

SKRIPSI

**ANALISA RESPON GERAK TURBIN ANGIN TERAPUNG
LEPAS PANTAI TIPE *BARGE* TERHADAP VARIASI BENTUK
*FLOATER***

Disusun dan diajukan oleh:

**NURHALIM DWI PUTRA
D091191084**



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK SISTEM PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**



LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

ANALISA RESPON GERAK TURBIN ANGIN TERAPUNG LEPAS PANTAI TIPE *BARGE* TERHADAP VARIASI BENTUK *FLOATER*

Disusun dan diajukan oleh

NURHALIM DWI PUTRA
D091191084

Telah dipertahankan dihadapan Panitia Ujian dibentuk dalam rangka Penyelesaian
Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Sistem Perkapalan

Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

Pada tanggal *20 Agustus 2024*

Dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,



Dr. Eng. Ir. Faisal Mahmuddin, S.T., M.Inf.,
Tech., M.Eng., IPM

NIP : 19810211 200501 1 003

Pembimbing Pendamping,



Ir. Syerly Klara, M.T.
NIP : 19640501 199002 2 001

Ketua Program Studi,



Dr. Eng. Ir. Faisal Mahmuddin, ST., M.Inf.Tech., M.Eng., IPM

NIP : 19810211 200501 1 003



PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Nurhalim Dwi Putra
NIM : D091191084
Program Studi : Teknik Sistem Perkapalan
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

ANALISA RESPON GERAK TURBIN ANGIN TERAPUNG LEPAS PANTAI
TIPE *BARGE* TERHADAP VARIASI BENTUK *FLOATER*

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

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

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

Gowa, 21 Agustus 2024

Yang Menyatakan



Nurhalim Dwi Putra



ABSTRAK

NURHALIM DWI PUTRA. *Analisa Respon Gerak Turbin Angin Terapung Lepas Pantai Tipe Barge Terhadap Variasi Bentuk Floater* (dibimbing oleh Faisal Mahmuddin dan Syerly Klara)

Negara Indonesia mempunyai potensi energi baru terbarukan yang sangat besar, salah satunya energi angin. Posisi Indonesia juga termasuk negara dengan garis pantai yang panjang, potensi energi anginnya cukup besar, terutama dibagian laut (offshore). Kawasan Nusa Tenggara Timur, termasuk kawasan dengan potensi energi angin laut yang melimpah di Indonesia dengan potensi sebesar 10,188 MW, dan cocok untuk dikembangkan turbin angin terapung. Maka dari itu, untuk membuat performa turbin dapat bekerja dengan normal, maka respon gerak perlu dianalisa. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui respon gerak *Floating Offshore Wind Turbine* tipe *Barge* pada setiap variasi bentuk *floater* terhadap gelombang reguler dari 3 arah yang berbeda (0° , 45° , 90°). Variasi bentuk *barge floater* yang digunakan yaitu kubus, silinder, dan oktagon. Analisa respon gerak turbin angin terapung dilakukan dengan metode analisis difraksi dan radiasi pada *Ansys Aqwa Hydrodynamic Diffraction*. Hasil analisa respon gerak Ansys kemudian dibandingkan dengan analisa *3D Panel Method* pada *software Maxsurf Motion*. Hasil dari penelitian berupa kurva *respon amplitude operator* (RAO) struktur terhadap 2 arah gerak bebas secara berpasangan pada penampang 2 Dimensi yaitu *Heave-Pitch*. Pengaruh bentuk dan volume dari tiap model mempengaruhi nilai respon yang dihasilkan, dimana *floater* kubus memiliki nilai respon gerak maksimum, pada gerak *heave* sebesar 0.999 m/m, dan gerak *pitch* sebesar 2.228 $^\circ$ /m. Sedangkan *floater* silinder, pada gerak *heave* sebesar 1.132 m/m, gerak *pitch* sebesar 10.050 $^\circ$ /m. Kemudian *floater* oktagon, pada gerak *heave* sebesar 1.010 m/m, dan gerak *pitch* sebesar 2.565 $^\circ$ /m.

Kata Kunci: *Response Amplitude Operator*, Turbin Angin Terapung, *Barge Floater*



ABSTRACT

NURHALIM DWI PUTRA. *Motion Response Analysis of Barge Type Floating Offshore Wind Turbine to Floater Shape Variation* (supervised by Faisal Mahmuddin and Syerly Klara)

Indonesia has significant potential for renewable energy, one of which is wind energy. Indonesia's position is also a country with a long coastline, the potential for wind energy is quite large, especially in the sea (offshore). East Nusa Tenggara is a region with abundant offshore wind energy potential in Indonesia, with a potential of 10,188 MW, making it suitable for developing floating wind turbines. Therefore, to make the turbine performance can work normally, the motion response needs to be analyzed. This study aims to understand the movement response of Floating Offshore Wind Turbines of the Barge type with different floater shapes against regular waves from three different directions (0° , 45° , 90°). The variations of barge floater shapes used are cubic, cylindrical, and octagonal. The movement response analysis of floating wind turbines was done using diffraction and radiation analysis methods in Ansys Aqwa Hydrodynamic Diffraction. The results were then compared with the 3D Panel Method analysis in Maxsurf Motion software. The study results include response amplitude operator (RAO) curves for the structure in two paired directions of movement, Heave-Pitch, on a 2D section. The shape and volume of each model affect the response values obtained. The cube floater has the maximum movement response, with a heave response of 0.999 m/m and a pitch response of $2.228^\circ/\text{m}$. Meanwhile, the cylindrical floater has a heave response of 1.132 m/m and a pitch response of $10.050^\circ/\text{m}$. The octagonal floater has a heave response of 1.010 m/m and a pitch response of $2.565^\circ/\text{m}$.

Keywords: Response Amplitude Operator, Wind Turbine, Barge Floater



DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI.....	i
PERNYATAAN KEASLIAN	ii
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR TABEL.....	vii
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL	viii
DAFTAR LAMPIRAN.....	x
KATA PENGANTAR	1
BAB I PENDAHULUAN	2
1.1 Latar Belakang	2
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Manfaat Penelitian	5
1.5 Ruang Lingkup.....	5
1.6 Penelitian Terdahulu	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Turbin Angin Lepas Pantai	7
2.2 <i>Floating Support Structure</i>	10
2.3 Arah Gerak Bebas Struktur Turbin Terapung.....	14
2.4 Dasar Analisa Respon Gerak	15
2.5 <i>Response Amplitude Operator</i>	16
2.6 Beban Gelombang Reguler	19
2.7 Gerak <i>Couple Heave-Pitch</i>	25
2.7 <i>Computational Fluid Dynamics</i>	27
BAB III METODE PENELITIAN.....	30
3.1 Lokasi Penelitian.....	30
3.2 Jenis Penelitian.....	30
3.3 Studi Literatur	30
3.4 Pengumpulan Data	31
3.6 Analisa Respon Gerak dan Validasi Perbandingan.....	33
3.7 Analisa Perbandingan Respon Gerak Struktur.....	34
3.8 Kesimpulan	34
3.9 Diagram Alir	34
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	35
4.1 Pemodelan Struktur Turbin Angin Terapung Lepas Pantai	35
4.2 Parameter Hidrostatik Variasi <i>Floater</i>	41
4.3 Analisa Respon Gerak Struktur Terhadap Beban Gelombang.....	42
4.4 Perbandingan Hasil Analisa Respon Gerak Akibat Variasi Struktur.....	52
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	58
Kesimpulan	58
Daftar Pustaka	58
Daftar Pustaka	59



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Sebaran potensi energi angin di Indonesia	3
Gambar 2 <i>Platform</i> dan <i>tower</i> turbin terapung <i>ITI Energy Barge</i>	8
Gambar 3 Model turbin NREL 5MW	9
Gambar 4 Jenis <i>floater</i> umum untuk turbin angin terapung	10
Gambar 5 Referensi bentuk <i>floater</i> turbin angin terapung	12
Gambar 6 Arah gerak 3 Dimensi (kiri) dan 2 Dimensi (kanan)	15
Gambar 7 Bentuk umum grafik respons gerakan bangunan apung	18
Gambar 8 Bentuk grafis gelombang reguler	22
Gambar 9 Bentuk amplitudo dan Panjang gelombang reguler	23
Gambar 10 Perbandingan teori <i>Airy</i> dan <i>Stokes</i>	25
Gambar 11 Tampilan Panel <i>Floater</i> di <i>Ansys Aqwa</i>	27
Gambar 12 Tampilan Panel <i>Floater</i> di <i>Maxsurf Motion</i>	28
Gambar 13 Lokasi penelitian	30
Gambar 14 Variasi rancangan model <i>floater</i> turbin angin terapung	33
Gambar 15 Variasi arah gelombang laut	33
Gambar 16 Sketsa bentuk <i>Floater</i> Kubus	35
Gambar 17 Sketsa bentuk <i>Floater</i> Silinder	36
Gambar 18 Sketsa bentuk <i>Floater</i> Oktagon	36
Gambar 19 Gambar keseluruhan struktur model <i>floater</i> kubus	38
Gambar 20 Gambar keseluruhan struktur model <i>floater</i> silinder	38
Gambar 21 Gambar keseluruhan struktur model <i>floater</i> oktagon	39
Gambar 22 Bentuk permukaan <i>meshing</i> pada objek yang dihasilkan	40
Gambar 23 Kurva RAO <i>floater</i> kubus pada arah 0°	43
Gambar 24 Kurva RAO <i>floater</i> silinder pada arah 0°	44
Gambar 25 Kurva RAO <i>floater</i> oktagon pada arah 0°	45
Gambar 26 Kurva RAO <i>floater</i> kubus pada arah 45°	46
Gambar 27 Kurva RAO <i>floater</i> silinder pada arah 45°	47
Gambar 28 Kurva RAO <i>floater</i> oktagon pada arah 45°	48
Gambar 29 Kurva RAO <i>floater</i> kubus pada arah 90°	49
Gambar 30 Kurva RAO <i>floater</i> silinder pada arah 90°	50
Gambar 31 Kurva RAO <i>floater</i> oktagon pada arah 90°	51
Gambar 32 Perbandingan nilai RAO <i>Heave</i> setiap <i>floater</i> pada arah 0°	52
Gambar 33 Perbandingan nilai RAO <i>Heave</i> setiap <i>floater</i> pada arah 45°	52
Gambar 34 Perbandingan nilai RAO <i>Heave</i> setiap <i>floater</i> pada arah 90°	53
Gambar 35 Perbandingan nilai RAO <i>Pitch</i> setiap <i>floater</i> pada arah 0°	53
Gambar 36 Perbandingan nilai RAO <i>Pitch</i> setiap <i>floater</i> pada arah 45°	54
Gambar 37 Perbandingan nilai RAO <i>Pitch</i> setiap <i>floater</i> pada arah 90°	54



