

**EVALUASI RESPON DINAMIS DAN TEGANGAN TALI TAMBAT PADA
FLOATING OFFSHORE WIND TURBINE (FOWT): (STUDI KASUS LOKASI
PERAIRAN UJUNG GENTENG, LAUT BANDA, DAN LAUT ARAFURA)**



**HERU JABALUDDIN SAPUTRA LUBIS
D081 20 1032**



**PROGRAM STUDI TEKNIK KELAUTAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

**EVALUASI RESPON DINAMIS DAN TEGANGAN TALI TAMBAT PADA
FLOATING OFFSHORE WIND TURBINE (FOWT): (STUDI KASUS LOKASI
PERAIRAN UJUNG GENTENG, LAUT BANDA, DAN LAUT ARAFURA)**

**HERU JABALUDDIN SAPUTRA LUBIS
D081 20 1032**



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK KELAUTAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

**EVALUASI RESPON DINAMIS DAN TEGANGAN TALI TAMBAT PADA
FLOATING OFFSHORE WIND TURBINE (FOWT): (STUDI KASUS LOKASI
PERAIRAN UJUNG GENTENG, LAUT BANDA, DAN LAUT ARAFURA)**

HERU JABALUDDIN SAPUTRA LUBIS
D081 20 1032

Skripsi

Sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar sarjana

Program Studi Sarjana Teknik Kelautan

pada

**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK KELAUTAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

SKRIPSI**EVALUASI RESPON DINAMIS DAN TEGANGAN TALI TAMBAT PADA
FLOATING OFFSHORE WIND TURBINE (FOWT): (STUDI KASUS LOKASI
PERAIRAN UJUNG GENTENG, LAUT BANDA, DAN LAUT ARAFURA)**

HERU JABALUDDIN SAPUTRA LUBIS
D081201051

Skripsi,

Telah dipertahankan di depan Panitia Ujian Sarjana Teknik Kelautan pada
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

pada

Program Studi Teknik Kelautan
Departemen Teknik Kelautan
Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin
Gowa

Mengesahkan:
Pembimbing tugas akhir,



Fuad Mahfud Assidiq, ST., MT.,
NIP. 19950929 202406 1 003

Mengetahui:
Ketua Program Studi,



Dr. Ir. Chairul Paotonan, ST., MT.,
NIP. 19750605 200212 1 003

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa, skripsi berjudul **“Evaluasi Respon Dinamis dan Tegangan Tali Tambat Pada *Floating Offshore Wind Turbine (FOWT)*: (Studi Kasus Perairan Ujung Genteng, Laut Banda, dan Laut Arafura)”** adalah benar karya saya dengan arahan dari pembimbing (Fuad Mahfud Assidiq, S.T., M.T., sebagai Pembimbing Utama). Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka skripsi ini. Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan skripsi ini adalah karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut berdasarkan aturan yang berlaku.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta (hak ekonomis) dari karya tulis saya berupa skripsi ini kepada Universitas Hasanuddin.

Gowa, 26 Agustus 2024



Heru Jabaluddin Saputra Lubis
D081 20 1032

UCAPAN TERIMA KASIH

Assalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.

Alhamdulillah, puji syukur kehadiran Allah subhanahu Wa Ta'ala yang telah memberikan berkat rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan tugas akhir ini dalam memperoleh gelar Sarjana Teknik (S.T.). Sholawat serta salam kita haturkan kepada junjungan kita Nabi Besar Muhammad Shalallaahu 'Alayhi Wasallam beserta sahabatnya yang telah membawa kita pada peradaban yang tenram dan penuh ilmu pengetahuan seperti sekarang ini.

Saya ingin mengucapkan terima kasih yang setinggi-tingginya atas kesempatan dan dukungan yang diberikan kepada saya untuk menyusun tugas akhir ini yang berjudul .

“Evaluasi Respon Dinamis dan Tegangan Tali Tambat Pada *Floating Offshore Wind Turbine* (FOWT): (Studi Kasus Perairan Ujung Genteng, Laut Banda, dan Laut Arafura)”

Segala perjuangan saya hingga titik ini saya persembahkan pada dua orang paling berharga dalam hidup saya yaitu **Bapak Harun Alrasid Lubis** dan **Ibu Sahwina** yang telah berjuang dan selalu menghaturkan doa-doanya serta selalu memberikan yang terbaik disetiap langkah penulis dalam menempuh pendidikan. Hidup menjadi begitu mudah dan lancar ketika kita memiliki orang tua yang lebih memahami kita daripada diri kita sendiri. Terima kasih telah menjadi orang tua yang sempurna,

Penulis menyadari bahwa dalam proses pembelajaran hingga penyusunan skripsi ini banyak pihak yang membantu dalam bentuk apapun itu. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih yang tak terhingga kepada semua pihak dengan segala keikhlasannya yang telah membantu dalam penyusunan skripsi ini terutama kepada:

1. Dosen Pembimbing, Bapak **Fuad Mahfud Assidiq, S.T., M.T.**, Terima kasih atas segala keikhlasan, kesabaran serta dukungannya yang tak terhingga dalam mengarahkan, memberikan bimbingan, bantuan dan motivasi serta masukan-masukan kepada penulis dalam proses pembelajaran sampai dengan hari ini. Semoga selalu dilimpahkan kesehatan dan rezeki yang baik.
2. Bapak **Prof. Daeng Paroka, S.T., M.T., Ph.D.**, selaku Kepala Laboratorium Riset dan Operasi Struktur Bangunan Apung (DOFLER) Departemen Teknik Kelautan FT-UNHAS. Terima kasih atas segala keikhlasannya yang telah meluangkan waktu, pikiran, kesabaran, ketulusannya serta dukungan tak terhitung dalam mengarahkan, memberikan bimbingan, bantuan dan motivasi serta masukan-masukan kepada penulis selama proses pembelajaran sampai dengan hari ini. Semoga selalu dilimpahkan kesehatan dan rezeki yang baik.
3. Bapak **Ir. Juswan, M.T.**, selaku dosen penguji yang telah meluangkan waktu dan memberikan kritik serta saran yang sangat membantu penulis dalam proses penelitian maupun penyusunan skripsi ini. Semoga selalu dilimpahkan kesehatan dan rezeki yang baik.

4. Bapak **Dr. Ir. Chairul Paotonan, S.T., M.T.**, selaku Ketua Departemen Teknik Kelautan FT-UNHAS yang telah memberikan kritikan serta saran dan mengesahkan skripsi ini.
5. Bapak **Dr. Eng. Firman Husain, S.T., M.T.**, selaku Penasehat Akademik (PA) selama penulis menjadi mahasiswa Teknik Kelautan FT-UNHAS, Terima kasih banyak atas saran dan masukannya kepada penulis selama proses pembelajaran sampai hari ini.
6. Seluruh **Dosen-Dosen Departemen Teknik Kelautan FT-UNHAS**, Bapak **Prof. Ir. Muhammad Zubair Muis Alie, S.T., M.T., Ph.D.**, Bapak **Dr. Eng. Achmad Yasir Baeda, S.T., M.T.**, Bapak **Sabaruddin Rahman, S.T., M.T., Ph.D.**, Bapak **Dr. Ir. Taufiqur Rahman, S.T., M.T.**, Bapak **Dr. Habibie, S.T., M.T.**, Bapak **Dr. Ir. Ashury Djamaluddin, S.T., M.T.**, dan Ibu **Dr. Hasdinar Umar, S.T., M.T.**, yang telah memberikan pengalaman dan pengetahuannya kepada penulis selama proses perkuliahan.
7. **Staf Administrasi Departemen Teknik Kelautan FT-UNHAS** yang telah membantu segala aktivitas administrasi selama perkuliahan serta dalam penyelesaian skripsi ini.
8. Kepada **teman-teman penulis Insinyur Muda Masa Depan (IMAN)**, yaitu **Ginting, Yayat, Ikbal, Ezron, Mahen, Clarion, Trivaldo, Felis, Tandi, Edwin, dan Sem Singgi**. Terima kasih telah kebersamai dan mengisi hari-hari penulis, akan dirindukan kelak petualangan bersama kalian di perantauan. Sehat dan sukses selalu.
9. Kepada **teman-teman WARDER 2014** yang selalu menemani penulis selama proses pembelajaran dan teman kecil penulis hingga hari ini, terima kasih atas dukungan dan motivasinya. Sehat dan sukses selalu.
10. Teman-teman **Lab. DOFLER** yang selalu memberikan semangat kepada saya, penulis mengucapkan banyak terima kasih juga kepada Alumni Lab. DOFLER yang selalu bersedia memberikan pengarahan. Semoga sehat dan sukses selalu.
11. Kepada **sahabat** terdekat penulis **Ahmad Hidayat Saidiman Nur, Gabriel Pratama Ginting, Muh. Ikbal, Clarion Nixon Kandole, Tandi Tarru, Ezron Pasangla'** dan **Nurhikma** yang selalu memotivasi dan memberikan dukungan kepada penulis, menghibur dan membantu. Terima kasih telah mengisi petualangan penulis selama hidup, menjadi saudara tak sedarah penulis di perantauan. Sehat dan sukses selalu.
12. **Teman-teman Mahasiswa NAVAL20 khususnya Teknik Kelautan 2020 (DREDGER 2020) FT-UNHAS** yang telah menjadi keluarga penulis selama di perkuliahan yang kebersamai penulis selama proses pembelajaran sampai hari ini. Sehat dan sukses selalu.
13. Yang terakhir saya mengucapkan terima kasih banyak kepada **diri saya sendiri** yang sudah berjuang sampai sejauh ini, banyak rintangan yang dilewati selama proses perkuliahan dari awal sampai sekarang. Jangan cepat puas karena ini baru awalan dari hidup, masih banyak keinginan dan pencapaian yang harus diraih, semoga selalu dilimpahkan rezeki dan kesehatan dalam melanjutkan petualangan, satu yang selalu ditanam dalam diri yaitu "kemalasan dihari ini akan menjadi beban di esok hari".

14. Serta semua pihak yang turut serta dalam penyelesaian pendidikan, penelitian, dan penyusunan skripsi yang tidak dapat penulis sebutkan satu-persatu. Penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya untuk seluruh bantuan yang diberikan. Dengan segala kerendahan hati penulis berharap skripsi ini dapat bermanfaat bagi kita semua.

Sekian,

Keep On Fighting Till The End!

Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.

Penulis,

Heru Jabaluddin Saputra Lubis

ABSTRAK

Heru Jabaluddin Saputra Lubis. **Evaluasi Respon Dinamis dan Tegangan Tali Tambat Pada *Floating Offshore Wind Turbine* (FOWT): (Studi Kasus Lokasi Perairan Ujung Genteng, Laut Banda, dan Laut Arafura** (dibimbing oleh Fuad Mahfud Assidiq, S.T., M.T.)

