



TUGAS AKHIR - MO234801

**OPTIMASI DESAIN SUBSTRUKTUR DEEPCWIND
FLOATING OFFSHORE WIND TURBINE DENGAN
METODE DETERMINISTIC DESIGN OPTIMIZATION**

HUDZWAH AZZAHRAWANI DARISMAN
NRP 5020201004

Dosen Pembimbing

Dr. Eng. Rudi Walujo Prastianto, S.T., M.T.
NIP 197105081997031001

Prof. Ir. Daniel Mohammad Rosyid, Ph.D.
NIP 196107021988031003

Program Studi Sarjana Teknik Kelautan
Departemen Teknik Kelautan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2024



TUGAS AKHIR - MO234801

**OPTIMASI DESAIN SUBSTRUKTUR DEEPCWIND
FLOATING OFFSHORE WIND TURBINE DENGAN
METODE DETERMINISTIC DESIGN OPTIMIZATION**

HUDZWAH AZZAHRAWANI DARISMAN
NRP 5020201004

Dosen Pembimbing
Dr. Eng. Rudi Walujo Prastianto, S.T., M.T.
NIP 197105081997031001
Prof. Ir. Daniel Mohammad Rosyid, Ph.D.
NIP 196107021988031003

Program Studi Sarjana Teknik Kelautan
Departemen Teknik Kelautan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2024



FINAL PROJECT - MO234801

**DETERMINISTIC DESIGN OPTIMIZATION
OF A SUBSTRUCTURE ON DEEPCWIND
FLOATING OFFSHORE WIND TURBINE**

HUDZWAH AZZAHRAWANI DARISMAN
NRP 5020201004

Advisor

Dr. Eng. Rudi Walujo Prastianto, S.T., M.T.

NIP 197105081997031001

Prof. Ir. Daniel Mohammad Rosyid, Ph.D.

NIP 196107021988031003

Undergraduate Study Program of Ocean Engineering
Department of Ocean Engineering
Faculty of Marine Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2024

LEMBAR PENGESAHAN

OPTIMASI DESAIN SUBSTRUKTUR DEEPCWIND *FLOATING* *OFFSHORE WIND TURBINE* DENGAN METODE *DETERMINISTIC DESIGN OPTIMIZATION*

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat
memperoleh gelar Sarjana Teknik di
Program Studi Teknik Kelautan
Departemen Teknik Kelautan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh : **HUDZWAH AZZAHRAWANI DARISMAN**

NRP. 5020201004

Disetujui oleh Tim Penguji Proposal Tugas Akhir:

1. Dr. Eng. Rudi Walujo Prastianto, S.T., M.T. (Pembimbing I)
2. Prof. Ir. Daniel Mohammad Rosyid, Ph.D. (Pembimbing II)
3. Dr. Eng. Yeyes M, S.T., M.Sc. (Penguji I)
4. Dr. Eng. Kriyo Sambodho, S.T., M.Eng. (Penguji II)

SURABAYA

JULI, 2024

APPROVAL SHEET

DETERMINISTIC DESIGN OPTIMIZATION OF A SUBSTRUCTURE ON DEEPCWIND FLOATING OFFSHORE WIND TURBINE

FINAL PROJECT

Submitted to fulfill one of the requirements
for obtain a degree in Ocean Engineering at
Undergraduate Study Program of Ocean Engineering
Department of Ocean Engineering
Faculty of Marine Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

By: **HUDZWAH AZZAHRAWANI DARISMAN**

NRP. 5020201004

Approved by Final Project Examiner Team:

1. Dr. Eng. Rudi Walujo Prastianto, S.T., M.T. (Advisor I)
2. Prof. Ir. Daniel Mohammad Rosyid, Ph.D. (Advisor II)
3. Dr. Eng. Yeyes M, S.T., M.Sc. (Examiner I)
4. Dr. Eng. Kriyo Sambodho, S.T., M.Eng (Examiner II)

SURABAYA

JULY, 2024

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa / NRP : Hudzwah Azzahrawani Darisman / 5020201004

Departemen : Teknik Kelautan FTK - ITS

Dosen pembimbing / NIP : Dr. Eng. Rudi Walujo P., S.T., M.T. / 197105081997031001


dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Optimasi Desain Substruktur DeepCWind *Floating Offshore Wind Turbine* dengan Metode *Deterministic Design Optimization*” adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 11 Juli 2024

Mengetahui

Dosen Pembimbing



(Dr. Eng. Rudi Walujo Prastianto, S.T., M.T.)

NIP. 197105081997031001

Mahasiswa,



(Hudzwah Azzahrawani Darisman)

NRP. 5020201004

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

Name of student / NRP : Hudzwah Azzahrawani Darisman / 5020201004
Department : Ocean Engineering FTK - ITS
Advisor / NIP : Dr. Eng. Rudi Walujo P., S.T., M.T. / 197105081997031001

Hereby declare that the Final Project with the title of "Deterministic Design Optimization of A Substructure on DeepCWind Floating Offshore Wind Turbine" is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing.

If in the future there is a discrepancy with this statement, then I am willing to accept sanctions in accordance with the provisions that apply at Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 11 July 2024

Acknowledged

Advisor



(Dr. Eng. Rudi Walujo Prastjanto, S.T., M.T.)

NIP. 197105081997031001

Student,



(Hudzwah Azzahrawani Darisman)

NRP. 5020201004

**OPTIMASI DESAIN SUBSTRUKTUR DEEPCWIND *FLOATING*
OFFSHORE WIND TURBINE DENGAN METODE
*DETERMINISTIC DESIGN OPTIMIZATION***

Nama / NRP : **Hudzwah Azzahrawani Darisman / 5020201004**
Departemen : **Teknik Kelautan FTK - ITS**
Dosen Pembimbing : **Dr. Eng. Rudi Walujo Prastianto, S.T., M.T.**
Prof. Ir. Daniel Mohammad Rosyid, Ph.D.

ABSTRAK

Potensi energi angin (bayu) di Indonesia memiliki prospek yang baik, utamanya di daerah lepas pantai. Perairan Arafura adalah salah satu area yang memiliki kecepatan angin hingga 15 m/s di ketinggian 100 meter, sehingga rencana instalasi turbin angin dapat dipertimbangkan. Beberapa literatur telah mengkaji berbagai performa jenis substruktur dari turbin angin yang sesuai dengan perairan di Indonesia, dengan desain performa terbaik dimiliki oleh DeepCWind *semisubmersible*. Akan tetapi, substruktur ini dianggap *overdesign* karena perancangannya menyesuaikan dengan beban lingkungan di Laut Amerika yang memiliki kondisi lingkungan yang ekstrem. Maka dari itu, studi terkait optimalisasi substruktur sesuai dengan Perairan Indonesia perlu dilakukan. Proses optimasi berfokus pada penurunan berat dengan meminimumkan *cross-sectional properties member* dengan memenuhi beberapa kendala. Optimasi menggunakan *surrogate model* sebagai fungsi eksplisit kendala yang dibentuk oleh data eksperimen. Desain eksperimen yang digunakan untuk membangun *surrogate model* berjumlah 120 desain, berdasarkan variasi ukuran desain variabel yang dibuat dengan teknik sampling *Latin Hypercube Sampling* yang merepresentasi ruang dimensi variabel secara keseluruhan. Simulasi dilakukan di *software* OpenFAST dari National Renewable Energy Laboratory untuk analisis *aero-hydro-servo-elastic* setiap desain eksperimennya. Selanjutnya, respons struktur maksimum menjadi input bagi pembentukan *surrogate model* berdasarkan metode Kriging. *Model surrogate* yang memiliki ukuran statistik R^2 di atas 0.9 dapat dikatakan valid sehingga proses optimasi dapat dilanjutkan. Desain optimum memiliki reduksi berat hingga 71% dari desain awal, dengan performa yang berada di bawah batas kendala.

Kata kunci : *Optimasi, Deterministic Design Optimization, Floating Offshore Wind Turbine, Semisubmersible, Surrogate Model*

DETERMINISTIC DESIGN OPTIMIZATION OF A SUBSTRUCTURE ON DEEPCWIND FLOATING OFFSHORE WIND TURBINE

Name / NRP : **Hudzwah Azzahrawani Darisman / 5020201004**
Department : **Ocean Engineering FTK - ITS**
Advisor : **Dr. Eng. Rudi Walujo Prastianto, S.T., M.T.**
Prof. Ir. Daniel Mohammad Rosyid, Ph.D.

ABSTRACT

Indonesia has good prospects of wind energy, especially in Arafura Sea. Several literatures have reviewed the performance of various types of wind turbine substructures that are suitable for Indonesian Seas, with the best performance design being the DeepCWind semisubmersible. However, this substructure is considered overdesigned because its design is adjusted to the environment in the American Sea which has extreme environmental conditions. Therefore, a study related to substructure optimization according to environment of Indonesian Seas needs to be carried out. The optimization process focuses on reducing weight by minimizing the *cross-sectional* properties of *members* by meeting several constraints. The design of experiments used to build the *surrogate model* consisted of 120 designs, based on variations created by the Latin Hypercube Sampling technique which represents the overall dimension space of variable design. Simulations are carried out in OpenFAST for aero-hydro-servo-elastic analysis of each design of experiments. Furthermore, the maximum structural responses of each design of experiments are created to construct the *surrogate model* based on the Kriging method. The *surrogate models* have R^2 above 0.9, so that the *surrogate models* are valid. Based on optimization with sequential quadratic programming (SQP) as the solver, the optimum design has a weight reduction of 71% from the initial design, with performance below the constraint limit.