DAFTAR TABEL

Tabel 1 Data turbin angin NREL 5MW	31
Tabel 2 Data utama struktur ITI <i>energy barge</i>	31
Tabel 3 Data variasi struktur <i>barge</i> bentuk kubus	32
Tabel 4 Data variasi struktur <i>barge</i> bentuk silinder.....	32
Tabel 5 Data variasi struktur <i>barge</i> bentuk oktagon	32
Tabel 6 Parameter berat komponen struktur turbin kubus	37
Tabel 7 Parameter berat komponen struktur turbin silinder.....	37
Tabel 8 Parameter berat komponen struktur turbin oktagon.....	37
Tabel 9 Ukuran batas simulasi	38
Tabel 10 Titik berat variasi bentuk struktur turbin angin terapung	39
Tabel 11 <i>Meshing properties</i> model kubus.....	40
Tabel 12 <i>Meshing properties</i> model silinder	40
Tabel 13 <i>Meshing properties</i> model oktagon.....	41
Tabel 14 Parameter hidrostatik struktur bentuk kubus	41
Tabel 15 Parameter hidrostatik struktur bentuk silinder	41
Tabel 16 Parameter hidrostatik struktur bentuk oktagon	42
Tabel 17 Parameter gelombang laut.....	42
Tabel 18 Nilai RAO floater kubus pada arah 0°	43
Tabel 19 Nilai RAO floater silinder pada arah 0°.....	44
Tabel 20 Nilai RAO floater oktagon pada arah 0°	45
Tabel 21 Nilai RAO floater kubus pada arah 45°	46
Tabel 22 Nilai RAO floater silinder pada arah 45°	47
Tabel 23 Nilai RAO floater oktagon pada arah 45°	48
Tabel 24 Nilai RAO floater kubus pada arah 90°	49
Tabel 25 Nilai RAO floater silinder pada arah 90°	50
Tabel 26 Nilai RAO floater oktagon pada arah 90°.....	51
Tabel 27 Perbandingan nilai periode alami floater	55



DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan
b, B	<i>Damping coefficient heaving, pitching</i>
c_n, C	<i>Restoring force coefficient heaving, pitching</i>
c	<i>Restoring force coefficient</i>
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
d, D	<i>Inertial moment coefficient heaving, pitching</i>
e, E	<i>Damping coefficient heaving, pitching</i>
F_{eff}	<i>Fetch efektif (km)</i>
FOWT	<i>Floating Offshore Wind Turbine</i>
FPSO	<i>Floating Production Supply and Offloading</i>
ITI	<i>International Technology and Innovation</i>
I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}	<i>Momen inersia massa benda (kg.m²)</i>
k	<i>Nondimensional damping factor</i>
k_{xx}, k_{yy}, k_{zz}	<i>Jari-jari girasi (m)</i>
L_w	<i>Panjang gelombang (m)</i>
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>
RAO	<i>Response Amplitude Operators (m/m, °/m)</i>
TLB	<i>Tension Leg Buoy</i>
TLP	<i>Tension Leg Platform</i>
T_w	<i>Periode gelombang (s)</i>
U_w	<i>Kecepatan angin diatas laut (knot)</i>
U_A	<i>Faktor tegangan angin</i>
U_L	<i>Kecepatan angin diatas daratan (knot)</i>
V_w	<i>Kecepatan gelombang (m/s)</i>
z_a	<i>Amplitudo gerak heave (m)</i>
	<i>static heaving amplitude (m)</i>
	<i>Tuning factor</i>
	<i>Amplitudo gerak struktur terapung (m, °)</i>



ζ_a	Amplitudo gelombang (m)
μ_z	<i>Magnification factor</i>
ω_ϕ	Frekuensi alami (rad/s)
ϕ_a	Amplitudo gerak <i>Pitch</i> (°)
ω_w	Frekuensi gelombang (rad/s)
ρ	Massa jenis (air laut 1025 kg/m ³)



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Data Lingkungan Laut Sawu, NTT	61
Lampiran 2 Konfigurasi Bentuk Floater	63
Lampiran 3 Perhitungan Periode Gelombang <i>Frequency Domain Analysis</i>	66
Lampiran 4 <i>Result Analisa Mass Properties Ansys Mechanical</i>	71
Lampiran 5 <i>Hydrostatic Result Ansys Aqwa Hydrodynamic Diffraction</i>	73
Lampiran 6 Setup Analisa Respon Gerak <i>Maxsurf Motion</i>	74
Lampiran 7 Posisi Trim & Stabilitas Floater	80
Lampiran 8 Periode Natural Variasi Floater	84



KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas segala limpahan rahmat, taufiq dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini yang berjudul “Analisa Respon Gerak Turbin Angin Terapung Lepas Pantai Terhadap Variasi Bentuk *Floater*”.

Selesainya Skripsi/Tugas Akhir (TA) ini tidak terlepas dari bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, melalui ini penulis memberikan ucapan terima kasih sebanyak-banyaknya kepada beberapa pihak yang berjasa selama saya kuliah:

1. Kedua orang tua dan Saudari penulis karena telah menjadi sosok yang selalu memberikan motivasi, kasih sayang, perhatian dan doa.
2. Bapak Dr. Eng. Ir. Faisal Mahmuddin, S.T., M.Inf., Tech., M.Eng., IPM, selaku ketua departemen sekaligus dosen pembimbing I yang senantiasa meluangkan waktunya untuk membantu penulis dengan memberikan bimbingan, kritik, dan saran.
3. Ibu Ir. Syerly Klara, M.T, selaku dosen pembimbing II yang telah membimbing serta mengarahkan penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini dengan baik.
4. Bapak Ir. Zulkifli, M.T dan Baharuddin S.T., M.T, selaku dosen penguji yang telah memberikan arahan dan saran selama penelitian berlangsung.
5. Bapak Muhammad Iqbal Nikmatullah, S.T., M.T, selaku dosen Pembimbing Akademik bagi penulis selama menuntut ilmu di kampus.
6. Teman-teman KORTNOZZLE'19 yang telah menemani penulis mengerjakan tugas-tugas dari awal semester 1 hingga pengerjaan skripsi selesai.

Penulis menyadari bahwa dalam penyelesaian skripsi ini terdapat banyak kekurangan. Oleh karena itu, penulis berharap adanya kritik dan saran sebagai bahan untuk memenuhi kekurangan dari penulisan skripsi ini. Wassalamualaikum
Wr. Wb.



Gowa, 27 Mei 2024

BAB I PENDAHULUAN

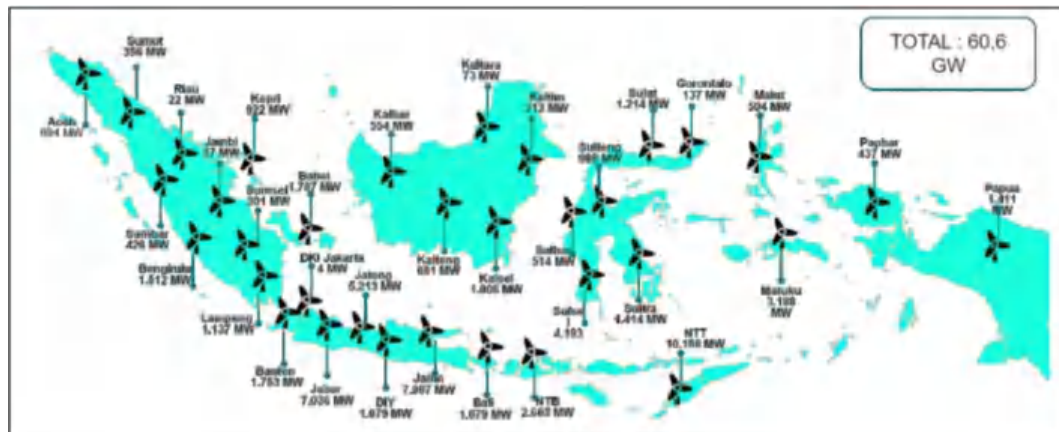
1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan salah satu negara penghasil dan pengeksportir minyak dan gas bumi terbesar. Namun, cadangannya mulai berkurang seiring berjalannya waktu. Sumber energi berbasis bahan bakar fosil yang semakin berkurang, terutama minyak dan gas bumi, telah mendorong pemerintah untuk memprioritaskan energi terbarukan untuk mencapai kemandirian energi. Pengembangan energi angin di lepas pantai menjadi isu energi modern yang mendesak, karena didorong oleh kebutuhan untuk menemukan sumber tenaga listrik baru dan menghindari penggunaan bahan bakar fosil. Faktanya, dampak lingkungan yang dihasilkan dari turbin angin lepas pantai cenderung lebih rendah (Tavner, 2012).

Dampak lingkungan dan tantangan sosial juga menjadi aspek yang perlu diperhatikan. Seperti kejadian yang baru-baru ini di Manggarai Barat, NTT yang diberitakan oleh (Rosary, 2023) bahwa pemerintah melalui PT. Perusahaan Listrik Negara (PLN) tengah melakukan perluasan Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Ulumbu, Kabupaten Manggarai, Flores, NTT, guna menaikkan kapasitas dari 7,5 MW saat ini menjadi 40 MW. Namun, terjadi penolakan keras dari tokoh adat dan masyarakat lokal yang menolak pembangunan dan perluasan PLTP tersebut, dan menilai proyek ini akan sangat berdampak buruk bagi ruang hidup mereka, kesatuan yang utuh tak terpisahkan antara pemukiman, kebun pencaharian, sumber air, pusat kehidupan adat, kuburan, hutan dan danau. Proyek *geothermal* ini juga melakukan pembongkaran kawasan hutan, merubah fungsi lahan, hingga menggeser permukiman penduduk. Sikap penolakan masyarakat diperlihatkan melalui berbagai aksi yang dilakukan demi menghentikan kelanjutan proyek *geothermal*. Beberapa Lembaga Swadaya Masyarakat, Organisasi Masyarakat, hingga kalangan mahasiswa juga turut menggalang dukungan penolakan kehadiran proyek ini. Sehingga dari kejadian tersebut, Pemilihan Laut

Utara untuk kawasan pengoperasian Turbin Angin Terapung akan solusi bagi sumber energi listrik terbarukan bagi masyarakat disana, a bagian Nusa Tenggara Timur.





Gambar 1 Sebaran potensi energi angin di Indonesia
Sumber : Direktorat aneka energi baru dan terbarukan, RUEN, 2017

Negara Indonesia mempunyai potensi energi baru terbarukan yang sangat besar, salah satunya energi angin. Dengan posisi Indonesia menjadi negara dengan garis pantai yang panjang, potensi energi anginnya cukup besar, terutama dibagian laut (*offshore*). Menurut data dari Ditjen EBTKE Kementerian ESDM (P3TKEBTKE, 2021), Indonesia memiliki potensi energi angin sebesar 60,647 MW yang tersebar di 34 provinsi. Daerah provinsi yang memiliki potensi paling besar adalah wilayah Nusa Tenggara Timur (NTT) dengan potensi sebesar 10,188 MW. Kemudian disusul oleh Jawa Timur sebesar 7,907 MW, Jawa Barat sebesar 7,036 MW, Sulawesi Selatan sebesar 4,193 MW, hingga yang paling kecil adalah DKI Jakarta dengan potensi hanya sebesar 4 MW. Berdasarkan data (BPS, 2023), rata-rata kapasitas daya listrik yang terpasang di daerah Nusa Tenggara Timur selama 7 tahun terakhir (2015-2021) sebesar 419,494 kW. Sehingga turbin angin terapung lepas pantai untuk kawasan penelitian kali ini dipilih dikawasan laut Sawu Utara, karena kawasan ini memiliki potensi energi angin yang besar berdasarkan data penelitian (Purba et al., 2015).