1. Indonesia memiliki potensi besar sebagai penghasil energi angin, terutama pada daerah lepas pantai karena kecepatan angin yang lebih besar dan jumlah penghalang seperti bukit, gedung, hutan, dan lain sebagainya lebih sedikit dibandingkan dengan yang ada pada daratan. Penelitian ini membahas mengenai *Floating Offshore Wind Turbine* (FOWT) dengan variasi struktur terapung meliputi MIT/NREL TLP 5MW, *semi-submersible* OC4 5MW, dan SPAR OC3 5MW yang diinstal pada beberapa titik di Indonesia, yakni Laut Banda, Perairan Ujung Genteng, dan Laut Arafura yang berpotensi mempunyai energi angin yang besar untuk memasok kebutuhan listrik. Metode yang dihasilkan pada penelitian ini yaitu respon gerak struktur dan tegangan tali tambat dari setiap struktur terapung menggunakan *software* ANSYS AQWA. Hasil analisis yang telah dilakukan menunjukkan bahwa model struktur terapung tipe *semi-submersible* OC4 5MW memiliki respon gerak struktur yang paling kecil pada seluruh mode gerak *surge*, *sway*, *heave*, *roll*, *pitch*, dan *yaw*, diikuti dengan SPAR OC3 5MW dan MIT/NREL TLP 5MW. Hasil analisis respon gerak struktur dari ketiga lokasi yang diuji dari setiap model struktur terapung *semi-submersible* OC4 5MW sebesar 18 poin dengan respon gerak terkecil, Tegangan tali tambat yang didapat pada setiap model struktur terapung yang diuji pada tiga lokasi yaitu Laut Banda, Perairan Ujung Genteng, dan Laut Arafura dengan skor perbandingan dari setiap model struktur terapung *semi-submersible* OC4 5MW sebesar 8 poin, sedangkan pada hasil analisis *anchor lift* cenderung variatif pada dua model struktur terapung yakni pada tipe *semi-submersible* OC4 5MW dan SPAR OC3 5MW dengan skor perbandingan terkecil terdapat pada model MIT/NREL TLP 5MW sebesar 3 poin,

Kata Kunci: Angin, ANSYS AQWA, Respon gerak, Struktur terapung, Tali tambat, Turbin angin lepas pantai

ABSTRACT

*Heru Jabaluddin Saputra Lubis. **Evaluation of Dynamic Response and Mooring Line Tension on Floating Offshore Wind Turbine (FOWT): (Case Study of Ujung Genteng, Banda Sea, and Arafura Sea)** (supervised by Fuad Mahfud Assidiq, S.T., M.T.)*

Indonesia has great potential as a producer of wind energy, especially in offshore areas because the wind speed is greater and the number of obstacles such as hills, buildings, forests, and so on is less than those on land. This research discusses the Floating Offshore Wind Turbine (FOWT) with a variety of floating structures including MIT/NREL TLP 5MW, semi-submersible OC4 5MW, and SPAR OC3 5MW installed at several points in Indonesia, namely the Banda Sea, Ujung Genteng Waters, and the Arafura Sea which have the potential to have large wind energy to supply electricity needs. The methods produced in this study is the structural motion response and mooring line tension of each floating structure using ANSYS AQWA software. The results of the analysis show that the semi-submersible OC4 5MW type floating structure model has the smallest structural motion response in all modes of motion of surge, sway, heave, roll, pitch, and yaw, followed by SPAR OC3 5MW and MIT/NREL TLP 5MW. The results of the analysis of the motion response of the structure from the three locations tested from each model of the OC4 5MW semi-submersible floating structure amounted to 18 points with the smallest motion response, the mooring rope tension obtained on each model of the floating structure tested at three locations namely the Banda Sea, Ujung Genteng Waters, and Arafura Sea with a comparison score of each model of the semi-submersible OC4 5MW floating structure of 8 points, while the results of the anchor lift analysis tend to vary on two floating structure models, namely the OC4 5MW semi-submersible type and OC3 5MW SPAR with the smallest comparison score found on the MIT / NREL TLP 5MW model of 3 points,

Keywords: Wind, ANSYS AQWA, Sctructure response, Floating structure, Mooring line, Offshore wind turbine

DAFTAR ISI

PERNYATAAN PENGAJUAN	i
HALAMAN PENGESAHAN.....	ii
PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI	iii
UCAPAN TERIMA KASIH	iv
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xv
DAFTAR SINGKATAN ATAU ARTI SIMBOL	xvii
BAB I	1
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Turbin Angin Lepas Perairan.....	3
1.3 Penelitian Mengenai Sub-Struktur Turbin Angin Lepas Pantai.....	4
1.4 Dasar Teori.....	5
1.4.1 Turbin Angin	5
1.4.2 <i>Floating Offshore Wind Turbine</i> (FOWT).....	5
1.4.3 Sistem Tali Tambat.....	7
1.4.4 Kondisi Desain dan Pembebanan Turbin Angin Lepas Pantai	9
1.4.5 Dasar Analisis Dinamis	10
1.4.6 Beban Aerodinamis dan Hidrodinamika	11
1.4.7 Spektrum Energi Gelombang.....	13
1.4.8 Persamaan Gerakan Bangunan Apung.....	14
1.4.9 Periode Natural	15
1.4.10 Simulasi Numerik	15
1.5 Rumusan Masalah	16
1.6 Tujuan Penelitian.....	16
1.7 Manfaat Penelitian	17
1.8 Batasan Masalah	17
BAB II	18
METODE PENELITIAN	18
2.1 Alur Penelitian	18
2.2 Tahapan Penelitian.....	19
2.2.1 Studi Literatur.....	19
2.2.2 Pengumpulan Data FOWT dan Data Lingkungan.....	20
2.2.3 Pemodelan FOWT serta tali tambat pada <i>software</i> ANSYS AQWA	22
2.2.4 Validasi Model.....	23
2.2.5 Analisa <i>Response Amplitude Operator</i> FOWT	23
2.2.6 Analisis Dari Tiap 3 Model <i>Floating Offshore Wind Turbine</i> (FOWT) dan Sistem Tali Tambat.....	23

2.2.7 Perbandingan <i>Floating Offshore Wind Turbine</i> (FOWT) Pada <i>Software</i> ANSYS Workbench.....	23
2.2.8 Evaluasi Model Struktur Terapung Terhadap Perairan Indonesia.....	23
2.2.9 Kesimpulan dan Saran.....	24
BAB III	25
HASIL DAN PEMBAHASAN.....	25
3.1 Hasil.....	25
3.1.1 Perancangan Model.....	25
3.1.2 Pengambilan Data Lingkungan	25
3.1.3 Validasi Terhadap Model Struktur Terapung.....	25
3.1.4 Analisis Metode Numerik.....	27
3.1.5 Perbandingan <i>Response Amplitude Operators</i> (RAO) Struktur Terapung....	32
3.1.6 <i>Response Amplitude Operators</i> (RAO) Model Struktur Terapung	37
3.1.7 Pemodelan Sistem Tambat	43
3.1.8 Analisis Respon Gerak <i>Floating Offshore Wind Turbine</i> (FOWT).....	51
3.2 Pembahasan.....	67
3.2.1 Pemodelan Pada Struktur Terapung	67
3.2.2 Validasi Model Struktur Terapung.....	67
3.2.3 Analisis Numerik.....	67
3.2.4 Analisis <i>Response Amplitude Operator</i> (RAO).....	68
3.2.5 Analisis Respon Gerak Menggunakan <i>Time Domain</i>	72
3.2.6 Analisis Tali Tambat Pada Struktur Terapung	77
3.2.7 Perbandingan Hasil Analisis Model Struktur Terapung.....	78
BAB IV.....	80
KESIMPULAN DAN SARAN.....	80
4.1 Kesimpulan	80
4.2 Saran	80
DAFTAR PUSTAKA	82
LAMPIRAN.....	88

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Tipe-tipe desain Floater Offshore Wind Turbine (FOWT)	3
Gambar 2. Tipe-tipe FOWT yang dominan digunakan	4
Gambar 3. Perbandingan daya dan kedalaman dari tiap tipe FOWT	5
Gambar 4. Model tipe struktur terapung <i>semi-submersible</i> OC4 5MW	6
Gambar 5. Model tipe struktur terapung SPAR OC3 5MW	6
Gambar 6. Model tipe struktur terapung MIT/NREL TLP 5MW	7
Gambar 7. Model tipe struktur terapung barge	7
Gambar 8. Tali tambat tipe <i>catenary</i>	8
Gambar 9. Tali tambat tipe <i>taut</i>	9
Gambar 10. Tahapan Penelitian	19
Gambar 11. Model MIT/NREL TLP 5MW	20
Gambar 12. <i>semi-submersible</i> OC4 5MW	21
Gambar 13. SPAR OC3 5MW	22
Gambar 14. Model FOWT pada AutoCAD	25
Gambar 15. Dimensi model struktur yang digunakan pada ANSYS AQWA	26
Gambar 16. Model FOWT pada ANSYS AQWA dalam bentuk surface body	28
Gambar 17. <i>Mesh</i> yang digunakan pada model struktur terapung	30
Gambar 18. Perbandingan model struktur terapung yang diteliti terhadap model referensi jurnal	33
Gambar 19. Perbandingan RAO MIT/NREL TLP 5MW terhadap penelitian sebelumnya	34
Gambar 20. Perbandingan RAO <i>semi-submersible</i> OC4 5MW terhadap penelitian sebelumnya	35
Gambar 21. Perbandingan RAO SPAR OC3 5MW terhadap penelitian sebelumnya	36
Gambar 22. Grafik Perbandingan Grafik Response Amplitude Operators (RAO) arah 0°	39
Gambar 23. Grafik Perbandingan Grafik Response Amplitude Operators (RAO) arah 45°	41
Gambar 24. Grafik Perbandingan Grafik Response Amplitude Operators (RAO) arah 90°	43
Gambar 25. Model tali tambat pada MIT/NREL TLP 5MW	44
Gambar 26. Model tali tambat pada <i>semi-submersible</i> OC4 5MW	46
Gambar 27. Model tali tambat pada SPAR OC3 5MW	47
Gambar 28. Perbandingan tegangan tali tambat pada Laut Banda	48
Gambar 29. Perbandingan tegangan tali tambat pada Perairan Ujung Genteng	48
Gambar 30. Perbandingan tegangan tali tambat pada Laut Arafura	49
Gambar 31. Perbandingan kekuatan <i>anchor</i> pada Laut Banda	50
Gambar 32. Perbandingan kekuatan <i>anchor</i> pada Perairan Ujung Genteng	50
Gambar 33. Perbandingan kekuatan <i>anchor</i> pada Laut Arafura	51
Gambar 34. Peta Lokasi Pengambilan Data Gelombang (Laut Banda)	52
Gambar 35. Perbandingan arah <i>surge</i> dari setiap struktur terapung	53
Gambar 36. Perbandingan arah <i>sway</i> dari setiap struktur terapung	54

Gambar 37. Perbandingan arah <i>heave</i> dari setiap struktur terapung.....	55
Gambar 38. Perbandingan arah <i>roll</i> dari setiap struktur terapung.....	55
Gambar 39. Perbandingan arah <i>pitch</i> dari setiap struktur terapung	56
Gambar 40. Perbandingan arah <i>yaw</i> dari setiap struktur terapung	57
Gambar 41. Peta Lokasi Pengambilan Data Gelombang (Perairan Ujung Genteng) ...	57
Gambar 42. Perbandingan arah <i>surge</i> dari setiap struktur terapung.....	58
Gambar 43. Perbandingan arah <i>sway</i> dari setiap struktur terapung	59
Gambar 44. Perbandingan arah <i>heave</i> dari setiap struktur terapung.....	60
Gambar 45. Perbandingan arah <i>roll</i> dari setiap struktur terapung.....	60
Gambar 46. Perbandingan arah <i>pitch</i> dari setiap struktur terapung	61
Gambar 47. Gambar. Perbandingan arah <i>yaw</i> dari setiap struktur terapung	62
Gambar 48. Peta Lokasi Pengambilan Data Gelombang (Laut Arafura).....	62
Gambar 49. Perbandingan arah <i>surge</i> dari setiap struktur terapung.....	63
Gambar 50. Perbandingan arah <i>sway</i> dari setiap struktur terapung	64
Gambar 51. Perbandingan arah <i>heave</i> dari setiap struktur terapung.....	65
Gambar 52. Perbandingan arah <i>roll</i> dari setiap struktur terapung.....	65
Gambar 53. Perbandingan arah <i>pitch</i> dari setiap struktur terapung	66
Gambar 54. Perbandingan arah <i>yaw</i> dari setiap struktur terapung	67
Gambar 55. Klasifikasi stabilitas struktur terapung.....	79