Keywords : Optimization, Deterministic Design Optimization, Floating Offshore Wind Turbine, Semisubmersible, *Surrogate Model*

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.

Segala puji bagi Allah SWT yang telah *memberikan* kesempatan dan kelancaran bagi saya, sehingga dapat menyelesaikan tugas akhir ini sebagai persyaratan untuk menyelesaikan perkuliahan di Departemen Teknik Kelautan FTK ITS. Berkat rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan penelitian saya yang Berjudul “Optimasi Desain Substruktur DeepCWind *Floating Offshore Wind Turbine* Dengan Metode *Deterministic Design Optimization*”.

Penulis menyusun tugas akhir ini dalam rangka memenuhi persyaratan kelulusan mencapai gelar sarjana (S-1) pada jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Penulis menyadari bahwa masih terdapat ketidaksempurnaan dalam pengerjaan dan penyusunan proposal ini. Oleh karena itu, penulis membuka diri terhadap kritik dan saran yang membangun dari pihak lain.

Surabaya, 11 Juli 2024

Hudzwah Azzahrawani Darisman

NRP. 5020201004

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	ii
APPROVAL SHEET.....	iii
PERNYATAAN ORISINALITAS	iv
STATEMENT OF ORIGINALITY	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
KATA PENGANTAR.....	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan.....	4
1.4 Manfaat.....	4
1.5 Batasan Masalah.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Studi Literatur.....	6
2.2 Dasar Teori	7
2.2.1 Turbin Angin.....	7
2.2.1.1 Komponen Utama Turbin Angin.....	9
2.2.1.2 Substruktur Turbin Angin.....	11
2.2.1.3 Sistem Tambat	13
2.2.2 <i>Floating Offshore Wind Turbine</i>	14
2.2.2.1 Pemilihan Jenis Substruktur FOWT	14
2.2.2.2 <i>DeepCWind Platform</i>	15
2.2.3 Gelombang Acak	17
2.2.4 Spektrum Gelombang	18
2.2.5 Respons Spektra.....	19
2.2.6 Gerakan Dinamis Turbin Angin Lepas Pantai.....	20
2.2.7 Analisis <i>Time Domain</i>	22
2.2.8 OpenFAST	22
2.2.9 Optimasi.....	23
2.2.9.1 Metode Sequential Quadratic Programming	24

2.2.10	<i>Surrogate model</i>	25
2.2.10.1	Desain Eksperimen (<i>Design of Experiments/DoE</i>)	26
2.2.10.2	<i>Latin Hypercube Sampling</i>	27
2.2.10.3	Metode Kriging	27
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		29
3.1	Metode Penelitian	29
3.2	Prosedur Penelitian	30
3.2.1	Studi Literatur	30
3.2.2	Pengumpulan Data	31
3.2.2.1	Data Struktur	31
3.2.2.2	Data Lingkungan	32
3.2.3	Pemodelan Substruktur Desain Awal	32
3.2.4	Validasi Model.....	33
3.2.5	<i>Sampling</i> pada Ruang Desain Variabel.....	33
3.2.6	Penyesuaian Parameter Hidrostatik tiap <i>Sample Point</i>	34
3.2.7	Simulasi Dinamis Aero-Hydro-Servo-Elastic.....	34
3.2.8	Pembentukan <i>Surrogate model</i>	34
3.2.9	Optimasi Desain.....	35
3.2.9.1	Model Optimasi	35
3.2.9.2	Kendala Optimasi	36
3.2.9.3	Variabel Desain	37
3.2.10	Kesimpulan	37
BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN		38
4.1	Pemodelan Substruktur pada MOSES	38
4.2	Validasi Model Substruktur.....	42
4.3	Penentuan Desain Eksperimen	44
4.4	Penyesuaian Daya Apung Struktur.....	45
4.4.1	Penerapan Prinsip Archimedes	45
4.4.2	Perhitungan Daya Apung pada Dimensi Tereduksi.....	46
4.5	Pemodelan Struktur DeepCWind	50
4.5.1	Pemodelan Substruktur pada MOSES	51
4.5.2	Pemodelan Substruktur pada OrcaFlex.....	51
4.5.3	Pemodelan Struktur pada OpenFAST.....	54
4.5.3.1	ElastoDyn	55
4.5.3.2	AeroDyn dan ServoDyn	55
4.6	Analisis Respons Substruktur	55

4.7	Respons Maksimum tiap Desain Eksperimen	58
4.8	Validasi <i>Surrogate model</i>	61
4.8.1	Metode Kriging	61
4.8.2	Validasi Model	62
4.9	Optimasi Desain Berbasis <i>Surrogate model</i>	64
4.10	Desain Optimum	66
4.11	Performa Desain Optimum	68
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		69
5.1	Kesimpulan	69
5.2	Saran	69
DAFTAR PUSTAKA		70
LAMPIRAN A DESAIN EKSPERIMEN		73
LAMPIRAN B MODEL DEEPCWIND (MOSES)		77
LAMPIRAN C SKRIP OPENFAST		82
LAMPIRAN D <i>MAXIMUM RESPONSE VALUE</i> (DATA EKSPERIMEN)		95
LAMPIRAN E SKRIP OPTIMASI (MATLAB)		99
LAMPIRAN F DATA FABRIKASI		106
UCAPAN TERIMA KASIH		108
BIODATA PENULIS		109

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Perkembangan ukuran turbin angin dalam 20 tahun (Berkeley Lab, 2016)	8
Gambar 2.2 Komponen utama pada turbin angin (Wind Energy Technologies, 2018).....	9
Gambar 2.3 Jenis substruktur turbin angin lepas pantai (a) <i>semisubmersible</i> , (b) <i>barge</i> , (c) <i>spar</i> , (d) <i>tension-leg platform</i> (BVG Associates, 2023).....	12
Gambar 2.4 Rincian CAPEX berbagai jenis substruktur FOWT (James & Ros, 2015).....	14
Gambar 2.5 Sketsa struktur DeepCWind (a) tampak atas, (b) tampak samping	16
Gambar 2.6 Superposisi gelombang tak hingga (Djatkiko, 2012).....	17
Gambar 2.7 Transformasi RAO menjadi spektra respons (Djatkiko, 2012)	20
Gambar 2.8 Komputasi Coupled Simulation pada OpenFAST (Jonkman & Buhl, 2007)	23
Gambar 2.9 Visualisasi dalam proses optimasi mencapai nilai minimum berdasarkan metode SQP dalam 3 dimensi dan 2 dimensi	25
Gambar 2.10 Visualisasi <i>model surrogate</i> pada ruang 3 dimensi.....	26
Gambar 2.11 Sebaran desain eksperimen dari berbagai teknik sampling.....	27
Gambar 2.12 Pembacaan point pada metode Kriging.....	28
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian.....	29
Gambar 3.2 Tampilan LHS DoE Generator di MATLAB.....	33
Gambar 4.1 Model <i>Semisubmersible</i> DeepCWind Tampak Isometrik.....	38
Gambar 4.2 Grafik RAO pada (a) <i>surge</i> , (b) <i>sway</i> , (c) <i>heave</i> , (d) <i>roll</i> , (e) <i>pitch</i> , (f) <i>yaw</i>	39
Gambar 4.3 Grafik validasi koefisien <i>added mass</i> oleh Albasyir (2023)	42
Gambar 4.4 Grafik validasi koefisien <i>damping</i> oleh Albasyir (2023).....	43
Gambar 4.5 Input distribusi variabel desain pada LHS DoE Generator di MATLAB	44
Gambar 4.6 Ilustrasi Hukum Archimedes	45
Gambar 4.7 Posisi <i>Ballast Water</i>	46
Gambar 4.8 <i>Static calculation</i> pada OrcaFlex	53
Gambar 4.9 Visualisasi <i>semisubmersible</i> pada OrcaFlex	53
Gambar 4.10 Konfigurasi sistem tambat.....	54
Gambar 4.11 Coupling antar modul OpenFAST	54
Gambar 4.12 Respons gerak substruktur <i>time domain</i>	56
Gambar 4.13 Sebaran respons maksimum tiap desain eksperimen	59

Gambar 4.14 Validasi R^2 <i>model surrogate</i> yang dibangun dari performa tiap desain eksperimen pada model (a) perpindahan <i>surge</i> , (b) perpindahan <i>pitch</i> , (c) perpindahan tower-top fore-aft, (d) perpindahan tower-top pitch, (e) tegangan member, (f) gaya tarik tali tambat.	62
Gambar 4.15 Proses Iterasi pada Optimasi	65
Gambar 4.16 Ilustrasi reduksi dimensi (a) tampak atas, (b) OD <i>brace</i> , (c) OD <i>column</i> , (d) OD <i>heave plate</i>	67

