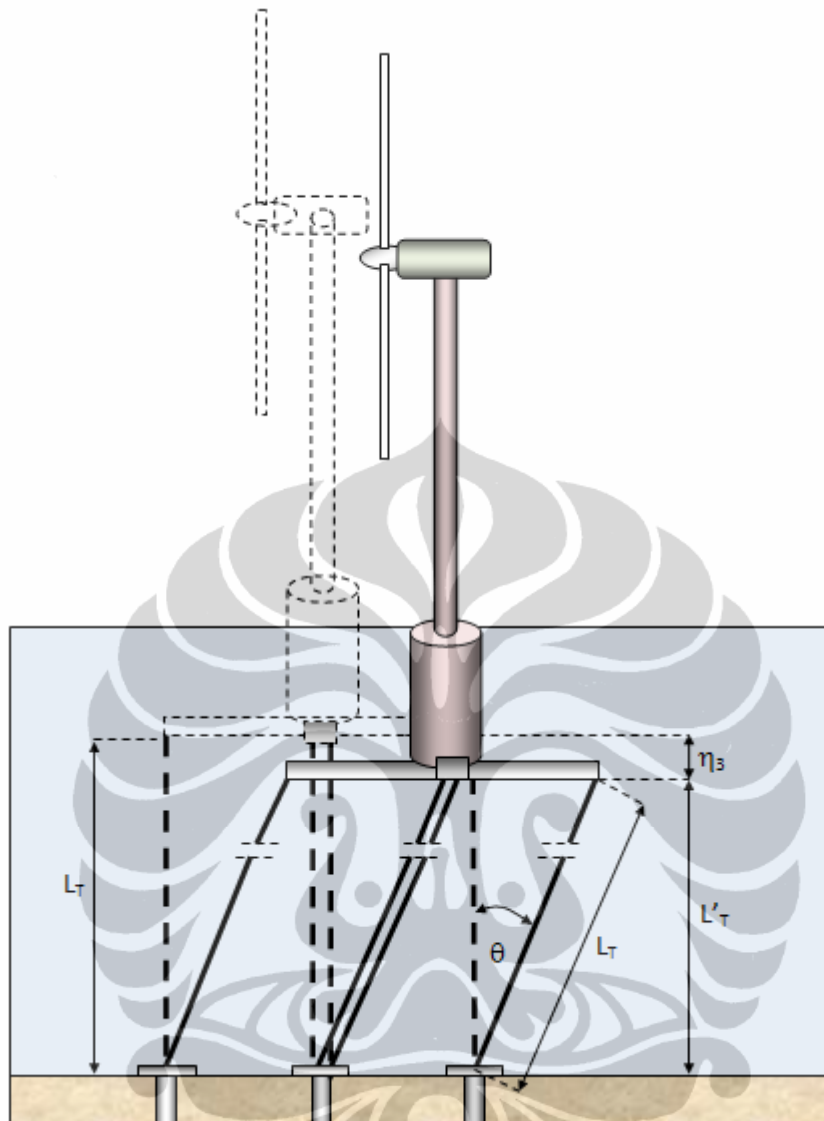
$$\eta_3 = L_T - L_T' \quad (3.77)$$

$$\eta_3 = L_T - L_T \cdot \cos \theta \quad (3.78)$$

$$\eta_3 = L_T \cdot (1 - \cos \theta) \quad (3.79)$$

Dimana:

$$\cos \theta = \frac{\eta_1}{L_T}$$



Gambar 3.8 Set-down Akibat Translasi arah Surge

3.8.4. Rotasi untuk Derajat Kebebasan Roll

Rotasi akibat Gaya Angin pada Turbin akibat pergerakan *rotor* pada turbin angin yang searah dengan derajat kebebasan pada *roll*, maka momen pada arah *roll* dari kurva karakteristik turbin angin dibebankan pada platform. Rotasi pada arah *roll* menjadi:

$$\eta_4 = \frac{\text{Torsi pada rotor}}{K_{roll, T+H\&I}} \quad (3.80)$$

3.8.5. Rotasi untuk Derajat Kebebasan Pitch

Rotasi akibat gaya angin pada *rotor* dan tiang, gaya gelombang dan arus akibat gaya angin pada *rotor* mengakibatkan gaya sebesar F_{thrust} pada blade dan pada tiang seperti pada persamaan 3.29. Karena terjadi lengan momen antara gaya dan *keel* struktur terapung maka terjadi momen arah *pitch*. Gaya gelombang dan arus diasumsikan mempunyai lengan $\frac{1}{2}$ dari *draft*.

$$\eta_5 = \frac{F_{thrust} \cdot l_t + F_w \cdot l_h + F_g \cdot l_g + F_a \cdot l_a}{K_{pitch, T+H\&I}} \quad (3.81)$$

Dimana:

l_t = Jarak antara gaya F_{thrust} ke keel

l_h = Jarak antara pusat gaya angin pada hub dengan keel

l_g, l_a = Jarak antara pusat gaya gelombang atau arus dengan keel

3.8.6. Rotasi untuk Derajat Kebebasan Yaw

Rotasi pada arah *Yaw* tidak dianalisa, Rotasi pada arah *yaw* diasumsikan tidak terjadi karena dilakukan antisipasi dengan menambahkan komponen-komponen suppression VIV (*Vortex Induce Vibration*) untuk mencegah terjadinya gerakan yaw akibat aliran air.

3.9. GAYA TARIK STATIK PADA TETHERS

Gaya tarik pada tethers ketika tidak ada gaya luar yang bekerja pada struktur dihasilkan dari selisih dari gaya buoyancy dengan berat struktur. Sehingga rata-rata gaya tarik tether sebagai berikut:

$$F_{T,ave} = \frac{F_B - m \cdot g}{4} \quad (3.82)$$

Posisi tether yang searah dengan arah angin akan mengalami kondisi yang kritis. Pada gambar 3.4, tether yang searah dengan arah mata angin adalah kelompok tether 1 dan 3. Apabila gaya angin bekerja pada struktur seperti gambar tersebut, maka tether 1 akan mengalami gaya tarik yang berlebih sedangkan tether 3 akan berkurang gaya tariknya. Kelebihan dan kekurangan gaya tarik (ΔF) ini perlu diperhitungkan untuk mempertahankan keseimbangan gaya vertikal yang

terjadi distruktur. Gaya tarik tether ΔF dapat dihitung dengan meninjau keseimbangan momen di keel struktur TLP.

$$\sum M_{keel} = 0 \quad (3.83)$$

$$M_{Thrust} - F_{T3} \cdot (R + L_{leg}) + F_{T1} \cdot (R + L_{leg}) = 0 \quad (3.84)$$

$$M_{Thrust} - (F_{T,ave} + \Delta F) \cdot (R + L_{leg}) + (F_{T,ave} - \Delta F) \cdot (R + L_{leg}) = 0 \quad (3.85)$$

Dengan menyelesaikan persamaan 3.85 didapatkan besarnya gaya tarik ΔF , kemudian dengan mensubstitusikannya kembali sehingga gaya tarik pada tether 1 dan 3 dapat diketahui.

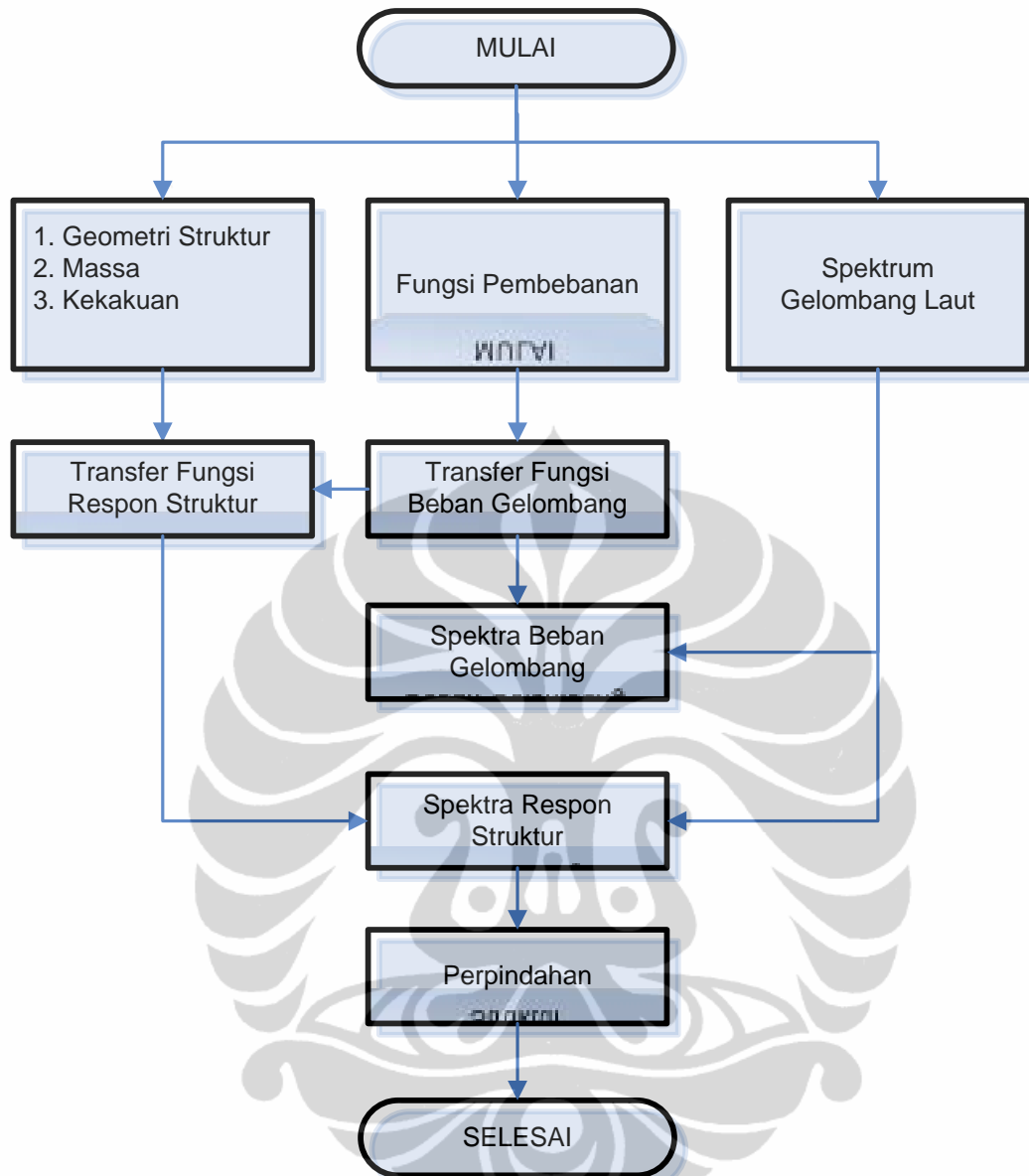
$$F_1 = F_{T,ave} - \Delta F, (Downwind) \quad (3.86)$$

$$F_3 = F_{T,ave} + \Delta F, (Upwind) \quad (3.87)$$

3.10. DIAGRAM ALIR PADA MATLAB

Setelah melakukan identifikasi parameter-parameter yang digunakan dalam melakukan analisa stabilitas struktur, langkah selanjutnya adalah melakukan studi kasus pada struktur yang dalam proses perhitungannya digunakan program bantu MATLAB. Alur program yang akan dibuat di MATLAB dapat dilihat pada gambar 3.9.

Pada program yang dibuat di MATLAB adalah program perhitungan untuk respon struktur akibat pembebanan gaya gelombang. Seperti yang terlihat pada gambar 3.9, geometri dan properti struktur didapatkan dari program bantu yang dibuat di MS. Excel 2007 dengan VBA. Besaran nilai geometri dan properti struktur yang didapat dari MS. Excel kemudian dimasukkan ke dalam program bantu MATLAB. Setelah itu program akan menghitung fungsi pembebanan dan spektrum gelombang laut, kemudian fungsi transfer beban gelombang dan respon struktur. Perpindahan translasi adalah hasil yang didapat setelah varian respon struktur diketahui.



Gambar 3.9 Diagram Alir membuat Sub Routine Pada MATLAB

BAB 4

SIMULASI DAN ANALISA

Bab ini membahas proses dan hasil simulasi yang dilakukan pada struktur turbin angin terapung lepas pantai dengan sistem CBC (*Surface-piercing cylinder*) yang dibuat oleh MIT-NREL (Massachusetts Institute of Technology - National Renewable Energy Laboratory) dan struktur turbin angin terapung lepas pantai dengan sistem *tension leg platform* NREL (National Renewable Energy Laboratory). Model yang dibuat NREL adalah model struktur yang mempunyai sistem gaya pembalik dari mooring lebih dominan. Sedangkan sistem CBC adalah model struktur yang menggunakan ketiga mekanisme gaya pembalik (*waterplane area*, *ballast*, dan *mooring*). Sistem *mooring* yang digunakan pada CBC MIT-NREL adalah *vertical tension leg* sehingga struktur ini disebut juga *tension leg platform* MIT-NREL. Untuk membedakan dengan model *tension leg platform* NREL maka dalam *penulisan tension leg platform* MIT-NREL disingkat dengan *tension leg platform* MIT. Pada bab ini juga dilakukan simulasi terhadap 4 (empat) parameter desain untuk mengetahui pengaruh parameter tersebut. Parameter tersebut adalah tinggi gelombang signifikan dan periode signifikan gelombang laut (H_s dan T_s), kecepatan angin, dan kedalaman laut.

4.1. MODEL STRUKTUR

Model struktur *tension leg platform* yang digunakan untuk simulasi adalah *tension leg platform* MIT dengan tipe *submerged* sedangkan *tension leg platform* NREL yang disimulasikan adalah *tension leg platform* NREL RB6. RB6 menunjukkan bahwa *tension leg platform* NREL ini mempunyai *reserve bouyancy* sebesar 6 (enam) kali dari berat struktur. *Reserve bouyancy* adalah rasio kelebihan *buoyancy* dengan total massa struktur.

4.1.1. Properti Turbin Angin

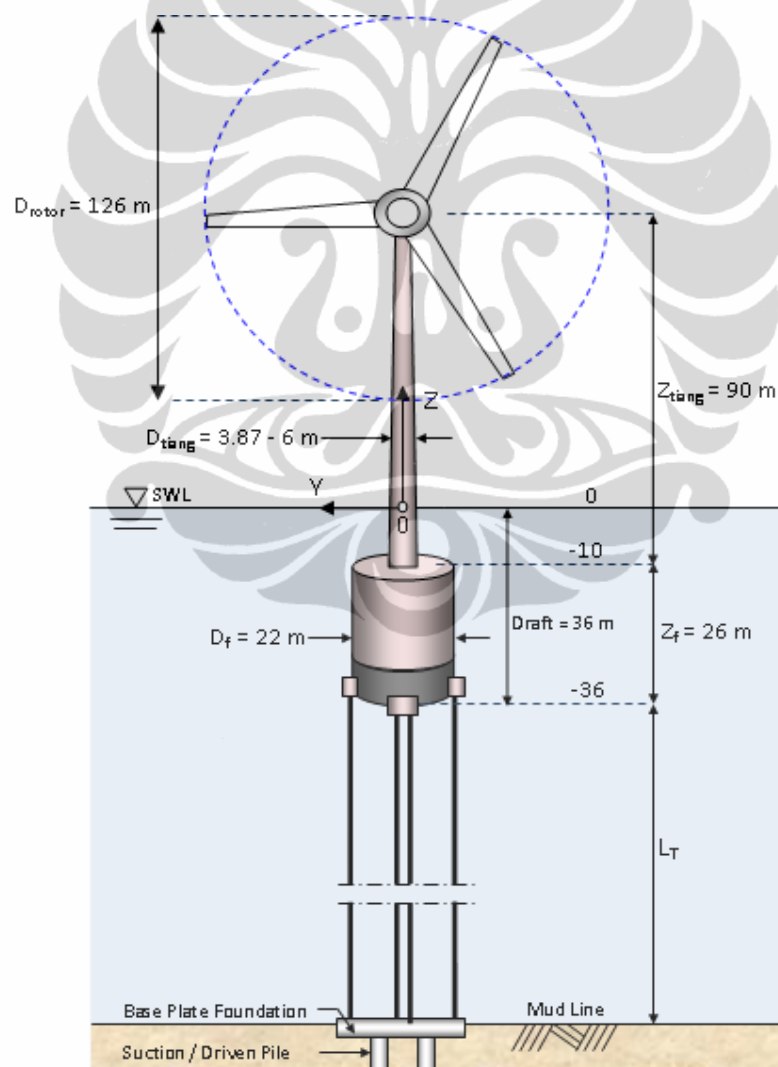
Turbin angin yang digunakan adalah turbin angin NREL 5-MW. Turbin angin tersebut mempunyai properti sebagai berikut:

Tabel 4.1 Properti Turbin angin

PARAMETER	KETERANGAN
Diameter Rotor/Tiang	126 m / 3.87- 6 m
Tinggi Tiang	90 m
Massa Rotor	110.000 kg
Massa Nacelle	240.000 kg
Massa Tiang	347.460 kg
Massa Total	697.460 kg

4.1.2. Model Tension Leg Platform MIT

Tipe model *tension leg platform* MIT yang digunakan adalah *tension leg platform submerged*.



Gambar 4.1 Model Tension Leg Platform MIT

Tension leg platform MIT *submerged* merupakan tipe *tension leg platform* MIT-NREL dimana struktur tiangnya terendam sebesar 10 m. Model ini bisa dilihat pada gambar 4.1. Pada bagian bawah *hull* yang berbentuk silinder diberi *ballast* dari beton sehingga titik gravitasi struktur berada dibawah titik *buoyancy* struktur. Dengan demikian, *tension leg platform* mempunyai mekanisme gaya pembalik (*restoring force*) *ballast* sehingga menambah kekakuan arah *roll* dan *pitch* struktur. Proses instalasi turbin angin bisa dilakukan di darat. Pada saat transportasi untuk menambah stabilitas dengan mekanisme gaya pembalik *ballast*, air laut dipompa ke dalam *hull*. Setelah sampai dilokasi, tethers dipasang ke struktur *hull* dan kemudian air laut dipompa keluar dari *hull*. Properti dari *tension leg platform* MIT dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

Tabel 4.2 Properti Platform Tension Leg Platform MIT

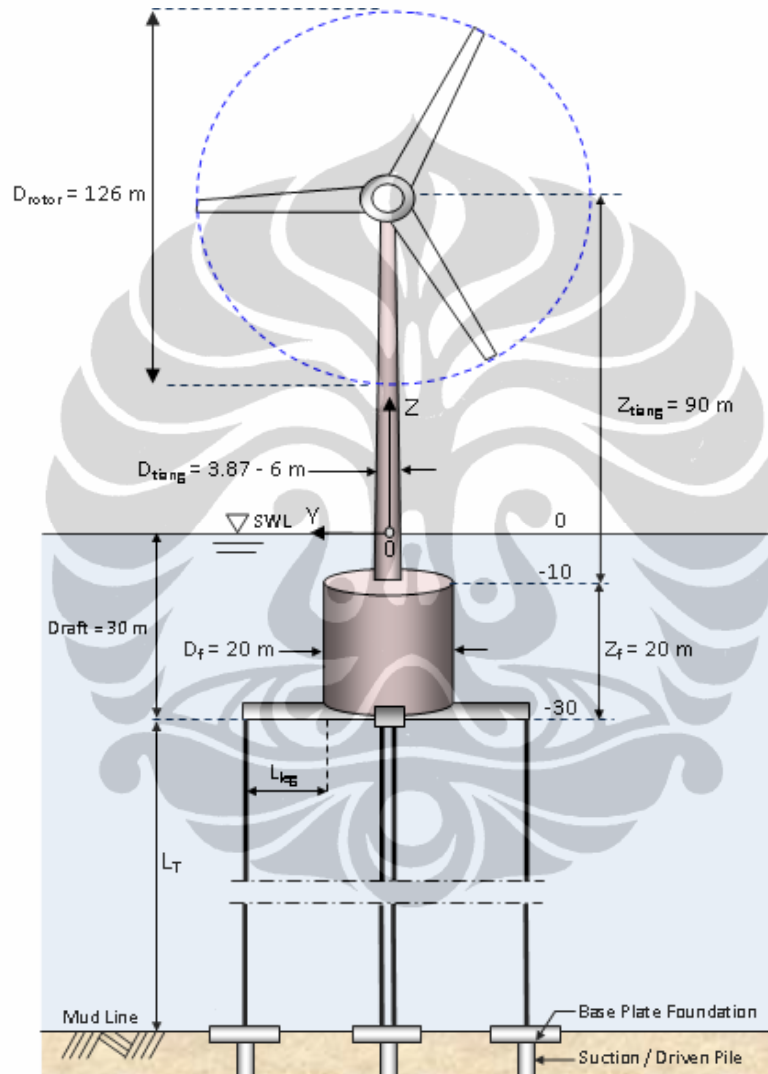
PROPERTI	SUBMERGED TLP	SATUAN
Diameter	22	m
Tinggi Silinder	26	m
Draft Tiang	10	m
Tinggi Ballast Beton	4.5	m
Tebal Plat baja	0.015	m
Massa Baja	301.100	kg
Massa Beton	4371.500	kg
Massa Total Turbin	697.500	kg
Jumlah Porch	4	-
Jumlah Tether per Porch	2	-
Jari-jari Girasi roll	31.72	m
Jari-jari Girasi pitch	31.72	m
Jari-jari Girasi yaw	9.89	m

Tabel 4.3 Properti Operasional Tension Leg Platform MIT

PROPERTI	SUBMERGED TLP	SATUAN
Jumlah Tether	8	-
Diameter Tether	0.156	m
Draft	36	m
Free Board	0	m
Pusat Gravitasi TLP	-25.26	m

4.1.3. Model Tension Leg Platform NREL

Perbedaan secara visual antara model *tension leg platform* NREL dengan MIT dapat dilihat dari kaki atau *leg* yang terdapat di struktur *tension leg platform* NREL.



Gambar 4.2 Model Tension Leg Platform NREL

Leg pada model *tension leg platform* NREL berfungsi untuk menambah kekakuan arah *pitch* dan *roll* secara signifikan. Tiang pada struktur ini juga ditenggelamkan sebesar 10 m sehingga beban gelombang dan arus dapat direduksi. Titik gravitasi struktur *tension leg platform* RB6 ini berada di atas SWL. Properti model *tension leg platform* NREL adalah sebagai berikut:

Tabel 4.4 Properti Platform Tension Leg Platform NREL

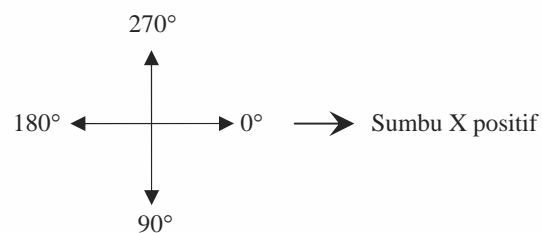
PROPERTI	TLP RB 6	SATUAN
Diameter	20	m
Tinggi Silinder	20	m
Draft Tower	10	m
Tinggi Ballast Beton	0	m
Tebal Plat baja	0.015	m
Massa Baja	297.000	kg
Massa Beton	0	kg
Massa Total Turbin	697.500	kg
Panjang Leg	10	m
Lebar Leg	4	m
Tinggi Leg	4	m
Jumlah Leg	4	-
Jumlah Tether per Leg	2	-
Jari-jari Girasi roll	22.61	m
Jari-jari Girasi pitch	22.61	m
Jari-jari Girasi yaw	10.19	m

Tabel 4.5 Properti Operasional Tension Leg Platform NREL

PROPERTI	TLP RB 6	SATUAN
Jumlah Tether	8	-
Diameter Tether	0.156	m
Draft	30	m
Free board	-10	m
Pusat Gravitasi	16.55	m

4.2. KONFIGURASI SIMULASI

Konfigurasi simulasi yang dilakukan dapat dilihat pada tabel 4.6 s/d 4.8. *Headwave* atau arah gelombang datang yang digunakan adalah 0° .