Keuntungan dari turbin angin terapung di laut adalah bahwa alat ini dapat ditempatkan di perairan yang lebih dalam. Turbin Angin Terapung Jenis *Barge* adalah salah satu jenis turbin angin terapung yang paling umum digunakan di dunia.

Turbin angin terapung ini lebih stabil di perairan yang berombak dan dalam, dapat dioperasikan di kedalaman air hingga lebih dari 100 meter. Saat ini dapat dilihat dikawasan negara Eropa, terutama di laut Utara



Eropa, perairan Baltik, laut Irlandia, dan kawasan laut Inggris yang saat ini memiliki kapasitas turbin angin di lepas pantai yang terbesar dengan produksi energi tahunan >800 GWh dan turbin angin lepas pantai dengan kapasitas 300 MW dari 100 unit turbin yang beroperasi saat ini di kawasan laut negara Inggris (Tavner, 2012).

Pergerakan struktur turbin angin terapung ketika di laut dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, salah satunya adalah gelombang laut. Maka perlu dilakukan analisa terhadap beban yang bekerja pada struktur turbin angin terapung. Analisa bertujuan untuk memperoleh respon gerak dan mengidentifikasi potensi beban dari lingkungan yang dapat merusak bentuk desain dari *barge*. Ada beberapa perdebatan dan penelitian di seluruh dunia untuk mengidentifikasi kedalaman transisi ketika *platform* terapung lebih ekonomis dibandingkan dengan turbin yang dipasang tiang pancang ke dasar laut. Namun, jelas bahwa ketika kedalaman air lebih dari 100 m, konsep *floater* terapung merupakan solusi yang paling hemat biaya (Karimirad, 2014). Maka dari itu, analisa respon gerak diperlukan untuk mengetahui perilaku dari struktur diatas gelombang. Pada bentuk *floater* utama yang digunakan pada model penelitian kali ini, adalah model *ITI Energy Barge* yang dikembangkan oleh *Universities of Glasgow and Strathclyde*, yang akan di lakukan variasi bentuk geometri *floater* dari data *floater* utama, sehingga bisa di analisa respon geraknya untuk menjadi pertimbangan bentuk mana yang paling cocok terhadap kondisi lingkungan perairan Laut Sawu.

1.2 Rumusan Masalah

Sehubungan dengan latar belakang di atas permasalahan yang akan dikaji dalam Tugas Akhir ini antara lain sebagai berikut:

1. Bagaimana respon gerak turbin angin terapung tipe *Barge* pada setiap variasi bentuk *floater*?
2. Bagaimana perbandingan respon gerak dari setiap variasi bentuk floater turbin angin terapung?



Bagaimana bentuk *floater* tipe *barge* yang memiliki respon gerak paling baik terhadap beban lingkungan yang bekerja?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penulisan Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui respon gerak *Floating Offshore Wind Turbine* tipe *Barge* pada setiap variasi bentuk *floater*.
2. Mengetahui perbandingan respon gerak dari setiap variasi bentuk floater turbin angin terapung.
3. Mengetahui bentuk *Floating Offshore Wind Turbine* tipe *Barge* yang paling baik respon geraknya terhadap pengaruh beban lingkungan.

1.4 Manfaat Penelitian

Mengetahui karakteristik respon gerak dari tiap variasi bentuk *floater* turbin angin terapung lepas pantai yang cocok dioperasikan untuk perairan Laut Sawu Utara, yang merupakan kawasan dengan potensi angin yang baik di wilayah perairan Indonesia.

1.5 Ruang Lingkup

Untuk mengurangi masalah selama proses pengerjaan tugas akhir ini, maka diberikan batasan-batasan sebagai berikut :

1. Data struktur *Barge* yang digunakan adalah *floater* yang dikembangkan oleh *Universities of Glasgow and Strathclyde*, bernama *ITI Energy Barge*, dari Jurnal (Robertson & Jonkman, 2011) “*Loads analysis of several offshore floating wind turbine concepts*, dengan kondisi terapung bebas”.
2. Data turbin angin menggunakan turbin angin berkapasitas 5 WM dari jurnal (Jonkman et al., 2009).
3. Analisa ditinjau dengan metode *Frequency Domain*.
4. Beban gelombang yang digunakan yaitu gelombang reguler model *Airy*.
5. Analisa respon gerak pada 2 arah gerak bebas berpasangan (*coupled*) 2 dimensi pada penampang longitudinal, yaitu gerak *heave-pitch*.

” wasan beban lingkungan yang digunakan yaitu perairan gelombang Laut sawu Utara, Nusa Tenggara Timur.



1.6 Penelitian Terdahulu

No	Nama	Kesimpulan
1	Ida Ayu Irawati Diah Ratna Putra (2017)	Hasil penelitian menunjukkan pada model simulasi yang dilakukan diperoleh respon gerak tertinggi pada arah pembebanan 180° yaitu gerak heave, sementara itu pada arah pembebanan 90° diperoleh gerak rotasi terbesar terjadi pada gerak roll dan pitch.
2	Almutahir (2016)	Hasil <i>Respon Amplitude Operator</i> menunjukkan bahwa model struktur FWT Sarat 130 M cukup signifikan mereduksi amplitudo gerakan struktur terutama terjadi pada mode gerakan <i>surge</i> dan <i>pitch</i> . Serta konfigurasi struktur FWT 130 M memiliki nilai RAO lebih kecil dibandingkan struktur FWT 120 M. Hal ini terjadi pada semua mode gerakan dan arah pembebanan. Perbedaan nilai RAO terbesar terjadi pada mode gerakan <i>Pitch</i> .
3	Zulfikar Adytia Vernanda (2018)	Hasil penelitian mengatakan bahwa diameter rotor yang semakin kecil akan mengakibatkan respons gerak <i>pitch</i> semakin besar. Hal ini dikarenakan dengan diameter yang kecil maka massa struktur rotor juga semakin kecil sehingga lebih mudah mengalami gerakan meskipun mendapatkan gaya luar yang sama. Sementara untuk gerakan lain perbedaan desain wind turbin relatif tidak berpengaruh signifikan.



Berdasarkan hasil penelitian sebelumnya, maka yang akan dibahas dalam bab ini adalah terkait analisa respon gerak struktur *barge* dari *Floating Wind Turbine* terhadap variasi bentuk *floater* untuk wilayah perairan Laut

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Turbin Angin Lepas Pantai

Turbin angin terapung, atau *floating wind turbine*, adalah jenis turbin angin lepas pantai yang dipasang di perairan dalam, menggunakan struktur apung sebagai dasar penyangganya. Konsep ini memungkinkan pemasangan turbin angin di lokasi yang jauh dari pantai, di mana potensi energi angin lebih besar. Perbedaan turbin angin terapung dengan turbin angin darat adalah cara penyangganya. Untuk turbin angin darat menggunakan sistem pondasi struktur yang tertanam di tanah dengan kedalaman tertentu, sementara turbin angin terapung, menggunakan mooring lines yang menghubungkan platform terapung dengan dasar laut (*sea bed*). Menurut (Bachynski, 2018), Struktur pendukung untuk turbin angin lepas pantai memiliki berbagai bentuk dan model, tergantung pada kedalaman air, ukuran turbin, aspek geoteknik, dan kondisi lingkungan. Di perairan dangkal (<40–60 m), struktur pendukung turbin yang sering digunakan yaitu struktur dasar *fixed* seperti *monopile*, struktur berbasis gravitasi, atau struktur *jackets*. Setiap desain turbin angin terapung memiliki kelebihan dan kekurangan yang harus diperhitungkan tergantung pada parameter lokasi pemasangan, seperti kedekatan dengan pantai, kedalaman laut, faktor lingkungan, dan karakteristik dasar laut. Turbin angin lepas pantai terdiri atas 2 jenis, yaitu *fixed support structure* dan *floating support structure*.

Fixed support structure untuk turbin angin terapung dirancang untuk memberikan stabilitas dan dukungan pada turbin di lingkungan lepas pantai. Dimana material yang digunakan harus tahan terhadap lingkungan laut yang keras, termasuk korosi dari air laut. Sedangkan *Floating Support Structure* merupakan struktur terapung yang digunakan untuk mendukung instalasi dan operasi peralatan di perairan dalam. Struktur ini seringkali digunakan untuk mendukung turbin angin terapung, panel surya terapung, pembangkit listrik tenaga gelombang, tenaga angin, atau proyek-proyek lain yang memerlukan akses ke sumber energi. Seperti yang

NV, 2021) bahwa secara umum terdapat 4 bentuk turbin angin terapung, yaitu *Spar-Buoy*, tipe *Tension-Leg Platform*, tipe *Semi-Submersible*, dan



2.1.1 Platform dan Tower

Tujuan utama *platform* ialah untuk mempertahankan turbin dalam posisi yg stabil di bagian atas permukaan air serta mengurangi pergerakan dan getaran yg ditimbulkan oleh kondisi laut. *Platform* juga memberikan ruang untuk sistem pengapungan (*ballast*) serta komponen lain yang diperlukan buat operasi turbin angin terapung.

Tower pada turbin angin terapung serupa dengan *tower* pada turbin angin darat. Ini adalah struktur vertikal yang menjulang tinggi dan menopang gondola (*nacelle*) turbin angin di atasnya. *Tower* pada turbin angin terapung dirancang dengan mempertimbangkan kestabilan struktural di atas *platform* yang terapung. Karena *platform* bisa mengalami gerakan akibat gelombang dan arus, tower harus dapat menahan beban dinamis dan menjaga posisi vertikal turbin angin. *Tower* pada turbin angin terapung dapat terbuat dari berbagai material seperti baja, beton, atau karbon tergantung pada kebutuhan desain dan kondisi lingkungan di lokasi penempatan turbin. *Tower* menopang struktur dari turbin. Semakin tinggi *tower* maka akan semakin besar angin yang bisa didapatkan. Momen tekuk dari *tower* berbanding lurus dengan tinggi tower, jika *tower* semakin tinggi maka bending momen yang terjadi akan semakin besar (Karimirad, 2014).