DAFTAR TABEL

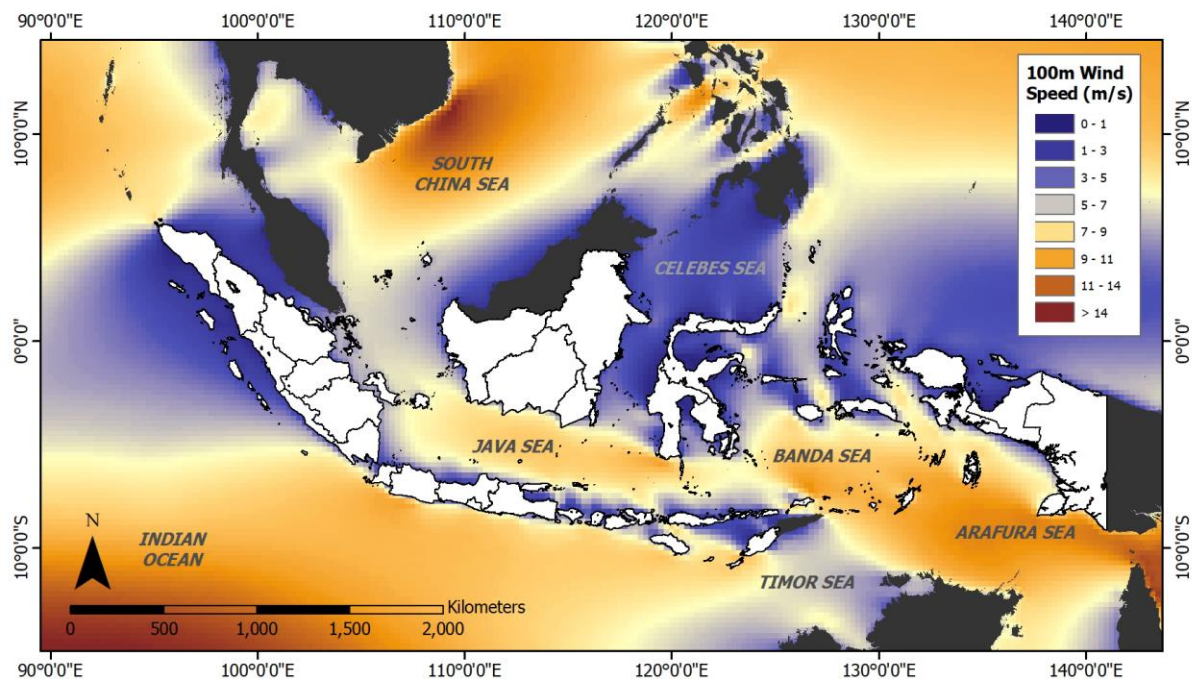
Tabel 2.1 Perhitungan <i>mooring line</i>	13
Tabel 2.2 Pertimbangan teknis FOWT (James & Ros, 2015)	14
Tabel 3.1 Dimensi Utama <i>Platform Semisubmersible DeepCWind</i>	31
Tabel 3.2 Parameter Utama pada Struktur DeepCWind.....	31
Tabel 3.3 Properti Tower DeepCWind	32
Tabel 3.4 Properti <i>Member</i> pada <i>Semisubmersible DeepCWind</i>	31
Tabel 3.5 Properti pada Sistem Tambat DeepCWind.....	32
Tabel 3.6 Ketentuan <i>constraints</i>	36
Tabel 3.7 Variabel desain pada optimasi	37
Tabel 4.1 Parameter Hidrostatik Substruktur	38
Tabel 4.2 Validasi parameter hidrostatik	43
Tabel 4.3 Nilai MAPE parameter hidrodinamis antara model dengan penelitian terdahulu ...	43
Tabel 4.4 Hasil perhitungan panjang brace (desain eksperimen no.1)	47
Tabel 4.5 Hasil perhitungan volume <i>steel</i> (desain eksperimen no.1)	48
Tabel 4.6 Perhitungan volume tercelup (desain eksperimen no.1).....	49
Tabel 4.7 Properti Tali Tambat.....	52
Tabel 4.8 Parameter input pada ElastoDyn	55
Tabel 4.9 RMS dan nilai maksimum dari 6 gerak DOF	58
Tabel 4.10 Persentase reduksi desain optimum tiap variabel desain	65
Tabel 4.11 Desain optimum sesuai kesediaan fabrikasi	66
Tabel 4.12 Perbandingan desain awal dan desain optimum	67
Tabel 4.13 Performa desain optimum dibandingkan dengan desain awal.....	68

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pemerintah Indonesia menetapkan Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik 2021-2030 dengan arahan kerja *memberdayakan* pemanfaatan energi baru terbarukan hingga 51,6% dari total penggunaan bauran energi. Energi angin merupakan salah satu energi baru terbarukan yang belum dimanfaatkan secara optimal, dengan persentase pemanfaatan energi angin keseluruhan sebesar 1,5% (Kementerian ESDM, 2021). Padahal, menurut data dari ESMAP (2021), total potensi energi angin di Indonesia mencapai 277 GW.



Gambar 1.1 Pemetaan kecepatan angin pada ketinggian 100 m (ECMWF ERA5, 2023)

Indonesia terletak pada daerah ekuator sehingga memiliki kecepatan angin yang lebih rendah dibandingkan dengan belahan bumi yang lain. Gambar 1.1 menunjukkan nilai dari kecepatan angin pada ketinggian 100 meter di berbagai wilayah di Indonesia berdasarkan data sekunder dari ECMWF ERA5 (2023). Pada gambar tersebut, terlihat bahwa hanya beberapa daerah yang memiliki potensi pemanfaatan angin. Hal ini disebabkan karena turbin angin memerlukan kecepatan awal operasi (*cut-in speed*) di atas 4 m/s. Oleh karena itu, dapat

disimpulkan bahwa terdapat banyak wilayah di Indonesia yang tidak memenuhi kriteria lokasi instalasi turbin angin (Hidayat, 2022).

Karakteristik angin di daratan dan lepas pantai memiliki energi yang berbeda. Angin di darat memiliki nilai yang fluktuatif, berbeda dengan karakteristik angin di lepas pantai yang berhembus langsung tanpa penghalang dari topografi permukaan dan bangunan di sekitarnya. Hal ini menjadikan daya keluaran turbin angin di darat lebih rendah daripada daya keluaran turbin angin lepas pantai (Desalegn et al., 2023). Selain itu, pengoperasian turbin angin menimbulkan polusi suara sehingga mengganggu aktivitas publik, terlebih apabila turbin berlokasi di daerah pemukiman. Di sisi lain, penggunaan turbin angin lepas pantai memiliki berbagai keuntungan, antara lain tidak bersinggungan secara langsung dengan manusia dan metode transportasi struktur yang tergolong mudah (Hidayat, 2022).

Instalasi turbin angin lepas pantai berefisiensi tinggi memiliki potensi pada perairan lepas pantai dengan kedalaman lebih dari 60 meter (ESMAP, 2021). Pada kedalaman tersebut, struktur terpancang untuk mengakomodasi kebutuhan *tower* turbin tidak lagi efisien dari segi ekonomi, sehingga pengembangan struktur terapung dikaji untuk memenuhi kebutuhan tersebut. Berdasarkan data dari James dan Ros (2015), biaya pembangunan platform dan sistem turbin serta instalasinya menempati hingga separuh dari *capital expenditure* (CAPEX) turbin angin lepas pantai. Pada jenis *floating structure* SPAR dan TLP, biaya manufaktur platform bernilai lebih rendah daripada manufaktur *semisubmersible*. Akan tetapi, dari segi instalasi dan *maintenance*, struktur *semisubmersible* memiliki biaya yang sangat murah dibandingkan struktur lainnya, hingga dua kali lipat. Oleh karena terbatasnya perubahan metode instalasi dan *maintenance*, maka manufaktur struktur dapat diubah untuk menekan biaya CAPEX turbin angin lepas pantai. Biaya manufaktur struktur tereduksi secara linear dengan penurunan berat struktur. Maka dari itu, diperlukan pengkajian ukuran struktur *semisubmersible* yang efektif sehingga berat struktur dapat diminimumkan.

Performa dari struktur *floating offshore wind turbine* sangat dipengaruhi oleh gaya eksternal, utamanya dari angin dan gelombang. Pada analisis hidrodinamis, penggunaan struktur DeepCWind dibandingkan dengan beberapa struktur *semisubmersible* lainnya (VolturnUS dan HiveWind) telah dikaji oleh Albasyir (2023). Penelitian tersebut menyebutkan bahwa struktur DeepCWind memiliki gaya *viscous drag* yang paling besar dikarenakan konfigurasi strukturnya yang memiliki banyak *brace* sehingga memiliki efek redaman yang tinggi. Selain itu, studi tersebut juga menyatakan bahwa DeepCWind memiliki nilai frekuensi

getar dan amplitudo getar yang lebih rendah sehingga dapat disimplifikasi pada beban siklis *fatigue* yang rendah. Dengan hal tersebut, DeepCWind memiliki simpangan daya keluaran yang lebih kecil sehingga cukup stabil ketika memproduksi daya keluaran/energi listrik.

Substruktur *semisubmersible* pada DeepCWind didesain oleh National Renewable Energi Laboratory. Desain substruktur ini mengacu pada pembebanan hidrodinamis di lingkungan Amerika yang memiliki kondisi lingkungan yang tergolong ekstrem, sehingga apabila diaplikasikan di Indonesia akan bersifat *overdesign*. Menanggapi hal tersebut, diperlukan adanya penyesuaian substruktur berdasarkan karakteristik beban lingkungan di perairan Indonesia sehingga struktur dapat direduksi dimensinya tetapi tetap beroperasi dengan baik.