Gambar 4.3 Arah Gelombang Datang

Gambaran arah gelombang sebesar 0° dapat dilihat pada gambar 4.3. Penampang struktur yang berbentuk lingkaran menyebabkan variasi *headwave* menghasilkan besar gaya gelombang yang relatif sama. Parameter tinggi gelombang signifikan, periode gelombang, dan kecepatan angin dijadikan simulasi kondisi laut. Ketiga parameter ini saling mempengaruhi satu sama lain, sehingga perlu ditinjau dalam satu simulasi. Konfigurasi simulasi yang dilakukan sebagai berikut:

1. Simulasi 1 (satu) : Model Struktur

Tabel 4.6 Parameter Simulasi 1

NO	PARAMETER	VARIABEL TETAP	VARIABEL BEBAS
1	Model TLP	-	TLP MIT-NREL TLP NREL
2	Kedalaman Laut	200 m	-
3	Kecepatan Angin (19.5m)	9.77 m/s	-
4	Rasio Redam	0	-
5	Tinggi Gelombang Signifikan	1.88 m	-
6	Periode Gelombang Signifikan	8.8 s	-

2. Simulasi 2 (dua) : Kondisi Laut (*Sea State*)

Tabel 4.7 Parameter Simulasi 2

NO	PARAMETER	VARIABEL TETAP	VARIABEL BEBAS
1	Model TLP	TLP NREL	-
2	Kedalaman Laut	200 m	-
3	Rasio Redam	0	-
4	Kondisi Laut (<i>Sea State</i>)	-	Sea State 2 Sea State 4 Sea State 6 Sea State 8

3. Simulasi 3 (tiga) : Kedalaman Laut

Tabel 4.8 Parameter Simulasi 3

NO	PARAMETER	VARIABEL TETAP	VARIABEL BEBAS
1	Model TLP	TLP NREL	-
2	Kedalaman Laut	-	62.5 m 100 m 200 m 300 m
3	Kecepatan Angin (19.5m)	9.77 m/s	-
4	Rasio Redam	0	-
5	Tinggi Gelombang Signifikan	1.88 m	-
6	Periode Gelombang Signifikan	8.8 s	-

4.3. KONDISI LAUT (SEA STATE)

Variasi kondisi laut (*sea state*) menggunakan referensi dari penelitian Lee (*Standardized wind and wave environments in North Pacific Ocean Areas*, 1985). Referensi tersebut dapat dilihat pada tabel 4.9 dibawah ini.

Tabel 4.9 Kondisi Laut (Sea State)

Sea State	H _s (m)		Mean (m)	U (knots)		Mean u(h=19.5m) (knots) (m/s)		T _s (s)
0-1	0.00	- 0.10	0.05	0	- 6	3.00	1.54	-
2	0.10	- 0.50	0.30	7	- 10	8.50	4.37	7.5
3	0.50	- 1.25	0.88	11	- 16	13.50	6.94	7.5
4	1.25	- 2.50	1.88	17	- 21	19.00	9.77	8.8
5	2.50	- 4.00	3.25	22	- 27	24.50	12.60	9.7
6	4.00	- 6.00	5.00	28	- 47	37.50	19.29	12.4
7	6.00	- 9.00	7.50	48	- 55	51.50	26.49	15
8	9.00	- 14.00	11.50	56	- 63	59.50	30.61	16
> 8	14.00		> 14	> 63				20

4.4. PERBEDAAN HASIL ANALISA COUPLED DAN UNCOUPLED

Analisa yang dilakukan pada penelitian ini adalah analisa *uncoupled*. Jika dibandingkan dengan hasil analisa *coupled* yang dikerjakan oleh Elizabeth (2006), maka hasil perbandingan dapat dilihat pada tabel 4.11. Pada tabel tersebut, frekuensi angular alami struktur turbin angin terapung lepas pantai *tension leg platform* NREL oleh Elizabeth dengan model pada penulisan ini mempunyai perbedaan 15 % dan MIT 15 %. Perbedaan simpangan baku yang signifikan terjadi ketika menganalisa struktur pada kondisi ekstrim, dimana standar deviasi yang dihasilkan pada model yang dibuat penulis menjadi dibawah estimasi analisa *coupled*. Pada kondisi normal ($H_s \leq 5$ m), standar deviasi cenderung lebih dari estimasi sekitar 4 - 8 % dan 24 - 44 % untuk *tension leg platform* model MIT. Perbandingan yang dilakukan pada tabel 4.10 dilakukan dengan mengasumsi kecepatan angin diposisi turbin h=80 m) adalah 11.2 m/s.

Tabel 4.10 Frekuensi Angular Alami Tension Leg Platform Analisa Coupled & Uncoupled

Frekuensi Angular Alami		Coupled	Uncoupled	Deviasi	Satuan
MIT	Surge	0.146	0.14	-5%	rad/s
	Sway	0.146	0.14	-5%	rad/s
NREL	Surge	0.246	0.21	-15%	rad/s
	Sway	0.246	0.21	-15%	rad/s

Tabel 4.11 Perbedaan Hasil Akhir Analisa Coupled dan Uncoupled Variasi Sea State

VALIDASI			3 σ (Simpangan Baku)		3 σ (Simpangan Baku)		Satuan	
			MIT		NREL			
			Coupled	Uncoupled	Coupled	Uncoupled		
KONDISI LINGKUNGAN	1	$H_s = 0.09$ m	Surge	0.0001	0.0000	0.0001	0.0000	m
		$T_s = 2$ detik	Sway	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	m
	2	$H_s = 0.67$ m	Surge	0.0292	0.0258	0.0526	0.0419	m
		$T_s = 4.8$ detik	Sway	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	m
	3	$H_s = 2.44$ m	Surge	0.3468	0.4308	0.6238	0.6721	m
		$T_s = 8.1$ detik	Sway	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	m
	4	$H_s = 5.49$ m	Surge	1.2271	1.7667	2.6819	2.7972	m
		$T_s = 11.3$ detik	Sway	0.0000	0.0003	0.0005	0.0007	m
	5	$H_s = 10.00$ m	Surge	2.7981	4.1682	12.3667	6.8634	m
		$T_s = 13.6$ detik	Sway	0.0001	0.0016	0.0132	0.0033	m

Tabel 4.12 Perbedaan Hasil Akhir Analisa Coupled dan Uncoupled Variasi Kedalaman Laut

VALIDASI			3 σ (Simpangan Baku)		3 σ (Simpangan Baku)		Satuan	
			MIT		NREL			
			Coupled	Uncoupled	Coupled	Uncoupled		
KEDALAMAN LAUT	1	$d = 62.5$ m	Surge	0.6671	0.5681	3.4309	7.4197	m
			Sway	0.0001	0.0000	0.0011	0.0009	m
	2	$d = 100$ m	Surge	0.3942	0.4611	1.3991	0.7885	m
			Sway	0.0000	0.0000	0.0019	0.0001	m
	3	$d = 200$ m	Surge	0.3468	0.4308	0.6238	0.6721	m
			Sway	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	m
	4	$d = 300$ m	Surge	0.3378	0.4242	0.5737	0.6485	m
			Sway	0.0000	0.0000	0.0000	0.0007	m

4.5. SIMULASI MODEL STRUKTUR

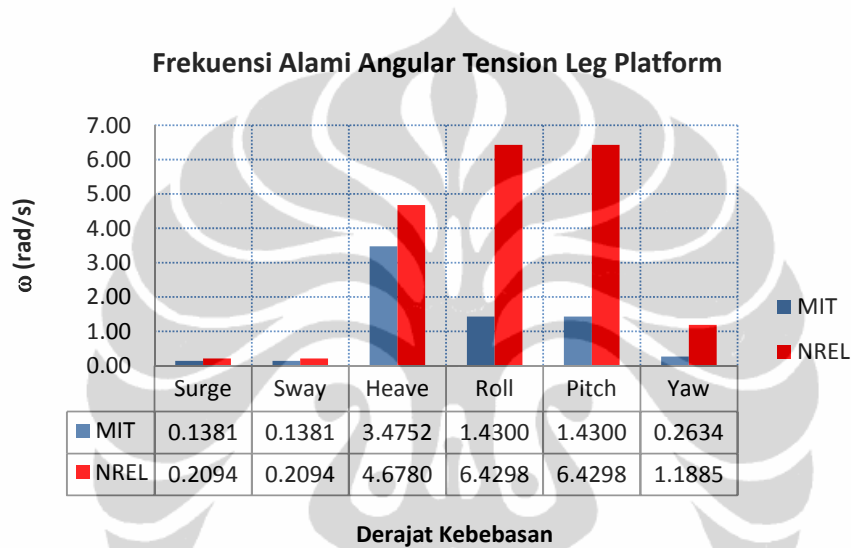
Pada simulasi ini akan membandingkan karakteristik struktur turbin angin *tension leg platform* MIT dengan NREL yaitu frekuensi alami angular, kekakuan atau gaya pembalik, perpindahan translasi dan rotasi yang terjadi.

4.5.1. Frekuensi Alami Struktur (ω)

Pada tabel 4.13 menunjukkan frekuensi alami angular untuk seluruh derajat kebebasan pada struktur turbin angin *tension leg platform* MIT lebih kecil dari *tension leg platform* NREL. Perbedaan frekuensi angular alami terjadi karena kekakuan dan massa struktur cukup berbeda.

Tabel 4.13 Frekuensi Alami Tension Leg Platform MIT dan NREL

NO	DOF	Frekuensi Alami		Satuan
		MIT	NREL	
1	Surge (η_1)	0.14	0.21	rad/s
2	Sway (η_2)	0.14	0.21	rad/s
3	Heave (η_3)	3.48	4.68	rad/s
4	Roll (η_4)	1.43	6.43	rad/s
5	Pitch (η_5)	1.43	6.43	rad/s
6	Yaw (η_6)	0.26	1.19	rad/s



Gambar 4.4 Frekuensi Angular Alami

4.5.2. Kekakuan Struktur

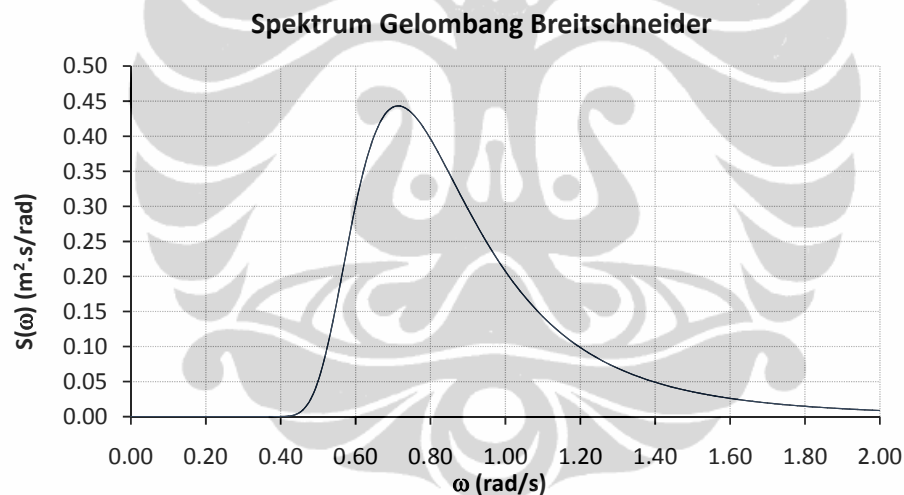
Kekakuan struktur *tension leg platform* MIT dan NREL dapat dilihat pada tabel 4.14, dimana struktur turbin angin *tension leg platform* NREL mempunyai kekakuan yang lebih besar daripada *tension leg platform* MIT pada kekakuan keenam derajat kebebasannya kecuali pada derajat kebebasan *heave*. Hal ini dikarenakan bentuk geometri berbeda dari kedua struktur tersebut. Perbedaannya dapat dilihat pada gambar 4.1 dan 4.2. Rasio kekakuan *tension leg platform* NREL terhadap *tension leg platform* MIT juga dapat dilihat pada tabel 4.14. Rasio kekakuan untuk derajat kebebasan *surge* dan *sway* dari struktur *tension leg platform* NREL adalah 1.22 kali dari struktur *tension leg platform* MIT. Rasio kekakuan *roll*, dan *pitch* struktur *tension leg platform* NREL adalah 1.92 kali dari *tension leg platform* MIT.

Tabel 4.14 Kekakuan Tension Leg Platform MIT dan NREL

NO	DOF	Kekakuan		K_{NREL}/K_{MIT}	Satuan
		MIT	NREL		
1	Surge (η_1)	3.01E+05	3.68E+05	1.22	N/m
2	Sway (η_2)	3.01E+05	3.68E+05	1.22	N/m
3	Heave (η_3)	1.91E+08	1.83E+08	0.96	N/m
4	Roll (η_4)	1.10E+10	2.12E+10	1.92	N.m/rad
5	Pitch (η_5)	1.10E+10	2.12E+10	1.92	N.m/rad

4.5.3. Spektrum Gelombang

Pada simulasi 1 digunakan tinggi gelombang signifikan dan periode gelombang pada *sea state* no.4 dimana probabilitas kemungkinan terjadinya terbesar diantara *sea state* lainnya (Lee, 1985).



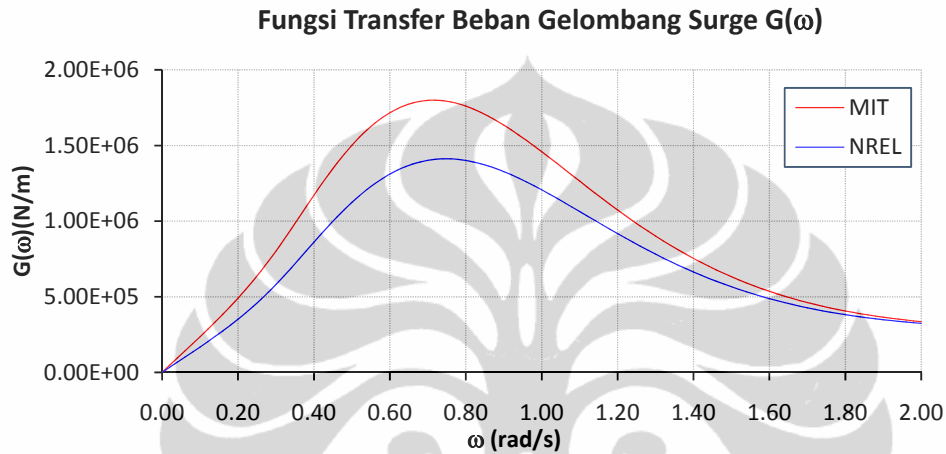
Gambar 4.5 Spektrum Gelombang Tension Leg Platform MIT dan NREL

Nilai parameter pada kondisi laut tersebut adalah sebagai berikut: Tinggi gelombang signifikan (H_s) = 1.88 m, periode gelombang signifikan (T_s) = 8.8 detik, dan kecepatan angin pada ketinggian 19.5 m dari SWL = 9.77 m/s.

4.5.4. Fungsi Transfer Beban Gelombang

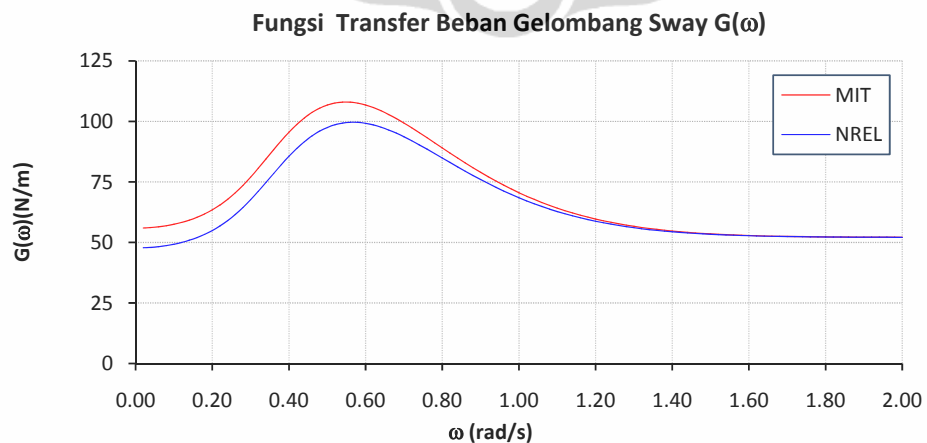
Fungsi transfer beban gelombang untuk *tension leg platform* MIT pada derajat kebebasan *surge* dan *sway* lebih besar dari *tension leg platform* NREL. Hal ini mengindikasikan TLP MIT menerima beban gelombang lebih besar dari *tension leg platform* NREL. Diameter *hull* struktur *tension leg platform* MIT lebih

besar dari *hull* struktur *tension leg platform* NREL sehingga beban gelombang pada *hull* struktur *tension leg platform* MIT lebih besar. Panjang *hull* dari struktur *tension leg platform* MIT sebesar 26 m lebih panjang dari *hull* struktur *tension leg platform* NREL yang hanya 20 m. Grafik fungsi transfer beban gelombang untuk derajat kebebasan arah *surge* dan *sway* dapat dilihat pada gambar 4.6 dan 4.7.



Gambar 4.6 Fungsi Transfer Beban Gelombang Surge Tension Leg Platform MIT dan NREL

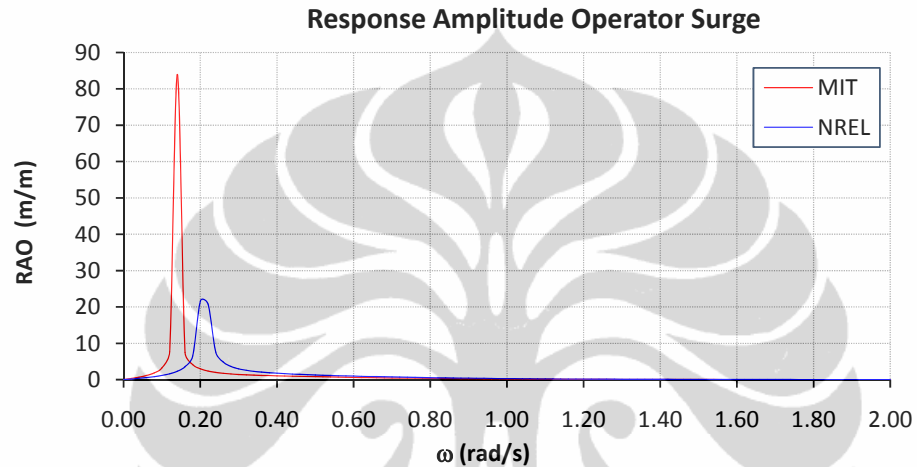
Pada gambar 4.7, setelah nilai fungsi transfer beban gelombang *sway* pada *tension leg platform* MIT mencapai puncak, nilainya kemudian turun dan akhirnya menjadi konstan. Sedangkan pada fungsi transfer beban gelombang *surge* nilainya cenderung turun.



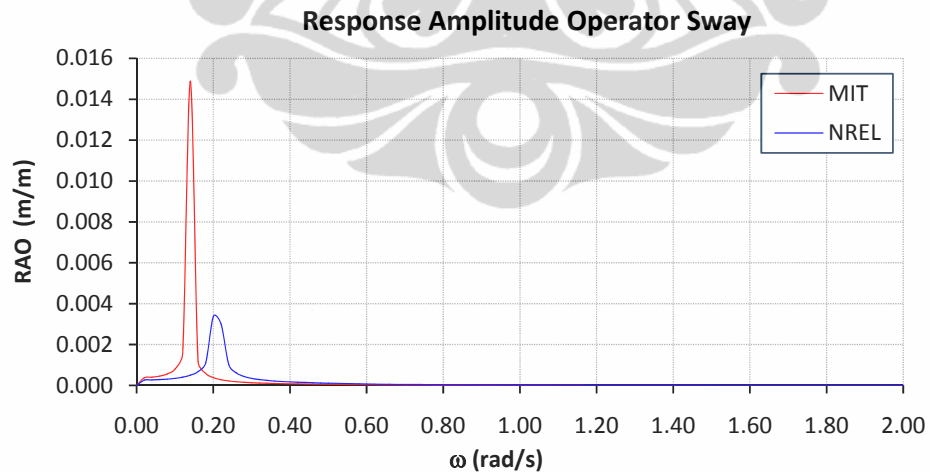
Gambar 4.7 Fungsi Transfer Beban Gelombang Sway Tension Leg Platform MIT dan NREL

4.5.5. Response Amplitude Operator

Grafik respon amplitude operator untuk arah *surge* dapat dilihat pada gambar 4.8, sedangkan gambar 4.9 untuk arah *sway*. Jika dilihat puncak kedua grafik tersebut, struktur *tension leg platform* MIT mempunyai puncak RAO yang lebih tinggi dari *tension leg platform* NREL.



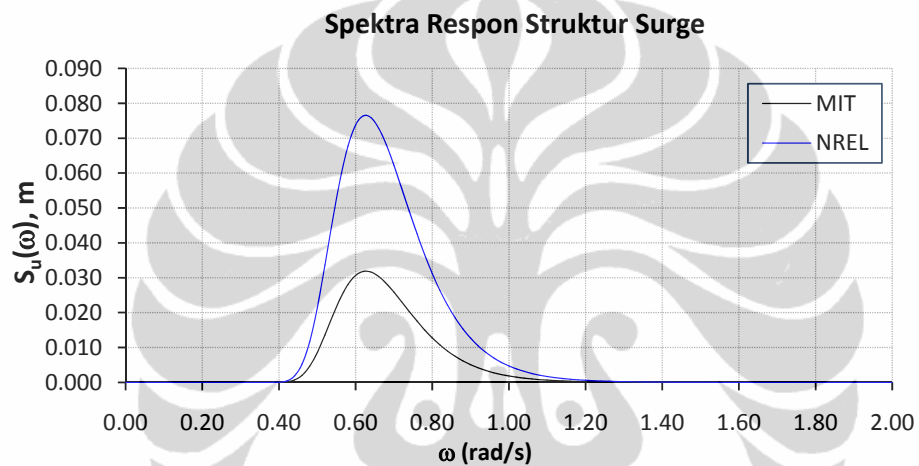
Gambar 4.8 Response Amplitude Operator Surge Tension Leg Platform MIT dan NREL



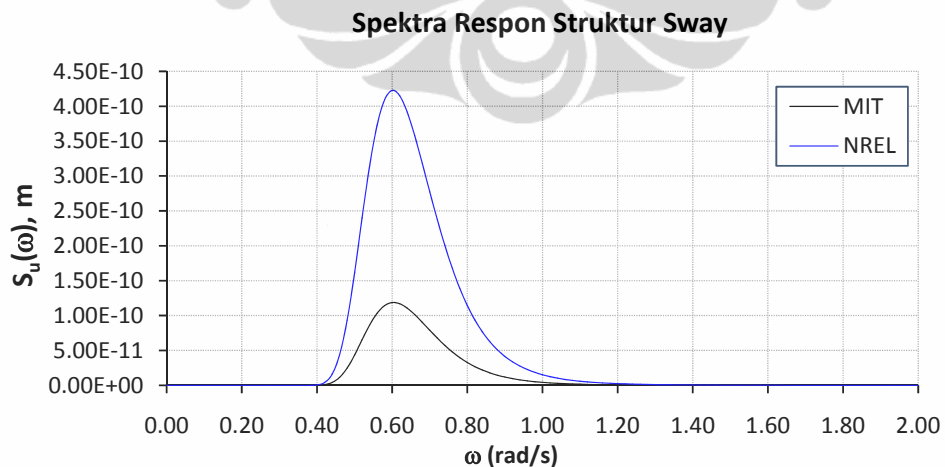
Gambar 4.9 Response Amplitude Operator Sway Tension Leg Platform MIT dan NREL

4.5.6. Spektra Respon Struktur

Spektra respon struktur menggambarkan distribusi respon dari struktur akibat gaya eksitasi yang diberikan kepada struktur. Pada gambar 4.10 dan 4.11 dapat dilihat spektra respon struktur untuk *tension leg platform* MIT dan NREL. Pada spektra tersebut menunjukkan bahwa distribusi repon struktur *tension leg platform* NREL hampir sama dibandingkan dengan *tension leg platform* MIT. Rentang distribusi respon struktur *surge tension leg platform* MIT dan NREL adalah 0.4 – 1.2 rad/s.