Gambar 2 Platform dan tower turbin terapung ITI Energy Barge

Sumber : (Jonkman et al., 2009)



2.1.2 *Blades, Nacelle, dan Hub*



Gambar 3 Model turbin NREL 5MW

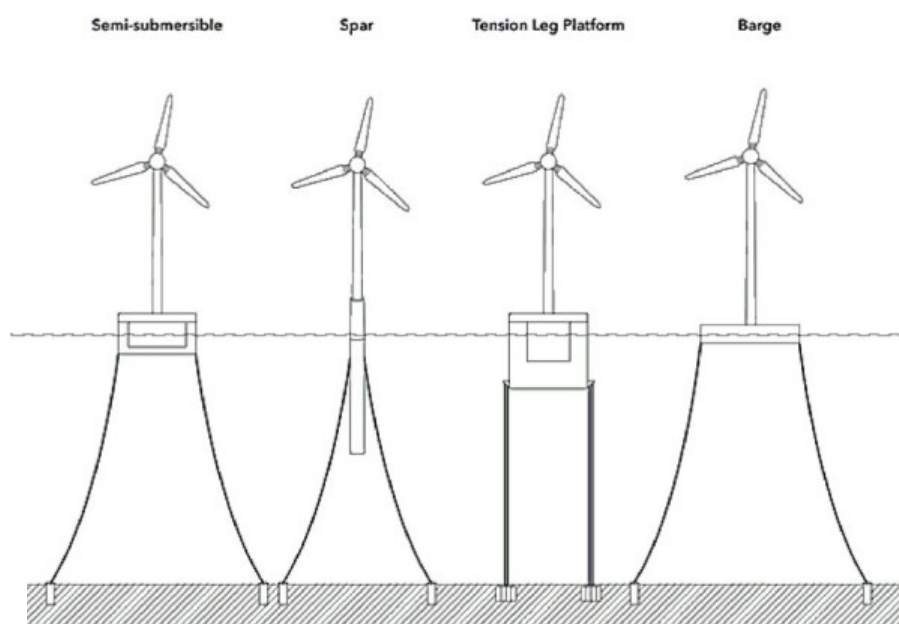
Sumber : (Jonkman et al., 2009)

Dalam turbin angin terapung, terdapat tiga komponen utama yang berperan penting dalam menghasilkan energi listrik dari angin. Komponen-komponen tersebut adalah *blade*, *nacelle*, dan *hub*. *Blades*, atau yang juga dikenal sebagai baling-baling, merupakan komponen yang paling terlihat pada turbin angin terapung. Biasanya terdapat tiga atau lebih *blades* yang terpasang pada *hub* dan membentuk seperti kipas yang besar. Fungsi *blades* adalah untuk menangkap energi angin yang mengalir dan mengubahnya menjadi energi mekanik. Gaya ini mendorong putaran *blades* secara rotasi. *Blades* biasanya terbuat dari serat komposit yang kuat dan ringan, seperti serat karbon atau serat kaca yang diperkuat dengan resin. Turbin angin sumbu horizontal dengan tiga bilah merupakan turbin yang umum digunakan. Akan tetapi, turbin angin dengan dua bilah juga digunakan. Sementara *nacelle* adalah komponen utama yang berada di atas tower turbin angin terapung. Selain itu, *Hub* yang merupakan bagian yang menghubungkan *blades* dengan rotor turbin angin. *Blades* dihubungkan ke *hub* dengan menggunakan sistem penguncian khusus yang kuat (Karimirad, 2014). *Blades*, *nacelle*, dan *hub* pada ITI *Energy Barge*, merupakan perangkat turbin berkapasitas 5MW. Secara umum, material utama yang digunakan oleh turbin angin NREL 5MW yaitu *Carbon UD (230 GPa) Prepreg*.



2.2 Floating Support Structure

Struktur apung turbin angin lepas pantai biasanya terdiri dari ponton atau *platform* yang dilengkapi dengan sistem *ballast*, sehingga turbin tetap stabil di atas permukaan air. Ada beberapa jenis struktur apung yang digunakan, seperti *platform semi-submersible*, *platform ponton*, *platform spar*, atau *platform* dengan kaki pendek (*tension leg*) yang diisi dengan air atau bahan *ballast* lainnya untuk menjaga keseimbangan. Turbin angin terapung termasuk bentuk konsep yang secara efisien dan ekonomis mampu menangkap energi dari sumber daya angin lepas pantai di laut. Turbin angin yang dipasang di atas pondasi terapung adalah bagian dari ide tersebut, yang memungkinkan produksi daya listrik di perairan laut dalam, di mana turbin angin tipe *fixed-bottom* kurang cocok secara ekonomi. Turbin angin terapung lepas pantai adalah sebuah struktur yang digunakan untuk menghasilkan energi listrik dari tenaga angin di laut. Turbin angin terapung ini dirancang untuk ditempatkan di perairan dalam, biasanya beberapa kilometer dari pantai, di mana angin laut yang kuat dan konsisten dapat digunakan untuk menghasilkan energi listrik. Keuntungan utama turbin angin terapung adalah kemampuannya untuk dioperasikan di perairan dalam yang memiliki kecepatan angin yang lebih tinggi dibandingkan dengan wilayah pesisir. Selain itu, turbin angin terapung juga lebih fleksibel dalam hal penempatan dan dapat diangkut ke lokasi yang sulit dijangkau.



Gambar 4 Jenis floater umum untuk turbin angin terapung

Sumber : DNV-ST-0119 Floating Wind Turbine Structures



2.2.1 *Semi-Submersible*

Untuk membuat pergerakan Turbin angin terapung *semi-submersible* dan tipe tongkang menjadi lebih baik, maka penggunaan material yang paling efisien adalah dengan menambah luas permukaan yang jauh dari sumbu pusat massa, daripada menambah luas keseluruhan. Beban tekan dan momen puntir pada kolom harus diambil oleh sistem konstruksi *bresing* atau di dalam kolom dan ponton dengan desain tanpa *bresing* (Subrata K. Chakrabarti, 2005). Dibandingkan dengan jenis turbin angin terapung lainnya, pemasangan *semi-submersible* relatif lebih kompleks.

2.2.2 *Spar*

Titik berat pada struktur model *Spar* ditempatkan jauh di bawah pusat titik apung, sehingga gaya pengembali akan positif dari titik berat, sehingga jauh melebihi gaya negatif dari pusat titik apung. Desain seperti itu memungkinkan area *waterplane* menjadi sangat kecil, yang secara signifikan mengurangi beban gelombang. Kerugian utama dari *spar* FWT adalah *draft* yang dalam, yang membatasi kemungkinan penyelesaian proses *mating* (menghubungkan turbin dan menara ke lambung kapal) di darat dan lokasi pemasangannya.

2.2.3 *Tension Leg*

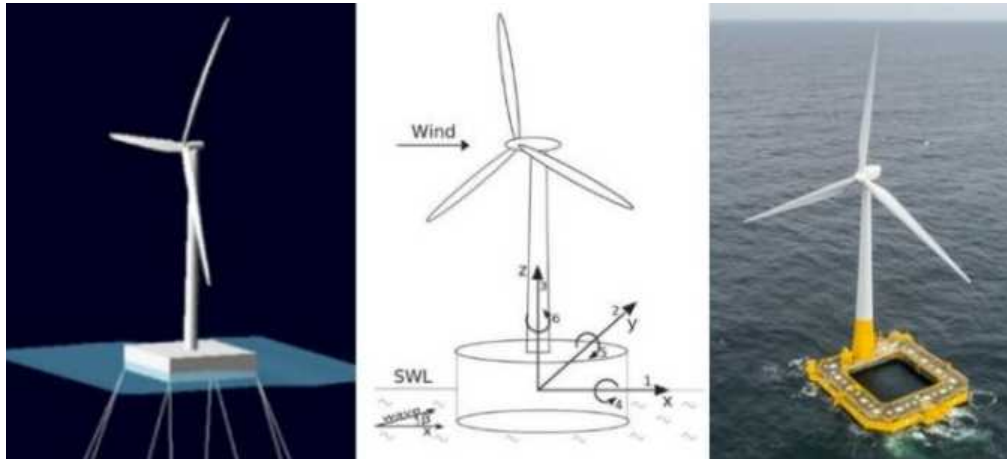
Turbin angin TLP dan TLB menawarkan keuntungan dari gerakan yang sangat terbatas, pengurangan pondasi dan potensi penghematan pada material baja di strukturnya, tetapi akan mengalami biaya tinggi dari sistem tambat, yang harus menahan beban dinamis yang besar dan harus menghindari kehilangan tegangan pada tambat. Dalam hal ini, kegagalan pada sistem *mooring* atau *anchoring* dapat menjadi terbalik karena sistem *mooring* mengembalikan stabilitas platform (Bachynski, 2018).

2.2.4 *Barge*



Tongkang (*barge*) akan mencapai stabilitas dengan menggunakan daya apung terdistribusi, memanfaatkan area bidang air yang besar. Untuk *platform* terapung, menggunakan sistem tambat *catenary*. Hal ini juga berfungsi untuk mendukung struktur yang ditinggalkan sebagai *platform* terapung pada turbin

angin. Namun, penggunaan *floater* tipe *barge* dibatasi oleh beberapa masalah, hal ini terkait pada ukuran sistem, *bending moment* di dasar menara yang tinggi, gerakan dinamis yang diinduksi oleh gelombang, dan percepatan yang terkait pada beban *nacelle* dan gelombang.



Gambar 5 Referensi bentuk floater turbin angin terapung

Sumber : (Robertson & Jonkman, 2011), (Philippe et al., 2013), (Choisnet & Vasseur, 2019)

a. *Barge* Kubus

Salah satu model floater kubus yang saat ini yang telah dikembangkan yaitu model *ITI Energy Barge*, yang memiliki bentuk persegi (*rectangular*). *ITI Energy Barge* adalah konsep awal *barge* yang dikembangkan oleh Departemen *Naval Architecture* dan *Marine Engineering* di Universitas *Glasgow* dan *Strathclyde* melalui kontrak dengan *ITI Energy*. Tongkang berbentuk bujur sangkar dan diimbangi dengan air laut untuk mencapai *draft* yang normal. Model ini cocok untuk digunakan di teluk dan laut yang tenang (Bachynski, 2018). Platform ini dirancang agar efisien secara biaya dan mudah dipasang di lokasi. Teknologi turbin angin lepas pantai terapung (FOWT) menggunakan struktur penopang yang menyerupai bangunan lepas pantai. *ITI Energy Barge* memiliki desain yang unik dan futuristik, berbentuk kubus dengan dimensi yang presisi. Bentuk kubus ini bukan hanya estetis, tetapi juga fungsional. Struktur kubus memberikan stabilitas tinggi di permukaan air, memungkinkan perangkat ini bertahan dalam kondisi laut yang beragam. *Floater* kubus umumnya memiliki bentuk yang sederhana dan dengan sisi-sisi yang datar dan ujung yang runcing. Ini membuatnya mudah diangkut dan dikelola dalam proses instalasi di ketika dipasang dilaut laut. Di bawah turbin angin terapung, pontoon kubus berfungsi sebagai



platform utama yang menopang turbin dan sistem kelistrikan yang terkait. Ini membantu menjaga kinerja turbin tetap optimal di berbagai kondisi laut.