Maka dari itu, penelitian ini akan melakukan studi optimalisasi dimensi substruktur DeepCWind untuk menurunkan berat struktur yang linear terhadap penurunan biaya CAPEX. Penelitian dalam Tugas Akhir ini akan mereduksi dimensi OD dan *thickness* secara deterministik dari *column*, *heave plate*, dan *brace*. Variabel desain yang ditentukan antara lain variasi *outside diameter* dan *thickness* dari masing-masing *member* dengan tujuan untuk meminimumkan berat struktur yang secara tidak langsung mempengaruhi biaya manufaktur struktur tanpa melebihi batasan dari aspek gerakan struktur, perpindahan *tower-top*, tegangan struktur, dan gaya tali tambat. Desain eksperimen yang dilakukan pada penelitian akan divariasikan dengan metode *Latin Hypercube Sampling* sehingga distribusi variasi dari variabel desain akan menyebar secara merata dalam ruang desain variabel. Analisis dalam penelitian ini meliputi analisis hidrodinamis struktur *semisubmersible*, analisis aerodinamis dari *tower* dan bilah turbin yang dikenai beban angin, dan analisis *servo-elastic* yang mempengaruhi defleksi bilah turbin dan gerak *hub* turbin, yang dianalisis secara *coupling* menggunakan *software* OpenFAST. Selanjutnya, respons-respons struktur yang diperoleh dari komputasi *finite element method* akan menjadi input pembentukan *surrogate model* untuk menyederhanakan proses komputasi numerik yang bersifat mahal. Data eksperimen akan menjadi basis dari *training data* dan *testing data* pada *machine learning*. Model surrogate yang terbentuk akan divalidasi berdasarkan nilai R^2 . Apabila model surrogate telah memenuhi kriteria validasi maka model dapat dilanjutkan sebagai input dalam proses optimasi. Dimensi struktur dioptimasi dengan konstrain antara lain gerakan struktur, tegangan struktur, serta gaya tarik tali tambat. Studi dalam tugas akhir ini diharapkan menjadi referensi terkait pengembangan *wind turbine* dalam segi praktikal dan ekonomikal bagi peneliti atau insinyur relevan.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang akan dikaji dalam penelitian Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana model optimasi dimensi berbasis *surrogate model* dengan fungsi objektif menurunkan berat pada substruktur DeepCWind?
2. Bagaimana desain optimal dari *outside diameter* (OD) dan *thickness* (t) pada *column*, *heave plate*, dan *brace* pada substruktur DeepCWind?
3. Bagaimana performa struktur DeepCWind dengan variabel desain yang optimal?

1.3 Tujuan

Tujuan penelitian Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut.

1. Mengembangkan *surrogate model* yang mewakili *outside diameter* dan *thickness* dari *column*, *heave plate*, dan *brace* pada analisis aero-hydro-servo-elastic meninjau gerakan struktur, kekuatan struktur, dan gaya tarik tali tambat struktur.
2. Mengetahui desain optimal dari *outside diameter* dan *thickness* dari *column*, *heave plate*, dan *brace* pada struktur *semisubmersible* DeepCWind mempertimbangkan gerakan struktur, stabilitas struktur, kekuatan struktur, serta gaya tarik tali tambat struktur yang optimal.
3. Mengetahui respons struktur DeepCWind yang telah dioptimasi pada kondisi lingkungan di Perairan Arafura

1.4 Manfaat

Manfaat yang diharapkan dari penelitian Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut.

1. Dapat memperoleh pertimbangan desain dan pengaruh ukuran pada substruktur *semisubmersible floating offshore wind turbine*.
2. Dapat menjadi rujukan literatur terhadap implementasi struktur *floating offshore wind turbine*.

1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah yang diterapkan dalam penelitian Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut.

1. Data lingkungan berada pada perairan Arafura pada kedalaman 200 meter.

2. Referensi rujukan data utama struktur *semisubmersible* DeepCWind diperoleh dari laporan oleh National Renewable Energy Laboratory.
3. Beban lingkungan yang bekerja pada struktur adalah beban gelombang, beban arus, dan beban angin.
4. Optimasi desain dibatasi dengan mempertimbangkan aspek gerakan struktur translasional dan rotasional, kekuatan struktur, dan gaya tarik tali tambat.
5. Angin diasumsikan *steady flow* dan selalu berhembus tegak lurus luasan bilah turbin (*upwind*).
6. *Marine growth* dan kelelahan struktur tidak menjadi pertimbangan dalam penelitian ini.
7. *Machine learning* yang digunakan adalah metode Kriging, sedangkan optimasi akan menggunakan *Sequential Quadratic Programming*.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Studi Literatur

Seiring dengan meningkatnya pengaplikasian turbin angin lepas pantai, Vernanda (2018) dan Albasyir (2023) melakukan penelitian mengenai struktur turbin angin lepas pantai yang sesuai dengan kondisi perairan Indonesia. Penelitian tersebut menyatakan bahwa jenis struktur yang potensial digunakan di Indonesia adalah turbin angin berkemampuan 5 MW dengan jenis penopang *semisubmersible*. Penelitian tersebut mengkaji beberapa jenis *semisubmersible* turbin angin lepas pantai dan membandingkan *output* hidrodinamis serta daya yang dihasilkan dari beberapa turbin. Struktur *semisubmersible* DeepCWind merupakan struktur yang lebih unggul dibandingkan struktur lainnya karena memiliki gaya redaman paling tinggi serta daya keluaran listrik yang memiliki simpangan terkecil sehingga dianggap lebih stabil. Oleh karena itu, diperlukan studi implementasi lebih lanjut dari berbagai aspek.

Salah satu aspek yang menjadi fokus utama dalam investasi energi terbarukan adalah modal inti atau *Capital Expenditure* (CAPEX). James & Ros (2015) melakukan analisis sensitivitas terhadap faktor urgensi dan faktor biaya dari turbin angin lepas pantai. Hasil analisis tersebut menyatakan bahwa aspek manufaktur struktur menjadi aspek terpenting pertama untuk dilakukan optimalisasi, disusul dengan aspek instalasi dan *controlling system*. Pada pembangunannya, biaya dari manufaktur pembangunan struktur *semisubmersible* menempati 41% dari total seluruh komponen turbin angin lepas pantai, yaitu mencapai 3000€/ton sehingga diperlukan pengoptimalisasian berat struktur yang linear dengan penurunan biaya manufaktur struktur.

Dalam rangka optimalisasi biaya struktur turbin angin lepas pantai, Zhou et al. (2021) melakukan optimasi dengan *objective function* menurunkan biaya CAPEX dengan mengecilkan dimensi struktur *semisubmersible* pada turbin angin lepas pantai. Analisis sensitivitas dilakukan dengan memvariasikan beberapa dimensi *hull* dan parameter dari tali tambat. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa modifikasi besar jari-jari diameter *column* struktur berpengaruh signifikan terhadap biaya manufaktur dan gerakan *surge* struktur, sedangkan modifikasi jarak antar *column* berpengaruh signifikan terhadap gerakan *pitch* struktur.

Penelitian dari Mas-Soler et al. (2022) melakukan studi optimasi dengan *multi-objective genetic algorithm* dengan meminimalkan biaya struktur dan memaksimalkan percepatan

horizontal di *nacelle*. Beberapa parameter yang berpengaruh antara lain *outer diameter column*, tinggi *draft*, tinggi *pontoon*, dan jarak antar *column*. Di sisi lain, Liu et al. (2022) melakukan penelitian mengenai optimasi parameter struktural pada struktur turbin angin lepas pantai VoltornUS-S. Studi ini dilakukan dengan memvariasikan *outer diameter* dari *column* dan jarak antar *column* yang mempengaruhi berat struktur keseluruhan. Hasil dari penelitian ini menyatakan bahwa variasi parameter struktural tersebut dapat mempengaruhi stabilitas, displasemen, dan gaya hidrodinamis struktur, khususnya pada *surge*, *pitch*, dan *heave*. Setelah dilakukan optimasi pemilihan struktur, variasi yang digunakan adalah struktur dengan dimensi jarak antar *column* sebesar 105% dari desain awal VoltornUS-S dan *outer diameter column* sebesar 95% dari desain awal VoltornUS-S. Struktur turbin angin modifikasi pada kondisi operasi menurunkan gerakan *surge*, *sway*, *pitch*, *roll*, dan *yaw*, serta gaya *drift* dan momen struktur secara signifikan.