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Data Tingkat Potensi Angin di Indonesia.....	2
Tabel 2. Statistik amplitude dan tinggi gelombang pada spektrum	13
Tabel 3. Data struktur MIT/NREL TLP 5MW	20
Tabel 4. Data struktur <i>semi-submersible</i> OC4 5MW.....	21
Tabel 5. Data struktur SPAR OC3 5MW	22
Tabel 6. Validasi model struktur terapung terhadap penelitian sebelumnya	27
Tabel 7. Jari-jari girasi pada struktur terapung model MIT/NREL TLP 5MW.....	28
Tabel 8. Jari-jari girasi pada struktur terapung <i>semi-submersible</i> OC4 5MW	29
Tabel 9. Jari-jari girasi pada struktur terapung SPAR OC3 5MW.....	29
Tabel 10. Data meshing pada model MIT/NREL TLP 5MW	30
Tabel 11. Data meshing pada model <i>semi-submersible</i> OC4 5MW.....	30
Tabel 12. Data meshing pada model <i>semi-submersible</i> OC4 5MW	31
Tabel 13. Analisis hidrostatik pada model MIT/NREL TLP 5MW	31
Tabel 14. Analisis hidrostatik pada model <i>semi-submersible</i> OC4 5MW	32
Tabel 15. Analisis hidrostatik pada model SPAR OC3 5MW.....	32
Tabel 16. Koordinat <i>fairlead</i> (m) pada model MIT/NREL TLP 5MW	43
Tabel 17. Data <i>taut section</i> pada model MIT/NREL TLP 5MW	44
Tabel 18. Koordinat <i>fairlead</i> (m) pada model <i>semi-submersible</i> OC4 5MW	45
Tabel 19. Data <i>catenary section</i> pada model <i>semi-submersible</i> OC4 5MW	45
Tabel 20. Koordinat <i>fairlead</i> (m) pada model SPAR OC3 5MW.....	46
Tabel 21. Data <i>catenary section</i> pada model SPAR OC3 5MW	46
Tabel 22. Analisis tegangan tali tambat pada Laut Banda (kN)	47
Tabel 23. Analisis tegangan tali tambat pada Perairan Ujung Genteng (kN)	48
Tabel 24. Analisis tegangan tali tambat pada Laut Arafura (kN)	49
Tabel 25. Analisis kekuatan <i>anchor</i> pada Laut Banda (kN)	49
Tabel 26. Analisis kekuatan <i>anchor</i> pada Perairan Ujung Genteng (kN)	50
Tabel 27. Analisis kekuatan <i>anchor</i> pada Laut Arafura (kN)	51
Tabel 28. Spektrum Gelombang Laut Banda.....	53
Tabel 29. Hasil analisis gerak <i>surge</i> setiap struktur terapung.....	53
Tabel 30. Hasil analisis gerak <i>sway</i> setiap struktur terapung	54
Tabel 31. Hasil analisis gerak <i>heave</i> setiap struktur terapung.....	54
Tabel 32. Hasil analisis gerak <i>roll</i> setiap struktur terapung.....	55
Tabel 33. Hasil analisis gerak <i>pitch</i> setiap struktur terapung.....	56
Tabel 34. Hasil analisis gerak <i>yaw</i> setiap struktur terapung	56
Tabel 35. Spektrum Gelombang Perairan Ujung Genteng.....	58
Tabel 36. Hasil analisis gerak <i>surge</i> setiap struktur terapung.....	58
Tabel 37. Hasil analisis gerak <i>sway</i> setiap struktur terapung	59
Tabel 38. Tabel Hasil analisis gerak <i>heave</i> setiap struktur terapung	59

Tabel 39. Tabel Hasil analisis gerak <i>roll</i> setiap struktur terapung	60
Tabel 40. Hasil analisis gerak <i>pitch</i> setiap struktur terapung.....	61
Tabel 41. Hasil analisis gerak <i>yaw</i> setiap struktur terapung	61
Tabel 42. Spektrum Gelombang Laut Arafura.....	63
Tabel 43. Hasil analisis gerak <i>surge</i> setiap struktur terapung.....	63
Tabel 44. Hasil analisis gerak <i>sway</i> setiap struktur terapung	64
Tabel 45. Hasil analisis gerak <i>heave</i> setiap struktur terapung.....	64
Tabel 46. Hasil analisis gerak <i>roll</i> setiap struktur terapung.....	65
Tabel 47. Hasil analisis gerak <i>pitch</i> setiap struktur terapung.....	66
Tabel 48. Hasil analisis gerak <i>yaw</i> setiap struktur terapung	66
Tabel 49. Rekapitulasi respon gerak pada model struktur terapung.....	78
Tabel 50. Rekapitulasi tegangan tali tambat dan <i>anchor uplift</i>	78

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Tabel hasil <i>running</i> RAO surge, sway, heave, roll, pitch, dan yaw pada model MIT/NREL TLP 5MW	89
Lampiran 2. Tabel hasil <i>running</i> RAO surge, sway, heave, roll, pitch, dan yaw pada semi-submersible OC4 5MW	91
Lampiran 3. Tabel hasil <i>running</i> RAO surge, sway, heave, roll, pitch, dan yaw pada SPAR OC3 5MW	93
Lampiran 4. Tabel hasil <i>running added mass</i> surge, sway, heave, roll, pitch, dan yaw pada MIT/NREL TLP 5MW, semi-submersible OC4 5MW, dan SPAR OC3 5MW	95
Lampiran 5. Tabel hasil <i>running radiation damping</i> surge, sway, heave, roll, pitch, dan yaw pada MIT/NREL TLP 5MW, semi-submersible OC4 5MW, dan SPAR OC3 5MW	96
Lampiran 6. Grafik hasil <i>added mass</i> surge, sway, heave, roll, pitch, dan yaw pada MIT/NREL TLP 5MW, semi-submersible OC4 5MW, dan SPAR OC3 5MW	97
Lampiran 7. Grafik hasil <i>running radiation damping</i> surge, sway, heave, roll, pitch, dan yaw pada MIT/NREL TLP 5MW, semi-submersible OC4 5MW, dan SPAR OC3 5MW	98
Lampiran 8. Grafik hasil <i>running structure position</i> surge, sway, heave, roll, pitch, dan yaw pada MIT/NREL TLP 5MW pada Laut Banda	99
Lampiran 9. Grafik hasil <i>running tension mooring line</i> dan <i>anchor lift</i> surge, sway, heave, roll, pitch, dan yaw pada MIT/NREL TLP 5MW pada Laut Banda	100
Lampiran 10. Grafik hasil <i>running structure position</i> surge, sway, heave, roll, pitch, dan yaw semi-submersible OC4 5MW pada Laut Banda	100
Lampiran 11. Grafik hasil <i>running tension mooring line</i> dan <i>anchor lift</i> semi-submersible OC4 5MW pada Laut Banda	102
Lampiran 12. Grafik hasil <i>running structure position</i> surge, sway, heave, roll, pitch, dan yaw SPAR OC3 5MW pada Laut Banda	102
Lampiran 13. Grafik hasil <i>running tension mooring line</i> dan <i>anchor lift</i> SPAR OC3 5MW pada Laut Banda	103
Lampiran 14. Grafik hasil <i>running structure position</i> surge, sway, heave, roll, pitch, dan yaw MIT/NREL TLP 5MW pada Perairan Ujung Genteng	104
Lampiran 15. Grafik hasil <i>running tension mooring line</i> dan <i>anchor lift</i> MIT/NREL TLP 5MW pada Perairan Ujung Genteng	105
Lampiran 16. Grafik hasil <i>running structure position</i> surge, sway, heave, roll, pitch, dan yaw semi-submersible OC4 5MW pada Perairan Ujung Genteng	106
Lampiran 17. Grafik hasil <i>tension mooring line</i> dan <i>anchor lift</i> semi-submersible OC4 5MW pada Perairan Ujung Genteng	107
Lampiran 18. Grafik hasil <i>running structure position</i> surge, sway, heave, roll, pitch, dan yaw SPAR OC3 5MW pada Perairan Ujung Genteng	108
Lampiran 19. Grafik hasil <i>tension mooring line</i> dan <i>anchor lift</i> SPAR OC3 5MW pada Perairan Ujung Genteng	109
Lampiran 20. Grafik hasil <i>running structure position</i> surge, sway, heave, roll, pitch, dan yaw MIT/NREL TLP 5MW pada Laut Arafura	110
Lampiran 21. Grafik hasil <i>tension mooring line</i> dan <i>anchor lift</i> MIT/NREL TLP 5MW pada Laut Arafura	111

Lampiran 22. Grafik hasil running structure position surge, sway, heave, roll, pitch, dan yaw semi-submersible OC4 5MW pada Laut Arafura	112
Lampiran 23. Grafik hasil <i>running tension mooring line</i> dan <i>anchor lift semi-submersible</i> OC4 5MW pada Laut Arafura.....	113
Lampiran 24. Grafik hasil <i>running structure position surge, sway, heave, roll, pitch</i> , dan yaw SPAR OC3 5MW pada Laut Arafura	114
Lampiran 25. Grafik hasil <i>running tension mooring line</i> dan <i>anchor lift</i> SPAR OC3 5MW pada Laut Arafura	115

DAFTAR SINGKATAN ATAU ARTI SIMBOL

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan	Satuan
CL	<i>Center Line</i>	m
CM	<i>Center Metacentra</i>	m
COB	<i>Center of Buoyancy</i>	m
COG	<i>Center of Gravity</i>	m
DNV	<i>Det Norske Veritas</i>	-
DOF	<i>Degrees of Freedom</i>	-
FOWT	<i>Floating Offshore Wind Turbine</i>	-
GW	<i>Giga Watt</i>	-
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>	-
MW	<i>Mega Watt</i>	-
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>	-
PLTB	Pembangkit Listrik Tenaga Bayu	-
RAO	<i>Response Amplitude Operator</i>	-
SWL	<i>Sea Water Level</i>	m
TSR	<i>Tip Speed Ratio</i>	-
TLP	<i>Tension Leg Platform</i>	-
F_{xW}	gaya angin longitudinal	kN
F_{yW}	gaya angin lateral	kN
C_{xW}	koefisien gaya angin longitudinal non dimensional	-
C_{yW}	koefisien gaya angin transversal non dimensional	-
ρ_w	<i>density</i> udara	kg/m ³
V_w	kecepatan angin pada ketinggian 10m	knot
A_T	luas penampang transversal diatas air	m ²
A_L	luas penampang longitudinal diatas air	m ²
ω_p	frekuensi puncak spectra	Hz
Y	parameter puncak	-
A_Y	$1 - 0.287 \ln(\gamma)$	-
σ	parameter bentuk	-
T_p	periode puncak spectra	s
H_S	tinggi gelombang signifikan	m
M_{jk}	matriks massa dan momen inersia massa bangunan laut	-
A_{jk}	matriks koefisien-koefisien massa tambah hidrodinamik	-
B_{jk}	matriks koefisien-koefisien redaman hidrodinamik	-
K_{jk}	matriks koefisien-koefisien kekakuan atau gaya dan momen hidrostatik	-

F_j	matriks gaya eksitasi (F_1, F_2, F_3) dan momen eksitasi (M_4, M_5, M_6) dalam fungsi kompleks (dinyatakan oleh $e^{i\omega t}$)	-
F_1	gaya eksitasi yang menyebabkan gerakan surge	N
F_2	gaya eksitasi yang menyebabkan gerakan sway	N
F_3	gaya eksitasi yang menyebabkan gerakan heave	N
M_4	gaya eksitasi yang menyebabkan gerakan roll	N
M_5	gaya eksitasi yang menyebabkan gerakan pitch	N
M_6	gaya eksitasi yang menyebabkan gerakan yaw	N
ζ_k	elevasi gerakan pada mode ke k	m
$\dot{\zeta}_k$	elevasi kecepatan gerak pada moda ke k	m
$\ddot{\zeta}_k$	elevasi petcepatan gerak pada moda ke k	m
ζ_{k0}	amplitude struktur	m
ζ_0	amplitude gelombang	m

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Angin merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang sangat berkembang pesat. Indonesia memiliki potensi besar sebagai penghasil energi angin, terutama pada daerah lepas perairan karena kecepatan angin yang lebih besar dan jumlah penghalang seperti bukit, gedung, hutan, dan lain sebagainya lebih sedikit dibandingkan dengan yang ada pada daratan. Selain itu, dengan pengoperasian turbin angin yang semakin jauh ke tengah laut, potensi energi angin semakin besar (Assidiq F.M., 2018). Oleh karena itu, teknologi energi terbarukan diharapkan bisa berkontribusi banyak pada bauran energi Indonesia pada tahun 2050. Diharapkan pada tahun 2025 kontribusi energi baru terbarukan terhadap produksi energi nasional sebesar 23% dan pada tahun 2050 sebesar 31% (Dewan Energi Nasional, 2014). Teknologi yang sedang dikembangkan didunia saat ini yaitu bagaimana pemanfaatan energi angin sebagai energi berkelanjutan dan bisa diaplikasikan di Indonesia dalam waktu dekat ini.

Indonesia merupakan negara yang terletak tepat di garis khatulistiwa dan umumnya memiliki kecepatan angin yang rendah. Namun beberapa lokasi di Indonesia mempunyai potensi angin yang cukup besar. Perpaduan garis Pantai Indonesia yang sangat panjang dan luas laut Indonesia yang sangat luas membuat pemanfaatan energi angin lepas Pantai di Indonesia sangat mungkin dilakukan. Aliran angin yang berhembus di atas permukaan laut lebih stabil dan lebih besar bila dibandingkan hembusan angin di darat. Sudah seharusnya pembangkit listrik tenaga angin di tempatkan di laut (Almutahir, 2016).