b. *Barge Silinder*

Turbin angin model barge yang juga saat ini dikembangkan dan dipasang pada platform yang dikenal sebagai “MIT/NREL *Shallow Drafted Barge (SDB)*”. Ini adalah tongkang berbentuk silinder. Struktur yang dianggap memiliki biaya terendah setelah pertimbangan awal adalah struktur dengan konsep tongkang. Konsep ini kemudian dikembangkan menjadi *Shallow Drafted Barge (SDB)* oleh *Massachusetts Institute of Technology (MIT)* dan *National Renewable Energy Laboratory (NREL)*. Pontoon jenis ini memiliki bentuk silinder yang panjang dengan diameter tertentu. Pontoon berbentuk lingkaran/tabung silinder merupakan salah satu pilihan struktur penopang yang efektif dan dapat diandalkan untuk turbin angin terapung. Desainnya yang sederhana dan bentuk permukaannya yang melengkung memberikan area penyebaran air disekitarnya lebih luas. Bentuk melengkung ini juga mampu memberi aliran air yang lebih mulus mengalir disekitar penampang sisi lengkung dari floater silinder yang menyesuaikan bentuk lengkung tersebut, sehingga aliran air cenderung mampu mengalir dengan baik sekeliling floater.

c. *Barge Oktagonal*

Bentuk yang juga menjadi model inovasi baru saat ini, yaitu bentuk oktagonal. Ciri khas dari bentuk ini memiliki bentuk umum seperti persegi, akan tetapi pada keempat sudutnya terdapat permukaan rata. Salah satu model turbin angin lain yang saat ini menggunakan bentuk oktagonal, ialah model turbin Floatgen di Prancis dan Hibiki di Jepang. Pondasi terapung baru model oktagonal ini, dipresentasikan di *Grand Renewable Energy* tahun 2014. Sejak saat itu, turbin angin terapung telah dibangun, diuji di pelabuhan, dan akan segera digunakan di lepas pantai Prancis. Turbin angin terapung Floatgen adalah proyek turbin angin pertama dan Hibiki ialah yang kedua yang dikembangkan oleh Perusahaan BW-Ideol. Karena sifat proyek yang pada dasarnya inovatif, beberapa konsep baru



akan dan diuji (Choisnet & Vasseur, 2019). Bentuk ini juga identik dengan barge lainnya, yaitu memiliki bentuk permukaan yang simetris, sehingga luas permukaan dek utama yang seimbang dan merata.

2.3 Arah Gerak Bebas Struktur Turbin Terapung

Turbin angin terapung memiliki enam arah gerak bebas, yang sering disebut sebagai gerakan bebas enam derajat kebebasan (*six degrees of freedom*). Dan untuk menyederhanakan pengembangan studi tentang gerakan kapal atau bangunan terapung, hanya satu derajat kebebasan bergerak yang dipertimbangkan. Penyederhanaan seperti itu memungkinkan untuk memperoleh "fokus" untuk gaya dan momen gaya yang terlibat. Tetapi di laut yang terjadi sebenarnya, sebuah kapal mengalami keenam derajat kebebasan (Bhattacharyya, 1978). Sehingga beberapa arah gerak bebas dapat ditinjau secara berpasangan (*coupled*), baik dalam tinjauan penampang 2 Dimensi atau 3 Dimensi.

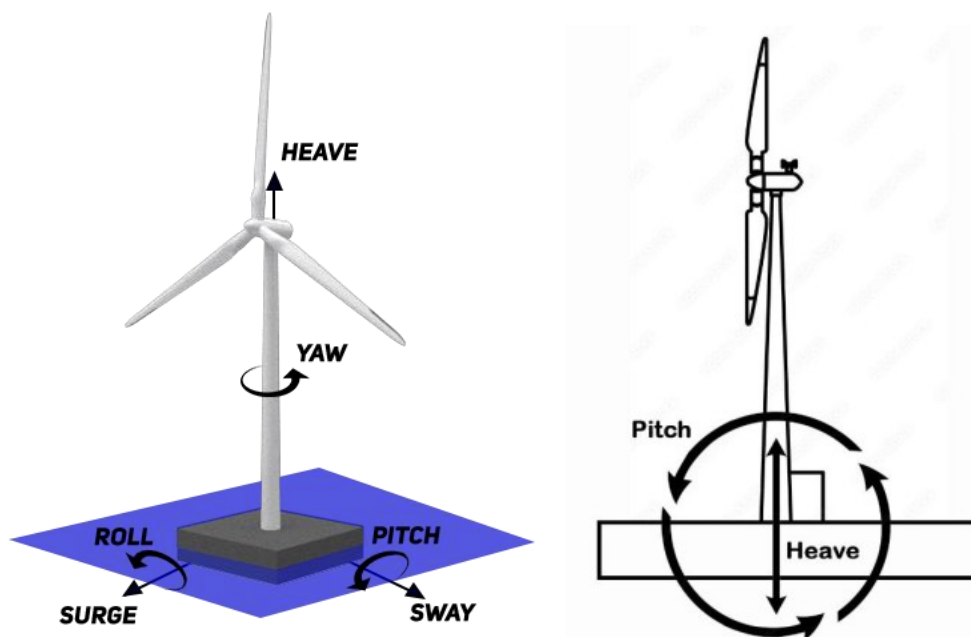
Kinerja *Floating Offshore Wind Turbine* dipengaruhi oleh perpindahan dalam enam derajat kebebasan, yang terdiri dari tiga mode gerakan translasi (*surge, sway, dan heave*) dan tiga mode gerakan rotasi (*roll, pitch, dan yaw*), seperti dapat dilihat pada Gambar 6. Gerakan pada 6 derajat kebebasan disebabkan oleh pengaruh gabungan dari lingkungan dan beban pemulihan sistem yang bekerja pada turbin angin terapung. Berikut adalah penjelasan mengenai keenam arah gerak bebas turbin angin terapung:

- a. Gerakan *yaw* (sudut rotasi), Gerakan *yaw* mengacu pada kemampuan turbin angin terapung untuk berputar mengelilingi sumbu vertikalnya. Dalam gerakan ini, turbin dapat berubah arah sudut pandang atau menghadap ke arah angin yang datang, sehingga memaksimalkan pemanfaatan energi angin.
- b. Gerakan *roll* (sudut *roll*), Gerakan *roll* merujuk pada gerakan turbin angin terapung yang melibatkan rotasi sepanjang sumbu longitudinalnya. Gerakan ini menyebabkan turbin terguling atau miring dari satu sisi ke sisi lainnya, seperti gerakan kapal yang terguling.
- c. Gerakan *pitch* (sudut *pitch*), Gerakan *pitch* adalah gerakan turbin angin terapung yang melibatkan rotasi sepanjang sumbu transversalnya. Gerakan ini memungkinkan sudut rotor turbin angin berubah untuk mengoptimalkan penangkapan energi angin tergantung pada kecepatan dan arah angin.



dan *heave* (pergerakan naik turun), Gerakan *heave* adalah gerakan vertikal turbin angin terapung. Gerakan ini terjadi sepanjang sumbu vertikal turbin dan mempengaruhi respon gerak dari performa kinerja turbin.

- e. Gerakan *sway* (pergerakan samping), Gerakan *sway* adalah pergerakan turbin angin terapung secara lateral atau ke samping. Gerakan ini sering disebabkan oleh arus atau angin lateral yang mempengaruhi turbin.
- f. Gerakan *surge* (pergerakan maju mundur), Gerakan *surge* adalah gerakan maju-mundur turbin angin terapung sepanjang sumbu longitudinalnya. Gerakan ini terjadi ketika turbin mengalami gaya dorong atau hantakan dari arus atau gelombang yang mempengaruhi pergerakan turbin maju atau mundur.



Gambar 6 Arah gerak 3 Dimensi (kiri) dan 2 Dimensi (kanan)

2.4 Dasar Analisa Respon Gerak

Dasar analisis respon gerak pada turbin angin terapung berkaitan dengan studi tentang perilaku struktural turbin angin terapung dalam menghadapi beban-beban dinamis yang diinduksi oleh angin, gelombang, arus, dan faktor lingkungan lainnya. Menurut (DNV, 2008) metode analisis simulasi domain pada bangunan lepas pantai termasuk salah satunya yaitu analisa berbasis domain frekuensi, yaitu.

2.4.1 *Frequency Domain Analysis*



ika menangani masalah di domain frekuensi, kita memperhatikan gerakan
 o kecil mengenai posisi mengambang kesetimbangan. Untuk studi
 k sistematis, mengingat banyaknya kemungkinan kombinasi kondisi

lingkungan, analisis domain waktu akan sangat memakan waktu; namun, evaluasi domain frekuensi terhadap respons sistem dapat menyediakan alat yang sederhana dan cepat untuk memenuhi persyaratan ini (ANSYS, 2022). Dalam penelitian (Zulfikar Adytia Vernanda, 2018), mengatakan bahwa jika suatu sistem linear dan memiliki beban gelombang yang hanya terdiri atas orde satu maka beban yang diterima maupun respon yang dihasilkan juga dalam bentuk linear sehingga akan mampu diberikan solusi dengan analisis dinamis berbasis ranah frekuensi (*frequency domain analysis*).

2.5 Response Amplitude Operator

Response Amplitude Operator (RAO) adalah parameter yang digunakan dalam analisis respons gerak sistem terhadap beban lingkungan seperti angin, gelombang, atau arus. RAO menggambarkan hubungan antara amplitudo respon sistem dengan amplitudo beban lingkungan pada frekuensi tertentu.