Berdasarkan penelitian-penelitian terdahulu yang telah ditinjau dan dipelajari, penulis menyadari bahwa urgensi studi terkait optimasi struktur *semisubmersible* DeepCWind meninjau bagian substrukturnya perlu dikaji lebih lanjut. Penentuan *design variable* dan *constraint* untuk mencapai *objective function* berupa minimalisasi berat struktur linear dengan biaya manufaktur akan dikaji berdasarkan parameter yang telah digunakan pada penelitian terdahulu. Analisis akan dilakukan dengan melakukan pemodelan numerik berbasis aero-hidro-servo-elastis pada *software* OpenFAST. Output hidrodinamis terkait akan dilakukan verifikasi sebagai prasyarat desain awal. Dimensi berdasarkan hasil optimasi yang memenuhi konstrain berlaku menjadi desain akhir modifikasi yang dipilih dalam penelitian ini. Oleh karena itu, penulis mengusulkan judul Tugas Akhir dengan topik optimasi desain struktur *semisubmersible* pada DeepCWind *floating offshore wind turbine* dengan metode *deterministic design optimization*.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Turbin Angin

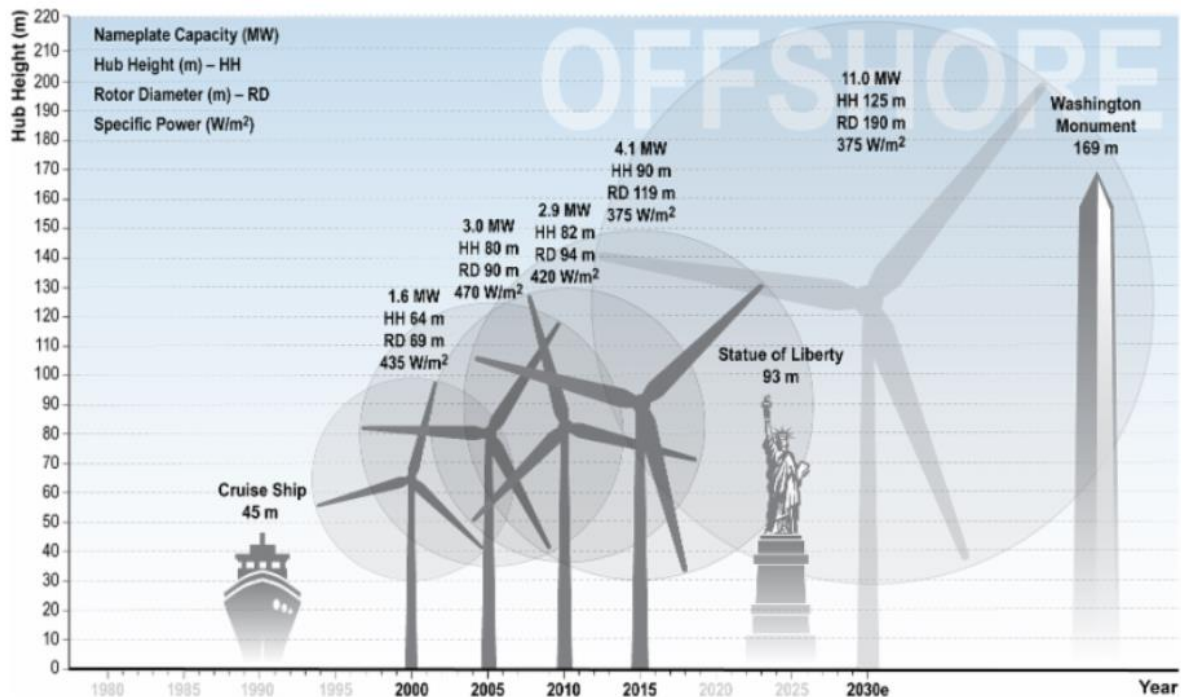
Energi angin menjadi salah satu energi terbarukan yang paling efisien dan dapat diandalkan. Pemanfaatan energi angin sudah tersebar di berbagai negara untuk meningkatkan produksi energi bersih dunia. Turbin angin merupakan struktur yang dapat mengonversi energi angin menjadi energi listrik. Mekanisme struktur ini memanfaatkan pergerakan bilah turbin yang dikenai energi kinetik angin menjadi energi mekanik di dalam rotor turbin kemudian diubah menjadi energi listrik (Desalegn et al., 2023).

Daya yang dihasilkan oleh energi angin merupakan turunan dari fungsi energi, di mana terdiri dari kecepatan angin kubik, densitas udara, serta luas penampang bilah turbin, sebagaimana tertulis pada Persamaan 2.1 dan 2.2. Semakin besar nilai luas penampang bilah turbin, maka semakin besar pula daya yang dihasilkan oleh turbin.

$$E_K = \frac{1}{2} m v^2 \quad (2.1)$$

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (2.2)$$

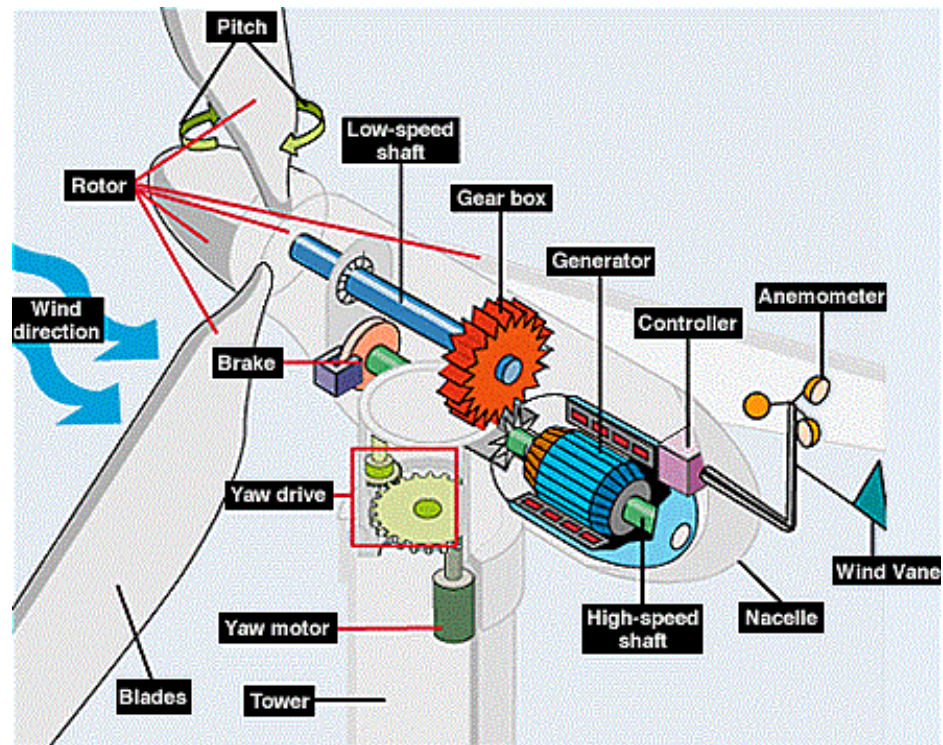
Peningkatan efisiensi turbin angin dapat dimaksimalkan dengan meningkatkan kecepatan angin serta memperbesar luas penampang bilah turbin. Maka dari itu, seiring berjalannya waktu, pengembangan turbin angin berfokus pada pembesaran radius bilah turbin dan peninggian struktur penopang turbin angin sehingga energi yang ditangkap juga semakin besar. Maka dari itu, turbin angin menjadi salah satu pembangkit energi terbarukan yang dapat bersaing dengan energi terbarukan lainnya dikarenakan biaya pembangkitan listrik atau *levelized cost of electricity* (LCOE) yang semakin murah akibat peningkatan kapasitas daya pembangkit per unit turbin angin. Pada Gambar 2.1, kondisi lingkungan yang mendukung dapat menghasilkan 11 MW energi listrik tiap turbin di ketinggian hingga 170 meter dengan panjang bilah rotor turbin mencapai 190 meter.



Gambar 2.1 Perkembangan ukuran turbin angin dalam 20 tahun (Berkeley Lab, 2016)

2.2.1.1 Komponen Utama Turbin Angin

Turbin angin memiliki beberapa komponen utama yang bekerja bersama-sama untuk menghasilkan energi listrik dari angin. Komponen yang bekerja pada turbin terlihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Komponen utama pada turbin angin (Wind Energy Technologies, 2018)

- *Rotor blades*
Baling-baling turbin angin dirancang untuk menangkap sebanyak mungkin energi dari angin.
- *Control system*
Sistem kontrol pada turbin angin berfungsi untuk memantau dan mengatur seluruh operasi turbin. Sistem ini terdiri dari kombinasi *software* dan *hardware* untuk mengatur gerakan *pitch* bilah turbin, pergerakan *nacelle* di gerakan *yaw* struktur, dan variabel lainnya untuk mengoptimalkan penangkapan energi angin.
- *Anemometer*
Wind vane mengukur arah angin dan berkomunikasi dengan *yaw controller* pada *control system* untuk mengorientasikan turbin secara tepat terhadap arah angin. Anemometer mengukur kecepatan angin dan mengirimkan data kecepatan angin ke sistem pada *nacelle*.

- *Hub/Shaft*
Hub merupakan pertemuan antara bilah turbin (*rotor blade*) kepada *shaft* (poros panjang turbin). Shaft berfungsi untuk mentransmisi energi mekanik dari bilah turbin untuk diteruskan ke generator.
- *Nacelle*
Nacelle adalah struktur berbentuk kotak berukuran besar yang menampung generator, *gearbox*, dan komponen penting lainnya pada turbin angin. Biasanya dipasang di bagian atas menara turbin angin yang terhubung langsung dengan *hub* dan rotor turbin. *Nacelle* juga dilengkapi dengan berbagai sensor dan sistem kontrol yang memantau kinerja turbin sesuai kebutuhan.
- *Gearbox*
Gearbox pada turbin angin berfungsi untuk meningkatkan kecepatan rotasi rotor turbin agar sesuai dengan kecepatan yang dibutuhkan untuk menggerakkan generator secara efisien. Umumnya terdiri dari rangkaian *gear* sebagai mekanisme untuk mentransmisikan torsi dari rotor ke generator. *Gear-gear* dalam *gearbox* berfungsi untuk mengubah rotasi bilah yang relatif lambat menjadi kecepatan rotasi generator sekitar 1500 rpm yang diperlukan untuk menghasilkan listrik secara efektif. Komponen ini dirancang sedemikian hingga dapat menahan tekanan dan beban tinggi yang diterapkannya selama turbin beroperasi. *Gearbox* merupakan salah satu komponen penting dalam *nacelle*.
- Generator
Generator adalah perangkat yang mengubah energi mekanik dari putaran poros menjadi energi listrik. Generator menggunakan prinsip elektromagnetik untuk menghasilkan arus listrik.
- *Brake*
Rem turbin berfungsi untuk mencegah rotor berputar setelah dihentikan oleh sistem kontrol. Setelah bilah-bilah turbin dihentikan oleh pengendali, rem menjaga agar bilah-bilah turbin tidak bergerak, yang diperlukan ketika kondisi angin melebihi *cut-out speed* yang telah ditetapkan.
- *Tower*
Menara turbin angin mendukung baling-baling dan generator di ketinggian yang optimal. Ketinggian ini penting untuk mendapatkan kecepatan angin yang lebih tinggi, karena kecepatan angin cenderung meningkat dengan ketinggian.