Gambar 4.10 Spektra Respon Struktur Surge Tension Leg Platform MIT dan NREL



Gambar 4.11 Spektra Respon Struktur Sway Tension Leg Platform MIT dan NREL

Untuk derajat kebebasan *surge*, puncak spektra *tension leg platform* NREL lebih tinggi dibandingkan dengan *tension leg platform* MIT dan pada spektra respon struktur *sway* juga demikian.

4.5.7. Perpindahan Translasi dan Rotasi Struktur

Pada Tabel 4.15 dapat dilihat perpindahan pada 5 derajat kebebasan struktur *tension leg platform* MIT. *Offset* yang terjadi adalah 5.91 m dan kemudian *offset* ini menyebabkan struktur *tension leg platform* MIT mengalami *set-down* sebesar -0.16 m.

Tabel 4.15 Translasi dan Rotasi Struktur Tension Leg Platform MIT

NO	DOF	Perpindahan disebabkan oleh				offset	Set-Down	Satuan
		Gelombang	Angin	Arus	Total			
1	Surge	3.93E-01	3.57E+00	1.95E+00	5.91E+00	5.9119		(m)
2	Sway	2.30E-05	0.00E+00	0.00E+00	2.30E-05			(m)
3	Heave	2.59E-01	0.00E+00	0.00E+00	2.59E-01		-0.1627	(m)
4	Roll	1.58E-05	2.26E-02	0.00E+00	2.26E-02			(°)
5	Pitch	2.90E-01	6.00E-01	7.23E-02	9.61E-01			(°)

Tabel 4.16 Translasi dan Rotasi Struktur Tension Leg Platform NREL

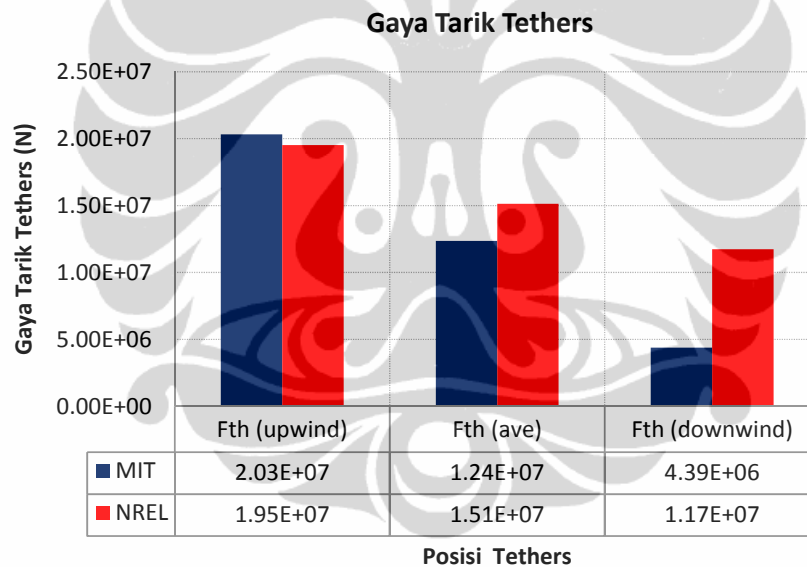
NO	DOF	Perpindahan disebabkan oleh				offset	Set-Down	Satuan
		Gelombang	Angin	Arus	Total			
1	Surge	6.13E-01	2.93E+00	1.13E+00	4.67E+00	4.6688		(m)
2	Sway	4.33E-05	0.00E+00	0.00E+00	4.33E-05			(m)
3	Heave	3.41E-01	0.00E+00	0.00E+00	3.41E-01		-0.06	(m)
4	Roll	6.54E-06	1.18E-02	0.00E+00	1.18E-02			(°)
5	Pitch	1.00E-01	2.98E-01	2.32E-02	4.21E-01			(°)

Struktur *tension leg platform* NREL mengalami *offset* 4.67 m dan *set-down* -0.06 m. Struktur *tension leg platform* NREL memiliki kinerja yang lebih baik jika dilihat dari respon struktur yang terjadi. Kategori stabilitas kedua struktur dengan melihat *pitch* dari struktur, seperti yang telah dijelaskan pada bab 2. Struktur *tension leg platform* NREL mempunyai rotasi *pitch* sebesar $0.421^\circ \leq 0.7^\circ$, sehingga struktur tersebut mempunyai kategori stabilitas operating. Pada struktur *tension leg platform* MIT rotasi *pitch* dan *roll* sebesar $0.961^\circ \geq 0.7^\circ$ tetapi $\leq 2.0^\circ$ sehingga dikategorikan survival. Pada tabel 4.15 dan 4.16 dapat dilihat

bahwa akibat kondisi awal, dimana gaya tarik pada tethers yang bekerja hanya gaya dari *reserve buoyancy* tethers mengalami perpanjangan searah *heave*.

4.5.8. Gaya Tarik pada Tethers

Contoh perhitungan gaya tarik tethers dapat dilihat pada lampiran A5. Gaya tarik tethers posisi *upwind* pada *tension leg platform* MIT lebih besar daripada *tension leg platform* NREL. Sedangkan pada posisi *downwind*, *tension leg platform* MIT lebih kecil dari *tension leg platform* NREL. Hal ini disebabkan oleh nilai ΔF pada *tension leg platform* MIT untuk menjaga gaya tarik rata-rata seluruh tethers, lebih besar dibandingkan *tension leg platform* NREL. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 4.12 di bawah ini.



Gambar 4.12 Gaya Tarik Tethers Simulasi 1

4.6. SIMULASI KONDISI LINGKUNGAN LAUT (SEA STATE)

Referensi kategori kondisi lingkungan laut adalah hasil penelitian Lee (1985) dan untuk lebih lengkapnya dapat dilihat pada tabel 4.9. Kondisi lingkungan laut terdiri dari 3 nilai parameter yang saling berhubungan. Parameter tersebut adalah tinggi gelombang signifikan, periode gelombang signifikan, dan kecepatan angin.

4.6.1. Frekuensi Alami Struktur (ω)

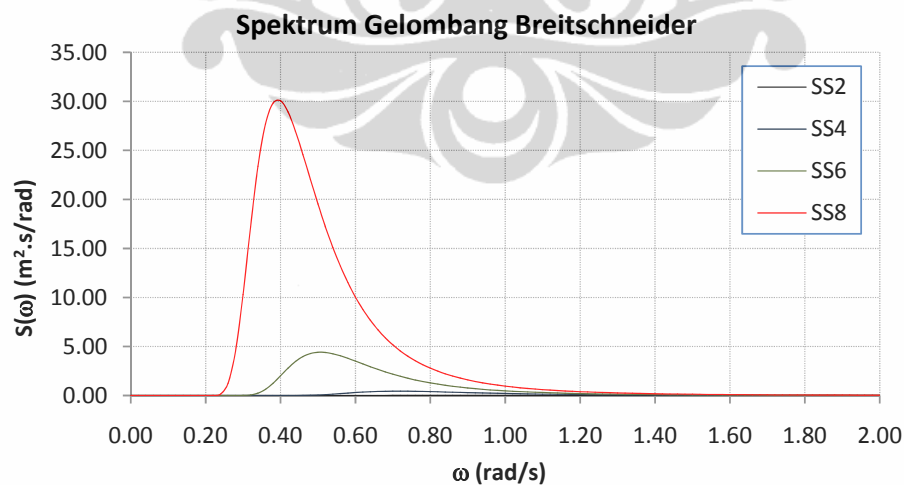
Struktur yang digunakan pada simulasi ini adalah struktur *tension leg platform* NREL yang digunakan pada simulasi 1, dengan nilai frekuensi alaminya untuk 5 DOF dapat dilihat pada tabel 4.13.

4.6.2. Kekakuan struktur

Kekakuan struktur struktur *tension leg platform* NREL untuk 5 DOF dapat dilihat pada tabel 4.14.

4.6.3. Spektrum Gelombang

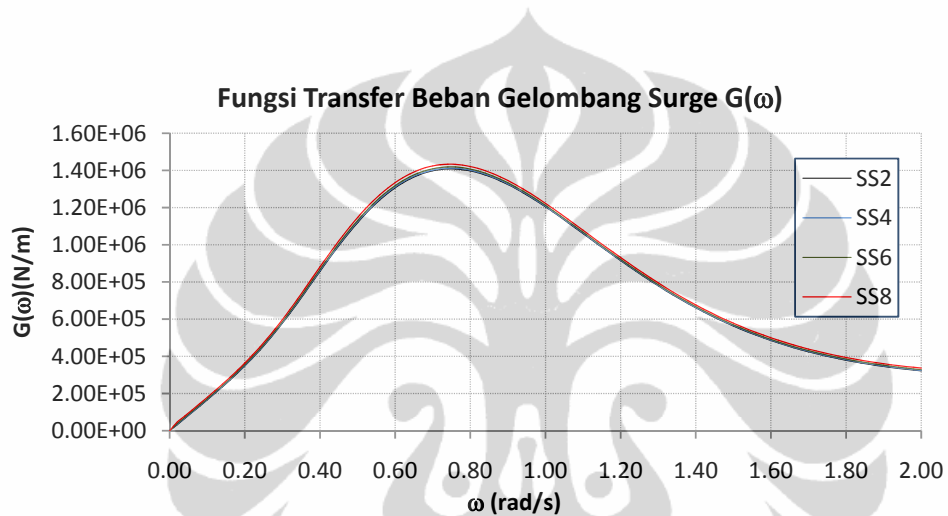
Parameter kondisi laut atau *sea state* seperti tinggi signifikan gelombang, periode gelombang signifikan, dan kecepatan angin pada ketinggian 19.5 m dari SWL dapat dilihat pada tabel 4.9. Spektrum gelombang laut dapat dihitung dengan menggunakan parameter tersebut ke dalam persamaan 2.22. Grafik untuk spektrum gelombang laut untuk *sea state* no.2, 4, 6, 8 dapat dilihat pada gambar 4.13. Pada gambar tersebut menunjukkan semakin besar tiga nilai parameter ditunjukkan dengan kenaikan level *sea state*, semakin besar distribusi energi gelombang laut yang ada pada spektrum.



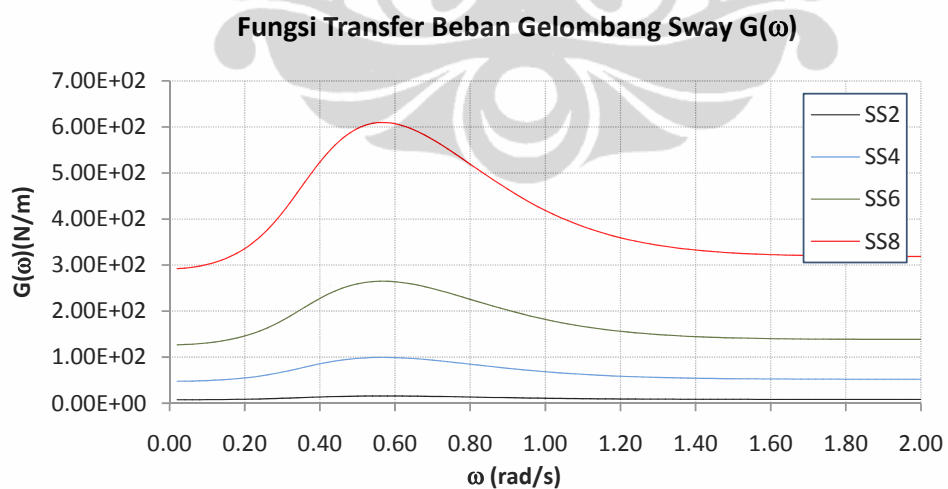
Gambar 4.13 Spektrum Gelombang Simulasi 2

4.6.4. Fungsi Transfer Beban Gelombang

Fungsi transfer beban pada derajat kebebasan *surge* untuk berbagai variasi *sea state* hampir berhimpitan satu sama lain. Hal ini disebabkan oleh komponen fungsi beban gelombang inersia jauh lebih dominan dibandingkan dengan fungsi beban gelombang hambatnya. Sedangkan untuk fungsi transfer beban gelombang pada derajat kebebasan *sway*, semakin tinggi level *sea state* semakin besar juga nilai fungsi transfer bebannya. Hal ini dapat dilihat pada gambar 4.15.



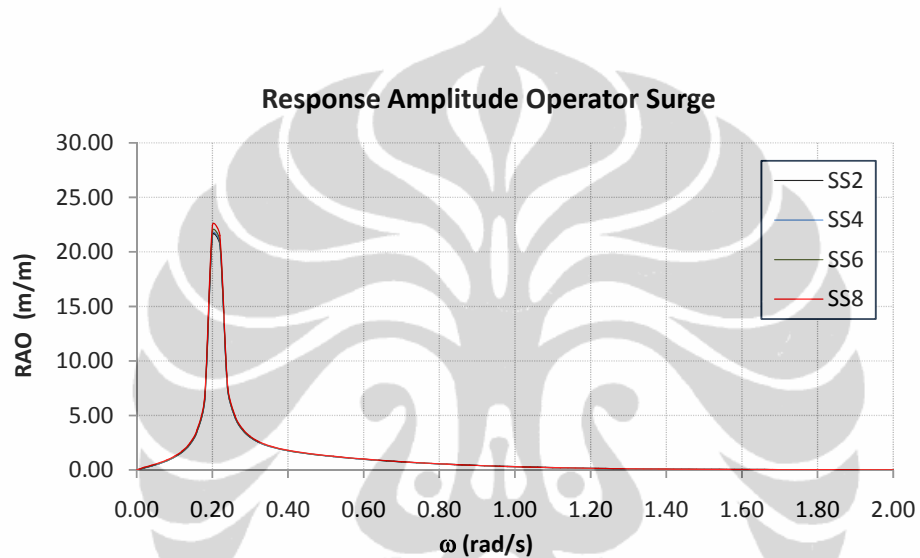
Gambar 4.14 Fungsi Transfer Beban gelombang Surge Simulasi 2



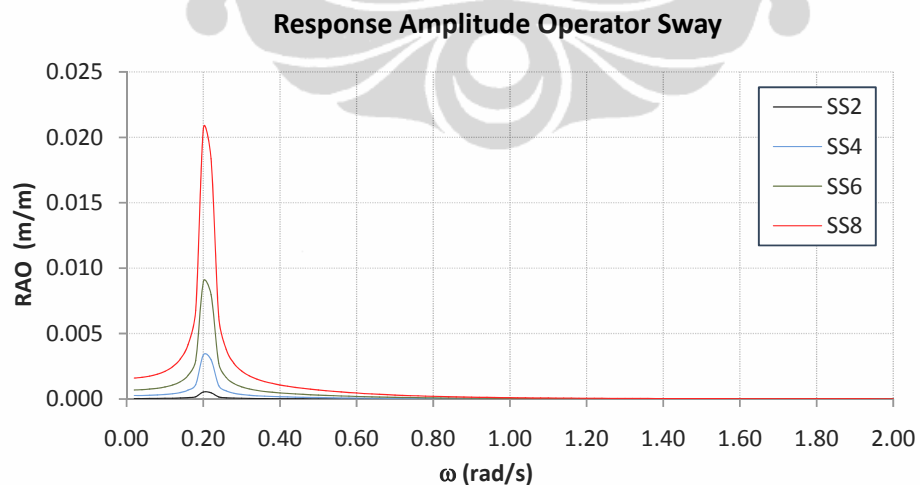
Gambar 4.15 Fungsi Transfer Beban Gelombang Sway Simulasi 2

4.6.5. Response Amplitude Operator

Kondisi pada fungsi transfer beban gelombang juga terjadi untuk grafik RAO pada gambar 4.16 dan 4.17. Puncak RAO dari kedua derajat kebebasan yaitu *surge* dan *sway* terjadi pada frekuensi angular (ω) = 0.21 rad/s. Pada nilai tersebut juga merupakan nilai frekuensi alami dari struktur *tension leg platform* NREL ini. Kondisi ini menjelaskan juga terjadinya resonansi struktur dan gelombang pada frekuensi tersebut.



Gambar 4.16 Response Amplitude Operator Surge Simulasi 2

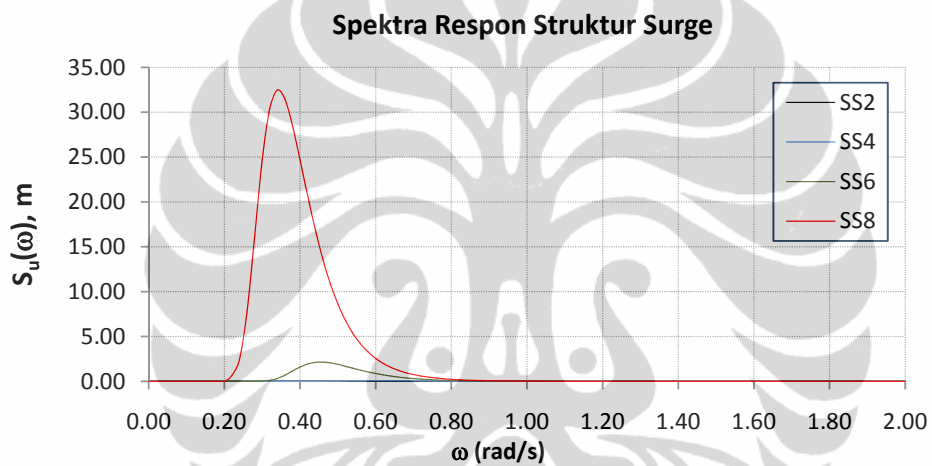


Gambar 4.17 Response Amplitude Operator Sway Simulasi 2

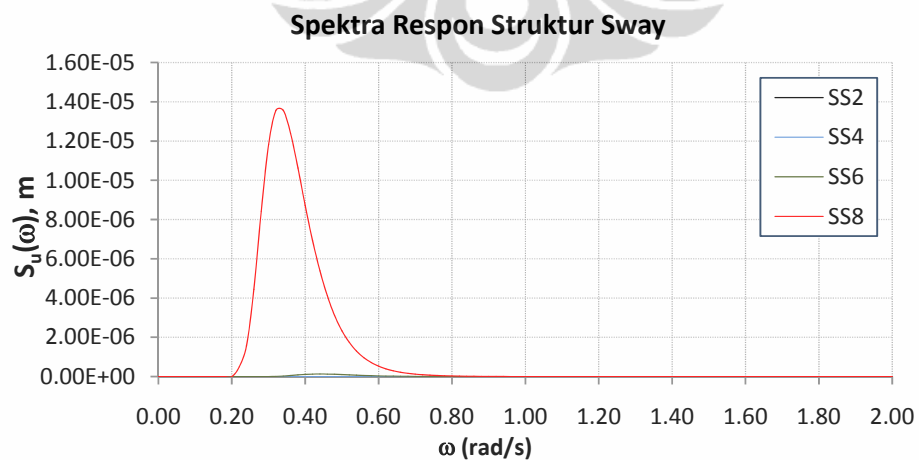
4.6.6. Spektra Respon Struktur

Pada spektra respon struktur derajat kebebasan *surge* dan *sway* pada gambar 4.18 dan 4.19 menunjukkan perbedaan nilai respon yang cukup jauh antara *sea state* satu dengan yang lainnya. Hal tersebut menyebabkan *sea state* 2, 4, dan 6 tidak terlihat jelas karena nilainya jauh di bawah 32 m untuk *surge* dan 1.4×10^{-5} m untuk *sway*.

Bentuk spektra respon struktur untuk *surge* dan *sway* cenderung seperti bentuk spektrum gelombang yang digunakan.



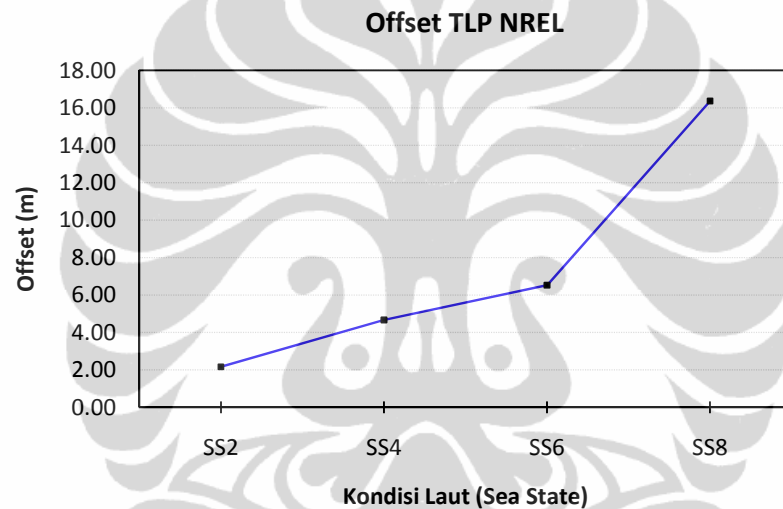
Gambar 4.18 Spektra Respon Struktur Surge Simulasi 2



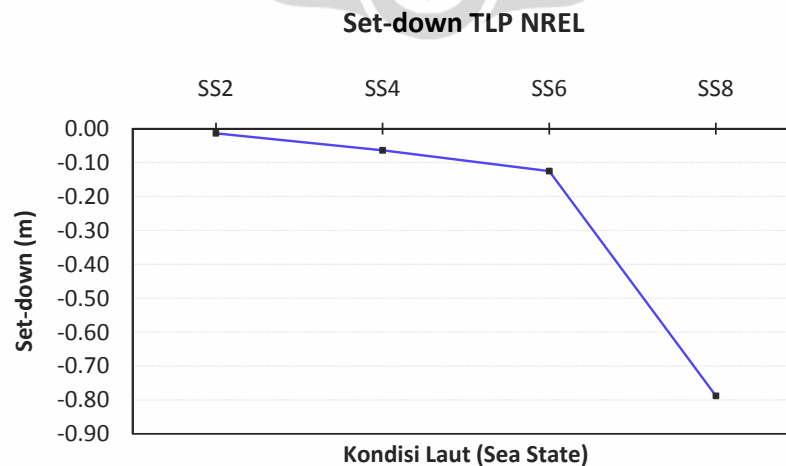
Gambar 4.19 Spektra Respon Struktur Sway Simulasi 2

4.6.7. Perpindahan Translasi dan Rotasi Struktur

Respon struktur *tension leg platform* NREL untuk berbagai *sea state* dapat diwakilkan oleh *offset* dan *set-down* dari struktur *tension leg platform*. Hal ini dikarenakan struktur *tension leg platform* mempunyai gerakan primernya searah derajat kebebasan *heave* (*set-down*) dan gerakan sekundernya searah DOF *surge* (*offset*). Apabila terjadi *offset* pada struktur dan panjang tethers diasumsikan tidak terjadi penambahan panjang maka struktur juga mengalami *set-down*. Kedua respon struktur tersebut dapat dilihat pada gambar 4.20 dan 4.21.