Gerakan bangunan apung terhadap *sea state* memerlukan fungsi transfer setiap komponen frekuensi beban gelombang regular yang digunakan untuk menjelaskan respon gerak bangunan tersebut. *Response Amplitude Operator* (RAO), ialah rasio ζ_a = amplitudo gerakan bangunan apung, untuk translasi dalam satuan (m) dan rotasi dalam satuan ($^\circ$) dan ζ_a = amplitudo gelombang (m). Nilai RAO dapat dicari dengan persamaan berikut ini (Firdaus et al., 2021).

$$\text{RAO} = \frac{\zeta_a}{\zeta_a} \quad (1)$$

dimana,

ζ_a = amplitudo gerak struktur (m, $^\circ$)

ζ_a = amplitudo gelombang (m)

Kemudian, dalam simulasi yang akan dilakukan terkait pada gerakan *heaving* dan *pitching*, salah satu persamaan gerak yaitu gerak *heave* (z) dalam kondisi beban regular dapat diperoleh dari persamaan menurut (Bhattacharyya, 1978). Dimana gerak *heave* pada titik yang sama untuk kondisi *steady-state* akan sebagai.

$$\zeta_a = z = z_a \cos(\omega_e t - \varepsilon) \quad (2)$$



$\varepsilon = \text{phase angle } (^\circ)$

$\omega_e = \text{encounter frequency (rad/s)}$

Sementara itu, untuk memperoleh amplitudo gerak dari sebuah struktur terapung pada gerak heave (z_a), dimana dapat diperoleh dari persamaan *amplitude of forced heaving motion*, seperti pada persamaan (3). Dari persamaan (3), terdapat komponen *static heaving amplitude* (z_{st}) yang diperoleh dari persamaan (4). Persamaan ini saling berkaitan satu sama lain, untuk memperoleh nilai amplitudo gerak *heave*.

$$z_a = z_{st} \cdot \mu_2 \quad (3)$$

$$z_{st} = \frac{F_0}{c} \quad (4)$$

dimana,

$F_0 = \text{amplitude encountering force (m)}$

$c = \text{restoring force coefficient}$

$z_{st} = \text{static heaving amplitude (m)}$

$\mu_2 = \text{magnification factor}$

Restoring force coefficient untuk gerak heave diberikan sebagai gaya apung tambahan yang bekerja pada suatu benda ketika benda tersebut tenggelam hingga draft yang lebih dalam. Dari persamaan (3) diatas, nilai μ_2 merupakan faktor magnifikasi yang dapat diartikan sebagai rasio amplitudo dalam kasus dinamis dari sebuah struktur terapung (Bhattacharyya, 1978), yang dapat diperoleh pada persamaan berikut.

$$\mu_2 = \frac{1}{\sqrt{(1 - \Lambda^2)^2 + 4k^2\Lambda^2}} \quad (5)$$

dimana,

$\Lambda = \text{tuning factor}$

$k = \text{nondimensional damping factor}$



Dari persamaan (2) diatas, dapat dilihat bahwa sudut fase/*phase angle* (ε), se dalam perhitungan respons gerak struktur terapung adalah perbedaan antara gelombang laut yang datang dan respons gerak struktur pada frekuensi

tertentu. Sudut ini mengindikasikan apakah respons mendahului atau tertinggal dari gelombang, dan dapat dilihat seperti persamaan dibawah ini.

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \quad (6)$$

dimana,

ε_1 = sudut fase antara *wave profile* dengan *heave force* akibat gelombang (0°)

ε_2 = sudut fase antara *exciting force* dan gerak *heave* ($^\circ$)

Dari persamaan diatas, untuk memperoleh sudut fase antara *exciting force* dan gerak *heave*, yaitu dengan menggunakan persamaan dibawah.

$$\varepsilon_2 = \tan^{-1} \frac{2k\Lambda}{1-\Lambda^2} \quad (7)$$

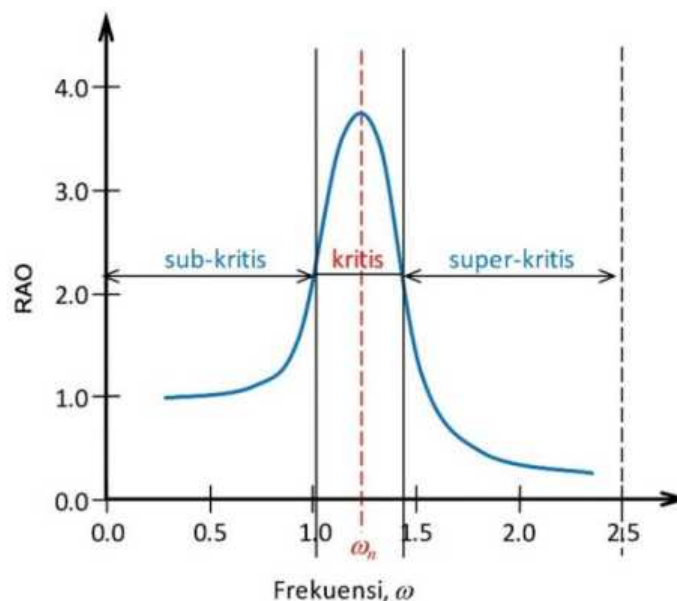
Selain itu, dari persamaan diatas dibutuhkan nilai *tuning factor* (Λ) pada gerak *heave platform*, dimana *tuning factor* adalah faktor yang digunakan untuk mengukur seberapa efektif sebuah sistem stabilisasi kapal dalam meredam gerakan oleng kapal, yang diperoleh dari persamaan berikut ini.

$$\Lambda = \frac{\omega_w}{\omega_\phi} \quad (8)$$

dimana,

ω_w = frekuensi gelombang (rad/s)

ω_ϕ = frekuensi alami (rad/s)



Jambar 7 Bentuk umum grafik respons gerakan bangunan apung

Sumber : (Djarmiko, 2012)



Mengacu pada Gambar 7, kurva *respons amplitude operator* (RAO) gerakan bangunan apung pada dasarnya dapat dibagi menjadi tiga bagian (Djatkiko, 2012):

- a. Pertama adalah bagian frekuensi rendah, atau gelombang (dengan periode) panjang, yang disebut daerah sub-kritis. Pada daerah ini bangunan laut akan bergerak mengikuti pola atau kontur elevasi gelombang yang panjang, sehingga amplitudo gerakan kurang lebih akan ekuivalen dengan amplitudo gelombang, atau disebut sebagai *contouring*.
- b. Kedua adalah daerah kritis, meliputi pertengahan lengan kurva di sisi frekuensi rendah sampai dengan puncak kurva dan diteruskan ke pertengahan lengan kurva di sisi frekuensi tinggi. Puncak kurva berada pada frekuensi alami, yang merupakan daerah resonansi, sehingga respons gerakan mengalami magnifikasi, atau amplitudo gerakan akan beberapa kali lebih besar daripada amplitudo gelombang.
- c. Ketiga adalah daerah super-kritis, yaitu daerah frekuensi tinggi, atau gelombang-gelombang (dengan periode) pendek. Pada daerah ini respons gerakan akan mengecil. Semakin tinggi frekuensi, atau semakin rapat antara puncak-puncak gelombang yang berturutan, maka akan memberikan efek seperti bangunan laut bergerak di atas air yang relatif datar. Oleh karena itu gerakan bangunan laut diistilahkan sebagai *platforming*.

2.6 Beban Gelombang Reguler

Pada perairan laut kepulauan, terdapat beberapa gaya-gaya yang akan mempengaruhi struktur bangunan terapung, salah satunya ialah gaya gelombang laut. Dan gaya gelombang laut juga termasuk dalam parameter hidrostatis. Beberapa parameter beban lingkungan yang dimiliki oleh bangunan terapung, seperti momen inersia (I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}) dan komponen stabilitas benda apung (BM, GM, KB, dan KG). Untuk menghitung momen inersia massa struktur terapung, salah satu contohnya persamaan dibawah, yaitu inersia pada sumbu x, dapat diperoleh menurut (Bhattacharyya, 1978), yaitu.

$$I_{xx} = M \times K_{xx}^2 = \int dMr_i^2 \quad (9)$$

$$= \int dM(y_i^2 + z_i^2)$$



$$r_i^2 = (y_i^2 + z_i^2)$$

dimana,

y_i = jarak transversal titik pusat massa benda ke-i terhadap sumbu benda (m)

z_i = jarak vertikal titik pusat massa benda ke-i terhadap sumbu benda (m)

M = massa struktur (kg)

K_{xx} = *radius of gyration* pada sumbu x (m)

Dari persamaan tersebut, dibutuhkan nilai radius girasi struktur pada ketiga sumbu (K_{xx}, K_{yy}, K_{zz}) dimana menurut ialah akar kuadrat dari rasio momen inersia massa terhadap massa dari suatu benda yang mengapung (Bhattacharyya, 1978), dan merupakan jarak distribusi massa ketika benda bergerak rotasional, akibat adanya momen inersia, yang dapat diperoleh menjadi persamaan berikut ini.

$$k_{xx}, k_{yy}, k_{zz} = \sqrt{\frac{I_{xx}}{M}} = \sqrt{\frac{I_{yy}}{M}} = \sqrt{\frac{I_{zz}}{M}} = \sqrt{\frac{\sum w_i (y_i^2 + z_i^2)}{\Delta}} \quad (10)$$

dimana,

w_i = berat elemen ke-i (kg)

Δ = *displacement* benda terapung (ton)

Selain itu, untuk mengetahui frekuensi alami dari sebuah struktur terapung, yang merupakan frekuensi di mana kapal cenderung bergerak secara alami tanpa adanya gaya eksternal yang signifikan. Frekuensi ini dipengaruhi oleh karakteristik fisik kapal, seperti massa dan kekakuan struktur. Dimana nilai ini dapat diperoleh dengan persamaan menurut Bhattacharyya dalam (Djatkiko, 2012), yaitu.

$$\omega_{nz} = \sqrt{\frac{k_{33}}{m_{33} + a_{33}}} = \sqrt{\frac{\rho g A_w}{m_{33} + a_{33}}} \quad (11)$$

$$\omega_{n\theta} = \sqrt{\frac{k_{55}}{I_{55} + a_{55}}} = \sqrt{\frac{\rho g \nabla GM_L}{I_{55} + a_{55}}} \quad (12)$$

dimana,

= frekuensi alami gerak *heave*, *pitch* (rad/s)

= kekakuan gerak *heave*, *pitch* (kg)

nen inersia massa untuk gerakan *pitch* (kg.m²)

ssa tambah untuk gerakan *heave* (kg)



a_{55} = momen inersia massa tambah untuk gerakan *pitch* (kg.m^2)

∇ = *volume displacement* struktur (m^3)

A_w = luas bidang penampang garis air (m^2)

Dari persamaan tersebut, terdapat parameter massa tambah yang akan digunakan untuk menghitung frekuensi alami struktur yang didalam persamaan ini terdapat *virtual mass* yang merupakan total berat antara berat struktur dengan berat tambahan, dimana salah satunya dapat dihitung dengan menggunakan persamaan menurut (Bhattacharyya, 1978), yaitu pada gerak *heave*.

$$a_z = \int_{-L/2}^{L/2} a_n dx \quad (13)$$

dimana,

a_n = *sectional added mass coefficient*

Sebelum melakukan simulasi respon gerak pada *Ansys Aqwa Hydrodynamic Diffraction*, terlebih dahulu diperoleh nilai-nilai hidrostatik. Agar sistem terapung menjadi stabil secara positif. $GM > 0$. Kemudian GM akan diibaratkan menjadi panjang tali, dan agar pendulum dapat berayun secara stabil dan kembali ke posisi semula, pusatnya harus berada di atas pendulum (Subrata K. Chakrabarti, 2005).

$$BM = \frac{I_{xx}}{\nabla} \quad (14)$$

$$GM = KB + BM - KG \quad (15)$$

dimana,

BM = tinggi titik metasentra terhadap titik tekan (m)

GM = tinggi titik metasentra terhadap titik berat (m)

KB = tinggi titik tekan terhadap lunas (m)

KG = tinggi titik berat terhadap lunas (m)

I_{xx} = *principle second moment of area* (m^4)

∇ = *volume displacement* struktur (m^3)



y Waves Theory

ori gelombang *Airy* digunakan dalam berbagai aplikasi di bidang afi, teknik pantai, dan rekayasa kelautan, seperti perencanaan struktur laut,

pelabuhan, dan studi interaksi gelombang dengan pantai. Teori gelombang *Airy* juga memperkenalkan hubungan dispersi, yang menghubungkan frekuensi gelombang dengan bilangan gelombang dan kedalaman air. Persamaan yang dapat mewakili gelombang reguler model *Airy*, dapat dilihat dibawah ini.