Salah satu aspek yang sangat penting dalam pengembangan energi angin adalah tentang pengukurannya. Untuk memastikan validitas data energi angin, terutama kecepatan angin, diperlukan pelaksanaan metode pengukuran yang akurat. Pemilihan teknologi yang akan digunakan dalam produksi energi listrik ini memiliki peran yang sangat besar. muha (Faizur et al, 2021).

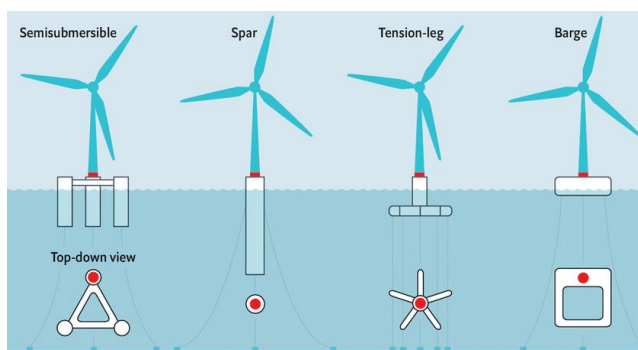
Dengan banyaknya penggunaan energi angin di laut, sumber daya angin laut dalam akan menjadi energi alternatif terbarukan yang memiliki potensi besar di masa depan karena kepadatan energinya yang tinggi dan fluktuasi yang rendah. Teknologi terapung sangat ideal untuk pengembangan energi angin di wilayah laut dalam. Oleh karena itu, *Floating Offshore Wind Turbine* (FOWT) menjadi pusat penelitian dalam beberapa tahun terakhir. Data pengukuran angin dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Data Tingkat Potensi Angin di Indonesia

Tingkat Potensi	Kecepatan Angin ada Ketinggian 50 m (m/detik)	WPD (W/m ²)	Jumlah Lokasi	Provinsi
Rendah	3,0 – 4,0	< 75	84	Maluku, Papua, Sumba, Mentawai, Bengkulu, Jambi, NTT, NTB, Sulawesi Selatan, Sulawesi Utara, Sumatera Barat, Jawa Tengah, Maluku, DIY, Lampung, Kalimantan Jawa Tengah, Jawa Barat, DIY, Bali, Bengkulu, NTT, NTB, Sulawesi Selatan, Sulawesi Utara
Sedang	4,0 – 5,0	75 - 150	34	Banten, DKI Jakarta, Jawa Tengah, Jawa Barat, DIY, NTT, NTB, Sulawesi Selatan, Sulawesi Utara, Maluku
Tinggi	> 5,0	> 150	35	Banten, DKI Jakarta, Jawa Tengah, Jawa Barat, DIY, NTT, NTB, Sulawesi Selatan, Sulawesi Utara, Maluku

Sumber: Lapan Wind Data

Floating Offshore Wind Turbine (FOWT) dibagi menjadi empat kategori dalam hal bagaimana mereka mencapai stabilitas hidrostatik. Salah satunya adalah tipe SPAR, Gaya apung yang dihasilkan oleh SPAR untuk menopang turbin angin lepas pantai dan tegangan tali tambat dalam mempertahankan posisi turbin angin mempunyai sifat unik, yakni lokasi stabilitas struktur terapung SPAR yang berada diantara C.O.G. dan C.O.B. Secara relatif, struktur terapung tipe SPAR cenderung lebih murah. Hal ini disebabkan karena volume struktur terapung SPAR yang terendam sangat kecil dan gaya gelombang yang ada dapat terabaikan (Assidiq et al, 2023). Kategori kedua, jenis *barge*, distabilkan oleh daya apung yang diciptakan oleh permukaan air yang besar. Kategori ketiga, *Tension Leg Platform* (TLP) yang distabilkan oleh tali tambatan yang kencang. Kategori lainnya adalah *semi-submersible* OC4 5MW, yang sebagian besar distabilkan oleh daya apung. Karena tipe *semi-submersible* OC4 5MW dapat diterapkan pada berbagai kedalaman air dan memiliki kinerja hidrodinamik yang baik, maka ini merupakan teknologi yang sangat menjanjikan untuk pemanfaatan *Floating Wind* (Xuan Mei dan Min Xiong, 2021). Berikut pada Gambar 1. Tipe-tipe desain *Floater Offshore Wind Turbine* (FOWT).



Gambar 1. Tipe-tipe desain Floater Offshore Wind Turbine (FOWT) (Xuan Mei dan Min Xiong, 2021)

Perairan di Indonesia merupakan daerah yang mempunyai potensi angin yang sangat besar. Berdasarkan Buku Statistik EBTKE (2016). Dengan potensi angin yang besar, tidak menutup kemungkinan di masa yang akan datang perairan di Indonesia dapat dibangun Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB).

1.2 Turbin Angin Lepas Perairan

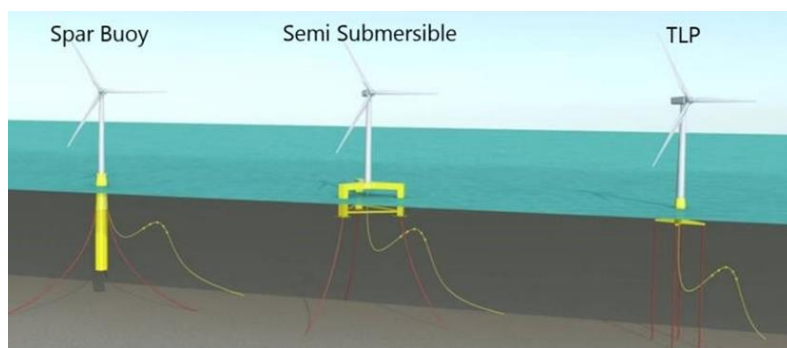
Kekhawatiran terhadap polusi lingkungan dan peningkatan kebutuhan energi yang signifikan telah mendorong dorongan untuk mengeksplorasi energi terbarukan. Energi angin, di antara alternatif bahan bakar fosil, merupakan sumber energi yang tumbuh paling pesat dan salah satu pasokan energi terbarukan yang paling matang. Industri tenaga angin telah dikembangkan secara signifikan untuk memanfaatkan tenaga angin terutama melalui lokasi di Perairan (Aubault dan Roddier, 2013). Seperti dilansir *World Energy Council* (2016), kapasitas energi angin dunia meningkat dua kali lipat setiap tiga setengah tahun sejak tahun 1990. Minat untuk memperluas produksi energi angin dan terbatasnya lahan di darat untuk ladang angin telah mendorong berkembangnya industri turbin angin lepas pantai. Di Inggris, misalnya, produksi energi angin lepas pantai telah melampaui produksi energi angin darat pada kuartal kedua tahun 2019, (Waters dan Spry, 2019).

Total kapasitas terpasang lepas pantai global pada tahun 2018 adalah 18,8 GW, yang dilaporkan oleh *Global Wind Energy Council* (2018). Pada tahun 2017, pembangkit listrik tenaga angin terapung pertama diresmikan di Skotlandia, Inggris, pada kedalaman air 96–110m. Menurut *Global Wind Energy Dewan ene* (2018) di antara negara-negara Eropa, Inggris adalah produsen angin lepas pantai terkemuka yang memiliki 36% pangsa kapasitas terpasang lepas pantai di dunia. Salah satu pengembangan pertama pembangkit listrik tenaga angin lepas pantai adalah proyek Vindeby pada awal tahun 1990an di Denmark (Aubault dan Roddier, 2013). Turbin angin dipasang di dekat pantai di perairan dangkal dan dipasang di dasar laut. Turbin angin seperti itu, yang dipasang di dekat pantai, dibatasi pada kedalaman air yang biasanya kurang dari 50 m dengan menggunakan pondasi tetap (Goupee et al, 2014). Lebih jauh dari pantai, angin lebih konsisten dan kecepatan rata-ratanya lebih tinggi dibandingkan lokasi di darat dan dekat pantai. Selain itu, di banyak tempat,

kedalaman air berubah dengan cepat, menyisakan zona terbatas bagi sumber daya angin lepas pantai di perairan dangkal. Oleh karena itu, industri sedang menjajaki konsep *Floating Offshore Wind Turbine* (FOWT).

1.3 Penelitian Mengenai Sub-Struktur Turbin Angin Lepas Pantai

Banyak konsep turbin angin terapung lepas pantai telah dibuat dan diuji. Desain sub-struktur yang paling dominan yakni SPAR OC3 5MW, *Semi-submersible* OC4 5MW, dan *Tension Leg Platform* (TLP). Berikut tipe-tipe sub-struktur pada Gambar 2. yang dominan digunakan pada turbin angin lepas pantai.



Gambar 2. Tipe-tipe FOWT yang dominan digunakan (Ramboll, 2021)

Pertama, sub-struktur bertipe SPAR OC3 5MW merupakan konsep silinder vertikal dengan sarat yang dalam guna mengakomodir daya apung. Gerakan *roll* ataupun *pitch* diminimalisir dengan pengaturan pusat gravitasi mesti di bawah pusat daya apung. Sub-struktur ini merupakan konsep yang paling terbukti secara teknis diantara sub-struktur lainnya seperti proyek IEA Wind Task OC3, Hywind, dan SWAY (Shin, 2011; Jonkman dan Musial, 2010; Roddier et al, 2009; Hansen, 2006). Kedua, sub-struktur bertipe *semi-submersible* OC4 5MW ini dapat dipasang pada perairan yang tidak jauh dari pantai. Inilah keunggulan utama konsep *semi-submersible* OC4 5MW (Karimirad, 2014). Konsep *semi-submersible* OC4 5MW ini memanfaatkan permukaan air untuk mencapai stabilitas. Terdiri dari 3-4 kolom silinder yang dihubungkan dengan ponton dan memiliki beberapa kolom. Konsep ini stabil terhadap pergerakan laut karena hukum Archimedes. Berat total struktur diseimbangkan dengan daya apung. Di sisi lain, gerakan *pitch* and *roll* diimbangi oleh gaya balik yang bekerja pada struktur (Vernanda, 2018). Ketiga, sub-struktur bertipe *Tension Leg Platform* (TLP) merupakan solusi yang mungkin untuk kedalaman air menengah, karena sistem tendon mungkin lebih cocok untuk perairan dangkal daripada sistem tambatan *catenary*. (Withee, 2004) mengembangkan sub-struktur TLP pertama pada tahun 2004. Pada penelitian yang dilakukan oleh (Robertson dan Jonkman, 2011) mengusulkan konsep TLP baru dengan menggabungkan TLP tradisional dan struktur SPAR OC3 5MW; konsep ini disebut MIT-TLP (*Massachusetts Institute of Technology Tension Leg Platform*) model. Keuntungan

dari model ini adalah, tanpa tambatan, desain ini stabil di kondisi laut tenang ketika turbin tidak beroperasi.

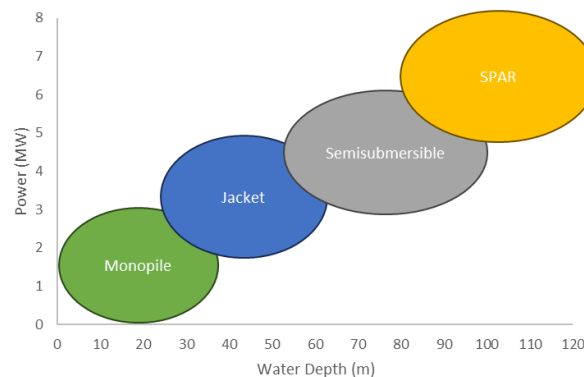
1.4 Dasar Teori

1.4.1 Turbin Angin

Turbin angin menggunakan energi kinetic angin yang mengenai bilahnya untuk menghasilkan listrik. Prinsip pengoperasian utama turbin angin sama dengan prinsip pengoperasian kipas angin, namun berkebalikan. Hembusan angin memutar baling-baling yang dihubungkan dengan penggerak generator, yang mengubah menjadi energi listrik (Karimirad, 2014).