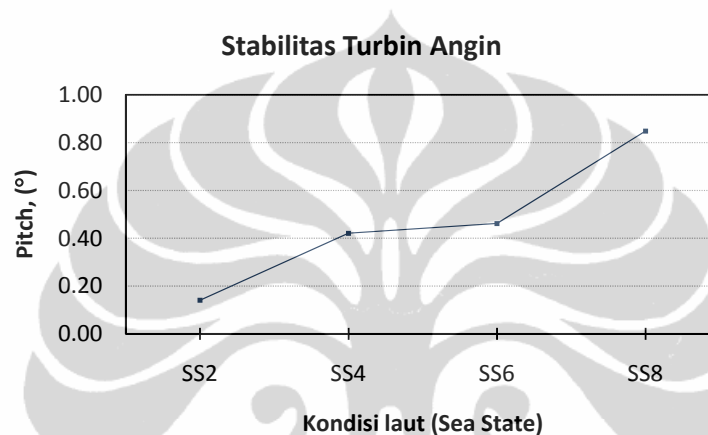


Gambar 4.20 Offset Tension Leg Platform NREL Simulasi 2

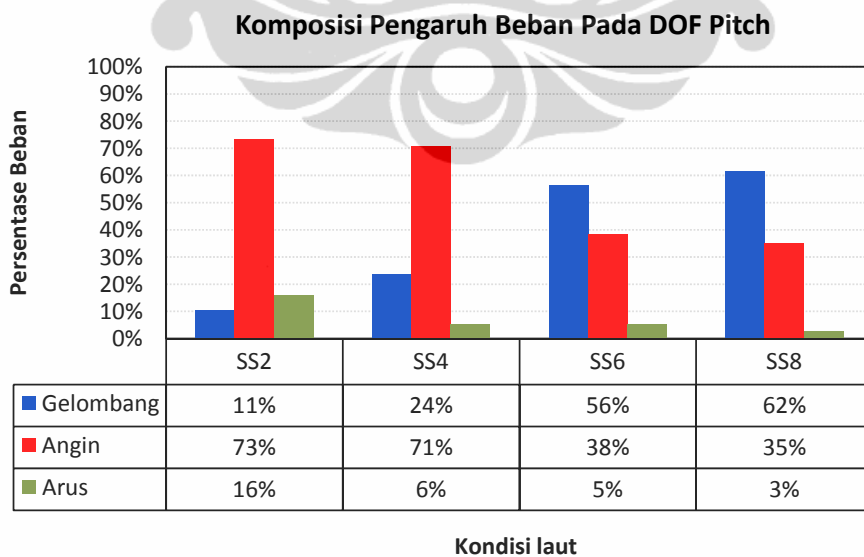


Gambar 4.21 Set-down Tension Leg Platform NREL Simulasi 2

Respon struktur DOF *pitch* juga perlu diperhatikan untuk menentukan kategori stabilitas turbin angin. Pada gambar 4.22 menunjukkan sudut *pitch* maksimum $\leq 0.7^\circ$ untuk *sea state* 2, 4, 6 sehingga struktur turbin angin terapung lepas pantai tipe *tension leg platform* NREL ini mempunyai kategori stabilitas operating. *Pitch sea state* 8 $> 0.7^\circ$ sehingga struktur turbin angin terapung lepas pantai tipe *tension leg platform* NREL mempunyai kategori stabilitas survival.



Gambar 4.22 Stabilitas Turbin Angin Terapung Lepas Pantai Tipe NREL Simulasi 2



Gambar 4.23 Komposisi Pengaruh Beban Pada Derajat Kebebasan Pitch Simulasi 2

Komposisi pengaruh beban luar pada struktur *tension leg platform* NREL dari berbagai variasi *sea state* dapat dilihat pada gambar 4.23. Grafik tersebut menunjukkan semakin tinggi *sea state*, beban gelombang yang mengakibatkan *pitch* lebih dominan, sedangkan beban arus dan angin semakin berkurang.

Berkurangnya pengaruh angin pada struktur disebabkan adanya kontrol yang dilakukan pada rotor untuk membatasi torsi dan gaya lateral angin.

Tabulasi lengkap dari hasil simulasi dapat dilihat pada tabel 4.17 sampai dengan 4.20 dibawah ini.

Tabel 4.17 Translasi dan Rotasi Tension Leg Platform NREL pada Sea State 2

NO	DOF	Perpindahan disebabkan oleh				offset	Set-Down	Satuan
		Gelombang	Angin	Arus	Total			
1	Surge	6.94E-02	9.84E-01	1.11E+00	2.1654	2.17		(m)
2	Sway	7.17E-07	0.00E+00	0.00E+00	0.0000			(m)
3	Heave	3.41E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.3409		-0.01	(m)
4	Roll	1.49E-07	2.33E-03	0.00E+00	0.0023			(°)
5	Pitch	1.48E-02	1.03E-01	2.28E-02	0.1408			(°)

Tabel 4.18 Translasi dan Rotasi Tension Leg Platform NREL pada Sea State 4

NO	DOF	Perpindahan disebabkan oleh				offset	Set-Down	Satuan
		Gelombang	Angin	Arus	Total			
1	Surge	6.13E-01	2.93E+00	1.13E+00	4.6688	4.67		(m)
2	Sway	4.33E-05	0.00E+00	0.00E+00	0.0000			(m)
3	Heave	3.41E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.3409		-0.06	(m)
4	Roll	6.54E-06	1.18E-02	0.00E+00	0.0118			(°)
5	Pitch	1.00E-01	2.98E-01	2.32E-02	0.4210			(°)

Tabel 4.19 Translasi dan Rotasi Tension Leg Platform NREL pada Sea State 6

NO	DOF	Perpindahan disebabkan oleh				offset	Set-Down	Satuan
		Gelombang	Angin	Arus	Total			
1	Surge	2.94E+00	2.42E+00	1.16E+00	6.5261	6.53		(m)
2	Sway	6.81E-04	0.00E+00	0.00E+00	0.0007			(m)
3	Heave	3.41E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.3409		-0.13	(m)
4	Roll	5.20E-05	1.18E-02	0.00E+00	0.0118			(°)
5	Pitch	2.60E-01	1.78E-01	2.38E-02	0.4618			(°)

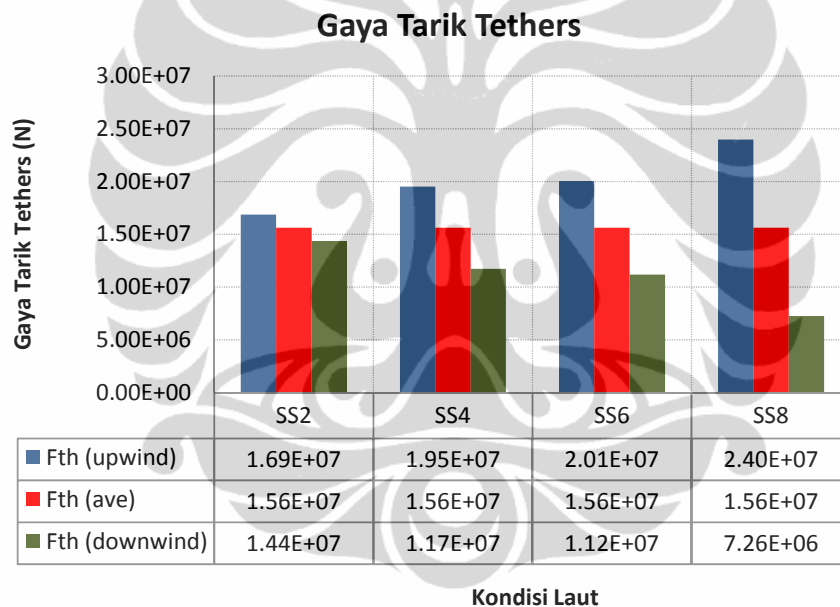
Tabel 4.20 Translasi dan Rotasi Tension Leg Platform NREL pada Sea State 8

NO	DOF	Perpindahan disebabkan oleh				offset	Set-Down	Satuan
		Gelombang	Angin	Arus	Total			
1	Surge	1.04E+01	4.7E+00	1.20E+00	16.3639	16.36		(m)
2	Sway	6.41E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.0064			(m)
3	Heave	3.41E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.3409		-0.79	(m)
4	Roll	2.66E-04	1.18E-02	0.00E+00	0.0120			(°)
5	Pitch	5.24E-01	3.0E-01	2.46E-02	0.8482			(°)

Translasi yang terjadi pada DOF *sway* sangat kecil dibandingkan dengan translasi arah *surge*. Pada *sea state* 8 translasi *sway* yang terjadi hanya 6 mm. Pada perhitungan translasi *sway* tersebut gaya transversal akibat arus dan angin pada tiang tidak dihitung. Hal ini dapat menyebabkan hasil perhitungan *under estimate* dari nilai yang terjadi dilapangan.

4.6.8. Gaya Tarik Tethers

Nilai ΔF pada tethers semakin besar seiring dengan meningkatnya *sea state* pada struktur *tension leg platform* NREL. Sehingga gaya tarik pada tethers di posisi *upwind* menjadi semakin besar dan tether pada posisi *downwind* semakin kecil.



Gambar 4.24 Gaya Tarik Tethers Simulasi 2

4.7. SIMULASI KEDALAMAN LAUT

Kedalaman laut akan mempengaruhi kekakuan dari struktur *tension leg platform* NREL. Simulasi kedalaman laut diharapkan dapat menjelaskan respon struktur akibat berkurangnya kekakuan struktur dan perubahan frekuensi angular alami dari struktur.

4.7.1. Frekuensi Alami Struktur (ω)

Frekuensi alami pada laut kedalaman laut 62.5 m mempunyai frekuensi alami yang besar, dibandingkan dengan frekuensi angular alami 5 derajat kebebasan pada kedalaman laut 100 m, 200 m, dan 300 m. untuk lebih lengkapnya dapat dilihat pada tabel 4.21.

Tabel 4.21 Frekuensi Angular alami TLP NREL Simulasi 3

NO	DOF	Frekuensi Angular Alami (rad/s)			
		62M	100M	200M	300M
1	Surge	0.48	0.33	0.21	0.17
2	Sway	0.48	0.33	0.21	0.17
3	Heave	10.62	7.25	4.68	3.73
4	Roll	13.78	9.57	6.43	5.32
5	Pitch	13.78	9.57	6.43	5.32

4.7.2. Kekakuan struktur

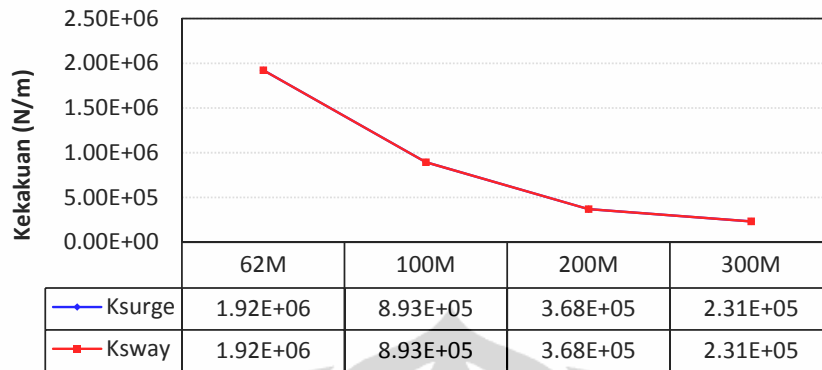
Kekakuan struktur untuk 5 (lima) derajat kebebasan yang dianalisa cenderung mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya kedalaman laut.

Tabel 4.22 Kekakuan 5 Derajat Kebebasan pada Simulasi 3

NO	DOF	Kekakuan			
		62M	100M	200M	300M
1	Surge	1.92E+06	8.93E+05	3.68E+05	2.31E+05
2	Sway	1.92E+06	8.93E+05	3.68E+05	2.31E+05
3	Heave	9.44E+08	4.40E+08	1.83E+08	1.17E+08
4	Roll	9.73E+10	4.69E+10	2.12E+10	1.45E+10
5	Pitch	9.73E+10	4.69E+10	2.12E+10	1.45E+10

Rata-rata persentase penurunan kekakuan untuk 5 derajat kebebasan dari kedalaman laut 100 m ke kedalaman laut 200 m adalah 57.13 %. Sedangkan rata-rata persentase penurunan kekakuan untuk 5 (lima) derajat kebebasan dari kedalaman 200 m ke kedalaman 300 adalah 34.66 %. Pada gambar 4.25 s/d 4.27 menunjukkan penurunan kekakuan struktur dari 5 (lima) derajat kebebasan. Struktur *tension leg platform* NREL simetri terhadap sumbu x dan y, maka kekakuan struktur derajat kebebasan *surge* dan *sway* relatif sama. Kekakuan struktur derajat kebebasan *roll* dan *pitch* juga relatif sama.

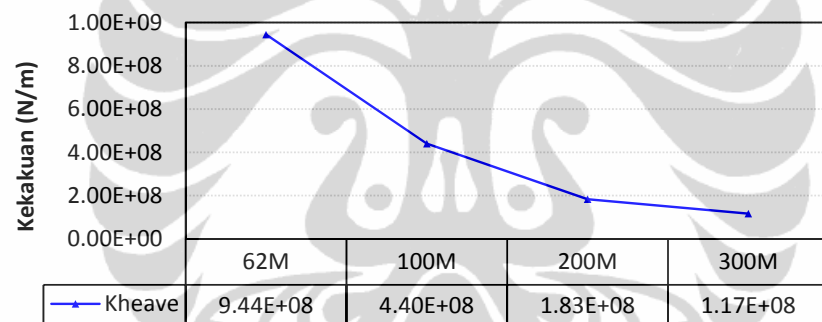
Kekakuan Surge dan Sway



Kedalaman Laut

Gambar 4.25 Kekakuan Surge dan Sway Simulasi 3

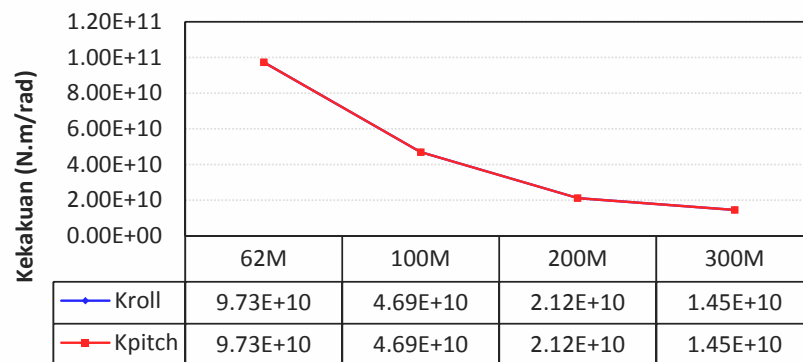
Kekakuan Heave



Kedalaman laut

Gambar 4.26 Kekakuan Heave Simulasi 3

Kekakuan Roll dan Pitch

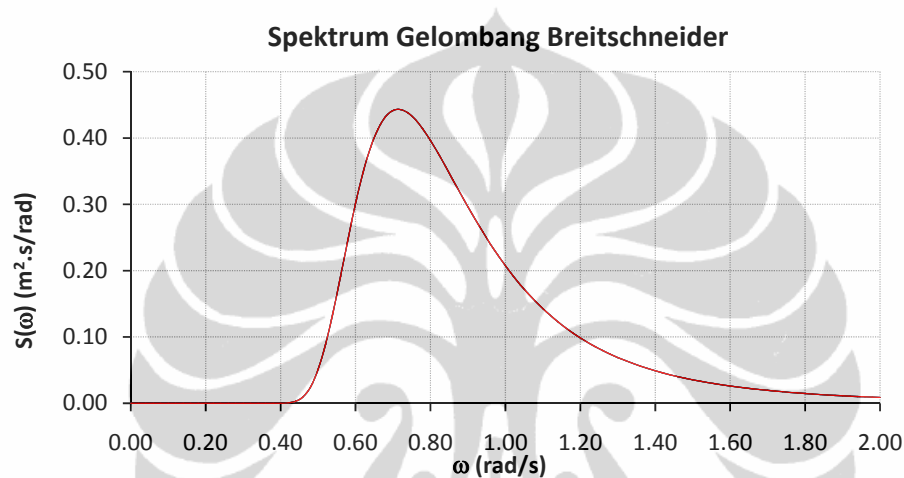


Kedalaman Laut

Gambar 4.27 Kekakuan Roll dan Pitch Simulasi 3

4.7.3. Spektrum Gelombang

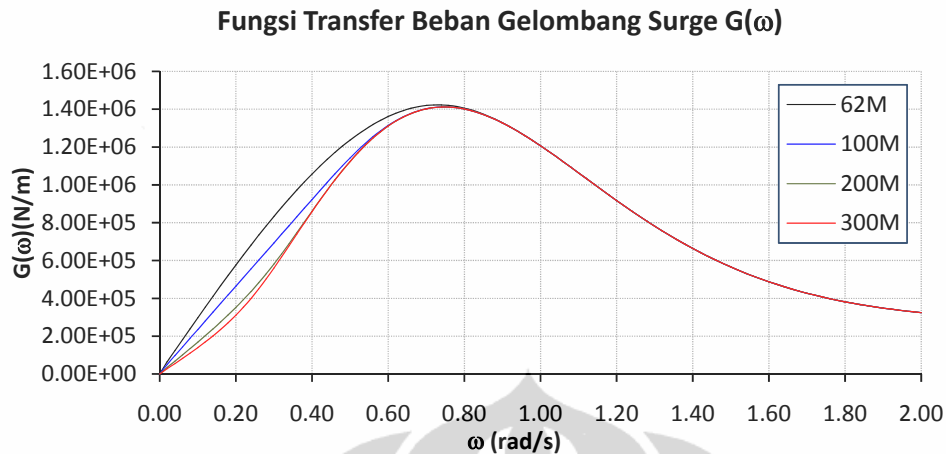
Variasi kedalaman laut tidak mempengaruhi bentuk dan rentang spektrum gelombang laut sehingga untuk kedalaman 62.5 m , 100 m, 200 m, dan 300 m mempunyai rentang dan besar yang sama. Pada gambar 4.28 juga menunjukkan rentang dari spektrum gelombang ini cukup besar dari 0.4 rad/s sampai dengan ≥ 2.0 rad/s.



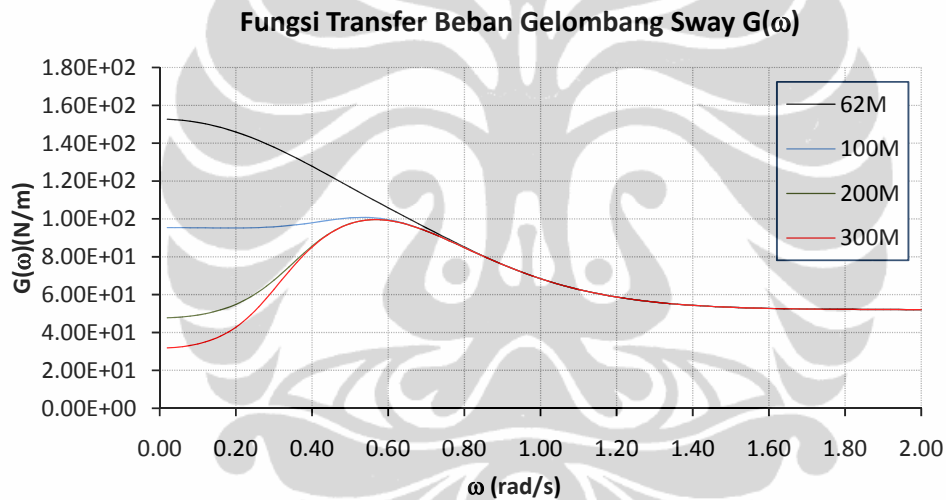
Gambar 4.28 Spektrum Gelombang Simulasi 3

4.7.4. Fungsi Transfer Beban Gelombang

Fungsi transfer beban gelombang *surge tension leg platform* NREL yang divariasikan terhadap kedalaman laut dapat dianalisa menjadi dua berdasarkan rentang frekuensi angularnya. Pada rentang dibawah frekuensi angular dari gelombang yaitu = 0.714 rad/s, fungsi transfer beban *surge* dan *sway* terjadi perbedaan. Sedangkan pada rentang diatas frekuensi angular beban gelombang, garis grafik fungsi transfer baik itu *surge* atau *sway* menjadi berhimpit. Pada gambar 4.29 menunjukkan bahwa pada rentang frekuensi dibawah frekuensi angular gelombang, semakin dalam kedalaman laut maka akan semakin kecil besarnya nilai fungsi transfer beban gelombang *surge*.



Gambar 4.29 Fungsi Transfer Beban gelombang Surge Simulasi 3

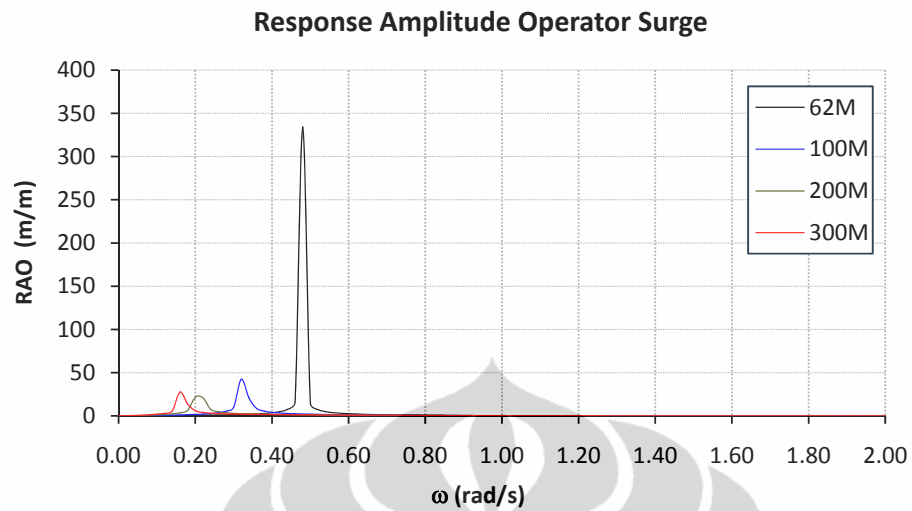


Gambar 4.30 Fungsi Transfer Beban Gelombang Sway Simulasi 3

Pada fungsi transfer beban gelombang sway juga dapat dilihat pada gambar 4.30, pada frekuensi angular dibawah frekuensi angular gelombang menunjukkan semakin dalam laut semakin berkurang fungsi transfernya.