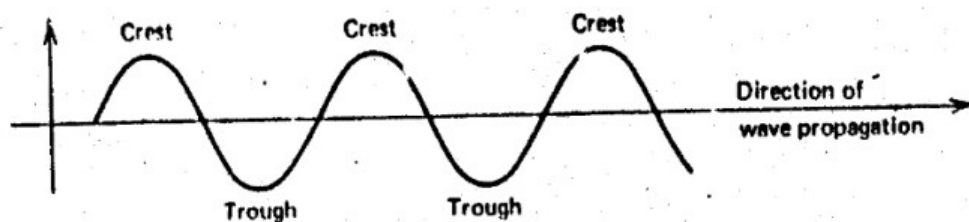
$$a = A \cos(-\omega t + kx) \quad (16)$$

dimana,

ω = frekuensi gelombang (rad/s)

k = *wave number*

Gelombang reguler model *Airy* merupakan gelombang yang mempunyai tinggi dan periode yang tetap terhadap waktu. Menurut (*Airy*, 1845) dalam penelitian (*Putra*, 2017) bahwa *Airy* memperkenalkan bentuk dari teori gelombang dengan amplitudo kecil untuk menghitung parameter-parameter gelombang.



Gambar 8 Bentuk grafis gelombang reguler

Sumber : (*Bhattacharyya*, 1978)

- Tinggi Gelombang (*Wave Height* (H_w)): Tinggi gelombang adalah perbedaan antara ketinggian puncak gelombang (*crest*) dan dasar gelombang (*trough*).
- Kecepatan Gelombang (*Wave Speed* (V_w)): Kecepatan gelombang laut dapat bervariasi tergantung pada beberapa faktor, termasuk kedalaman air, panjang gelombang, dan kecepatan angin di permukaan laut.

$$V_w = \sqrt{g \times d} \quad (17)$$

dimana,

g = percepatan gravitasi (9.81 m/s)

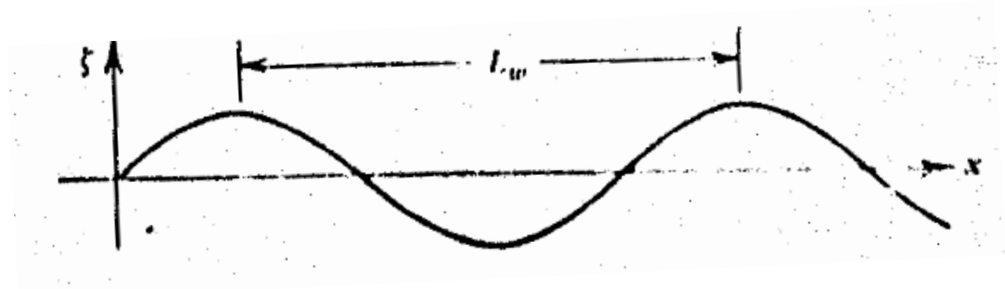
d = kedalaman laut (m)



Periode Gelombang (*Wave Period* (T_w)): Periode gelombang adalah waktu yang diperlukan oleh satu siklus gelombang untuk melalui satu titik tetap. Dalam kasus gelombang laut, ini mengacu pada interval waktu antara dua puncak gelombang berurutan. Gelombang yang digunakan dalam simulasi ini yaitu

model *Airy Wave Theory*. Gelombang Airy termasuk gelombang sinusoidal yang dibangkitkan oleh angin. Dengan menentukan periode gelombang awal dengan metode pendekatan (*hindcasting*) dari data kecepatan angin yang tersedia berdasarkan penelitian (Triatmodjo, 1999). Selain itu juga dapat diperoleh dengan rumus empiris, antara lain.

$$T_w = \sqrt{\frac{2\pi L_w}{g}} \quad (18)$$



Gambar 9 Bentuk amplitudo dan Panjang gelombang reguler

Sumber : (Bhattacharyya, 1978)

- d. Panjang Gelombang (Wave Length (L_w)): Panjang gelombang adalah jarak horizontal antara dua titik sukseksi dalam satu siklus gelombang. Panjang gelombang terkait erat dengan periode gelombang melalui kecepatan fase (kecepatan gelombang terbagi dengan periode gelombang).

$$L_w = \frac{2\pi g}{\omega_w^2} \quad (19)$$

dimana,

ω_w = frekuensi gelombang (rad/s)

g = percepatan gravitasi (9.81 m/s^2)

d = kedalaman laut (m)

- e. Amplitudo Gelombang (Wave Amplitude (ζ_0)) : Amplitudo gelombang adalah ukuran dari tingkat getaran atau ketinggian gelombang laut. Ini mengacu pada jarak vertikal antara dasar gelombang (*trough*) dan puncak gelombang (*crest*).

$$\zeta_0 = H/2 \quad (20)$$



1a,

inggi gelombang (m)

- f. Frekuensi Gelombang (*Wave Frequency* (ω_w)) : Frekuensi gelombang adalah ukuran yang digunakan untuk menggambarkan jumlah siklus atau getaran gelombang yang terjadi dalam satu unit waktu. Secara sederhana, frekuensi gelombang mengukur seberapa sering gelombang berulang dalam satu detik.

$$\omega_w = 2\pi/T \quad (21)$$

$$k_w = 2\pi \times \lambda_w \quad (22)$$

dimana,

ω_w = frekuensi gelombang (rad/s)

T = periode gelombang (s)

2.6.2 Stokes 2nd Order Wave

Dalam Teori Gelombang Linier (orde satu) hanya memperhitungkan suku pertama dari ruas kanan. Apabila diperhitungkan dua suku pertama disebut teori orde kedua, dan bila tiga suku pertama disebut teori orde ketiga, dan seterusnya. Gelombang *stokes* orde kedua, atau sering disebut sebagai *Second Order Stokes Wave*, adalah pendekatan matematis yang lebih canggih dibandingkan teori gelombang linier (Teori Gelombang *Airy*) untuk menggambarkan gelombang permukaan air. *Stokes* mengembangkan teori orde kedua untuk gelombang yang mempunyai tinggi gelombang kecil tetapi berhingga (Triatmodjo, 1999). Berikut ini persamaan yang dapat mewakili bentuk gelombang *Stokes* Orde 2, yaitu.

$$a = A \cos(-\omega t + kx) + 0.5 k A^2 \cos 2(-\omega t + kx) \quad (23)$$

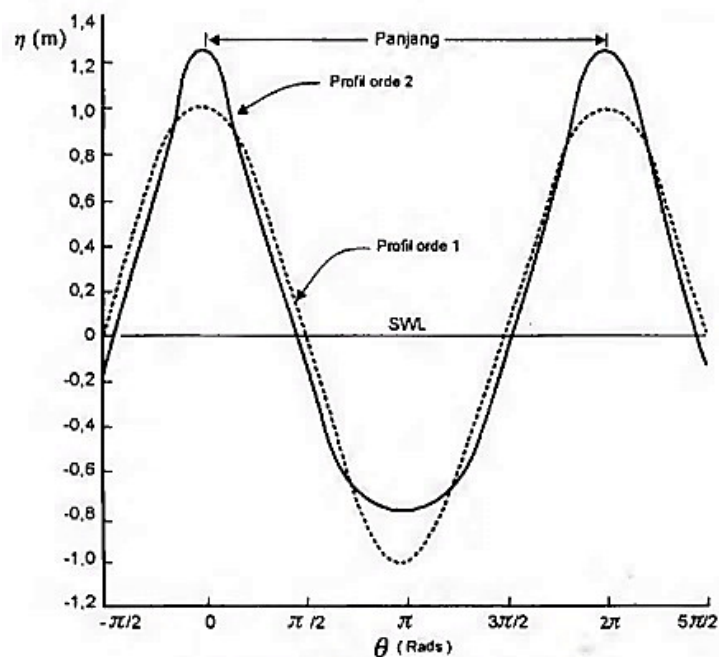
dimana,

ω = frekuensi gelombang (rad/s)

k = *wave number*

Pada Gambar 10 akan diberikan perbandingan dari bentuk profil gelombang orde satu (*Airy*) dan orde dua (*Stokes*), dimana kedua bentuk kontur tinggi dan panjang gelombang berada dalam posisi yang sama, dan dapat dilihat pada kurva seperti dibawah ini.





Gambar 10 Perbandingan teori *Airy* dan *Stokes*
Sumber : (Triatmodjo, 1999)

2.7 Gerak *Couple Heave-Pitch*

Setelah menyiapkan persamaan gerak sederhana untuk platform yang sedang naik turun, maka wajar jika pembahasan untuk analisa respon gerak diperluas ke persamaan gerak *heave* yang digabungkan. Mengingat sebuah platform mengapung di permukaan bebas dalam gelombang. Platform ini secara alami akan naik turun akibat datangnya gelombang. Namun tidak ada jaminan bahwa kedua hal ini akan independen. Oleh karena itu, perlu untuk mempertimbangkan gerakan-gerakan tersebut secara bersama-sama. Dalam buku *Dynamics of Marine Vehicles* menurut (Bhattacharyya, 1978) persamaan untuk gerak *couple heave-pitch* dituliskan dalam.

$$(m + A_z)\ddot{Z} + b\dot{Z} + cZ + d\ddot{\theta} + e\dot{\theta} + h\theta = F(t) \quad (24)$$

$$(I_{yy} + A_{yy})\ddot{\theta} + B\dot{\theta} + C\theta + D\ddot{Z} + E\dot{Z} + HZ = M(t) \quad (25)$$

dimana,

m = massa kapal (Ton)

a_z = *added mass heaving* (Ton)



d = *coupling coefficient heaving, pitching*

e = *restoring force coefficient heaving, pitching*

I_{yy} = *inertial moment coefficient heaving, pitching*

e , E = damping coefficient heaving, pitching

F = exciting force (N)

I_{yy} = momen inersia kapal pada gerak *pitching* (kg. m²)

A_{yy} = added mass pitching (Ton)

M = momen eksitasi (N)

Dari persamaan (21) dan (22), kemudian dapat diperoleh bentuk persamaan untuk respon gerak secara berpasangan (*couple*) *heave-pitch*, Persamaan gerak gabungan untuk *heave* dan *pitch* juga dapat dinyatakan dalam format matriks seperti persamaan (28).