1.4.2 Floating Offshore Wind Turbine (FOWT)

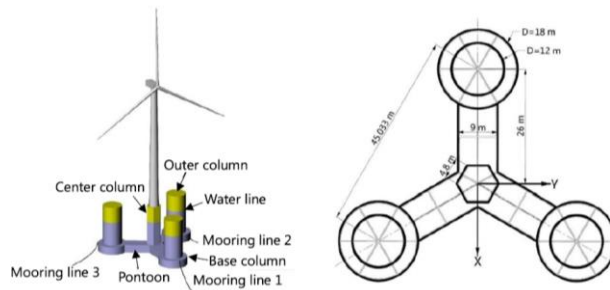
Penggunaan struktur pancang sangat tidak efisien, apalagi jika kedalaman perairan melebihi 100 m. Maka digunakan struktur terapung dalam memfasilitasi penggunaan energi angin lepas pantai yang kedalamannya melebihi 100 m. Berikut Gambar 3. yang menunjukkan penggunaan struktur terapung pada masing-masing tipe struktur pada kedalaman air dan jumlah energi yang dihasilkan oleh tiap struktur terapung



Gambar 3. Perbandingan daya dan kedalaman dari tiap tipe FOWT (Karimirad, 2014)

1.4.2.1 Semi-submersible OC4 5MW Offshore Turbine

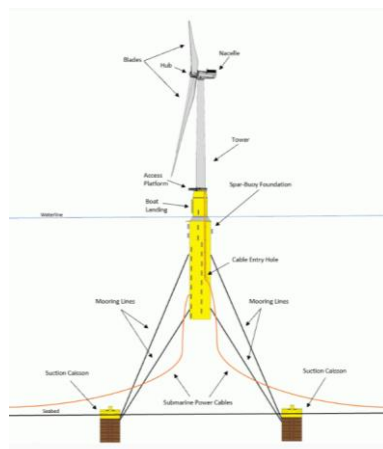
Penggunaan tipe struktur *semi-submersible* OC4 5MW ini berkisar pada kedalaman 50-100 m dan perairan yang tidak terlalu jauh dari garis pantai. Struktur terapung tipe *semi-submersible* OC4 5MW terdiri dari 3-4 kolom yang berbentuk silinder dengan pontoon dan memiliki beberapa *braces* sehingga struktur ini memanfaatkan penyebaran *water surface area* untuk mendapatkan stabilitas. Struktur terapung *semi-submersible* OC4 5MW ini stabil terhadap gerakan *heave* pada hukum Archimedes. Berat total pada struktur ini diseimbangkan dengan gaya apung. Sedangkan pada gerakan *pitch* dan *roll* diseimbangkan dengan gaya pengembali yang bekerja pada struktur ini. Berikut Gambar 4. merupakan model desain *Semi-submersible* OC4 5MW.



Gambar 4. Model tipe struktur terapung *semi-submersible* OC4 5MW (Chao Li et al, 2021)

1.4.2.2 SPAR OC3 5MW Offshore Wind Turbine

Tipe struktur SPAR OC3 5MW merupakan tipe struktur terapung yang berbentuk silinder yang menggunakan air/baja/beton sebagai *ballast* pada bagian bawah struktur bawah. *Center of Gravity* (CoG) yang rendah dan jaraknya yang jauh antara *Center of Gravity* (CoG) dan *Center of Buoyancy* (CoB) membuat tipe struktur ini sangat stabil, karena tinggi *metacenter* yang semakin besar. *Restoring moment* pada gerakan *pitch* dan *roll* secara langsung berhubungan dengan *metacenter* (Vernanda Z., 2018). Pada gerakan *heave* dipengaruhi oleh *surface area*. Sementara pada gerakan *surge*, *sway* dan *yaw* membutuhkan redaman dari tali tambat. Pada struktur terapung tipe SPAR OC3 5MW. Gaya angin akan menyebabkan gerakan *yaw* harus bisa ditahan oleh tambat. Struktur ini sangat cocok pada perairan dengan kedalaman 100-150 m. Berikut Gambar 5. merupakan model desain struktur terapung tipe SPAR OC3 5MW.

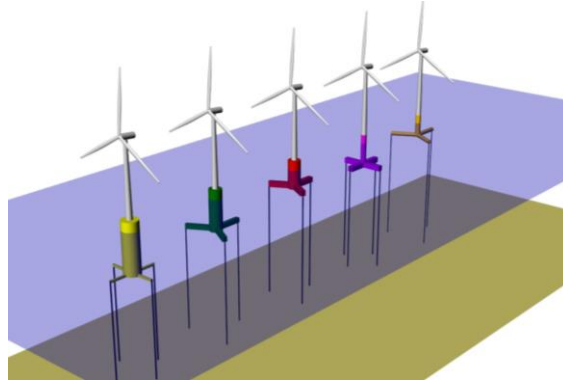


Gambar 5. Model tipe struktur terapung SPAR OC3 5MW (Jochem Tacx, 2019)

1.4.2.3 TLP Offshore Wind Turbine

Tipe struktur *Tension Leg Platform* (TLP) distabilkan oleh gaya tarik tendon. Rasio ketegangan total kaki dengan berat total harus sekitar 25%. Ketinggian *metacenter*

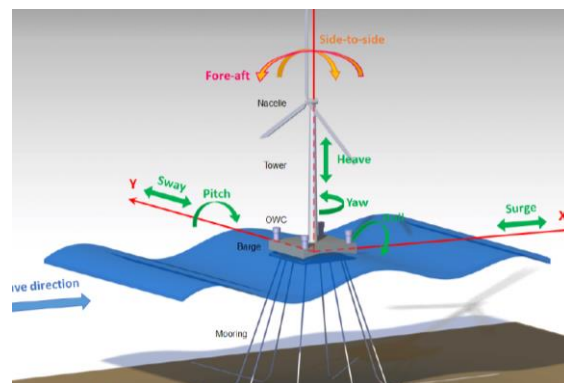
sistem adalah negatif. Artinya TLP tidak stabil jika tidak ada string. TLP memiliki pergerakan yang relatif sedikit dibandingkan dengan konstruksi padat. Pergerakan kecil ini menghasilkan produksi energi yang lebih besar. Meskipun desainnya juga mencakup beban hidro-servo-aero-elastis yang lebih besar (Vernanda Z., 2018). Berikut Gambar 6. merupakan model desain struktur terapung tipe TLP.



Gambar 6. Model tipe struktur terapung MIT/NREL TLP 5MW (Bachynski E., 2014)

1.4.2.4 Barge Offshore Wind Turbine

Respons dinamis FOWT tipe *barge* telah diteliti secara luas baik secara numerik dan secara eksperimental. Sistem tambatan *catenary* konvensional telah digunakan biasanya dipertimbangkan untuk konsep FOWT tipe *barge* yang dikembangkan. *National Renewable Energy Laboratory* dan *Massachusetts Institute of Technology* mengusulkan FOWT tipe *barge* konsep turbin angin, dengan fokus pada desain, fabrikasi, dan pemasangannya (Jonkman J., 2007). Model dinamis berpasangan untuk sistem turbin angin terapung dalam domain frekuensi (Wayman et al, 2006).



Gambar 7. Model tipe struktur terapung barge (Aboutalebi P. et al, 2021)

1.4.3 Sistem Tali Tambat

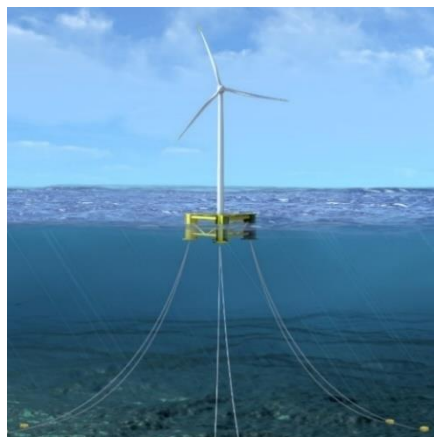
Sistem tambatan merupakan suatu teknologi yang bertujuan untuk mengurangi pergerakan struktur terapung yang ditambatkan, karena dapat bergerak bebas walaupun bergerak searah dengan beban lingkungan, namun tetap melekat pada tali

tambatan untuk memudahkan proses penyesuaian cuaca yang menguntungkan sehingga aktivitas dapat berjalan lancar. dapat berjalan dengan lancar. keamanan. Dalam kebanyakan kasus, sistem tali tambat terdiri dari beberapa jalur yang terbuat dari *chain*, *wire*, atau *synthetic rope*. Bagian atas tali tambat ini dipasang pada struktur dermaga. titik-titiknya berbeda, tetapi di bawah *mooring line* yang ditambatkan ke dasar laut. Kabel tambatan terbuat dari rantai baja (*steel chain*), atau terkadang kombinasi kedua jenis rantai tersebut. Ketegangan yang ada pada kabel bergantung pada panjangnya serta elastisitas bahan dan sistemnya. Sistem tambat pada struktur bangunan apung lepas pantai mempunyai beberapa tipe, antara lain:

- *Catenary Line Mooring*

Berdasarkan buku *Fleet Moorings Basic Criteria Planning Guidelines* (1985) Sistem tambat *catenary* adalah sistem tambat yang paling umum di perairan dangkal. Melalui gaya gravitasi antara *floating* unit dan dasar laut, akan menunjukkan bentuk khas dari garis gantung bebas. *Catenary* menggantung secara *horizontal* di dasar laut. Akibatnya panjang *catenary* harus lebih besar dari kedalaman air dan titik jangkar dalam sistem tambat *catenary* dikenakan gaya *horizontal*.

Merujuk regulasi yang ditulis dalam *Clasification of Mooring System for Permanent and Mobile Offshore Units* (2015) oleh Bureau Veritas, Sistem tambat *catenary* terdiri dari satu atau beberapa jalur individual yang terhubung ke struktur terapung di *fairlead* dan dasar laut di jangkar. Bagian yang tersuspensi dari setiap garis akan membentuk *catenary*, di mana bentuknya tergantung pada berat garis di samping *horizontal* dan jarak *vertikal* antara *fairlead* dan jangkar, sehingga hanya jangkar saja dikenakan kekuatan *horizontal*. Berikut pada Gambar 8. contoh tali tambat tipe *catenary*.



Gambar 8. Tali tambat tipe *catenary* (www.asmosley.com) diakses pada tanggal 5 Maret 2024

- *Taut Line Mooring*

Taut Mooring terdiri dari *polyester*, rantai, dan jangkar yang panjangnya antara 1000 dan 3000 meter. Mekanisme kerjanya adalah kabel tambatan bawah air menjaga integritas *platform*, dan mekanisme kegagalan kabel menyediakan sarana untuk mengumpulkan energi. Tegang akan memberikan gaya pemulih yang besar dan mengurangi perpindahan *Platform*; di kedalaman yang sama, kabel pendek terbaik dan dapat menghemat biaya dan menghindari banyak rantai baja pada waktu yang sama. Hal ini dapat meningkatkan varian *platform* dan mengurangi varian; radius tambatan lebih jelas, sehingga mengurangi resiko yang terkait dengan fasilitas dekat pantai di dekatnya (Aldi M.A., 2018). Berikut pada Gambar 9. contoh tali tambat tipe *taut*.



Gambar 9. Tali tambat tipe *taut* (www.empireengineering.co.uk) diakses pada tanggal 5 Maret 2024

1.4.4 Kondisi Desain dan Pembebanan Turbin Angin Lepas Pantai

Dikutip dalam regulasi DNV -OS-J103 yang berjudul “*Design of Floating Wind Turbine Structures*” (2013) menjelaskan bahwa ada beberapa *load category* untuk struktur terapung lepas pantai. Diantaranya sebagai berikut:

1. *Permanent Load*, yaitu beban yang tidak bervariasi besar dan arahnya selama waktu beroperasinya sebuah model struktur terapung. Beban ini termasuk jenis beban berat struktur, *ballast* permanen, tekanan hidrostatik dan reaksi struktur terhadap beban-beban tersebut.
2. *Variable Functional Load*, yaitu beban yang dapat bervariasi besar dan arahnya selama model struktur terapung beroperasi. Beban ini termasuk jenis beban *actuation loads*, beban *service maintenance*, beban sandaran kapal, beban *ballast* non-permanen, beban operasi *crane*.

3. *Environmental Loads*, yaitu beban yang disebabkan oleh lingkungan sekitar, beban ini termasuk jenis beban yang meliputi beban gelombang, beban angin, beban arus, gempa bumi, *marine growth* dan beban es.
4. *Accidental Loads*, yaitu kejadian yang terjadi diluar desain ULS. Beban ini termasuk jenis beban yang berasal dari tubrukan kapal, kegagalan sistem *ballast*, putusnya tali tambat, peralatan/objek yang jatuh, ledakan dan kebakaran.