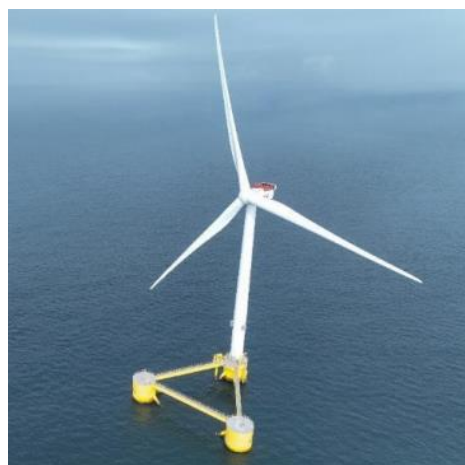
- *Substructure* (penopang/pondasi)

Substruktur turbin angin merupakan struktur yang berfungsi mempertahankan stabilitas *tower* dan bilah turbin di atasnya. *Foundation* atau struktur penopang ini biasanya merupakan *monopile* apabila berada di darat atau lepas pantai dengan kedalaman kurang dari 50 meter. Sedangkan struktur penopang berbentuk terapung digunakan pada turbin angin yang berada di perairan lepas pantai dengan kedalaman lebih dari 50 meter.

2.2.1.2 Substruktur Turbin Angin

Substruktur turbin angin memegang peranan penting dalam pemosisian komponen utama turbin penggerak angin di ketinggian tertentu. Pondasi ini menjaga pergerakan dinamis struktur terhadap beban lingkungan yang dikenai ke struktur. Berdasarkan penempatannya, substruktur turbin angin dibagi menjadi dua, yaitu *fixed structure* dan *floating structure*. *Fixed structure* pada substruktur turbin angin menggunakan struktur *monopile* atau *jacket structure* sebagai pondasinya di darat maupun perairan dangkal. Akan tetapi, konsep struktur terpancang tidak lagi efisien pada instalasi turbin angin lepas pantai di laut dengan kedalaman lebih dari 80 meter dari segi kemampuan struktur dan biaya (Oberti et al., 2022). Maka dari itu, pengembangan struktur terapung dikaji untuk memenuhi kebutuhan tersebut. Beberapa struktur penopang pada turbin angin lepas pantai atau selanjutnya disebut *floating offshore wind turbine/FOWT* antara lain tipe *barge*, tipe *spar*, tipe *tension leg platform*, dan tipe *semisubmersible*, terlihat pada Gambar 2.3. Struktur ini memanfaatkan gaya *buoyancy* dan stabilitas dari struktur itu sendiri sehingga dapat menahan beban *coupled* hidro-aero-servo-elastis pada turbin angin (Albasyir, 2023).

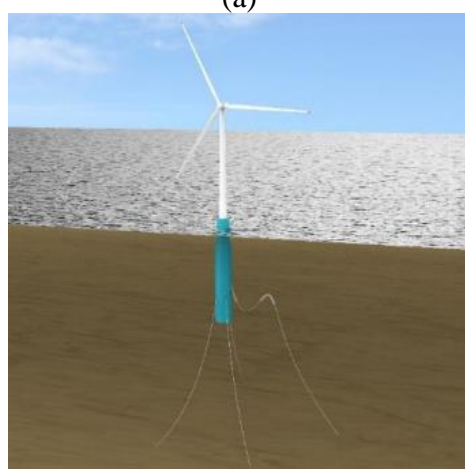
Penopang *floating wind turbine* seperti *spar*, *semisubmersible*, *barge*, dan *tension leg platform* (TLP) memiliki keuntungan dan kerugian masing-masing. Pemilihan penopang tergantung pada kondisi geografis, teknis, ekonomis, dan lingkungan proyek energi angin laut yang bersangkutan.



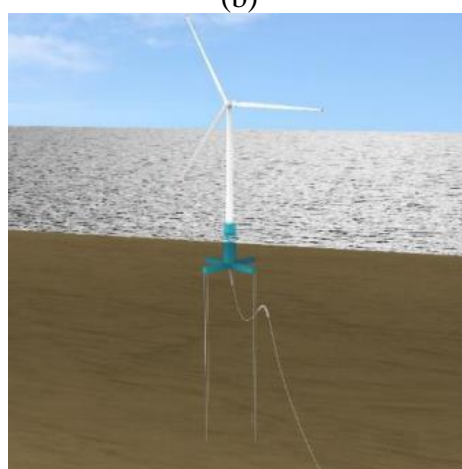
(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 2.3 Jenis substruktur turbin angin lepas pantai (a) *semisubmersible*, (b) *barge*, (c) *spar*, (d) *tension-leg platform* (BVG Associates, 2023)

Semisubmersible merupakan substruktur yang terdiri dari 3 hingga 4 *buoyant column* di bagian periferal yang disambungkan oleh *pontoon* dan/atau *brace*. Substruktur ini menggunakan prinsip *ballast* untuk menyesuaikan stabilitas berdasarkan kondisi lingkungan. Biasanya, *semisubmersible* memiliki draft yang lebih rendah daripada *spar* dan TLP, tetapi memiliki massa struktur dan dimensi paling besar dibandingkan substruktur lainnya. *Barge* merupakan salah satu substruktur yang memiliki *single hull* dengan prinsip luasan permukaan struktur yang besar saat kontak dengan permukaan air menciptakan stabilitas. Substruktur *barge* memiliki dimensi paling besar dibandingkan dengan substruktur lainnya, akan tetapi memiliki kemudahan transportasi paling baik dikarenakan strukturnya yang mudah dilakukan *towing* dengan bantuan *tugboat*. *Spar* merupakan substruktur berbentuk silinder tinggi dengan *ballast* berlokasi di bagian bawah struktur yang menciptakan gaya *buoyant* yang tinggi.

Substruktur ini memiliki *draft* yang tinggi. memungkinkan penyesuaian *ballasting* sehingga menggunakan prinsip *ballast* untuk mendapatkan stabilitas. Tingginya *draft* serta sedikitnya luasan penampang menyebabkan substruktur ini sulit dipengaruhi oleh gaya angin, gelombang, dan arus, dibandingkan dengan substruktur lainnya. Pada pengaplikasiannya, *spar* sangat cocok digunakan di perairan dengan kedalaman lebih dari 100 meter. *Tension leg platform* (TLP) merupakan substruktur yang menggunakan sistem tambat untuk memperoleh stabilitas. Gaya angkat struktur atau *buoyancy* bekerja pada lambung struktur di mana tali tambat memperoleh tegangan dari *buoyancy* struktur. Sistem tali tambat yang harus dicapai adalah *vertical taut mooring system* sehingga memiliki kompleksitas yang tinggi dalam proses instalasinya. Akan tetapi, substruktur ini memiliki massa yang paling ringan daripada substruktur lainnya (BVG Associates, 2023).

2.2.1.3 Sistem Tambat

Sistem tambat bertujuan untuk menjaga posisi struktur apung dengan aman pada posisi yang diperlukan dan untuk membatasi perpindahan (*excursion*) di sumbu horizontal dari pergerakan translasionalnya, dan menyerap gerakan berlebih akibat frekuensi gelombang. Sistem penambatan struktur ke dasar laut dapat dilakukan secara *catenary*, *taut*, atau *semi-taut*. Pangkal tali tambat dikaitkan pada struktur terapung di titik-titik tertentu dengan ujung tambat ditambatkan di dasar laut menggunakan *anchor*. Material tali tambat dapat terdiri dari *chain* (rantai baja), *rope* (tali), atau kombinasi antara keduanya. Parameter dari sistem tambat terlihat pada Tabel 2.1.

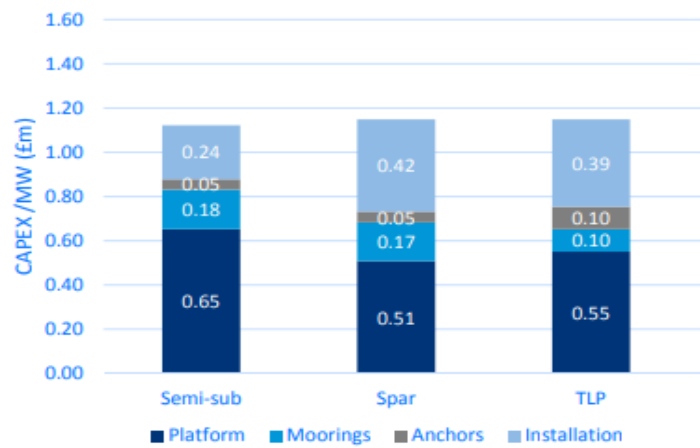
Tabel 2.1 Perhitungan *mooring line*

Parameter	Rumus	Unit
Panjang <i>suspended mooring line</i>	$l_s = h \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{T_H}{wh} - 1}$	m
Parameter <i>catenary shape</i>	$a = \frac{T_H}{w}$	-
Jarak horizontal <i>fairlead-touchdown</i>	$x = a \cdot \cosh^{-1} \left(1 + \frac{h}{a} \right)$	m
Jarak horizontal <i>fairlead-anchor</i>	$X = l - l_s + x$	m
Total panjang <i>mooring line</i>	$l = X/27.5$	m

2.2.2 Floating Offshore Wind Turbine

2.2.2.1 Pemilihan Jenis Substruktur FOWT

Berdasarkan data dari James & Ros (2015) pada Gambar 2.4, biaya pembangunan platform menempati hingga separuh dari biaya CAPEX. Pada jenis *floating structure* SPAR dan TLP, biaya manufaktur platform bernilai sedikit lebih rendah daripada manufaktur *semisubmersible*. Akan tetapi, dari segi instalasi dan sistem tambat, struktur *semisubmersible* jauh lebih unggul karena kompleksitas instalasi struktur dan sistem tambat yang digunakan tergolong sederhana. Padahal, menurut Tabel 2.2, metode instalasi yang rumit merupakan kerugian di mana aspek tersebut memiliki alternatif yang terbatas.