4.7.5. Response Amplitude Operator

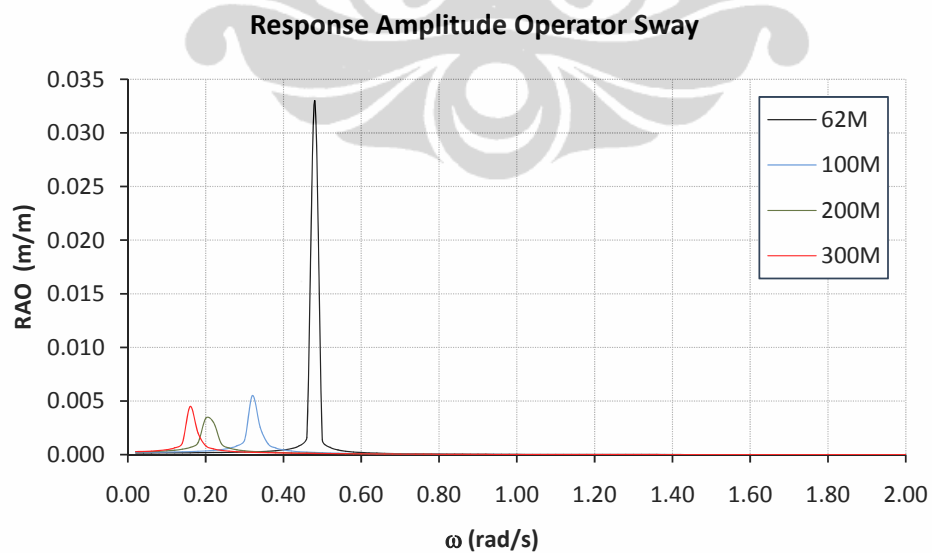
Pada RAO *surge* dan *sway* untuk kedalaman laut 62.5 m, terlihat puncaknya jauh lebih tinggi. Hal ini dikarenakan frekuensi alami angular struktur *tension leg platform* NREL jatuh pada rentang frekuensi angular dari spektrum gelombang.



Gambar 4.31 Response Amplitude Operator Surge Simulasi 3

Pada desain awal struktur *tension leg platform* MIT, kedalaman laut 62.5 m menjadi salah satu kedalaman yang ditinjau seperti yang telah dibahas pada bab 2, pada gambar 2.3 bahwa pada kedalaman > 60 m lebih akan ekonomis jika substruktur menggunakan struktur terapung.

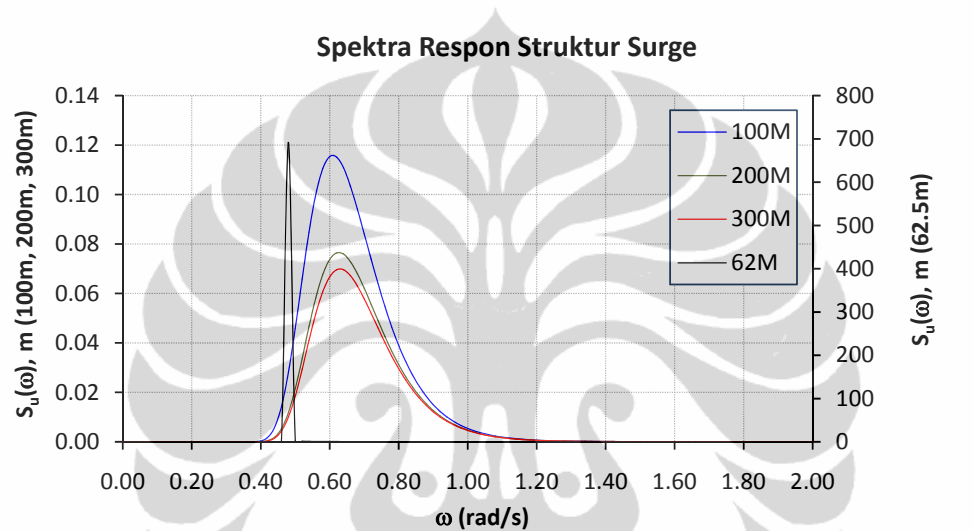
Pada gambar 4.32, bentuk dan konfigurasi RAO *sway* relatif sama dengan RAO *surge* tetapi dengan nilai puncak yang berbeda. Puncak RAO *surge* dan *sway* terjadi di frekuensi angular alami struktur.



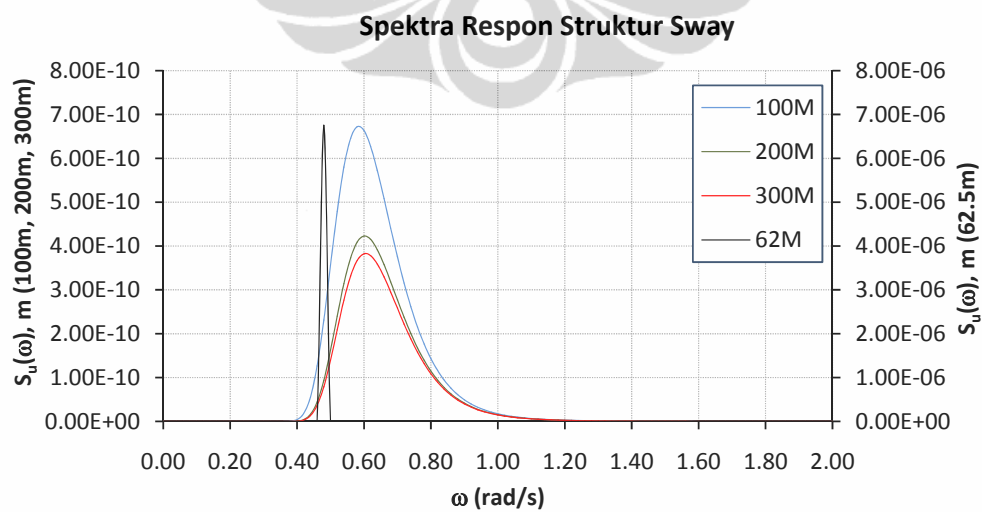
Gambar 4.32 Response Amplitude Operator Sway Simulasi 3

4.7.6. Spektra Respon Struktur

Pada spektra respon struktur *surge* dan *sway* dibuat aksis vertikal sekunder untuk melihat jelas bentuk spektra respon struktur variasi kedalaman laut 100 m, 200 m, dan 300 m karena nilai puncak pada spektra respon struktur *surge* dan *sway* untuk kedalaman laut 62.5 m sangat tinggi jika dibandingkan dengan variasi kedalaman laut lainnya.



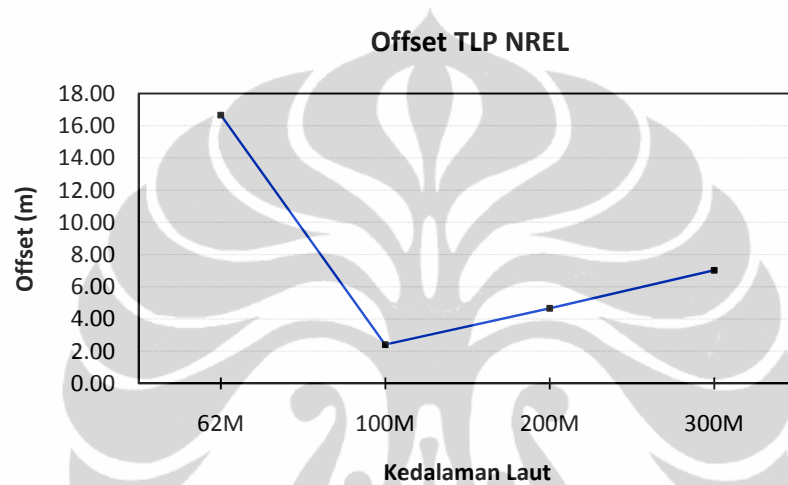
Gambar 4.33 Spektra Respon Struktur Surge Simulasi 3



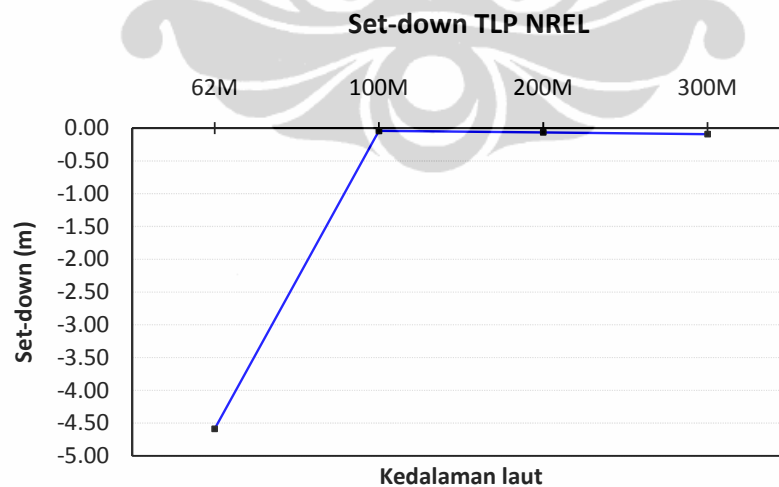
Gambar 4.34 Spektra Respon Struktur Sway Simulasi 3

4.7.7. Perpindahan Translasi dan Rotasi Struktur

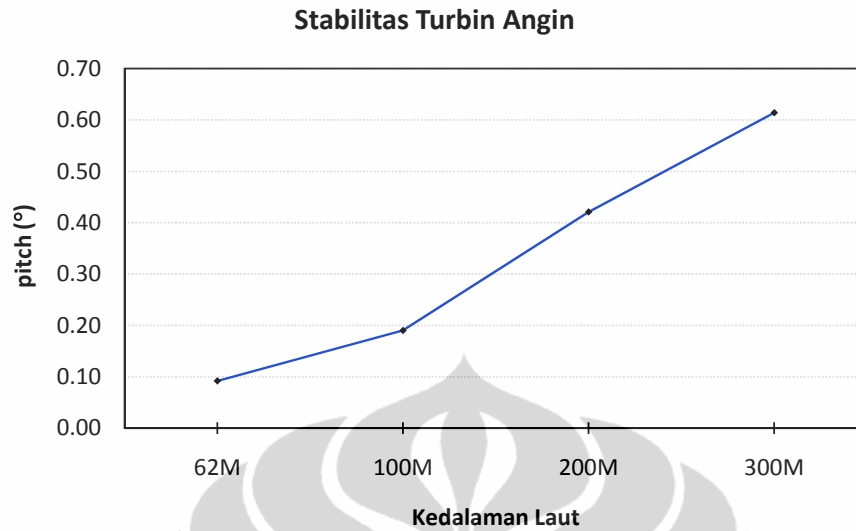
Offset dan *set-down* dari struktur *tension leg platform* NREL dengan variasi kedalaman dapat dilihat pada gambar 4.35 dan 4.36. Pada gambar tersebut menunjukkan fenomena yang telah dibahas pada subbab sebelumnya. Respon struktur pada kedalaman laut 62.5 m menjadi besar karena frekuensi alami struktur berada pada rentang frekuensi angular spektrum gelombang.



Gambar 4.35 Offset Tension Leg Platform NREL Simulasi 3

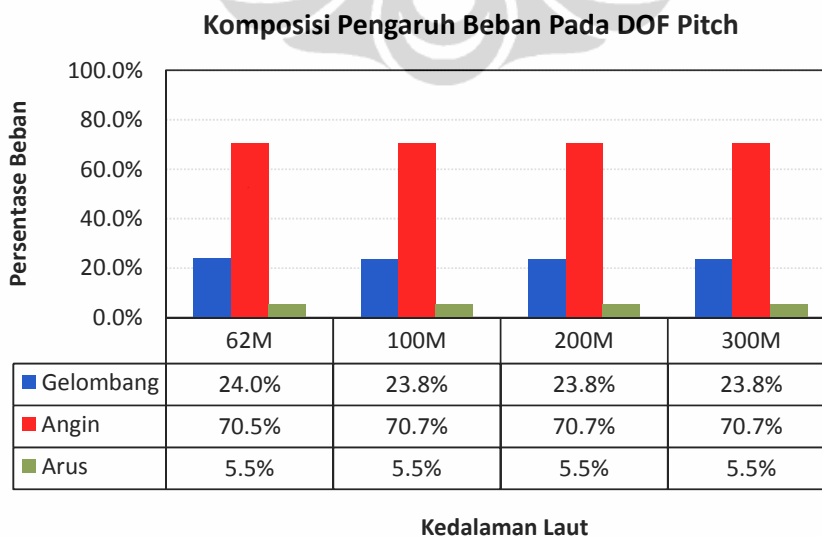


Gambar 4.36 Set-down Turbin Angin Terapung Lepas Pantai Tipe NREL Simulasi 3



Gambar 4.37 Stabilitas Turbin Angin Terapung Lepas Pantai Tipe NREL Simulasi 3

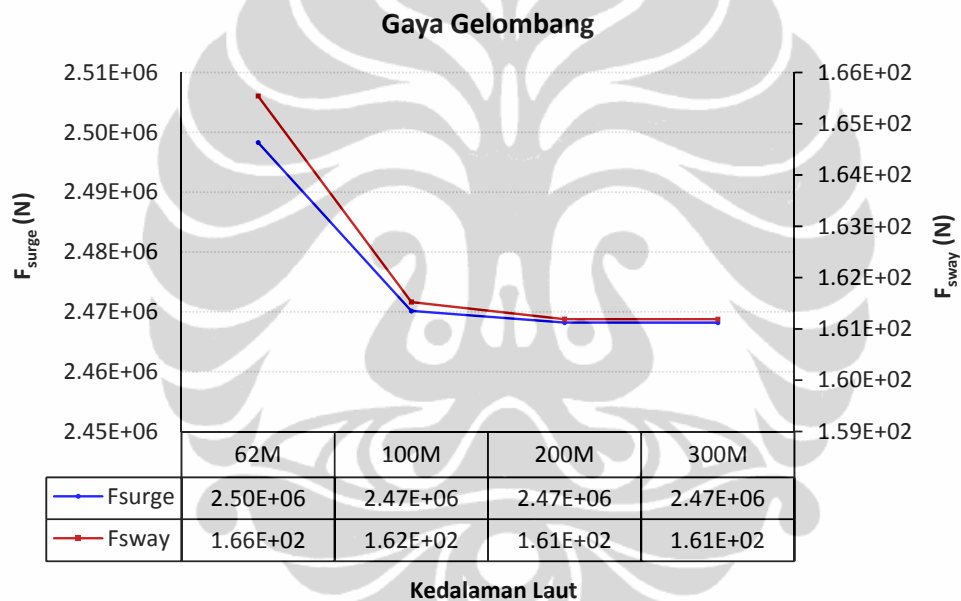
Pada gambar 4.37 menunjukkan kategori stabilitas struktur turbin angin terapung lepas pantai masih berada pada kategori operating pada semua variasi kedalaman. Namun, seperti yang diketahui sebelumnya pada struktur *tension leg platform* NREL kedalaman laut 62.5 m sudut yang terjadi antara tethers dengan sumbu vertikal menjadi 29.29° , padahal tersebut diasumsikan kecil sedangkan pada pemodelan ini. Validasi lebih lanjut diperlukan apakah struktur tersebut benar mempunyai stabilitas yang baik



Gambar 4.38 Komposisi Pengaruh Beban Pada Derajat Kebebasan Pitch

Komposisi pengaruh beban terhadap rotasi *pitch* dapat dilihat pada gambar 4.38. Pada gambar tersebut pengaruh tiap beban cenderung sama untuk berbagai variasi kedalaman laut yang dilakukan.

Besar gaya gelombang yang terjadi pada struktur turbin angin terapung lepas pantai dengan sistem *tension leg platform* NREL yang terbenam dengan variasi kedalaman dapat dilihat pada gambar 4.39. Pada gambar tersebut, besar gaya gelombang pada variasi kedalaman laut 100 – 300 m relatif sama yaitu 2.47×10^6 N untuk arah surge dan 1.60×10^2 N untuk arah sway.



Gambar 4.39 Gaya Gelombang Simulasi 3

Tabulasi lengkap dari hasil simulasi 3 dapat dilihat pada tabel 4.23 sampai dengan 4.26. Pada tabel tersebut dapat dilihat dengan jelas bahwa pada kedalaman laut 62.5 m, struktur turbin angin terapung lepas pantai dengan sistem *tension leg platform* NREL mempunyai respon struktur yang jauh lebih besar dibandingkan dengan pada kedalaman laut 100 – 300 m. Setelah melihat respon struktur pada tabel-tabel tersebut 4.31, struktur turbin angin terapung lepas pantai dengan sistem *tension leg platform* model NREL lebih sesuai untuk kedalaman laut lebih dari 100 m karena pada kedalaman 62.5 m frekuensi angular alami struktur berada

pada rentang frekuensi spektrum gelombang laut sehingga respon struktur akibat gelombang menjadi besar. Pada tabel 4.23 dapat dilihat bahwa translasi surge akibat gelombang menjadi 15.9 m.

Tabel 4.23 Translasi dan Rotasi Tension Leg Platform NREL Kedalaman Laut 62.5 m

NO	DOF	Perpindahan disebabkan oleh				offset	Set-Down	Satuan
		Gelombang	Angin	Arus	Total			
1	Surge	1.59E+01	5.59E-01	2.16E-01	16.6633	16.6633		(m)
2	Sway	1.57E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.0016			(m)
3	Heave	6.62E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.0662		-4.59	(m)
4	Roll	1.46E-06	2.56E-03	0.00E+00	0.0026			(°)
5	Pitch	2.21E-02	6.48E-02	5.05E-03	0.0919			(°)

Tabel 4.24 Translasi dan Rotasi Tension Leg Platform NREL Kedalaman Laut 100 m

NO	DOF	Perpindahan disebabkan oleh				offset	Set-Down	Satuan
		Gelombang	Angin	Arus	Total			
1	Surge	7.44E-01	1.21E+00	4.65E-01	2.4145	2.4145		(m)
2	Sway	5.39E-05	0.00E+00	0.00E+00	0.0001			(m)
3	Heave	1.42E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.1419		-0.04	(m)
4	Roll	2.96E-06	5.32E-03	0.00E+00	0.0053			(°)
5	Pitch	4.53E-02	1.35E-01	1.05E-02	0.1903			(°)

Tabel 4.25 Translasi dan Rotasi Tension Leg Platform NREL Kedalaman Laut 200 m

NO	DOF	Perpindahan disebabkan oleh				offset	Set-Down	Satuan
		Gelombang	Angin	Arus	Total			
1	Surge	6.13E-01	2.93E+00	1.13E+00	4.6688	4.6688		(m)
2	Sway	4.33E-05	0.00E+00	0.00E+00	0.0000			(m)
3	Heave	3.41E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.3409		-0.06	(m)
4	Roll	6.54E-06	1.18E-02	0.00E+00	0.0118			(°)
5	Pitch	1.00E-01	2.98E-01	2.32E-02	0.4210			(°)

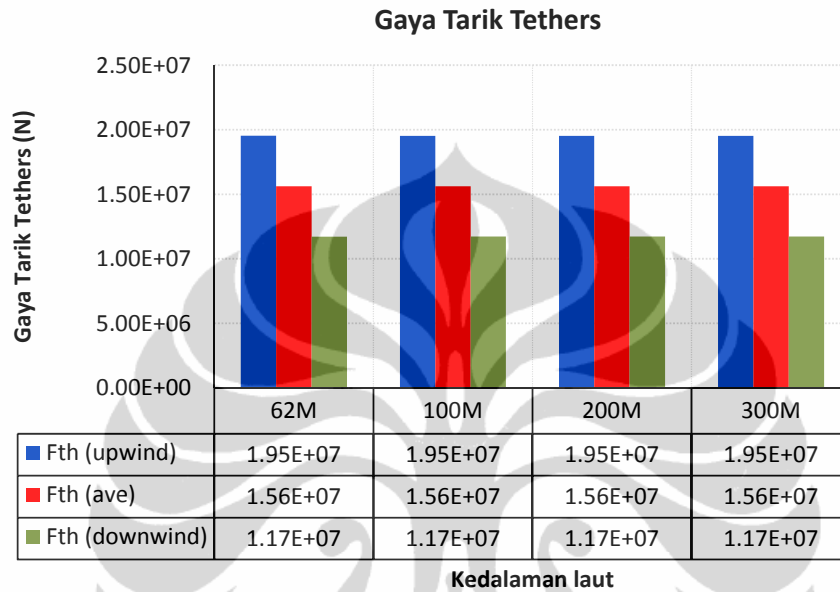
Tabel 4.26 Translasi dan Rotasi Tension Leg Platform NREL Kedalaman Laut 300 m

NO	DOF	Perpindahan disebabkan oleh				offset	Set-Down	Satuan
		Gelombang	Angin	Arus	Total			
1	Surge	5.88E-01	4.6E+00	1.79E+00	7.0295	7.0295		(m)
2	Sway	4.14E-05	0.00E+00	0.00E+00	0.0000			(m)
3	Heave	5.36E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.5355		-0.09	(m)
4	Roll	9.54E-06	1.72E-02	0.00E+00	0.0172			(°)
5	Pitch	1.46E-01	4.3E-01	3.38E-02	0.6141			(°)

4.7.8. Gaya Tarik pada Tethers

Pada gambar 4.39 menunjukkan beban eksitasi akibat gelombang yang terjadi pada struktur *tension leg platform* NREL dengan variasi kedalaman tidak terlalu berbeda satu dengan yang lainnya. Sehingga dapat dilihat pada gambar

4.40, gaya tarik tethers untuk posisi *upwind* dan *downwind* hampir mempunyai nilai yang sama untuk berbagai variasi kedalaman yaitu 1.96×10^7 N dan 1.17×10^7 N. Gaya tarik tether rata-rata adalah 1.56×10^7 N.



Gambar 4.40 Gaya Tarik Tethers Simulasi 3

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

Pada Bab 4 (empat) telah dilakukan 3 (tiga) simulasi dan analisa terhadap hasil simulasi model struktur, kondisi laut, dan kedalaman laut. Kemudian kesimpulan dan saran terhadap hasil dan analisa simulasi-simulasi yang telah dilakukan dijelaskan pada bab ini.

5.1 KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diambil setelah melakukan simulasi model struktur, kondisi laut atau *sea state*, dan kedalaman laut adalah sebagai berikut:

- Analisa *uncoupled* cukup akurat pada kondisi laut normal. Pada kondisi laut normal perbedaan respon struktur untuk *surge* dan *sway* adalah 4 – 8 % untuk tension leg platform NREL.
- Struktur turbin angin terapung lepas pantai dengan sistem *tension leg platform* NREL mempunyai performa yang lebih baik dibandingkan dengan *tension leg platform* MIT. Penilaian performa ini dengan meninjau respon struktur akibat gaya eksitasi terutama gaya gelombang. Tabulasi lengkap respon struktur dapat dilihat pada tabel 4.14 dan 4.15.
- Stabilitas *pitch tension leg platform* NREL lebih baik dari *tension leg platform* MIT. Besar *pitch tension leg platform* NREL pada *sea state* 4 adalah $0.421^\circ \leq 0.7^\circ$ sehingga mempunyai kategori operating dan besar *pitch tension leg platform* MIT pada *sea state* 4 adalah $0.961^\circ \leq 2^\circ$ sehingga mempunyai kategori survival.
- Hasil stabilitas *pitch tension leg platform* NREL terhadap variasi kondisi laut yaitu *Sea State* 2, 4, 6 masih dalam batasan operating sedangkan pada *sea state* 8 dalam batasan survival. *Pitch* untuk *sea state* 2, 4, dan 6 adalah 0.14° , 0.42° , dan 0.46° dimana besarnya masih $\leq 0.7^\circ$ dan *pitch* untuk *sea state* 8 adalah $0.85^\circ \leq 2^\circ$. Sehingga dapat disimpulkan semakin tinggi level *sea state* maka semakin besar *pitch* yang terjadi.