1.4.5 Dasar Analisis Dinamis

Berdasarkan regulasi DNV-GL OS-E301 yang berjudul "*Position Mooring System*" (2004), metode analisis simulasi domain pada bangunan lepas pantai dibagi menjadi dua, yaitu:

1. *Frequency Domain Analysis* (Analisis Dinamis Berbasis Ramah Frekuensi)
Frequency Domain Analysis yaitu simulasi pengoperasian pada saat tertentu dengan frekuensi yang sudah ditentukan sebelumnya. Metode ini biasa digunakan untuk memperkirakan respon pada gelombang acak, contohnya yaitu seperti gerakan dan percepatan *platform*. Gaya tendon dan sudut. - *frequency domain analysis* dilakukan untuk menentukan respon struktur bangunan lepas pantai pada gelombang regular yang dibuat dalam bentuk *Response Amplitude Operator* (RAO). Keuntungan metode ini ialah tidak membutuhkan banyak waktu dan perhitungan, *input* dan *output* juga lebih sering dipakai oleh perancang. Kekurangannya yaitu untuk setiap persamaan *non-linear* harus diubah menjadi *linear*.
2. *Time Domain Analysis* (Analisis Dinamis Berbasis Ranah Waktu)
 Jika sistem berbentuk linier dan pembebanan gelombang operasinya sebesar orde pertama saja, maka beban yang diterima dan respon yang dihasilkan juga berbentuk linier dan dapat diselesaikan dengan menggunakan analisis dinamik berdasarkan analisis domain frekuensi. Namun, perhitungan Analisis Domain Frekuensi menjadi kurang penting ketika elemen nonlinier seperti beban gelombang sekunder, redaman viskos nonlinier, serta gaya dan momen akibat angin dan aliran terlibat. Oleh karena itu, untuk memperhitungkan faktor-faktor nonlinier ini, persamaan gerak hukum kedua Newton diselesaikan sebagai fungsi waktu. Hal ini umumnya dikenal sebagai analisis dinamis berbasis domain waktu (analisis domain waktu).
 Pendekatan yang dilakukan pada metode ini menggunakan prosedur integrasi waktu untuk menghasilkan respon riwayat waktu berdasarkan fungsi waktu $x(t)$. Metode analisis domain waktu yang umum seperti program komputer dapat digunakan untuk menganalisis semua situasi tambatan di bawah pengaruh dinamika frekuensi gelombang. Periode awal harus dimaksimalkan menjadi untuk meminimalkan efek sementara. Namun cara ini memerlukan proses yang lebih kompleks dan memakan waktu. Ini

memerlukan simulasi kursus waktu. Riwayat waktu memberikan hasil tegangan maksimum, beban jangkar, dll.

Keuntungan *time domain analysis* dibanding *frequency domain analysis* adalah semua tipe *non-linear* dapat dimodelkan dengan lebih tepat. Sedangkan kekurangannya yaitu membutuhkan waktu perhitungan yang lebih. Menurut regulasi DNV-GL OS-E301 yang berjudul "*Position Mooring System*" (2010), minimal waktu yang digunakan dalam *time domain analysis* yaitu selama 3 jam.

1.4.6 Beban Aerodinamis dan Hidrodinamika

Floating Offshore Wind Turbine (FOWT) dirancang untuk menghadapi kondisi lingkungan pada perairan terbuka. Gaya dominan yang akan selalu mengenai struktur tersebut yaitu gaya aerodinamis dan hidrodinamika yang disebabkan oleh angin, gelombang dan arus. Mode *pitching* merupakan salah satu gerakan yang paling penting dalam hal ketidakstabilan aerodinamis. Selain itu, dampak aerodinamis dari turbin angin lepas pantai lebih besar dibandingkan dengan turbin angin darat, dengan mempertimbangkan turbulensi dinamis dan kurangnya keselarasan. Kemajuan platform terapung secara signifikan meningkatkan efisiensi sistem turbin yang berlebihan, Interaksi antara *blade* dan struktur sangat rumit, yang dapat menyebabkan terjadinya eksitasi pada basis regular, *Tip Speed Ratio* (TSR), perbedaan fase antara gerakan yang digabungkan (*surge* dan *pitch*), dan gelombang yang terjadi sangat dipengaruhi oleh gerakan *pitch*. Ditemukan bahwa TSR rendah menurun seiring dengan meningkatnya frekuensi yang dikurangi (Assidiq et al, 2023). Meskipun pada beberapa kasus dan konsep desain tertentu gaya hidrodinamika lebih mendominasi daripada gaya aerodinamis (Karimirad, 2014).

1.4.6.1 Gaya Gelombang

Gaya gelombang dapat dibedakan menjadi gaya gelombang orde satu dan gaya gelombang orde dua.

- **Gaya gelombang orde pertama**

Gaya frekuensi gelombang mewakili gaya gelombang orde 1 yang dilinearisasi dan proporsional dengan amplitudo gelombang. Gaya gelombang orde pertama dapat dibagi menjadi gaya eksitasi beban dan beban radiasi, dan diperoleh melalui teori potensial (Lied, 2019).

- **Gaya gelombang orde kedua**

Gaya gelombang *non-linier* berasal dari beban gelombang orde 2, proporsional dengan kuadrat amplitudo gelombang. Untuk *semi-submersible* OC4 5MW yang ditambatkan, yang kedua.

Urutan gaya gelombang yang diminati adalah gaya hanyut gelombang rata-rata dan frekuensi rendah banyak. Rumus untuk beban hanyut gelombang rata-rata dapat, menurut (Faltinsen, 1990) dinyatakan sebagai:

$$\overline{F}_i^s = 2 \int_0^\infty S(\omega) \left(\frac{\overline{F}_i(\omega; \beta)}{\zeta_a^2} \right) d\omega \quad i = 1, \dots, 6 \quad (1)$$

Namun, beban frekuensi rendah mungkin memiliki besaran yang lebih rendah daripada gaya penyimpangan gelombang rata-rata pengaruh gaya frekuensi rendah penting karena frekuensi beban mendekati frekuensi alami sistem (Larsen, 2014). Rumus umum untuk rendah frekuensi beban disajikan pada Persamaan (2.2). T_{jk}^{ic} adalah kuadrat orde kedua fungsi transfer untuk gaya yang bervariasi secara perlahan. Kuadrat orde kedua fungsi transfer bersifat independent keadaan laut, tetapi merupakan fungsi dari dua frekuensi ω_k dan ω_j (Faltinsen, 1990). Kuadrat orde kedua fungsi transfer didasarkan pada analisis lintas-bi-spektral dan tidak akan dibahas lebih lanjut dalam tesis ini. Baik rumus umum nilai rata-rata beban frekuensi rendah maupun rumus umum (2) dengan penerapan pendekatan Newman, dapat ditemukan di Beban laut pada kapal dan struktur lepas pantai (Faltinsen, 1990).

$$F_i^{SV} = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N A_j A_k [T_{jk}^{ic} \cos\{(\omega_k - \omega_j)t + (\epsilon_k - \epsilon_j)\}] + T_{jk}^{ic} \sin\{(\omega_k - \omega_j)t + (\epsilon_k - \epsilon_j)\} \quad (2)$$

Selain itu, beban frekuensi tinggi (HF) juga berkontribusi, namun hal ini dapat diabaikan struktur tertambat dengan volume besar seperti *semi-submersible* OC4 5MW. Frekuensi alami untuk *semi-submersible* OC4 5MW secara signifikan lebih rendah dibandingkan beban frekuensi tinggi yang mengarah ke sistem yang didominasi inersia dengan dampak kecil dari gaya frekuensi tinggi.

1.4.6.2 Gaya Angin

Meskipun beban angin merupakan beban dinamis, beberapa struktur meresponsnya dengan model statis berikut. Saat merancang struktur lepas pantai, perhitungan beban angin biasanya didasarkan pada besarnya kecepatan ekstrim selama periode ulang 50 atau 100 tahun. Semakin lama periode pengembalian, semakin tinggi risiko kegagalan.

Berdasarkan buku OCIMF “*Mooring Equipment Guidelines*” (2018), perhitungan beban angin didefinisikan sebagai:

- *Longitudinal Wind Force*

$$F_{xW} = C_{xW} \left(\frac{\rho_w}{7600} \right) V_W^2 A_T \quad (3)$$

- *Lateral Wind Force*

$$F_{yW} = C_{yW} \left(\frac{\rho_w}{7600} \right) V_W^2 A_T \quad (4)$$

dengan:

F_{xW} = gaya angin longitudinal (kN)

F_{yW} = gaya angin lateral (kN)

C_{xW} = koefisien gaya angin longitudinal non dimensional

C_{yW}	= koefisien gaya angin transfersal non dimensional
ρ_w	= <i>density</i> udara (1.223 Kg/m ³ pada 20°C)
V_w	= kecepatan angin pada ketinggian 10m (knot)
A_T	= luas penampang transfersal diatas air (m ²)
A_L	= luas penampang longitudinal diatas air (m ²)

1.4.7 Spektrum Energi Gelombang

Perancangan bangunan laut mengacu kepada spectra gelombang yang didapat dari data lingkungan perairan setempat. Apabila data tidak tersedia, dipilih formulasi spectra gelombang yang sesuai (perairan terbuka/tetutup, angin, geografis, kedalaman perairan, Panjang, *fetch* dll). Dari spektrum gelombang dapat diketahui parameter gelombang (Vernanda, 2018). Berikut pada tabel 2.

Tabel 2. Statistik amplitude dan tinggi gelombang pada spektrum

Parameter	Amplitudo	Tinggi
Gelombang rata-rata	$1.25 \sqrt{m_0}$	$2.50 \sqrt{m_0}$
Gelombang signifikan	$2.00 \sqrt{m_0}$	$4.00 \sqrt{m_0}$
Rata-rata 1/10 gelombang tertinggi	$2.55 \sqrt{m_0}$	$5.00 \sqrt{m_0}$
Rata-rata 1/100 gelombang tertinggi	$3.44 \sqrt{m_0}$	$6.67 \sqrt{m_0}$

Formulasi spektrum gelombang yang digunakan ialah *Joint North Sea Wave Project* (JONSWAP). Spektrum ini sesuai untuk perairan tertutup yakni perairan kepulauan dan merupakan modifikasi dari Spektrum Pierson Moskowitz.

$$S_j(\omega) = A_Y S_{PM}(\omega) Y^{-0.5 \left(\frac{\omega - \omega_p}{\sigma \omega_p} \right)^2} \quad (5)$$

$$S_{PM}(\omega) = \frac{5}{16} x H_5^2 x \omega_p^4 x \omega^{-5} \exp \left(\frac{5}{4} \left(\frac{\omega}{\omega_p} \right)^{-4} \right) \quad (6)$$

dengan:

ω_p	= frekuensi puncak spectra	(<i>spectral peak frequency</i>)
Y	= parameter puncak	(<i>peak parameter</i>)
A_Y	= $1 - 0.287 \ln(\gamma)$	(<i>normalizing factor</i>)
σ	= parameter bentuk	(<i>shape parameter</i>)

untuk $\omega \leq \omega_p = 0.07$ dan $\omega \geq \omega_p = 0.09$

kemudian nilai dari parameter puncak (γ) bisa dicari menggunakan rumus berikut:

$$\gamma = EXP \left[3.4843 \left(1 - 0.1975 \left(0.036 - 0.0056 \frac{T_P}{\sqrt{H_e}} \right) \frac{T_P^4}{H_S^2} \right) \right] \quad (7)$$

dengan:

T_p = periode puncak spectra
 H_s = tinggi gelombang signifikan

1.4.8 Persamaan Gerakan Bangunan Apung

Gerakan yang ada pada *Six Degrees of Freedom* atau 6 derajat kebebasan dinyatakan dalam bentuk persamaan diferensial. Gerakan dalam *Six Degrees of Freedom* dapat dituliskan sebagai berikut (Djarmiko, 2012).

$$\sum_{n=1}^6 [(M_{jk} + A_{jk})\ddot{\zeta}_k + B_{jk}\dot{\zeta}_k + K_{jk}\zeta_k] = F_j e^{i\omega t}; j, k = 1 \dots 6 \quad (8)$$

dengan :

M_{jk} = matriks massa dan momen inersia massa bangunan laut
 A_{jk} = matriks koefisien-koefisien massa tambah hidrodinamik
 B_{jk} = matriks koefisien-koefisien redaman hidrodinamik
 K_{jk} = matriks koefisien-koefisien kekakuan atau gaya dan momen hidrostatik
 F_j = matriks gaya eksitasi (F_1, F_2, F_3) dan momen eksitasi (M_4, M_5, M_6) dalam fungsi kompleks (dinyatakan oleh $e^{i\omega t}$)
 F_1 = gaya eksitasi yang menyebabkan gerakan surge
 F_2 = gaya eksitasi yang menyebabkan gerakan sway
 F_3 = gaya eksitasi yang menyebabkan gerakan heave
 M_4 = gaya eksitasi yang menyebabkan gerakan roll
 M_5 = gaya eksitasi yang menyebabkan gerakan pitch
 M_6 = gaya eksitasi yang menyebabkan gerakan yaw
 ζ_k = elevasi gerakan pada mode ke k
 $\dot{\zeta}_k$ = elevasi kecepatan gerak pada moda ke k
 $\ddot{\zeta}_k$ = elevasi petcepatan gerak pada moda ke k

Prediksi gerakan yang dirumuskan diatas dapat diselesaikan menggunakan formulasi secara numerik. Hasil perhitungan gerakan bangunan apung diberikan dalam perbandingan antara amplitude moda gerakan tertentu dengan amplitude gelombang yang berfluktuasi sebagai fungsi frekuensi *encountering*. Perbandingan amplitude tersebut, ζ_j/ζ_0 , disebut sebagai *Response Amplitudo Operator* (RAO) (Vernanda, 2018).