$$z = \text{Re} \bar{Z} e^{i\omega_e t} = \text{Re} Z_a e^{i(\omega_e t + \delta)} = Z_a \cos(\omega_e t + \delta) \quad (26)$$

$$z = \text{Re} \theta e^{i\omega_e t} = \text{Re} \theta_a e^{i(\omega_e t + \varepsilon)} = \theta_a \cos(\omega_e t + \varepsilon) \quad (27)$$

$$\begin{bmatrix} m + m_{zz} & m_{z\theta} \\ m_{\theta z} & I_{yy} + I_{\theta\theta} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \ddot{z} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N_{zz} & N_{z\theta} \\ N_{\theta z} & N_{\theta\theta} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{z} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{zz} & C_{z\theta} \\ C_{\theta z} & C_{\theta\theta} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} z \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} F_z(\omega, \omega_e) e^{j(\omega_e t + \psi)} \\ \bar{M}_\theta(\omega, \omega_e) e^{j(\omega_e t + u)} \end{pmatrix} \quad (28)$$

dimana,

Z_a = amplitude gerak *heaving* (m)

θ_a = amplitude gerak *pitching* (°)

δ = fase gerak *heaving* saat gelombang dititik CG (°)

ε = fase gerak *pitching* saat gelombang dititik CG (°)

m = massa benda (kg)

z = amplitudo gerak *heave* (m)

θ = amplitudo gerak *pitch* (°)

N = *pitch damping coefficient*

Persamaan di atas menunjukkan bahwa gerak *couple* terjadi melalui aksi hidrodinamik dan hidrostatis. Semua penambahan massa dan koefisien redaman bergantung pada frekuensi osilasi. Bergerak melalui air berbeda dengan bergerak di udara. Hal ini sebagian disebabkan karena air lebih padat dan lebih kental daripada udara (yaitu redaman meningkat). Gaya ekstra yang diperlukan ini dimasukkan dalam persamaan gerak sebagai penambahan massa benda yang dikenal sebagai *added mass*.

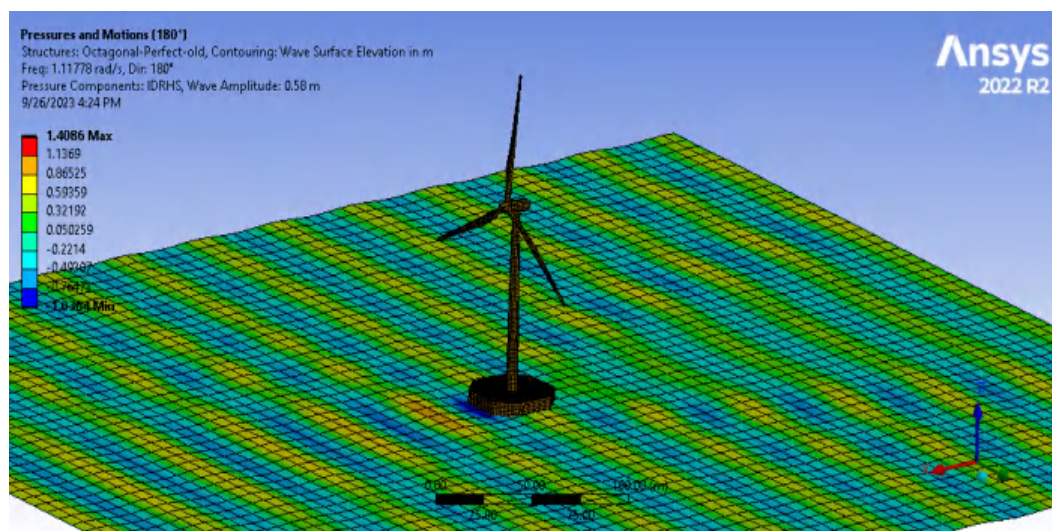


2.7 Computational Fluid Dynamics

Computational Fluid Dynamics (CFD) merupakan perangkat numerik yang diaplikasikan untuk mendapatkan perkiraan solusi dari masalah fluida dinamis dan perpindahan panas. Dalam penelitian ini akan digunakan program *Ansys Aqwa*. *Aqwa* dapat mensimulasikan pemuatan gelombang fluida hidrodinamik linier pada benda kaku terapung atau *fixed*. Hal ini dicapai dengan menggunakan teori radiasi/difraksi tiga dimensi dalam gelombang reguler pada frekuensi domain. Analisis hidrostatis dan hidrodinamik terapung bebas dalam frekuensi domain juga dapat dilakukan (ANSYS, 2022).

2.7.1 Ansys Aqwa Hydrodynamic Diffraction

Perangkat lunak ANSYS AQWA adalah rangkaian alat analisis teknik untuk menyelidiki efek gelombang, angin, dan arus pada struktur lepas pantai dan laut terapung dan *fixed*, termasuk spar, sistem *floating production storage and offloading (FPSO)*, *semi-submersible*, *tension leg platform (TLP)*, kapal, sistem energi terbarukan dan desain pemecah gelombang (ANSYS, 2022).



Gambar 11 Tampilan Panel Floater di *Ansys Aqwa*

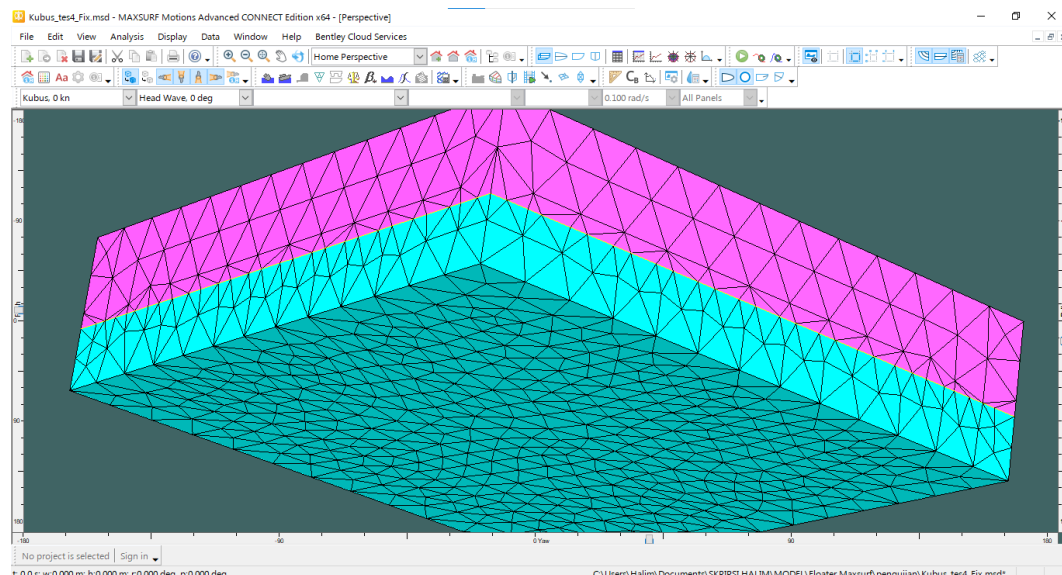
Tahapan utama *Computational Fluid Dynamics* terdiri dari tiga elemen utama. *Ansys Aqwa* menyediakan seperangkat alat untuk menyelidiki efek beban dinamis pada struktur lepas pantai dan laut terapung dan tetap. Ini termasuk, tidak terbatas pada, sistem produksi dan pembongkaran terapung, spar,



semi-submersible, sistem energi terbarukan, dan kapal. Asumsi teoritis utama dan keterbatasan teori potensial linier yang digunakan dalam *Aqwa* yaitu pertama, benda mempunyai kecepatan maju nol atau sangat kecil. Kedua, fluida *inviscid* dan tidak dapat dimampatkan, serta aliran fluida tidak berotasi. Ketiga, rangkaian gelombang reguler datang mempunyai amplitudo yang kecil dibandingkan dengan panjangnya (ANSYS, 2022). Pada penelitian ini, *ansys aqwa* yang berbasis *potential flow theory* hanya menggunakan sub program, yakni *Hydrodynamic Diffraction* yang berbasis simulasi terhadap frekuensi. Jika lebih dari satu benda yang diteliti pada simulasi *Ansys Aqwa*, efek penggabungan (*coupled*) antar benda dapat disimulasikan. Pendekatan konvolusi digunakan untuk memperhitungkan efek memori dari gaya radiasi.

2.7.2 3D Panel Method Maxsurf Motion

Metode panel adalah analisis hidrodinamik difraksi/radiasi orde pertama yang menggunakan metode elemen batas (BEM) berbasis panel konstan. Metode panel menghasilkan elemen analisisnya berdasarkan geometri dari permukaan NURBS dalam file desain *Maxsurf Modeller*. Pada analisa respon gerak di software *Maxsurf*, digunakan program *Maxsurf Motion*, yang memiliki tampilan seperti dibawah ini.



Gambar 12 Tampilan Panel Floater di *Maxsurf Motion*

Metode panel menghasilkan *Response Amplitude Operators* (RAOs) untuk derajat kebebasan: *surge*, *sway*, *heave*, *roll*, *pitch* dan *yaw*. Metode panel



berlaku untuk rentang geometri yang sangat luas. Metode Panel dan pemecah *Martec* dibatasi pada kecepatan nol. Selain mengeluarkan RAO, keluaran metode panel juga mencakup penambahan massa dan redaman hidrodinamik, gaya dan momen menarik gelombang orde pertama, gaya dan momen penyimpangan rata-rata, serta tekanan pada permukaan basah kapal (Bentley, 2018a). Pada Gambar 13 menunjukkan bentuk dari *floater* turbin angin yang telah di bagi menjadi panel-panel kecil. Sehingga dapat di berikan asumsi bahwa setiap gaya-gaya hidrodinamis yang terjadi pada floater adalah sama di tiap pembagian panel.

Permukaan Trimesh adalah permukaan linier yang terdiri dari segi segitiga. Ini bukan permukaan NURB, tidak memiliki titik kontrol, dan tidak dapat dipangkas dengan permukaan NURB. Permukaan *TriMesh* tidak dirancang mulus dan permukaannya mengikuti titik data masukan dengan tepat dan linier antar titik data. Seringkali data garis atau titik untuk kapal ada tetapi model permukaan NURB yang lengkap tidak ada. Melakukan rekayasa balik model permukaan NURB yang akurat dari data titik atau garis dapat memakan waktu dan tenaga kerja. Seringkali tingkat kehalusan yang diperoleh dari permukaan NURB tidak diperlukan dan permukaan yang terdiri dari segi segitiga linier sudah cukup. Tujuan dari permukaan *TriMesh* adalah untuk menyediakan rute cepat dari data garis atau titik ke model permukaan kapal yang dapat digunakan untuk analisis. Keakuratan representasi permukaan *TriMesh* dari bentuk lambung bergantung pada jumlah titik data yang digunakan untuk menghasilkan *TriMesh*. Karena permukaan *TriMesh* adalah permukaan linier, maka umumnya tidak cocok untuk keperluan konstruksi. Artinya, jika misalnya perluasan pelat dan keluaran geometri pengaku memanjang diharapkan diperlukan pada tahap selanjutnya dalam proses desain, maka alat Modeler dan Fitting untuk memasang permukaan NURB ke marker harus digunakan (Bentley, 2018b).