Gambar 2.4 Rincian CAPEX berbagai jenis substruktur FOWT (James & Ros, 2015)

Tabel 2.2 Pertimbangan teknis FOWT (James & Ros, 2015)

Technical challenge	Cost reduction potential	Urgency	IP sensitivity
Platform size & weight	2.7	2.4	2.8
Installation procedures	2.5	2.2	1.8
Port-side O&M (major repair procedures)	2.3	2.2	1.0
Floating substations/transformer modules	2.3	2.0	2.0
Advanced control systems for floating WTGs	2.2	2.2	2.6
Mooring design & installation	2.2	2.1	2.4
Anchor design & installation	2.1	2.1	2.0
Advanced tank testing facilities	2.0	2.1	1.7
Wind farm operation (wake effects, yield, AEP)	1.9	2.1	1.0
Advanced modelling tools	1.9	2.5	2.0
High voltage dynamic cables	1.8	2.1	1.6
Bespoke standards for floating wind	1.8	2.0	1.0
Environmental impact	1.4	2.1	1.0

N.B. Scoring from 1-3; High = 3, Med = 2, Low = 1.

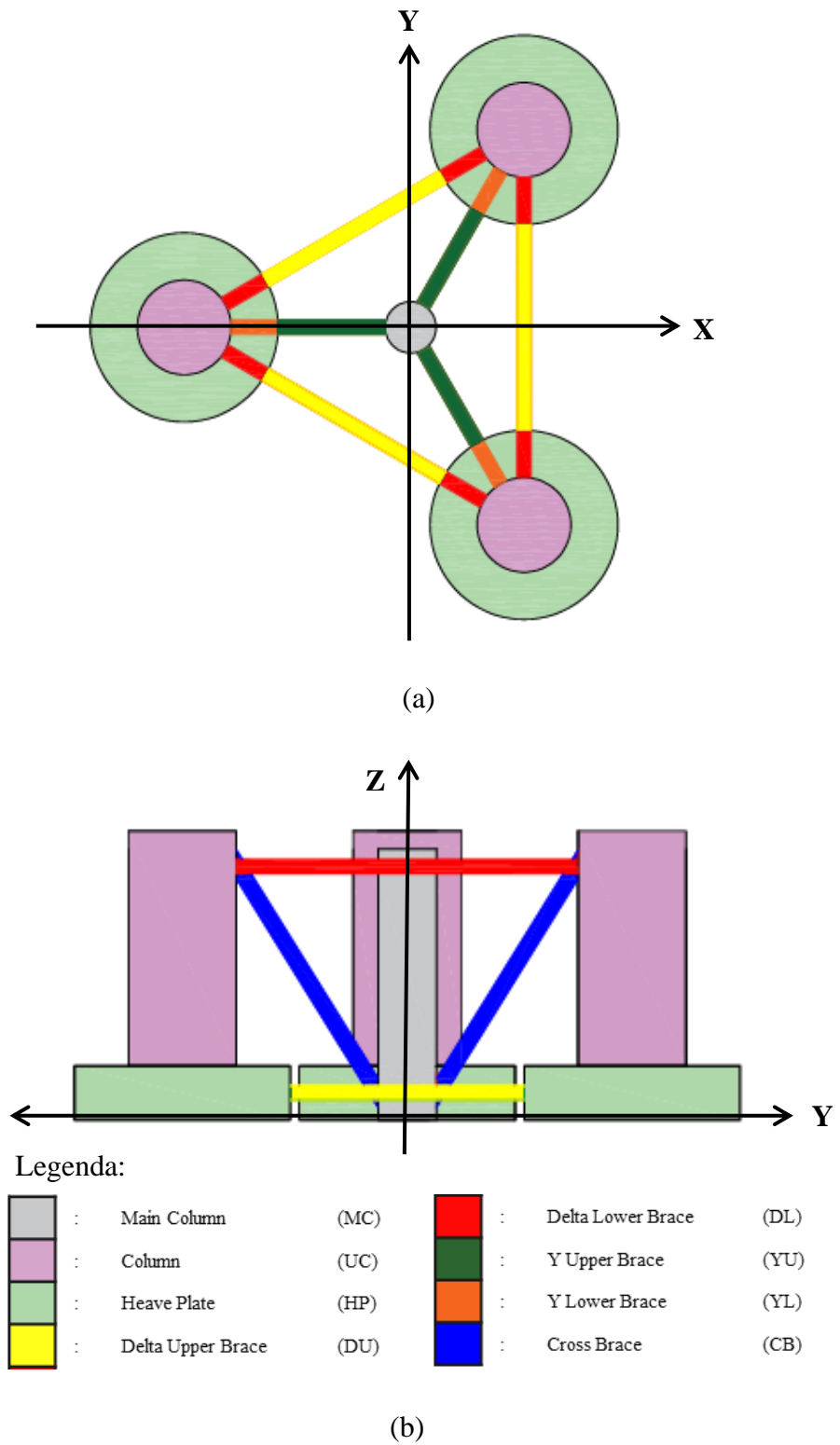
Oleh karena terbatasnya perubahan metode instalasi, maka manufaktur struktur dapat diubah untuk menekan biaya CAPEX. Maka dari itu, struktur *semisubmersible* menjadi struktur yang tepat untuk dilakukan pengkajian ukuran struktur yang efektif sehingga dapat menekan biaya CAPEX secara keseluruhan. Pertimbangan teknis ini juga diperkuat dengan analisis sensitivitas oleh James & Ros (2015) terhadap aspek teknis struktur berdasarkan potensi pengurangan biaya dan urgensinya. Hasil penelitian tersebut menyatakan bahwa ukuran dan berat dari suatu platform menjadi pertimbangan paling utama dalam permasalahan teknis, disusul oleh faktor dari sistem kontrol platform serta desain dan instalasi sistem tambat.

2.2.2.2 DeepCWind Platform

Substruktur *semisubmersible* memiliki berbagai konfigurasi struktur. Pemosisian *tower* turbin, penggunaan *brace*, penggunaan jumlah *column*, sangat mempengaruhi hidrodinamis struktur. Penelitian yang dilakukan oleh Albasyir (2023) melakukan analisis hidrodinamis terhadap beberapa struktur *semisubmersible* eksisting, yaitu VoltornUS, HiveWind, dan DeepCWind. Penelitian tersebut menyebutkan bahwa struktur DeepCWind memiliki gaya *viscous drag* yang paling besar dikarenakan konfigurasi strukturnya yang memiliki banyak *brace* sehingga memiliki efek redaman yang tinggi. Selain itu, studi tersebut juga menyatakan bahwa DeepCWind memiliki nilai frekuensi getar dan amplitudo getar yang lebih rendah sehingga memiliki beban *fatigue* yang paling rendah. Dengan hal tersebut, maka DeepCWind memiliki simpangan daya keluaran yang lebih kecil sehingga cukup stabil ketika memproduksi daya keluaran/energi listrik.

DeepCWind merupakan struktur turbin angin berkapasitas 5 MW yang dikembangkan oleh *National Renewable Energy Laboratory* dari proyek OC4 (*Offshore Code Comparison Collaboration Continuation*). Struktur DeepCWind berbentuk simetris yang disusun oleh satu *central column* (*column* inti) dan tiga *upper column* (*column* terluar) yang dihubungkan oleh *diagonal brace*. Untuk memperoleh *buoyancy* yang cukup, tiga *column* terluar dihubungkan oleh *upper pontoon* dan *lower pontoon*. Pada bagian bawah