- Pengaruh gaya gelombang semakin besar apabila level *sea state* semakin meningkat dan pengaruh gaya angin dan arus semakin turun. Pada gambar 4.23 menunjukkan persentase *pitch* akibat gaya gelombang pada *sea state* 2 sebesar 11 % kemudian meningkat menjadi 62 % pada *sea state* 8. Persentase *pitch* akibat gaya angin pada *sea state* 2 sebesar 73 % menjadi 35 % pada *sea state* 8 kemudian persentase *pitch* akibat gaya arus sebesar 16 % pada *sea state* 2 menjadi 3 % pada *sea state* 8.
- level *sea state* semakin meningkat akan mengakibatkan gaya tarik tethers pada posisi *upwind* semakin besar, sedangkan pada posisi *downwind* semakin berkurang. Pada gambar 4.24 menunjukkan gaya tarik tethers posisi *upwind* sebesar 1.69×10^7 N pada *sea state* 2 menjadi 2.40×10^7 N pada *sea state* 8 dan gaya tarik tethers posisi *downwind* sebesar 1.44×10^7 N pada *sea state* 2 menjadi 7.26×10^6 N pada *sea state* 8.
- Struktur *Tension leg platform* NREL lebih sesuai untuk kedalaman laut ≥ 100 m. Pada simulasi kedalaman laut 62.5 m, frekuensi angular alami struktur menjadi 0.48 rad/s berada pada rentang frekuensi angular dari spektrum gelombang *sea state* no.4 yaitu 0.4 – 2.0 rad/s. Hal tersebut menyebabkan translasi arah surge akibat gelombang menjadi besar yaitu 15.9 m.
- Ketika frekuensi angular alami struktur berada direntang frekuensi angular spektrum gelombang maka perpindahan translasi derajat kebebasan *surge* akibat gelombang menjadi besar. Seperti pada kedalaman 62.5 m, Translasi *surge* menjadi besar yaitu 15.9 m dan sudut antara sumbu vertikal dengan tether menjadi 29.29° .
- Kekakuan sistem *tension leg platform* NREL berkurang 57.13 % dari kedalaman laut 100 m – 200 m. Sedangkan dari kedalaman laut 200 m – 300 m, kekakuan berkurang 34.66 %.
- Kategori stabilitas *tension leg platform* NREL dengan kedalaman laut 62.5 m – 300 m masih pada kategori operating. *Pitch* pada kedalaman laut 62.5 m, 100 m, 200 m, dan 300 m adalah 0.092° , 0.190° , 0.421° , dan $0.614^\circ \leq 0.7^\circ$ sehingga masih dalam kategori stabilitas operating.

- Komposisi pengaruh gaya eksitasi pada rotasi *roll* dan *pitch* untuk variasi kedalaman laut cenderung konstan dengan komposisi sebagai berikut: 21 % untuk gaya gelombang, 75 % untuk gaya angin, dan 4 % untuk gaya arus.
- Gaya tarik tethers untuk posisi *upwind* dan *downwind* cenderung konstan dengan variasi kedalaman seperti yang terlihat pada gambar 4.40.

5.2 SARAN

Beberapa saran untuk analisa stabilitas dan penelitian selanjutnya mengenai struktur turbin angin terapung lepas pantai dengan sistem *tension leg platform* adalah sebagai berikut:

- Analisa frekuensi domain dapat dilakukan pada kedalaman laut lebih kecil dari 300 m (1000 ft)
- Diameter tethers pada struktur tethers NREL RB 6 perlu diperbesar untuk membatasi terjadinya pertambahan panjang pada tethers dan pergerakan *heave* struktur.
- Penelitian selanjutnya perlu menghitung perubahan massa tambahan terhadap perubahan frekuensi angular gelombang. Sehingga mengetahui pengaruh massa tambahan terhadap respon struktur turbin angin terapung lepas pantai.
- Hasil analisa frekuensi domain *uncoupled* untuk kondisi laut yang ekstrim perlu dipelajari lebih lanjut. Hal ini dikarenakan referensi pembandingan Elizabeth (2006) belum memberikan penjelasan yang cukup baik untuk kondisi ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ardian. (2006). *Analisa Mooring Pada FPSO Sistem Turret dengan Pendekatan Frekuensi Domain*. Depok : Universitas Indonesia.
- [2] Army Corps Engineer. (2003). *Shore Protection Manual*. Washington : US Departement of Army.
- [3] Barrass B., & Derret D.R.. (2006). *Ship Stability For Masters and Mates 6th Edition*. Singapore : Elsevier.
- [4] Bundessamt fur Seeschiffahrt Und Hydrographie. (2007). *Standard Design of Offshore Wind Turbines*. Hamburg & Rostock.
- [5] Dean G.R., & Dalrymple R.A.. (2000). *Water Wave Mechanics for Engineer and Scientist*. Singapore : World Scientific.
- [6] Det Norske Veritas. (2007). *Design Of Offshore Wind Turbine Structures*. Norwegia : DNV.
- [7] Faltinsen, O.M. (1990). *Sea Loads on Ships and Offshore Structures*. UK : Cambridge University Press.
- [8] Herlingga, M. (2009). *Analisa Dinamik Pada Tether Tension Leg Platform (TLP) Akibat Beban VIV*. Bandung : Institut Teknologi Bandung.
- [9] Jonkman J.M., & Buhl M.L. Jr. (2006). *Load Analysis of a Floating Offshore Wind Turbine Using Fully Coupled Simulation*, USA : National Renewable Energy Laboratory.
- [10] Journee, J.M.J & Massie, W.W. (2001). *Offshore Hydromechanics*. Netherland : Delft University of Technology.
- [11] McCormick, M.E. (2010). *Ocean Engineering Mechanics With Application*. Cambridge University Press, UK.

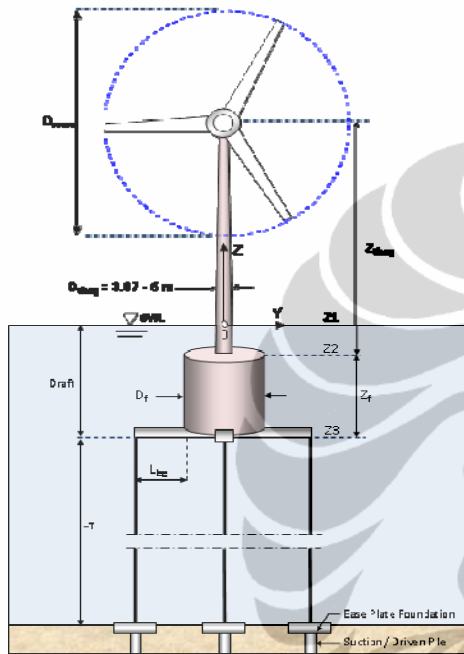
- [12] Mercier Rick. (2004). *Technology Issues With Deepwater Wind Energy Systems*. USA : Offshore Technology Research Center.
- [13] Musial Walt, Butterfield S.M., RAM B. (2006). *Energy From Offshore Wind*. USA : National Renewable Energy Laboratory.
- [14] Robinson M. & Musial Walt. (2007). *Offshore Wind Technology Overview*. USA : US Department Of Energy (NREL).
- [15] Sarpkaya & Isaacson. (1982). *Mechanics of Wave Forces on Offshore Structures*. New York : Van Nostrand Reinhold.
- [16] Subrata Chakrabakti. (2005). *Handbook of Offshore Engineering*, Singapore : Elsevier.
- [17] Summer B.M., & Fredsøe J. (2006). *Hydrodynamics Around Cylindrical Structures*. Singapore : World Scientific.
- [18] Tracy C. (2007). *Parametric Design of Floating Wind Turbine*. Massachusetts : MIT.
- [19] Wayman E.N., Sclavounos P.D., Butterfield S., Jonkman J., & Musial W. (2006). *Coupled Dynamic Modeling of Floating Wind Turbine Systems*. USA : National Renewable Energy Laboratory.
- [20] Wayman Elizabeth. (2004). *Coupled Dynamics and Economic Analysis of Floating Wind Turbine Systems*. Massachusetts : MIT.
- [21] Wilson J.F. (2003). *Dynamics of Offshore Structures*. New Jersey : John Wiley & Sons Inc.
- [22] World Wind Energy Association. (2008). *World Wind Energy Report*. Germany.



LAMPIRAN A
PERHITUNGAN DENGAN MS. EXCEL DAN VBA

ANALISA TURBIN ANGIN TERAPUNG LEPAS PANTAI TIPE TENSION LEG PLATFORM DENGAN METODE FREKUENSI DOMAIN NREL

I. GEOMETRI STRUKTUR



PARAMETER :		
1.	D_{tiang}	= 6.00 m
2.	Z_{hub}	= 90 m
3.	D_f	= 20 m
4.	Z_f	= 20 m
5.	R	= 10 m
6.	L_{leg}	= 10 m
7.	Draft	= 30 m
8.	z_1	= 0 m
9.	z_2	= 10 m
10.	z_3	= 30 m
11.	d	= 200 m
12.	L_T	= 170 m

II. MASSA DAN BOUYANCY

1. Massa Struktur

- Tebal Plat	=	0.015	m
- Penampang Leg	=	16	m^2
Tinggi	=	4	m
Lebar	=	4	m

$g = 9.807 \text{ m}^2/\text{s}$

a	Massa Turbin (termasuk berat tower)	=	6.98E+05	kg	}	Massa Total	=	1.00E+06	kg
b	Massa Baja Platform	=	3.05E+05	kg					
c	Massa Ballast	=	0.00E+00	kg					
d	Massa Tambahan	=	7.37E+06	kg					
e	r_3	=	22.61	m					
f	r_4	=	22.61	m					
g	r_5	=	10.19	m					
h	Pusat Gravitasi (Z_g)	=	16.55	m					

LAMPIRAN A1 (LANJUTAN)

Bouyancy

Volume Struktur Yang Terendam

- Tinggi Hub Terendam	=	10 m	Vol. Hub	=	271.4 m ³
-Tinggi Platform Terendam	=	20 m	Vol. Platform	=	6283 m ³
-Tinggi Leg Terendam	=	4 m	Vol. Leg	=	640 m ³
			Total Volume	=	7195 m ³

Bouyancy Force (N)	=	7.23E+07	N
Pusat Bouyancy	=	-20.50	m (dibawah SWL)
Jarak Dari Keel ke Titik Bouyancy	=	9.50	m

Total Tension Tethers	=	Bouyancy Force - Berat Struktur	
	=	6.25E+07	N

III. KEKAKUAN STRUKTUR

Spesifikasi Teknis Tethers/Tendon

1. Diameter Tethers (D _T)	=	0.156	m
2. Luas Penampang (A _T)	=	1.91E-02	m ²
3. Modulus Elastisitas (E _T)	=	2E+11	N/m ²

1. Kekakuan Translasi Surge

$$K_{surge} = n \frac{F_{tethers}}{L_T} = 8 \times \frac{7.81E+06}{170} = 3.68E+05 \text{ N/m}$$

2. Kekakuan Translasi Sway

$$K_{sway} = n \frac{F_{tethers}}{L_T} = 8 \times \frac{7.81E+06}{170} = 3.68E+05 \text{ N/m}$$

3. Kekakuan Translasi Heave

a Hidrostatika dan Inersia

$$\begin{aligned} K_{heave,H\&I} = \rho g \pi R^2 &= K_{HI,Platform} + K_{HI,Tower} \\ &= 3.16E+06 + 2.73E+05 \\ &= 3.43E+06 \text{ N/m} \end{aligned}$$

b Tethers

$$K_{heave, T} = n \frac{E_T A_T}{L_T} = 8 \times \frac{3.82E+09}{170} = 1.80E+08 \text{ N/m}$$

$$\begin{aligned} K_{heave} &= K_{heave, H\&I} + K_{heave, T} \\ &= 3.43E+06 + 1.80E+08 \\ &= 1.83E+08 \text{ N/m} \end{aligned}$$

4. Kekakuan Rotasi Roll**a Hidrostatika dan Inersia**

$$K_{roll, H\&I} = F_B \cdot z_B - m \cdot g \cdot z_g + \frac{\rho \cdot g \cdot \pi \cdot R^2}{4}$$

$$F_B \cdot z_B = 1.48E+09 \text{ N/m}$$

$$m \cdot g \cdot z_g = 1.63E+08 \text{ N/m}$$

$$\begin{aligned} \frac{\rho \cdot g \cdot \pi \cdot R^2}{4} &= \text{Platform} + \text{Hub} \\ &= 7.89E+05 + 6.82E+04 \\ &= 8.58E+05 \text{ N/m} \end{aligned}$$

$$K_{roll, H\&I} = 1.32E+09 \text{ N/m}$$

b Tethers

$$K_{roll, T} = 2 \frac{E_T A_T}{L_T} (R + L_{leg})^2 + (F_B - m \cdot g) \cdot T$$

$$= 1.80E+10 + 1.87E+09$$

$$= 1.99E+10$$

$$\begin{aligned} K_{roll} &= K_{roll, H\&I} + K_{roll, T} \\ &= 1.32E+09 + 1.99E+10 \\ &= 2.12E+10 \text{ N/m} \end{aligned}$$

5. Kekakuan Rotasi Pitch

a Hidrostatika dan Inersia

$$K_{pitch,H\&I} = F_B \cdot z_B - m \cdot g \cdot z_g + \frac{\rho \cdot g \cdot \pi \cdot R^2}{4}$$

$$F_B \cdot z_B = 1.48E+09 \quad \text{N/m}$$

$$m \cdot g \cdot z_g = 1.63E+08 \quad \text{N/m}$$

$$\begin{aligned} \frac{\rho \cdot g \cdot \pi \cdot R^2}{4} &= \text{Platform} + \text{Hub} \\ &= 7.89E+05 + 6.82E+04 \\ &= 8.58E+05 \quad \text{N/m} \end{aligned}$$

$$K_{roll, H\&I} = 1.32E+09 \quad \text{N/m}$$

b Tethers

$$K_{pitch,T} = 2 \frac{E_T A_T}{L_T} (R + L_{leg})^2 + (F_B - m \cdot g) \cdot T$$

$$= 1.80E+10 + 1.87E+09$$

$$= 1.99E+10$$

$$\begin{aligned} K_{pitch} &= K_{pitch, H\&I} + K_{pitch, T} \\ &= 1.32E+09 + 1.99E+10 \\ &= 2.12E+10 \quad \text{N/m} \end{aligned}$$

6. Kekakuan Rotasi Yaw

$$K_{yaw} = \frac{(R + L_{leg})^2}{L_T} (F_B - m \cdot g)$$

$$= 1.47E+08 \quad \text{N/m}$$

III. REDAMAN STRUKTUR

1. Rasio Redaman (ξ) = 0.00 %

2. Redaman Struktur (C)

$$C = \xi \cdot \sqrt{2KM} = 0.00E+00 \quad \text{N.s/m (surge \& Sway)}$$

KOEFSIEN HIDRODINAMIK

Wave Parameter

- Significant Wave Height : 1.88 m (H_s)
- Period of Wave : 8.8 s (T_m)
- Water Depth : 200 m (d)

Circular frequency (ω) :

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{6.28}{8.8} = 0.71 \text{ rad/s}$$

Wave Length (L) :

$$L = \frac{g}{2\pi} \times T^2 \tanh \frac{2\pi d}{L}$$

$$120.8709 = \frac{9.807}{6.28} \times 77.44 \tanh \frac{1256.64}{120.8709}$$

$$120.8709 - 120.8709 = 0.00$$

CARI L

$$L = 120.87 \text{ m}$$

$$\frac{d}{L} = \frac{200}{120.87} = 1.65 \text{ Classified As... DEEP WATER}$$

(Solve by Goal seek cell F21 by varrying Cell B18)

Wave Number (k)

$$k = \frac{2\pi}{L} = \frac{6.28}{120.87} = 0.052$$

Horizontal velocity (u)

$$u = \frac{\partial \Phi}{\partial x} = C_g \omega \frac{\cosh k(d+z)}{\sinh kd} \cos(kx - \omega t)$$

$$z = 0 \quad (\text{Assume } \theta = 0)$$

$$u_1 = 0.67 \times 1.00$$

$$= 0.67 \text{ m/s}$$

$$z = -30 \quad (\text{Assume } \theta = 0)$$

$$u_2 = 0.67 \times 0.21$$

$$= 0.14 \text{ m/s}$$

LAMPIRAN A2 (LANJUTAN)

$$U_{\text{average}} = \frac{u_1 + u_2}{2} = 0.41 \text{ m/s}$$

Reynold Number (Re) and Karpenter Number (KC)

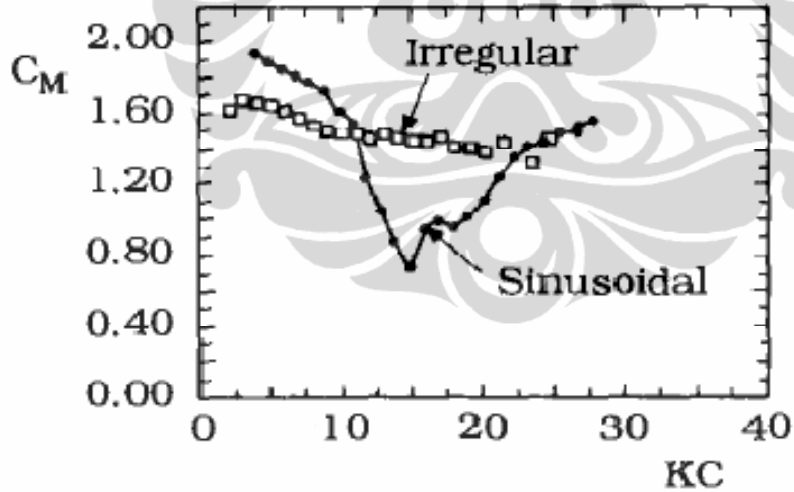
$$Re = \frac{u_{\text{max}} \times D}{\nu} = \frac{0.41 \times 20}{1.20E-06} = 6.77E+06$$

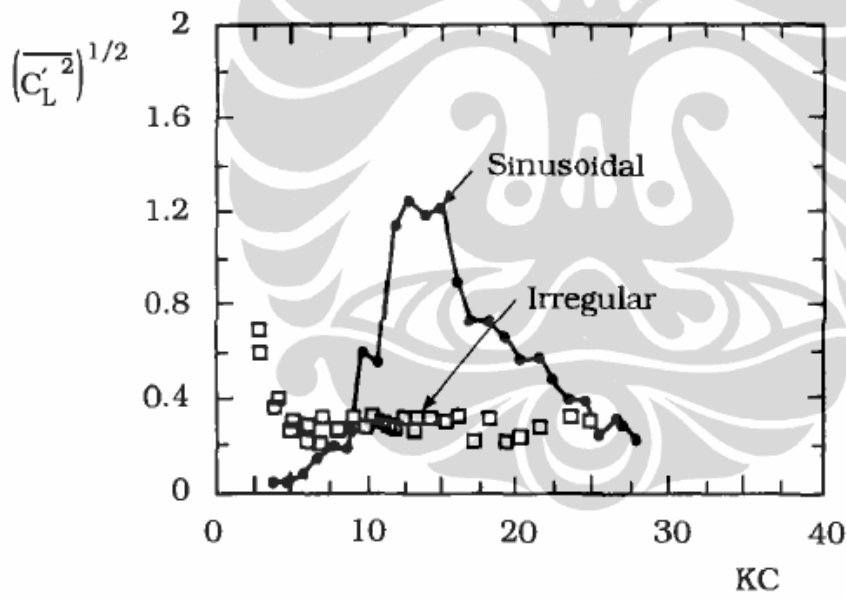
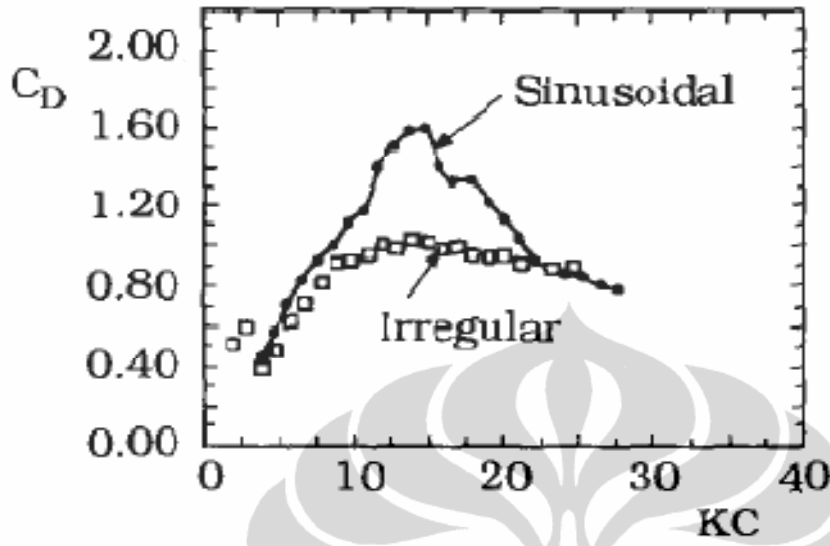
Vikositas Kinematik (ν) = 1.20E-06 m²/s

Keulegan-Carpenter Number (KC)

$$KC = \frac{u_{\text{max}} \times T}{D} = \frac{0.41 \times 8.8}{20} = 0.18$$

CD = 0.7 CL = 0.015
 CM = 2





PERHITUNGAN GAYA ANGIN

Parameter Desain

u(h=19.5)	=	9.77 m/s		h _t	=	77.60
u(rotor)	=	11.95 m/s		l _o	=	0.94
C _s	=	0.7				
C _H	=	1.0				
Zpl	=	0 m				

1. Gaya Angin Pada Hub

$$F_w = 0.0343 C_s C_H \bar{u}(h)^2 [3.87 h_t^{9/7} + l_o \cdot h_t]$$

Fw1	=	15013.65		kg
Fw2	=	0.00		kg

Gaya angin pada hub akan menyebabkan gaya searah surge dan momen searah pitch

A. Gaya arah Surge (Fwh)	=	15013.65		kg
	=	147238.85		N
B. Momen Arah Pitch				
- lh	=	53.83		m
- Momen	=	Fwh x lh		
	=	7.93E+06		N.m

2. Gaya Angin Pada Turbin

Gaya angin pada turbin diestimasi dari kurva yang di analisa dengan program FAST.