Response Amplitudo Operator (RAO) untuk gerakan translasi (*surge, sway, heave*) adalah perbandingan langsung antara amplitude gerakan struktur dengan amplitude gelombang insiden (Djarmiko, 2012). Persamaan *Response Amplitudo Operator* (RAO) untuk gerakan translasi sebagai berikut:

$$RAO(\omega) = \left(\frac{\text{Amplitudo Respon Gerakan}}{\text{Amplitudo Gelombang}} \right) = \left(\frac{\zeta_{k0}}{\zeta_0} \right) (m/m) \quad (9)$$

dengan:

$$\begin{aligned}\zeta_{k0} &= \text{amplitude struktur (m)} \\ \zeta_0 &= \text{amplitude gelombang (m)}\end{aligned}$$

Sedangkan untuk *Response Amplitudo Operator* (RAO) pada gerakan rotasi (*roll*, *pitch*, *yaw*) yaitu perbandingan antara amplitude gerakan rotasi (dalam radian) dengan kemiringan gelombang, yakni merupakan perkalian antara gelombang ($k\omega = \omega^2/g$) dengan amplitude gelombang insiden (Djarmiko, 2012).

$$RAO(\omega) = \frac{\zeta_{k0}}{K_W \zeta_0} = \frac{\zeta_{k0}}{(\omega^2/g)} (\text{rad/rad}) \quad (10)$$

1.4.9 Periode Natural

Periode natural (*natural period*) yaitu periode waktu dimana suatu struktur terapung bergerak secara alami tanpa ada pengaruh luar. Pada struktur bangunan lepas pantai seperti *Floating Offshore Wind Turbine* (FOWT) analisa periode natural sangat penting untuk memahami respon dinamis terhadap pengaruh gaya-gaya eksternal seperti angin, gelombang dan arus.

Getaran bebas terjadi disaat struktur berosilasi karena aksi dari suatu gaya yang bekerja di dalam struktur tanpa adanya gaya luar. Kekuatan-kekuatan yang bekerja tersebut muncul dari kecepatan awal (*initial velocity*) dan perpindahan (*displacement*) yang dimiliki struktur pada awal fase getaran bebasnya. Periode getar alami struktur, yang selanjutnya dapat disebut sebagai periode natural adalah properti dinamik dari suatu sistem struktur. (Sarifuddin, 2023. Assidiq, F.M., 2022).

1.4.10 Simulasi Numerik

Simulasi numerik adalah pemodelan menggunakan persamaan matematika yang diselesaikan dengan mengubah fisika permukaan ke dalam bentuk komputasi, yang kemudian diselesaikan secara numerik menggunakan perangkat lunak.

Pada dasarnya, simulasi numerik mengubah persamaan diferensial parsial sebelumnya dalam hal kontinuitas, momentum, dan energi menjadi persamaan aljabar. Persamaan kontinu sebelumnya (mengandung jumlah sel tak terhingga) diubah menjadi model diskrit (jumlah sel terbatas). Ada tiga metode penyelesaian numerik (metode diskritisasi): metode beda hingga, metode elemen hingga, dan metode volume hingga. Metode diskritisasi dipilih untuk menentukan stabilitas program numerik/CFD. Teknik diskritisasi yang dapat digunakan untuk menyelesaikan persamaan diferensial parsial antara lain:

1. Metode Beda Hingga (*Finite Difference Method*)

Teknik ini membagi permukaan aliran menjadi sekumpulan titik-titik grid, memperkirakan fungsi-fungsi kontinu (kecepatan, tekanan dll.) dengan nilai-nilai diskrit, dan menghitung fungsi-fungsi ini pada titik-titik grid tertentu.

Turunan suatu fungsi didekati dengan menggunakan selisih nilai fungsi pada titik-titik lokal pada grid dibagi dengan jarak grid.

2. Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method*)

Dalam metode ini, permasalahan besar dipecah menjadi permasalahan yang lebih kecil dan sederhana yang disebut elemen hingga. Persamaan sederhana yang memodelkan semua kasus disusun menjadi sistem persamaan yang lebih komprehensif. Persamaan kekekalan massa, momentum, dan energi ditulis dalam bentuk yang sesuai untuk setiap elemen, dan kumpulan persamaan aljabar yang dihasilkan untuk medan aliran diselesaikan secara numerik.

3. Metode Volume Hingga (*Finite Volume Method*)

Metode volume hingga merupakan metode untuk merepresentasikan dan mengevaluasi persamaan diferensial parsial dalam bentuk aljabar. Metode ini sama dengan metode beda hingga dan metode elemen hingga, di mana nilai dihitung pada lokasi geometri yang terpisah di dalam mesh. Metode ini berlaku untuk volume kecil di sekitar node dalam jaringan. Ini adalah metode untuk mengubah volume integral dari persamaan diferensial dengan suku divergen menjadi integral menggunakan teori divergensi (Sarifuddin, 2023).

1.5 Rumusan Masalah

Dengan melakukan analisis pada tiap-tiap *Floating Offshore Wind Turbine* (FOWT) permasalahan yang akan dibahas dalam tugas akhir ini antara lain:

1. Bagaimana respon gerak yang dihasilkan oleh tiap *Floating Offshore Wind Turbine* (FOWT)?
2. Model *Floating Offshore Wind Turbine* (FOWT) yang mempunyai gaya tarik tali tambat lebih kecil?
3. Bagaimana jenis *Floating Offshore Wind Turbine* (FOWT) yang cocok diaplikasikan di Perairan Indonesia?

1.6 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan daripada pembahasan didalam tugas akhir ini yaitu mengenai pemilihan *Floating Offshore Wind Turbine* (FOWT) mana yang tepat untuk diaplikasikan di Perairan Indonesia antara lain:

1. Mengetahui gerak desain struktur yang paling kecil dari tiap *Floating Offshore Wind Turbine* (FOWT).
2. Mengetahui tegangan tali tambat pada *Floating Offshore Wind Turbine* (FOWT) yang paling kecil terhadap lingkungan sekitar.
3. Pemilihan *Floating Offshore Wind Turbine* (FOWT) yang optimal pada pengujian di Perairan Indonesia.

1.7 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian yang dibahas dalam tugas akhir ini ialah mengetahui desain *Floating Offshore Wind Turbine* (FOWT) yang cocok pada Perairan Indonesia dalam mendukung *Net Zero Emission* dan Pembangunan Energi Baru Terbarukan (EBT) di Indonesia.

1.8 Batasan Masalah

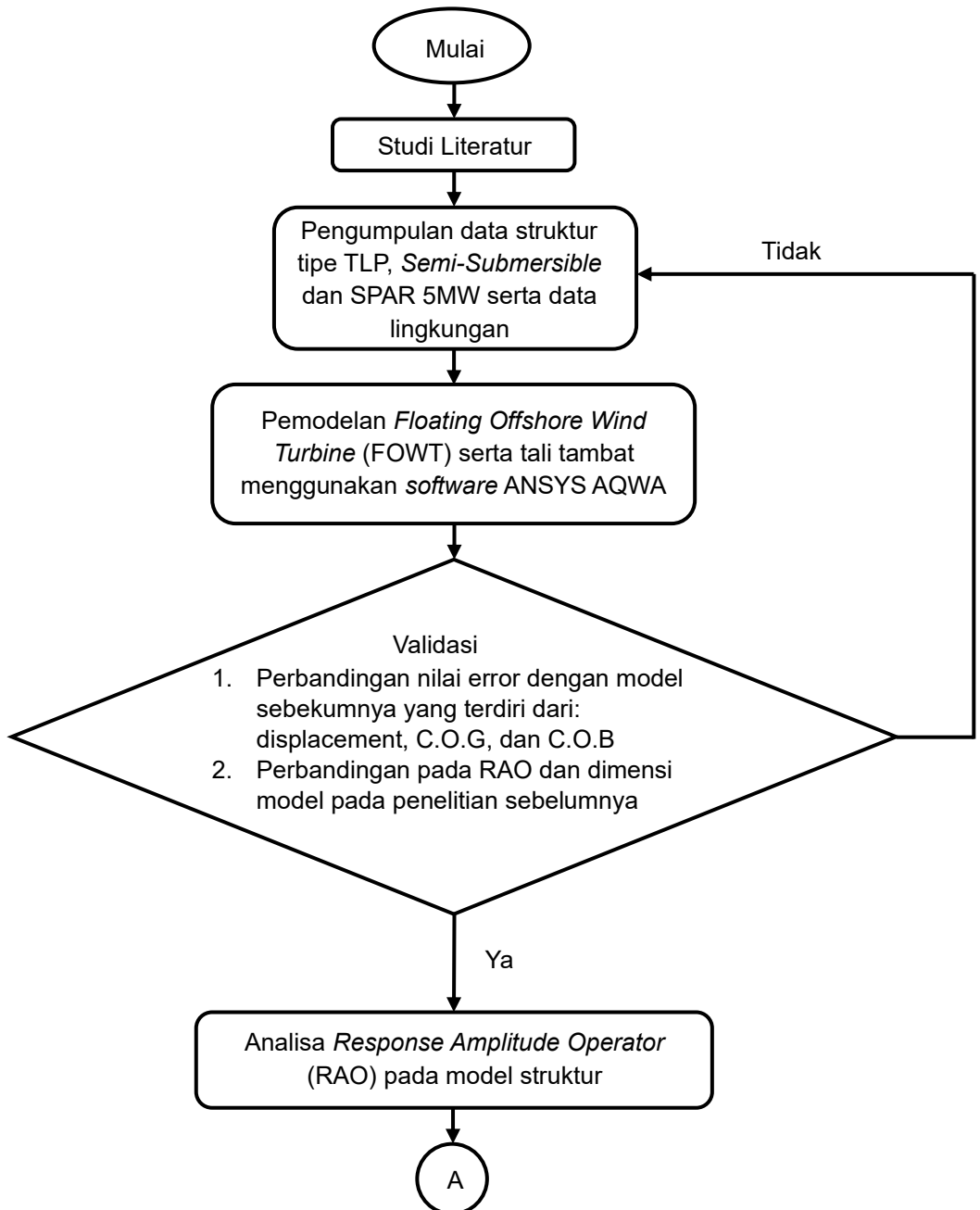
Agar penelitian ini dapat berjalan maksimal dan berada pada topik pembahasan awal, maka batasan masalah yang ditumpu pada penelitian ini antara lain:

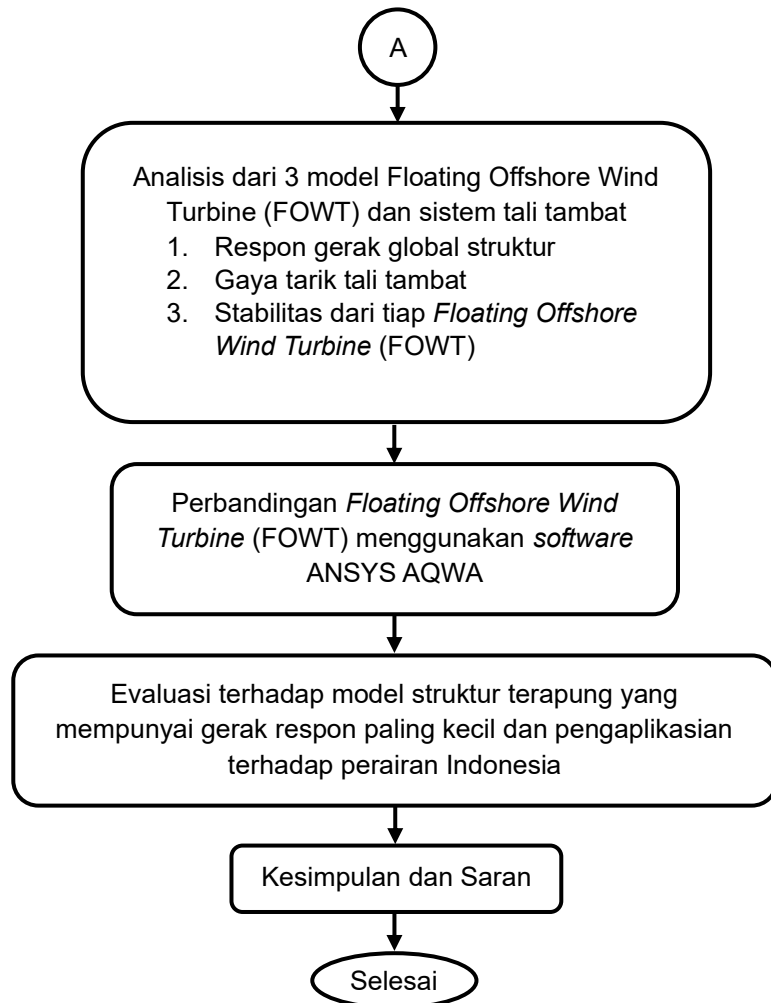
1. Penggunaan desain *Floating Offshore Wind Turbine* (FOWT) dengan besaran 5MW.
2. Pada penelitian tugas akhir ini model struktur terapung yang dipakai yaitu MIT/NREL TLP 5MW, *semi-submersible* OC4 5MW, , dan SPAR OC3 5MW.
3. Pembahasan didalam tugas akhir ini hanya mengenai struktur terapung pada Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB).
4. Penggunaan data penelitian yaitu merujuk kepada data sekunder pada Laut Banda, Perairan Ujung Genteng, dan Laut Arafura.
5. Penelitian ini menggunakan dimensi turbin angin secara sederhana dan tidak menghitung besaran listrik,
6. Variasi kasus yang dibahas dalam tugas akhir ini meliputi respon gerak dinamis dan tegangan tali tambat pada struktur terapung

BAB II METODE PENELITIAN

2.1 Alur Penelitian

Alur penelitian dalam tugas akhir ini akan dijelaskan dalam bagan pada gambar 10. dan penjelasan mengenai tahapan-tahapan pada sub-bab 2.2





Gambar 10. Tahapan Penelitian

2.2 Tahapan Penelitian

Berikut merupakan penjelasan pada setiap tahapan penelitian pada tugas akhir ini yaitu sebagai berikut:

2.2.1 Studi Literatur

Mengumpulkan referensi yang berkaitan dengan penelitian tugas akhir ini yaitu mengenai *Floating Offshore Wind Turbine* (FOWT) berupa MIT/NREL TLP 5MW, *semi-submersible* OC4 5MW, dan SPAR OC3 5MW baik melalui jurnal, makalah, tesis, buku catatan kuliah ataupun penelitian yang sudah ada sebelumnya sebagai penunjang pengerjaan tugas akhir yang sedang dikerjakan.

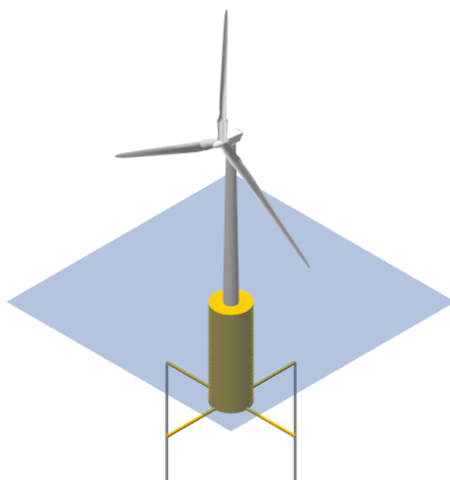
2.2.2 Pengumpulan Data FOWT dan Data Lingkungan

Basis data yang akan digunakan pada tugas akhir ini yaitu melalui model dengan tipe struktur NREL/MIT TLP 5MW, *semi-submersible* OC4 5MW, dan SPAR OC3 5MW serta sistem tambat.

Tabel 3. Data struktur MIT/NREL TLP 5MW

Properti	Spesifikasi
<i>Platform Diameter</i>	18 m
<i>Platform Draft</i>	47.89 m
<i>Water Displacement</i>	12.180 m ³
<i>Total Mass including Ballast</i>	8.600 ton
<i>Center of Mass Location below SWL</i>	40.61 m
<i>Roll Inertia about CM</i>	571.600 ton.m ²
<i>Pitch Inertia about CM</i>	571.600 ton.m ²
<i>Yaw Inertia about CM</i>	571.600 ton.m ²
<i>Number of Mooring Lines</i>	8 (2 x 4)
<i>Depth to Fairlead</i>	47.89 m
<i>Radius to Fairlead</i>	27 m
<i>Radius to Anchor</i>	27 m
<i>Line Diameter</i>	0.127 m
<i>Line Mass per Unit Length</i>	116.03 kg/m
<i>Line Extensional Stiffness</i>	1.500.000 kN

Sumber: (Robertson & Jonkman, 2011)



Gambar 11. Model MIT/NREL TLP 5MW (<https://docs.qblade.org>) diakses pada tanggal 11 Maret 2024)

Tabel 4. Data struktur *semi-submersible* OC4 5MW

Properti	Spesifikasi
<i>Diameter of Main Colomn</i>	6.5 m
<i>Diameter of Offset Colomn</i>	12 m
<i>Diameter of Pontons & Cross Braces</i>	24 m
<i>Platform Draft</i>	1.6 m
<i>Freeboard</i>	20 m
<i>Paltform Mass including Ballast</i>	13.473 ton
<i>Center of Mass Location below SWL</i>	13.46 m
<i>Roll Inertia about CM</i>	682.700 ton.m ²
<i>Pitch Inertia about CM</i>	682.700 ton.m ²
<i>Yaw Inertia about CM</i>	1.226.000 ton.m ²
<i>Number of Mooring Lines</i>	3
<i>Angle between Mooring Lines</i>	120°
<i>Depth to Fairlead</i>	14 m
<i>Radius to Fairlead</i>	40.87 m
<i>Radius to Anchor</i>	837.6 m
<i>Line Diameter</i>	0.0766 m
<i>Line Mass per Unit Length</i>	113.35 kg/m
<i>Line Extensional Stiffness</i>	753.600 kN

Sumber: (NREL, 2014)

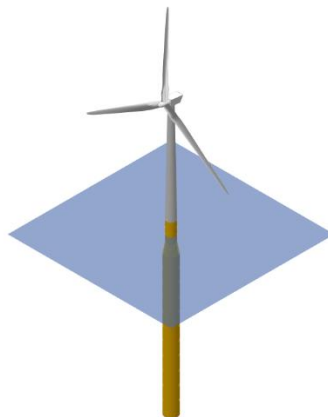


Gambar 12. *semi-submersible* OC4 5MW (<https://docs.qblade.org>) diakses pada tanggal 11 Maret 2024)

Tabel 5. Data struktur SPAR OC3 5MW

Properti	Spesifikasi
<i>Depth to Platform Base Below SWL (Total Draft)</i>	120 m
<i>Elevation to Platform Top (Tower Base) Above SWL</i>	10 m
<i>Depth to Top of Taper Below SWL</i>	4 m
<i>Depth to Bottom of Taper Below SWL</i>	12 m
<i>Platform Diameter Above Taper</i>	6.5 m
<i>Platform Diameter Below Taper</i>	9.4 m
<i>Platform Mass, Including Ballast</i>	7.466,33 kg
<i>CM Location Below SWL Along Platform CL</i>	89.9155 m
<i>Platform Roll Inertia About CM</i>	4.229.230 ton.m ²
<i>Platform Pitch Inertia About CM</i>	4.229.230 ton.m ²
<i>Platform Yaw Inertia About Platform CL</i>	154.230 ton.m ²

Sumber: (Jonkman, 2010)



Gambar 13. SPAR OC3 5MW (<https://docs.qblade.org>) diakses pada tanggal 11 Maret 2024)

Data lingkungan yang diperlukan dalam penelitian tugas akhir ini meliputi data gelombang dan data angin. Model struktur akan diuji pada Laut Banda, Perairan Ujung Genteng, dan Laut Arafura. Data lingkungan yang digunakan yaitu berfungsi untuk mendapatkan gerak respon global struktur dan mengetahui besaran gaya tarik pada tali tambat dari setiap model struktur terapung.

2.2.3 Pemodelan FOWT serta tali tambat pada *software* ANSYS AQWA

Pada penelitian tugas akhir ini akan menggunakan bantuan *software* ANSYS WORKBENCH pada sub-menu yaitu ANSYS AQWA dalam pemodelan dan analisis tegangan tali tambat dari setiap model struktur terapung terhadap kondisi perairan Indonesia yang telah diolah.

2.2.4 Validasi Model

Setelah melakukan penginputan data model pada *software* ANSYS AQWA dengan tipe struktur terapung MIT/NREL TLP 5MW, *semi-submersible* OC4 5MW dan SPAR OC3 5MW serta pemodelan tali tambat pada tiap model, maka dilakukan pengujian pada model di *software* yang sama dan validasi dilakukan terhadap model struktur terapung yang sudah diteliti sebelumnya.

2.2.5 Analisa Response Amplitude Operator FOWT

Setelah dilakukan validasi terhadap model struktur dan hasil yang didapat valid, maka langkah selanjutnya yaitu melakukan analisa *Response Amplitude Operator* (RAO) menggunakan *software* ANSYS AQWA untuk mengetahui karakteristik respon gerak struktur pada FOWT.

2.2.6 Analisis Dari Tiap 3 Model Floating Offshore Wind Turbine (FOWT) dan Sistem Tali Tambat

Pengujian model struktur terapung yang dilakukan pada 3 jenis model struktur terapung yaitu MIT/NREL TLP 5MW, *semi-submersible* OC4 5MW dan SPAR OC3 5MW di *software* ANSYS AQWA dilakukan pada kondisi lingkungan masing-masing perairan. File yang dihasilkan berupa grafik pengujian pada struktur tiap *timestep*. Respon gerak *Six Degrees of Freedom* (6 DOF) global dan gaya tarik tali tambat akan disimulasikan pada tiap struktur yang diuji dengan konfigurasi tali tambat 3x1 untuk model *semi-submersible* OC4 5MW dan SPAR OC3 5MW dan 4x1 untuk MIT/NREL TLP 5MW. Hasil tersebut akan dibuat dalam bentuk grafik dari setiap analisis tiap struktur. Respon masing-masing diolah untuk mendapatkan parameter *root mean square* dari tiap mode gerakan (*surge, sway, heave roll, pitch dan yaw*).

2.2.7 Perbandingan Floating Offshore Wind Turbine (FOWT) Pada Software ANSYS Workbench

Hasil dari tiap-tiap analisis ketiga model struktur terapung yang meliputi respon gerak global struktur, gaya tarik tali tambat dan stabilitas dari tiap model struktur terapung akan dibandingkan untuk menentukan struktur terapung mana yang paling sesuai pada Laut Banda, Perairan Ujung Genteng dan Laut Arafura.

2.2.8 Evaluasi Model Struktur Terapung Terhadap Perairan Indonesia

Pemilihan model struktur terapung dari MIT/NREL TLP 5MW, *semi-submersible* OC4 5MW, dan SPAR OC3 5MW meliputi hasil analisis pada *software* ANSYS AQWA mana hasil yang mempunyai bilangan paling kecil diantara ketiga model struktur terapung yang diuji pada data lingkungan di Laut Banda, Perairan Ujung Genteng, dan Laut Arafura.

2.2.9 Kesimpulan dan Saran

Hasil dari tiap – tiap analisis dibandingkan untuk menentukan konsep *Floating Offshore Wind Turbine* (FOWT) yang paling sesuai untuk perairan Indonesia. Selain itu, kekurangan dan saran – saran dari penelitian ini dapat dikemukakan untuk saran dan pertimbangan penelitian *Floating Offshore Wind Turbine* (FOWT) selanjutnya.