F _{Thrust}	=	928515		N
F _{Torq}	=	4350000		N.m

Gaya Thrust akibat gaya angin berkontribusi terhadap momen arah pitch dan Gaya torsi pada turbin berkontribusi terhadap momen arah roll

A. Force in surge direction	=	928515		N
B. Momen arah pitch				
- lt	=	110		m
- Momen	=	Fw x lt		
	=	102136645		N.m
C. Momen arah Roll	=	F torque		
	=	4350000		N.m

2. Perpindahan Akibat Gaya Angin

$$\eta_1 = \frac{F_w}{K_{\text{surge}}} = \frac{1075753.80}{3.68E+05} = 2.93 \text{ m}$$

$$\eta_4 = \frac{M_{w,\text{roll}}}{K_{\text{roll}}} = \frac{4350000.00}{2.12E+10} = 0.00 \text{ rad}$$

$$= 0.012^\circ$$

$$\eta_5 = \frac{M_{w,\text{pitch}}}{K_{\text{pitch}}} = \frac{110061976.86}{2.12E+10} = 0.005 \text{ rad}$$

$$= 0.298^\circ$$


OPERATING

PERHITUNGAN GAYA ARUS

Parameter Desain

$$V_{\text{tide}} = 0.500 \text{ m/s}$$

$$V_{\text{wind}} = 0.007 \text{ m/s}$$

$$V_{\text{current}} = 0.507 \text{ m/s}$$

1. Gaya Arus

$$F_f = \frac{1}{2} \rho_w C_D D_f v_f^2$$

$$F_{C1} = 53195.4836 \text{ N}$$

$$F_{C2} = 361971.02 \text{ N}$$

$$\text{Zarus} = -9.35934759 \text{ m}$$

2. Perpindahan

$$\eta_1 = \frac{F_{C1} + F_{C2}}{K_{\text{surge}}} = \frac{415166.50}{3.68E+05} = 1.13 \text{ m}$$

$$\eta_4 = \frac{F_c \cdot L_a}{K_{\text{pitch}}} = \frac{8569307.41}{2.12E+10} = 0.00 \text{ rad}$$

$$= 0.023^\circ$$

GAYA TARIK PADA TETHERS

a. Gaya Tarik akibat Angin

$$\begin{aligned}
 Mw1 &= 147238.85 \times 70 = 10306719.26 \text{ N.m} \\
 Mw2 &= 928515 \times 110 = 102136645.3 \text{ N.m} \\
 M_{\text{thrust}} &= 112443364.6 \text{ N.m}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 F_{T,\text{ave}} &= 15622800.3 \text{ N} \\
 R &= 10 \text{ m} \\
 L_{\text{leg}} &= 10 \text{ m}
 \end{aligned}$$

$$M_{\text{thrust}} - (F_{T,\text{upwind}} + \Delta F) \cdot (R + L_{\text{leg}}) + (F_{T,\text{downwind}} - \Delta F) \cdot (R + L_{\text{leg}}) = 0$$

$$\begin{aligned}
 1.12\text{E}+08 - 3.12\text{E}+08 - 20 \Delta F + 3.12\text{E}+08 - 20 \Delta F \\
 40 \Delta F &= 1.12\text{E}+08 \text{ N.m} \\
 \Delta F &= 2.81\text{E}+06 \text{ N}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Gaya Tether upwind} &= 1.84\text{E}+07 \text{ N} \quad (\text{dua tendon}) \\
 \text{Gaya Tether downwind} &= 1.28\text{E}+07 \text{ N} \quad (\text{dua tendon})
 \end{aligned}$$

b. Gaya Tarik Akibat Seluruh gaya eksitasi

$$Z_{\text{gaya}} = 15 \text{ m}$$

$$\begin{aligned}
 F_{\text{gelombang}} &= 2.47\text{E}+06 \\
 F_{\text{arus}} &= 4.15\text{E}+05
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_{\text{gelombang+arus}} &= 2.88\text{E}+06 \times 15 \\
 &= 4.33\text{E}+07 \text{ N.m}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 40 \Delta F &= 1.56\text{E}+08 \text{ N.m} \\
 \Delta F &= 3.89\text{E}+06 \text{ N}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Gaya Tether upwind} &= 1.95\text{E}+07 \text{ N} \quad (\text{dua tendon}) \\
 \text{Gaya Tether downwind} &= 1.17\text{E}+07 \text{ N} \quad (\text{dua tendon})
 \end{aligned}$$

RESUME PERHITUNGAN MODEL TLP

1. Frekuensi Angular Alami (ω)

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{I_{\theta}}}$$

NO	DOF	ω
		(rad/s)
1	Surge	0.21
2	Sway	0.21
3	Heave	4.68
4	Roll	6.43
5	Pitch	6.43
6	Yaw	1.19

2. Perpindahan (Rotasi dan Translasi)

NO	DOF	Perpindahan disebabkan oleh				Set Down	Satuan
		Gelombang	Angin	Arus	Total		
1	Surge	6.13E-01	2.93E+00	1.13	4.6688		(m)
2	Sway	4.33E-05	0.00E+00	0	0.0000		(m)
3	Heave	3.41E-01	0.00E+00	0	0.3409	-0.06	(m)
4	Roll	0.000	0.012	0	0.0118		(°)
5	Pitch	0.100	0.298	0.023176	0.4210		(°)
6	Yaw	0.00E+00	0.00E+00	0	0.0000		(°)

3. Kategori Stabilitas

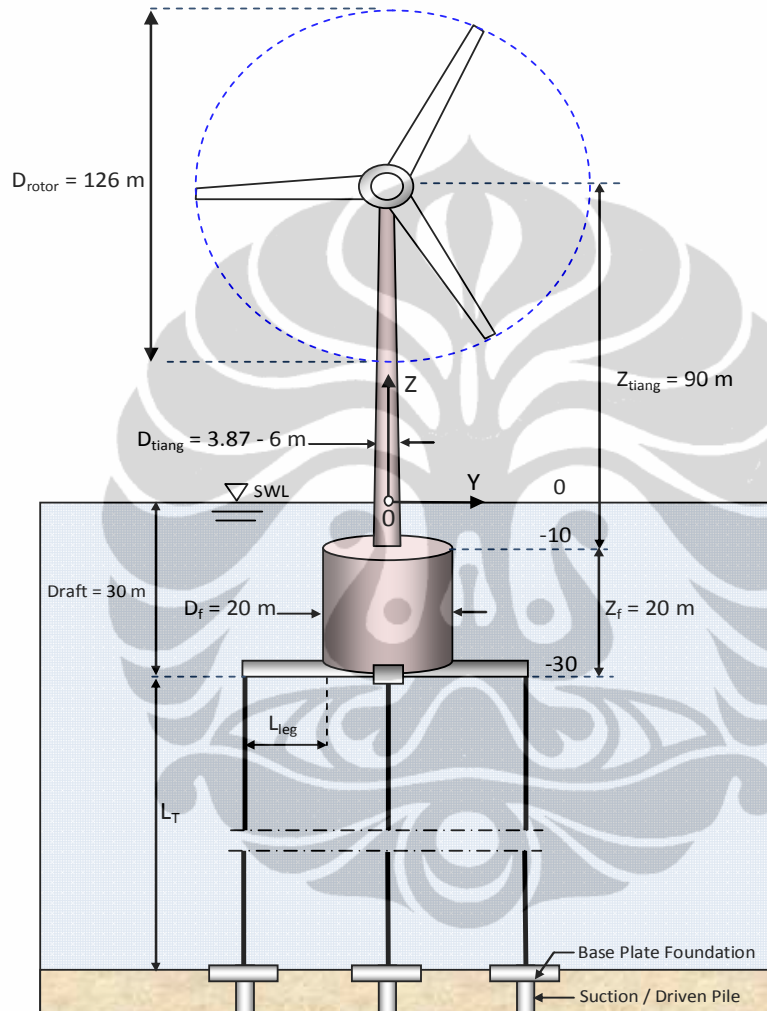
1 Operating		0.7	°
2 Survival		2	°
3 Stand By	η_4	≤	6
4 Damaged			18

$$\eta_4 = 0.4210 \text{ } ^\circ$$

OPERATING

**CEK STABILITAS AWAL
TURBIN ANGIN TERAPUNG LEPAS PANTAI
TENSION LEG PLATFORM NREL**

1. GEOMETRI STRUKTUR TLP NREL



2. TURBIN ANGIN DAN TIANG

MASSA

- Massa Turbin Angin	=	350,000 kg
1. Rotor	=	110,000 kg
2. Nacelle	=	240,000 kg
- Massa Tiang	=	347,460 kg

KOORDINAT PUSAT GRAVITASI

Z_{turbin}	=	90 m
Z_{tiang}	=	38.234 m

Massa Total Turbin Angin dan Tower = 697,460 kg

LAMPIRAN A7 (LAMPIRAN)

$$\text{Pusat gravitasi Turbin angin dan Tower} = \frac{\sum m_i \cdot Z_i}{\sum m_i} = 64.21 \text{ m}$$

3. HULL

MASSA

- Massa Baja Hull	=	221,954 kg
- Massa Ballast Beton	=	0 kg
- Massa Leg	=	82896 kg

KOORDINAT PUSAT GRAVITASI

$Z_{\text{baja hull}}$	=	-10
Z_{beton}	=	0
Z_{leg}	=	-18

$$\begin{aligned} \text{Massa Total Hull} &= 304,850 \text{ kg} \\ \text{Pusat gravitasi Hull} &= \frac{\sum m_i \cdot Z_i}{\sum m_i} = -12.18 \text{ m} \end{aligned}$$

4. TITIK GRAVITASI TURBIN ANGIN, TIANG, DAN HULL

TURBIN ANGIN DAN TIANG

Massa Total Turbin Angin dan Tower	=	697,460 kg
Pusat gravitasi Turbin angin dan Tower	=	64.21 m

HULL

Massa Total Hull	=	304,850 kg
Pusat gravitasi Hull	=	-12.18 m

Massa Total	=	1002309.5 kg
Pusat Gravitasi Total	=	40.98 m (dari dasar tiang)

Pusat Gravitasi Tanpa Tethers		
Koordinat dasar Tiang	=	-10 m
Pusat Gravitasi Total	=	30.98 m

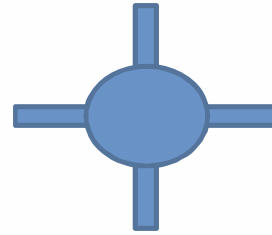
5. CEK KESTABILAN TANPA TETHERS

Keel	=	0 m
Gravitasi	=	60.98 m
Bouyancy	=	9.50 m

$$GM = KB + BM - KG$$

KB	=	9.50
BM	=	4.003
KG	=	60.98

LAMPIRAN A7 (LANJUTAN)



$$I_{xx} = I_{lingkaran} + (I_{Vertikal-leg} + (A_{vertikal} L_v^2)) + (I_{horizontal-leg} + (A_{horizontal} L_h^2))$$

$$I_{xx} = 26240.65 \text{ m}^4$$

$$\nabla = 6554.89 \text{ m}^3$$

$$BM = \frac{I_{xx}}{\nabla} = \frac{26240.65}{6554.89} = 4.00 \text{ m}$$

GM tanpa tethers = -47.48 m Kondisi = **TIDAK STABIL**

6. CEK KESTABILAN DENGAN GAYA TARIK TETHERS

GM tanpa Tethers = -47.48

Kekakuan Rotasi Roll/Pitch = 2.12E+10 N/m

Displacement (∇) = 7194.59 m³

Berat Jenis air (ρ) = 1025 kg/m³

Percepatan gravitasi (g) = 9.807 m/s²

$$GM \text{ Tether} = \frac{\text{Kekakuan Rotasi}}{\rho \cdot g \cdot \nabla}$$

$$= \frac{2.12E+10}{7.23E+07} = 292.93 \text{ m}$$

GM TLP = GM Tether + GM Tanpa Tether

= 292.93 + -47.48

= **245.45** m Kondisi = **STABIL**

=====

BAHASA PROGRAM UNTUK MENYELESAIKAN PERSAMAAN DISPERSI GELOMBANG

Sub cari_K()

Range("D14:D114").Select

Selection.ClearContents

Dim ARange As Range, TRange As Range, Aaddr As String, Taddr As String, NumEq As Long, i As Long

Dim GVal As Double, Acell As Range, TCell As Range, Orient As String

' Create the following names in the back-solver worksheet:

' Taddr - Cell with the address of the target range

' Aaddr - Cell with the address of the range to be adjusted

' gval - the "goal" value

Aaddr = Range("aaddr").Value

Taddr = Range("taddr").Value

Set ARange = Range(Aaddr)

Set TRange = Range(Taddr)

NumEq = ARange.Rows.Count

If NumEq = 1 Then

NumEq = ARange.Columns.Count

Orient = "H"

Else

Orient = "V"

End If

GVal = Range("gval").Value

```
For i = 1 To NumEq  
If Orient = "V" Then  
    TRange.Cells(i, 1).GoalSeek Goal:=GVal, ChangingCell:=ARange.Cells(i, 1)  
Else  
    TRange.Cells(1, i).GoalSeek Goal:=GVal, ChangingCell:=ARange.Cells(1, i)  
End If  
Next i  
End Sub
```





LAMPIRAN B

PERHITUNGAN DENGAN MATLAB Release R2009a

```

%-----
%
%                               TESIS
%                               ANALISA STABILITAS TURBIN ANGIN TERAPUNG LEPAS PANTAI
%                               DENGAN SISTEM TENSION LEG PLATFORM
% Oleh : Hendi
% Pembimbing Tesis : Ir. Iwan R. Soedigdo, MSCE. Ph.D,
% Analisa Gelombang Arah Surge
% File : Simulasi 2 SS4
%-----

clear all;
clc;
disp('=====');
disp('+      ANALISA STABILITAS TURBIN ANGIN TERAPUNG LEPAS PANTAI      +');
disp('+      DENGAN SISTEM TENSION LEG PLATFORM                        +');
disp('+      SINGLE DEGREE OF FREEDOM ARAH SURGE                        +');
disp('+      NREL TLP                                                    +');
disp('=====');
disp('=====');
disp('+      SIMULASI TINGGI SIGNIFIKAN DAN PERIODE GELOMBANG          +');
disp('=====');
%-----

r=0.02;           % Interval Frekuensi Angular
w=[0:r:2.0];     % Rentang frekuensi Angular yang digunakan
a=length(w);    % Jumlah rentang
Mat_satu=ones(a,1); % Matrik ukuran a x 1 bernilai satu
p=1025;         % (kg/m3)
CD=0.7;         % Koefisien Hambat (CD)
CM=2.0;         % Koefisien Inersia (CM)
g=9.807;        % (m2/s)
G=g*Mat_satu;  % Matrik Percepatan Gravitasi
Hs=1.88;        % Significant Wave Height (Hs, m)
Tm=8.80;        % Periode Gelombang
wm=((2*pi)/Tm); % Frekuensi Angular Gelombang
d=200;          % Kedalaman Laut (d, m)
Vw=9.77;        % Kecepatan Angin (Vw, m/s)
Dh=5.88;        % Diameter Hub (Dh, m)
Df=20;          % Diameter Platform (Df, m)
tf=4;           % Tinggi Leg Dari Platform (m)
Lleg=10;        % Panjang Leg (m)
bf=4;           % Lebar leg (m)
Ah=(0.25*pi*(Dh^2)); % Luas Penampang Hub (m2)
Af=(0.25*pi*(Df^2)); % Luas Penampang Platform (m2)
z1=0;           % Z Coordinate of Top Submerged tiang (z1, m)
z2=10;          % Z Coordinate of Base Submerged tiang (z2, m)
z3=30;          % Z Coordinate of Top Submerged Flatlorm (z3, m)
k=367595.30;    % Kekakuan Arah Surge
K=k*Mat_satu;   % matrix Kekakuan
m=8376800.710;  % Massa Translasi struktur
M=m*Mat_satu;   % Matrik Masssa
psi = 0;        % Rasio redaman struktur
c=(psi*(sqrt(2*k*m))); % Redaman Struktur
C=c*Mat_satu;   % Matrik Redaman

% -----
% Perhitungan Awal untuk mendapatkan nilai k(wave number) untuk setiap
% frekuensi angular yang ada.
% Analisa mencari akar persamaan dilakukan dengan metode brent, untuk

```

```

% mendapatkan akar persamaan dari f(x) = 0
% Dimana persamaan nya f(x)= k.tanh(k.d) - (w^2/g) (Persamaan dispersi
% gelombang)
%-----

for ii=1:a
    k=brent(@(k)((k.*tanh(k*d))-(((ii-1).*r).^2)./g),0,1);
    X(ii,1)= w(1,ii);
    X(ii,2)= [k]';
End

%-----
% Perhitungan Fungsi Pembebanan, F(w)
% Fw = FD(w) + FI(w)
%
% KETERANGAN :
% Fd1 = Fungsi gaya hambat pada tiang tanpa koefisien Kd1
% Fd2 = Fungsi gaya hambat pada platform tanpa koefisien Kd2
% Fd3 = Fungsi gaya hambat pada leg platform tanpa koefisien Kd3
% Kd1 = Koefisien Kd pada tiang
% Kd2 = Koefisien Kd pada platform
% Kd3 = Koefisien Kd pada leg platform
% Fi1 = Fungsi gaya inersia pada tiang tanpa koefisien Ki1
% Fi2 = Fungsi gaya inersia pada platform tanpa koefisien Ki2
% Fi3 = Fungsi gaya inersia pada leg platform tanpa koefisien Ki3
% Ki1 = Koefisien Ki pada tiang
% Ki2 = Koefisien Ki pada platform
% Ki3 = Koefisien Ki pada leg platform
%-----

for ii=1:a
    % Perhitungan Fungsi beban gelombang F(w)
    % akibat Gaya Hambat Gelombang
    Fd1 = ((1/16)*p*CD*Dh).*(X(ii,1)).^2*(Hs^2);
    Fd2 = ((1/16)*p*CD*Df).*(X(ii,1)).^2*(Hs^2);
    Fd3 = ((1/16)*p*CD*Lleg*2).*(X(ii,1)).^2*(Hs^2);
    Kd1 = ((cosh(X(ii,2)).*(d-z1)).*(sinh(X(ii,2)).*(d-z1)))...
        -(cosh(X(ii,2)).*(d-z2)).*(sinh(X(ii,2)).*(d-z2)))...
        +(X(ii,2))*z2-(X(ii,2))*z1)...
        ./((2.*X(ii,2)).*(sinh(X(ii,2)).*d)^2));
    Kd2 = ((cosh(X(ii,2)).*(d-z2)).*(sinh(X(ii,2)).*(d-z2)))...
        -(cosh(X(ii,2)).*(d-z3)).*(sinh(X(ii,2)).*(d-z3)))...
        +(X(ii,2))*z3-(X(ii,2))*z2)...
        ./((2.*X(ii,2)).*(sinh(X(ii,2)).*d)^2));
    Kd3 = ((cosh(X(ii,2)).*(d-(z3-tf)))).*(sinh(X(ii,2)).*(d-(z3-tf)))...
        -(cosh(X(ii,2)).*(d-z3)).*(sinh(X(ii,2)).*(d-z3)))...
        +(X(ii,2))*z3-(X(ii,2))*(z3-tf))...
        ./((2.*X(ii,2)).*(sinh(X(ii,2)).*d)^2));
    Fd = (Fd1.*Kd1) + (Fd2.*Kd2)+(Fd3.*Kd3);
    X(ii,3)= [Fd]'; format short e;
    % Akibat Gaya Inersia Gelombang
    Fi1 = ((1/2)*p*CM*Ah).*(X(ii,1)).^2.*Hs;
    Fi2 = ((1/2)*p*CM*Af).*(X(ii,1)).^2.*Hs;
    Fi3 = ((1/2)*p*CM*bf*Lleg*4).*(X(ii,1)).^2.*Hs;
    Ki1 = (sinh(X(ii,2)).*(d-z1))-(sinh(X(ii,2)).*(d-z2))...
        ./((X(ii,2)).*(sinh(X(ii,2)).*d)));

```

```

Ki2 = (sinh((X(ii,2)).*(d-z2))-(sinh((X(ii,2)).*(d-z3))))...
      ./((X(ii,2)).*((sinh((X(ii,2)).*d)))));
Ki3 = (sinh((X(ii,2)).*(d-(z3-tf)))-(sinh((X(ii,2)).*(d-z3))))...
      ./((X(ii,2)).*((sinh((X(ii,2)).*d)))));
Fi = (Fi1.*Ki1)+(Fi2.*Ki2)+(Fi3.*Ki3);
X(ii,4)= [Fi]'; format short e;
end
% Fungsi Pembebanan akibat Gaya Hambat dan Inersia

Fw= X(:,3)+X(:,4);

% -----
% Perhitungan Transfer Fungsi Gaya Gelombang hambat dan inertia (Gw)
% Gw = Fungsi Pembebanan / Siginificant Wave Height= F(w)/Hs
%
% KETERANGAN :
% Gd1 = Transfer Fungsi gaya hambat pada tiang tanpa koefisien Kd1
% Gd2 = Transfer Fungsi gaya hambat pada platform tanpa koefisien Kd2
% Gd3 = Transfer Fungsi gaya hambat pada leg platform tanpa koefisien Kd3
% Kd1 = Koefisien Kd pada tiang
% Kd2 = Koefisien Kd pada platform
% Kd3 = Koefisien Kd pada leg platform
% Gi1 = Transfer Fungsi gaya inersia pada tiang tanpa koefisien Ki1
% Gi2 = Transfer Fungsi gaya inersia pada platform tanpa koefisien Ki2
% Gi3 = Transfer Fungsi gaya inersia pada leg platform tanpa koefisien Ki3
% Ki1 = Koefisien Ki pada tiang
% Ki2 = Koefisien Ki pada platform
% Ki3 = Koefisien Ki pada leg platform
% -----

for ii=1:a
% Perhitungan Fungsi beban gelombang G(w)
% akibat Gaya Hambat Gelombang
Gd1 = ((1/16)*p*CD*Dh).*((X(ii,1)).^2)*(Hs);
Gd2 = ((1/16)*p*CD*Df).*((X(ii,1)).^2)*(Hs);
Gd3 = ((1/16)*p*CD*Lleg*2).*((X(ii,1)).^2)*(Hs);
Kd1 = ((cosh((X(ii,2)).*(d-z1)))*(sinh((X(ii,2)).*(d-z1))))...
      -(cosh((X(ii,2)).*(d-z2)))*(sinh((X(ii,2)).*(d-z2))))...
      +((X(ii,2))*z2)-((X(ii,2))*z1))...
      ./((2.*(X(ii,2)).*((sinh((X(ii,2)).*d))^2)));
Kd2 = ((cosh((X(ii,2)).*(d-z2)))*(sinh((X(ii,2)).*(d-z2))))...
      -(cosh((X(ii,2)).*(d-z3)))*(sinh((X(ii,2)).*(d-z3))))...
      +((X(ii,2))*z3)-((X(ii,2))*z2))...
      ./((2.*(X(ii,2)).*((sinh((X(ii,2)).*d))^2)));
Kd3 = ((cosh((X(ii,2)).*(d-(z3-tf))))*(sinh((X(ii,2)).*(d-(z3-tf)))))...
      -(cosh((X(ii,2)).*(d-z3)))*(sinh((X(ii,2)).*(d-z3))))...
      +((X(ii,2))*z3)-((X(ii,2))*(z3-tf)))...
      ./((2.*(X(ii,2)).*((sinh((X(ii,2)).*d))^2)));
Gd = (Gd1.*Kd1) + (Gd2.*Kd2)+ (Gd3.*Kd3);
X(ii,5)= [Gd]'; format short e;
% Akibat Gaya Inersia Gelombang
Gi1 = ((1/2)*p*CM*Ah).*((X(ii,1)).^2);
Gi2 = ((1/2)*p*CM*Af).*((X(ii,1)).^2);
Gi3 = ((1/2)*p*CM*bf*Lleg*4).*((X(ii,1)).^2);
Ki1 = (sinh((X(ii,2)).*(d-z1))-(sinh((X(ii,2)).*(d-z2))))...
      ./((X(ii,2)).*((sinh((X(ii,2)).*d)))));

```

LAMPIRAN B1 (LANJUTAN)

```

Ki2 = (sinh((X(ii,2)).*(d-z2))-(sinh((X(ii,2)).*(d-z3))))...
      ./((X(ii,2)).*(sinh((X(ii,2)).*d)));
Ki3 = (sinh((X(ii,2)).*(d-(z3-tf)))-(sinh((X(ii,2)).*(d-z3))))...
      ./((X(ii,2)).*(sinh((X(ii,2)).*d)));
Gi   = (Gi1.*Ki1)+(Gi2.*Ki2)+(Gi3.*Ki3);
X(ii,6)= [Gi]'; format short e;
end

% Transfer Fungsi Total akibat Gaya Hambat dan Inersia

X(:,7) = (X(:,5)+ X(:,6));

% -----
% Perhitungan Spektrum Breitschneider yang kemudian dikembangkan oleh Ochi
% dan Huble
% -----

for ii=1:a
    Sw=(1.25/4).*((wm.^4)./(X(ii,1).^5)).*(Hs^2)...
        .*exp(-1.25.*((wm/(X(ii,1))).^4));
    X(ii,8)= Sw ; format short e;
end

% =====
%
% Perhitungan RESPONSE AMPLITUDE OPERATOR RAO(w)
%
% =====

for ii=1:a
    P=((K(ii,1))-((M(ii,1)).*(X(ii,1).^2)));
    X(ii,9)= [P]'; format short e;
    RAO=abs((X(ii,7)).*2)/(X(ii,9));
    X(ii,10)= RAO; format short e;
end

% =====
%
% SPEKTRA RESPONSE STRUKTUR, Su(w)
%
% =====

for ii=1:a
    Suw=(((X(ii,10))./2).^2).*(X(ii,8));
    X(ii,11)= Suw; format short e;
end

% =====
%
% VARIANS
%
% =====

% Memformat agar nilai Suw selalu bilangan Real dan positif
% Mencari nilai Suw untuk setiap interval

```



```
for ii=1:a
    if or(X(ii,11)>0,X(ii,11)==0)
        ISuw=((X(ii,11)).*r);
    else ISuw=0;
    end
    X(ii,12)= ISuw; format short e;
end

% Mengintegrasikan dan mencari nilai varian dari
Varian=sqrt((X(:,12))'*(Mat_satu))*2);

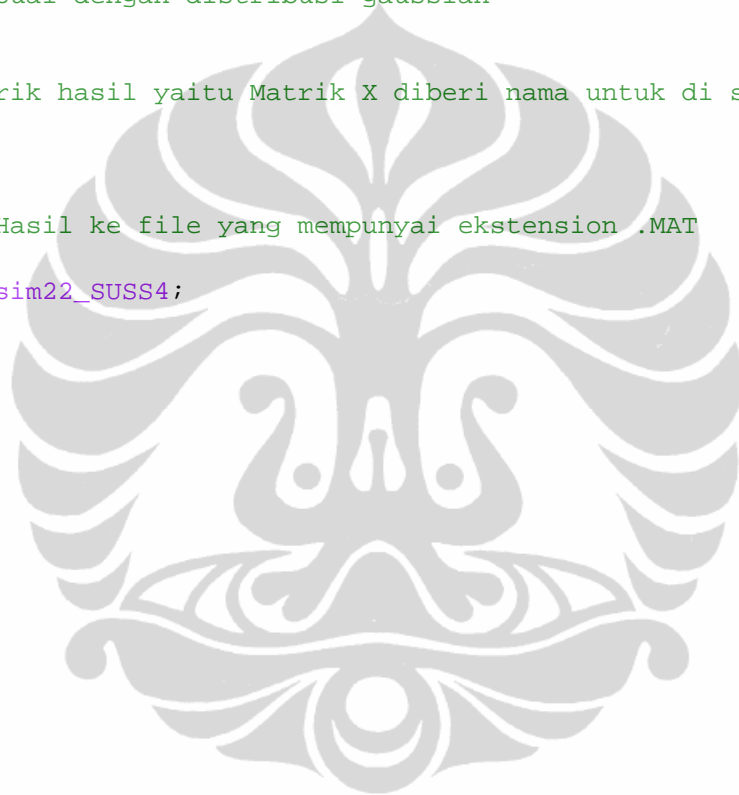
% Mencari nilai perpindahan arah surge dengan mengasumsikan distribusi
% perpindahannya sesuai dengan distribusi gaussian

u_wave =3*Varian
% Mengatur agar Matrik hasil yaitu Matrik X diberi nama untuk di save

sim22_SUSS4=X;

% Menyimpan Matrik Hasil ke file yang mempunyai ekstension .MAT

save Simulasi22su sim22_SUSS4;
```



```

%-----
%
%                               TESIS
%                               ANALISA STABILITAS TURBIN ANGIN TERAPUNG LEPAS PANTAI
%                               DENGAN SISTEM TENSION LEG PLATFORM
% Oleh : Hendi
% Pembimbing Tesis : Ir. Iwan R. Soedigdo, MSCE. Ph.D,
% Analisa Gelombang Arah Sway
% File : Simulasi 1 NREL
%-----
clear all;
clc;
disp('=====');
disp('+      ANALISA STABILITAS TURBIN ANGIN TERAPUNG LEPAS PANTAI      +');
disp('+      DENGAN SISTEM TENSION LEG PLATFORM                        +');
disp('+      SINGLE DEGREE OF FREEDOM ARAH SWAY                        +');
disp('+      NREL TLP                                                    +');
disp('=====');
disp('=====');
disp('+      SIMULASI TINGGI SIGNIFIKAN DAN PERIODE GELOMBANG          +');
disp('=====');
%-----
r=0.02;           % Interval frekuensi angular yang digunakan
w=[0:r:2.0];     % Rentang frekuensi Angular yang digunakan
a=length(w);     % Jumlah rentang
Mat_satu=ones(a,1); % Matrik ukuran a x 1 bernilai satu
p=1025;          % (kg/m3)
CL=0.015;        % Koefisien Angkat atau Transversal
g=9.807;         % (m2/s)
G=g*Mat_satu;   % Matrik Percepatan Gravitasi
Hs=1.88;         % Significant Wave Height (Hs, m)
Tm=8.80;         % Periode Gelombang
wm=((2*pi)/Tm);  % Frekuensi Angular Gelombang
d=200;           % Kedalaman Laut (d, m)
Vw=9.77;         % Kecepatan Angin (Vw, m/s)
Dh=5.88;         % Diameter Hub (Dh, m)
Df=20;           % Diameter Platform (Df, m)
tf=4;            % Tinggi Leg Dari Platform (m)
Lleg=10;         % Panjang Leg (m)
bf=4;            % Lebar leg (m)
Ah=(0.25*pi*(Dh^2)); % Luas Penampang Hub (m2)
Af=(0.25*pi*(Df^2)); % Luas Penampang Platform (m2)
z1=0;            % Z Coordinate of Top Submerged tiang (z1, m)
z2=10;           % Z Coordinate of Base Submerged tiang (z2, m)
z3=30;           % Z Coordinate of Top Submerged Flatlatform (z3, m)
k=367595.30;    % Kekakuan Arah Surge
K=k*Mat_satu;   % matrix Kekakuan
m=8376800.710;  % Massa Translasi struktur
M=m*Mat_satu;   % Matrik Massa
psi = 0;        % Rasio redaman struktur
c=(psi*(sqrt(2*k*m))); % Redaman Struktur
C=c*Mat_satu;   % Matrik Redaman

% -----
% Perhitungan Awal untuk mendapatkan nilai k(wave number) untuk setiap
% frekuensi angular yang ada.
% Analisa mencari akar persamaan dilakukan dengan metode brent, untuk
% mendapatkan akar persamaan dari f(x) = 0

```

LAMPIRAN B2 (LANJUTAN)

```

% Dimana persamaan nya f(x)= k.tanh(k.d) - (w^2/9) (Persamaan dispersi
% gelombang)
% -----
for ii=1:a
    k=brent(@(k)((k.*tanh(k*d))-(((ii-1).*r).^2)./g),0,1);
    X(ii,1)= w(1,ii);
    X(ii,2)= [k]';
end
% -----
% Perhitungan Fungsi Pembebanan, F(w)
% Fw = FL(w)
%
% KETERANGAN :
% Fl1 = Fungsi gaya transversal pada tiang tanpa koefisien Kl1
% Fl2 = Fungsi gaya transversal pada platform tanpa koefisien Kl2
% Fl3 = Fungsi gaya transversal pada leg platform tanpa koefisien Kl3
% Kl1 = Koefisien Kl pada tiang
% Kl2 = Koefisien Kl pada platform
% Kl3 = Koefisien Kl pada leg platform
% -----
for ii=1:a
    % Perhitungan Fungsi beban gelombang F(w)
    % akibat Gaya Angkat Gelombang
    Fl1 = ((1/16)*p*CL*Dh).*(X(ii,1)).^2*(Hs^2);
    Fl2 = ((1/16)*p*CL*Df).*(X(ii,1)).^2*(Hs^2);
    Fl3 = ((1/16)*p*CL*Lleg*2).*(X(ii,1)).^2*(Hs^2);
    Kl1 = ((cosh(X(ii,2)).*(d-z1)).*(sinh(X(ii,2)).*(d-z1)))....
        -(cosh(X(ii,2)).*(d-z2)).*(sinh(X(ii,2)).*(d-z2)))....
        +((X(ii,2))*z2)-((X(ii,2))*z1))....
        ./((2.*(X(ii,2)).*(sinh(X(ii,2)).*d))^2));
    Kl2 = ((cosh(X(ii,2)).*(d-z2)).*(sinh(X(ii,2)).*(d-z2)))....
        -(cosh(X(ii,2)).*(d-z3)).*(sinh(X(ii,2)).*(d-z3)))....
        +((X(ii,2))*z3)-((X(ii,2))*z2))....
        ./((2.*(X(ii,2)).*(sinh(X(ii,2)).*d))^2));
    Kl3 = ((cosh(X(ii,2)).*(d-(z3-tf))).*(sinh(X(ii,2)).*(d-(z3-tf)))....
        -(cosh(X(ii,2)).*(d-z3)).*(sinh(X(ii,2)).*(d-z3)))....
        +((X(ii,2))*z3)-((X(ii,2))*z3-tf))....
        ./((2.*(X(ii,2)).*(sinh(X(ii,2)).*d))^2));
    Fl = (Fl1.*Kl1)+(Fl2.*Kl2)+(Fl3.*Kl3);
    X(ii,3)= [Fl]'; format short e;
end
% Fungsi Pembebanan akibat Gaya Angkat

Fw= X(:,3);

% -----
% Perhitungan Transfer Fungsi Gaya Gelombang Angkat (Gw)
% Gw = Fungsi Pembebanan / Significant Wave Height= F(w)/Hs
%
% KETERANGAN :
% Gl1 = Transfer Fungsi gaya transversal pada tiang tanpa koefisien Kl1
% Gl2 = Transfer Fungsi gaya transversal pada platform tanpa koefisien Kl2
% Gl3 = Transfer Fungsi gaya transversal pada leg platform tanpa koefisien
Kl3
% Gl1 = Koefisien Kl pada tiang

```

```

% G12 = Koefisien Kl pada platform
% G13 = Koefisien Kl pada leg platform
% -----

for ii=1:a
    % Perhitungan Fungsi beban gelombang G(w)
    % akibat Gaya Hambat Gelombang
    G11 = ((1/16)*p*CL*Dh).*((X(ii,1)).^2)*(Hs);
    G12 = ((1/16)*p*CL*Df).*((X(ii,1)).^2)*(Hs);
    G13 = ((1/16)*p*CL*Lleg*2).*((X(ii,1)).^2)*(Hs);
    K11 = ((cosh((X(ii,2)).*(d-z1)).*(sinh((X(ii,2)).*(d-z1)))....
        -(cosh((X(ii,2)).*(d-z2)).*(sinh((X(ii,2)).*(d-z2)))....
        +((X(ii,2))*z2)-((X(ii,2))*z1))...
        ./((2.*(X(ii,2)).*(sinh((X(ii,2)).*d))^2));
    K12 = ((cosh((X(ii,2)).*(d-z2)).*(sinh((X(ii,2)).*(d-z2)))....
        -(cosh((X(ii,2)).*(d-z3)).*(sinh((X(ii,2)).*(d-z3)))....
        +((X(ii,2))*z3)-((X(ii,2))*z2))...
        ./((2.*(X(ii,2)).*(sinh((X(ii,2)).*d))^2));
    K13 = ((cosh((X(ii,2)).*(d-(z3-tf))).*(sinh((X(ii,2)).*(d-(z3-tf)))....
        -(cosh((X(ii,2)).*(d-z3)).*(sinh((X(ii,2)).*(d-z3)))....
        +((X(ii,2))*z3)-((X(ii,2))*z3-tf))...
        ./((2.*(X(ii,2)).*(sinh((X(ii,2)).*d))^2));
    G1 = (G11.*K11)+(G12.*K12)+(G13.*K13);
    X(ii,4)= [G1]'; format short e;

end
    Gw = X(ii,4);
% -----
% Perhitungan Spektrum Breitschneider yang kemudian dikembangkan oleh Ochi
% dan Huble
% -----

for ii=1:a
    Sw=(1.25/4).*((wm.^4)./(X(ii,1).^5)).*(Hs^2)...
        *(exp(-1.25.*(wm/(X(ii,1))).^4));
    X(ii,5)= Sw ; format short e;
end

% =====
%
% Perhitungan RESPONSE AMPLITUDE OPERATOR, RAO(w)
%
% =====

for ii=1:a
    P=((K(ii,1))-((M(ii,1)).*((X(ii,1)).^2)));
    X(ii,6)= [P]'; format short e;
    RAO=abs((X(ii,4)).*2)/(X(ii,6));
    X(ii,7)= RAO; format short e;
end

% =====
%
% SPEKTRA RESPONSE STRUKTUR, Su(w)

```

```

%
% =====

for ii=1:a
    Suw=(((X(ii,7))./2).^2).*(X(ii,5));
    X(ii,8)= Suw; format short e;
end

% =====
%
% VARIANS
%
% =====

% Memformat agar nilai Suw selalu bilangan Real dan positif
% Mencari nilai Suw untuk setiap interval
for ii=1:a
    if or(X(ii,8)>0,X(ii,8)==0)
        ISuw=((X(ii,8)).*r);
    else ISuw=0;
    end
    X(ii,9)= ISuw; format short e;
end

% Mengintegrasikan dan mencari nilai varian dari
Varian=sqrt(((X(:,9))'*(Mat_satu))*2);

% Mencari nilai perpindahan arah surge dengan mengasumsikan distribusi
% perpindahannya sesuai dengan distribusi gaussian

u_wave =3*Varian;

% Mengatur agar Matrik hasil yaitu Matrik X diberi nama untuk di save
sim22_SWSS4=X;

% Menyimpan Matrik Hasil ke file yang mempunyai ekstension .MAT

save Simulasi22sw sim22_SWSS4;

```

```

% =====
%                               Program Membuat Grafik
%                               Oleh : HENDI
% =====

clear all;
clc;

disp('=====')
disp('                               GRAFIK UNTUK SIMULASI 2                               ')
disp('          SIMULASI TINGGI SIGNIFIKAN DAN PERIODE GELOMBANG          ')
disp('                               TLP NREL                               ')
disp('=====')
% =====
%
% CATATAN :
% Sebelum menggunakan Program ini harus me re-run file-file berikut
% - AN_SUR_SIM_2_1_SS2
% - AN_SWA_SIM_2_1_SS2
% - AN_SUR_SIM_2_2_SS4
% - AN_SUR_SIM_2_2_SS4
% - AN_SUR_SIM_2_3_SS6
% - AN_SWA_SIM_2_3_SS6
% - AN_SUR_SIM_2_4_SS8
% - AN_SUR_SIM_2_4_SS8
%
% Keterangan :
% w      = Frekuensi angular (rad/s)
% G(w) = Transfer fungsi beban gelombang = F(w)/Hs
% F(w) = Fungsi beban gelombang
% S(w) = Spektrum gelombang
% RAO = Response Amplitude Operator
% Su(w)= Spektra Respon Struktur
%
% =====
% Memanggil Data Yang Diperlukan Untuk Membuat Grafik
% Simulasi21su = File dari Simulasi 2 variasi 1 arah surge
% Simulasi21sw = File dari Simulasi 2 variasi 1 arah sway
% Simulasi22su = File dari Simulasi 2 variasi 2 arah surge
% Simulasi22sw = File dari Simulasi 2 variasi 2 arah sway
% Simulasi23su = File dari Simulasi 2 variasi 3 arah surge
% Simulasi23sw = File dari Simulasi 2 variasi 3 arah sway
% Simulasi24su = File dari Simulasi 2 variasi 4 arah surge
% Simulasi24sw = File dari Simulasi 2 variasi 4 arah sway
% =====

load Simulasi21su;
load Simulasi21sw;
load Simulasi22su;
load Simulasi22sw;
load Simulasi23su;
load Simulasi23sw;
load Simulasi24su;
load Simulasi24sw;

```

```

% =====
% Membuat Grafik Spektrum Gelombang Pierson-Moskowitz
% =====

figure(1)
plot(sim21_SUSS2(:,1),sim21_SUSS2(:,8),'k-'. ...
      ,sim22_SUSS4(:,1),sim22_SUSS4(:,8),'b-'. ...
      ,sim23_SUSS6(:,1),sim23_SUSS6(:,8),'r-'. ...
      ,sim24_SUSS8(:,1),sim24_SUSS8(:,8),'g-')
title('SPEKTRUM GELOMBANG PIERSON-MOSKOWITZ')
xlabel('w, (rad/s)'), ylabel('S(w), m2.s/rad ')
legend('SS2', 'SS4', 'SS6', 'SS8')

% =====
% Membuat Grafik Transfer Fungsi Beban Gelombang
% =====

figure(2)
subplot(2,1,1);
plot(sim21_SUSS2(:,1),sim21_SUSS2(:,7),'k-'. ...
      ,sim22_SUSS4(:,1),sim22_SUSS4(:,7),'b-'. ...
      ,sim23_SUSS6(:,1),sim23_SUSS6(:,7),'r-'. ...
      ,sim24_SUSS8(:,1),sim24_SUSS8(:,7),'g-')
title('TRANSFER FUNGSI BEBAN GELOMBANG SURGE')
xlabel('w, (rad/s)'), ylabel('G(w), (N/m)')
legend('SS2', 'SS4', 'SS6', 'SS8')

subplot(2,1,2);
plot(sim21_SWSS2(:,1),sim21_SWSS2(:,4),'k-'. ...
      ,sim22_SWSS4(:,1),sim22_SWSS4(:,4),'b-'. ...
      ,sim23_SWSS6(:,1),sim23_SWSS6(:,4),'r-'. ...
      ,sim24_SWSS8(:,1),sim24_SWSS8(:,4),'g-')
title('TRANSFER FUNGSI BEBAN GELOMBANG SWAY')
xlabel('w, (rad/s)'), ylabel('G(w), (N/m)')
legend('SS2', 'SS4', 'SS6', 'SS8')

% =====
% Membuat Grafik RAO
% =====

figure(3)
subplot(2,1,1);
plot(sim21_SUSS2(:,1),sim21_SUSS2(:,10),'k-'. ...
      ,sim22_SUSS4(:,1),sim22_SUSS4(:,10),'b-'. ...
      ,sim23_SUSS6(:,1),sim23_SUSS6(:,10),'r-'. ...
      ,sim24_SUSS8(:,1),sim24_SUSS8(:,10),'g-')
title('RAO SURGE')
xlabel('w (rad/s)'), ylabel('RAO')
legend('SS2', 'SS4', 'SS6', 'SS8')

subplot(2,1,2);
plot(sim21_SWSS2(:,1),sim21_SWSS2(:,7),'k-'. ...
      ,sim22_SWSS4(:,1),sim22_SWSS4(:,7),'b-'. ...
      ,sim23_SWSS6(:,1),sim23_SWSS6(:,7),'r-'. ...
      ,sim24_SWSS8(:,1),sim24_SWSS8(:,7),'g-')

```

```

title('RAO SWAY')
xlabel('w (rad/s)'), ylabel('RAO')
legend('SS2', 'SS4', 'SS6', 'SS8')

% =====
% Membuat Grafik SPEKTRA RESPON STRUKTUR
% =====

figure(4)
subplot(2,1,1);
plot(sim21_SUSS2(:,1),sim21_SUSS2(:,11), 'k-'. ...
      ,sim22_SUSS4(:,1),sim22_SUSS4(:,11), 'b-'. ...
      ,sim23_SUSS6(:,1),sim23_SUSS6(:,11), 'r-'. ...
      ,sim24_SUSS8(:,1),sim24_SUSS8(:,11), 'g-')
title('SPEKTRA RESPON STRUKTUR SURGE')
xlabel('w, (rad/s)'), ylabel('Su(w), m')
legend('SS2', 'SS4', 'SS6', 'SS8')

subplot(2,1,2);
plot(sim21_SWSS2(:,1),sim21_SWSS2(:,8), 'k-'. ...
      ,sim22_SWSS4(:,1),sim22_SWSS4(:,8), 'b-'. ...
      ,sim23_SWSS6(:,1),sim23_SWSS6(:,8), 'r-'. ...
      ,sim24_SWSS8(:,1),sim24_SWSS8(:,8), 'g-')
title('SPEKTRA RESPON STRUKTUR SWAY')
xlabel('w, (rad/s)'), ylabel('Su(w), m')
legend('SS2', 'SS4', 'SS6', 'SS8')

```



```

function root=brent(func,a,b,tol)
% Find a root of f(x) = 0 by combining Quadratic
% Interpolation with bisection (Brent's method)
% USAGE : root = brent(func,a,b,tol)
% INPUT :
% func : handle of function that returns f(x)
% a,b : limits of the interval containing the root.
% tol : error tolerance (default is 1.0e6*eps).
% OUTPUT :
% root = zero of f(x) (root = NaN if failed to converge).
if nargin < 4; tol=1.0e6*eps; end
% First step is bisection
x1=a; f1=feval(func,x1);
if f1==0; root=x1; return; end
x2=b; f2=feval(func,x2);
if f2==0; root=x2; return; end
if f1.*f2 > 0
    error('Root is not bracketed in (a,b)')
end
x3=0.5*(a+b);
% Beginning of iterative loop
for i = 1:10000000
    f3= feval(func,x3);
    if abs(f3) < tol
        root = x3; return
    end
    % Tighten brackets (a,b) on the root.
    if f1.*f3<0.0; b = x3;
    else a=x3;
    end
    % Try quadratic interpolation.
    denom = (f2-f1).*(f3-f1).*(f2-f3);
    numer = x3.*(f1-f2).*(f2-f3+f1)...
        + f2.*x1.*(f2-f3)+f1.*x2.*(f3-f1);
    % If division by zero, push x out of bracket
    % to force bisection.
    if denom ==0; dx=b-a;
    else dx = f3.*numer./denom;
    end
    x=x3+dx;
    % Interpolation goes out of bracket, use bisection.
    if (b-x).*(x-a)<0.0
        dx=(0.5.*(b-a)); x=a+dx;
    end
    % Let x3 <---x & choose new x1,x1 so that x1<x3<s2
    if x<x3
        x2=x3;f2=f3;
    else
        x1 = x3;f1=f3;
    end
    x3=x;
end
root=0;

```