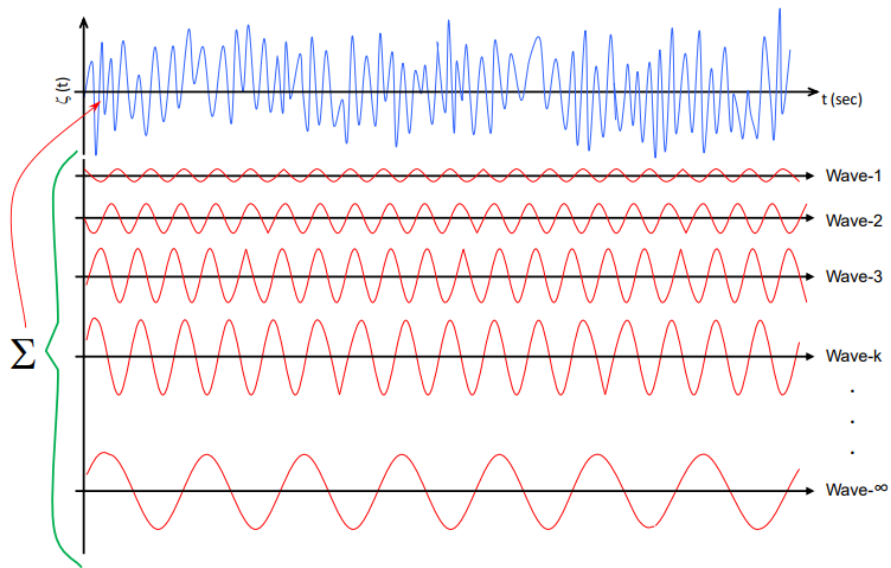
semisubmersible, terdapat *heave plate* untuk meredam gerakan *heave* secara signifikan. Sketsa struktur secara keseluruhan dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Sketsa struktur DeepCWind (a) tampak atas, (b) tampak samping

2.2.3 Gelombang Acak

Gelombang acak merupakan fenomena alam yang umumnya terjadi di laut dan berperan penting dalam dinamika perairan. Gelombang acak tidak memiliki pola atau arah tertentu, melainkan muncul secara acak sebagai superposisi gelombang sinusoidal dari berbagai sumber seperti angin dan interaksi kompleks antara gelombang yang berasal dari berbagai arah, diilustrasikan pada Gambar 2.6. Pada dasarnya, gelombang acak mencakup spektrum gelombang yang memiliki frekuensi dan amplitudo yang bervariasi, menciptakan kondisi laut yang dinamis dan selalu berubah (Djarmiko, 2012).



Gambar 2.6 Superposisi gelombang tak hingga (Djarmiko, 2012)

Sebaran gelombang acak di laut berbentuk spektral yang memiliki pendekatan statistik. Pada umumnya, profil gelombang dapat dituliskan dalam persamaan sebagai berikut.

$$(x, y, t) = \sum_{n=1}^N a_n \cos(knx + lny - \omega nt + \phi n) \quad (2.3)$$

Keterangan:

$\eta(x,y,t)$ = Elevasi permukaan air pada titik (x, y) dan waktu t

a_n = Amplitudo dari mode gelombang ke-n

kn, ln = Angka gelombang ke-n dalam arah x dan y

ω_n = Frekuensi angular gelombang ke-n

ϕ_n = Fase awal dari gelombang ke-n

Persamaan ini menjelaskan bagaimana gelombang-gelombang yang berbeda dalam hal amplitudo, frekuensi, dan arah dapat bersuperposisi untuk membentuk gelombang acak di atas permukaan laut. Persamaan di atas menjadi basis utama untuk turunan persamaan sehingga pendekatan dalam analisis respons gerakan struktur dalam gelombang acak dapat diselesaikan (Chakrabarti, 2005).

2.2.4 Spektrum Gelombang

Spektrum gelombang merujuk pada distribusi energi gelombang laut yang dihasilkan dalam berbagai frekuensi dan arah. Dalam konteks gelombang laut acak, spektrum gelombang menjadi lebih kompleks karena berbagai faktor seperti angin, seismik, dan interaksi gelombang menyebabkan variasi frekuensi dan amplitudo yang sangat bervariasi. Model matematis, seperti Persamaan Pierson-Moskowitz, Bretschneider, ISSC, atau JONSWAP, sering digunakan untuk menggambarkan distribusi energi gelombang di laut dengan memperhitungkan kondisi acak ini. Beberapa rumus spektrum digunakan dalam desain struktur lepas pantai, berasal dari sifat-sifat yang teramati dari gelombang laut dan bersifat empiris (Chakrabarti, 2005).

Tiap spektrum memiliki ciri khas masing-masing yang dipengaruhi oleh beberapa parameter. Pada pengaplikasiannya, spektrum JONSWAP atau *Joint North Sea Wave Project* merupakan spektrum dengan distribusi energi gelombang yang paling mendekati karakteristik gelombang di Indonesia, yang sebagian besar merupakan perairan kepulauan dan perairan tertutup.

$$S_{\zeta}(\omega) = \bar{\alpha} g^2 \omega^{-5} \exp\left(-1.25 \left[\frac{\omega}{\omega_p}\right]^{-4}\right) \times \gamma^{\left[\exp\left(-(\omega-\omega_p)^2/(2\sigma^2\omega_p^2)\right)\right]} \quad (2.4)$$

Keterangan:

$$\bar{\alpha} = 0.076(X_0)^{-0.22} \text{ atau } 0.0081 \text{ jika } X \text{ tidak diketahui}$$

$$X_0 = gX/U_w^2$$

$$X = \text{Panjang fetch}$$

$$U_w = \text{Kecepatan angin}$$

$$\gamma = \text{Parameter ketinggian/peakedness parameter}$$

$$\sigma = \text{Parameter bentuk/shape parameter, bernilai } 0.07$$

$$\omega_p = 2\pi(g/U_w)(X_0)^{-0.33}$$

Spektrum JONSWAP sebagaimana dinyatakan dalam persamaan 2.2 secara masif digunakan dalam merancang dan menganalisis respons gerak bangunan lepas pantai di Indonesia. Menurut Djatmiko (2012), perairan Indonesia disarankan untuk menggunakan nilai 2,0 sampai 2,5 pada parameter γ untuk mengurangi dominasi energi yang dikontribusikan oleh frekuensi gelombang tertentu. Hasil komputasi spektrum JONSWAP untuk gelombang acak dengan $H_s = 4$ m dan $\gamma = 2,5$ memiliki kepadatan energi $3,75$ m²/rads yang didominasi oleh gelombang dengan frekuensi 0,55 rad/s hingga 0,70 rad/s.

2.2.5 Respons Spektra

Response Amplitude Operator (RAO) merupakan karakteristik gerak yang dimiliki sebuah bangunan apung ketika berada dalam gelombang reguler dalam komponen-komponen respons sinusoidal. Karakteristik ini menghasilkan nilai di 6 derajat kebebasan, antara lain gerak *surge*, *sway*, *heave*, *roll*, *pitch*, dan *yaw*. Secara prinsip, ketika bangunan lepas pantai dikenai oleh beban dari gelombang acak di laut, nilai karakteristik gerak yang dimiliki akan diwakili oleh luasan di bawah kurva spektra, $S_\zeta(\omega)$, di setiap variasi frekuensi gelombangnya (Djatmiko, 2012). Komputasi dengan *frequency domain* dapat menggambarkan spektra respons yang mewakili nilai *transfer function* dan spektrum gelombang acak seperti tertulis dalam persamaan berikut (DNV-RP-C205, 2010).

$$S_R(\omega) = |\zeta^{(1)}(\omega)|^2 \times S(\omega) \quad (2.5)$$

Keterangan:

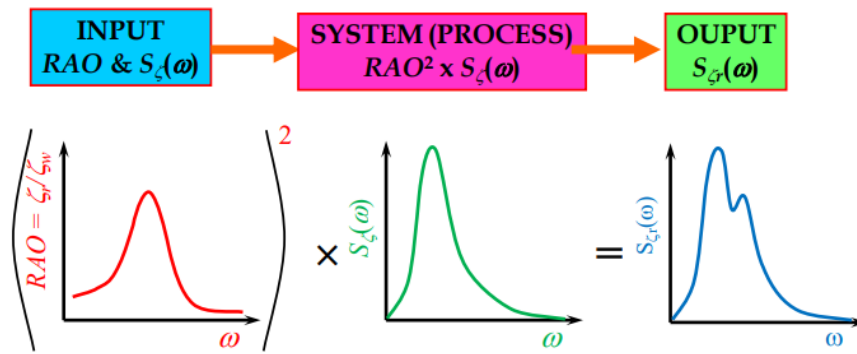
$S_R(\omega)$ = Spektra respons

ω = Frekuensi angular $\left(\frac{2\pi}{T}\right)$

$\zeta^{(1)}(\omega)$ = Respons dari *transfer function* (RAO)

$S(\omega)$ = Spektrum gelombang acak

Persamaan di atas dapat diilustrasikan sebagai Gambar 2.7, yang dapat disimpulkan bahwa respons gerakan bangunan apung yang berada di gelombang acak akan memiliki superposisi energi. Maka dari itu, penentuan periode natural struktur sangat mempengaruhi kelayakan dan keamanan ketika bangunan lepas pantai beroperasi. Apabila periode gelombang acak dan periode natural struktur memiliki periode yang sama, nilai superposisi antara dua kurva tersebut akan menjadi sangat tinggi sehingga dapat membahayakan kekuatan struktur karena dikenai beban yang besar (Chakrabarti, 2005).



Gambar 2.7 Transformasi RAO menjadi spektra respons (Djatkiko, 2012)

2.2.6 Gerakan Dinamis Turbin Angin Lepas Pantai

Struktur turbin angin di lepas pantai yang dikenai beban lingkungan dari angin dan gelombang akan berpengaruh signifikan terhadap stabilitas struktur baik di bawah permukaan air dan di atas permukaan air. Tidak hanya itu, pada masa operasi turbin, sistem di dalam *nacelle* memiliki komponen-komponen yang bergerak secara simultan dengan pergerakan struktur. Menurut Jonkman & Buhl (2007), terdapat total 24 derajat kebebasan pada turbin angin sumbu horizontal, yaitu 6 derajat kebebasan pada substruktur, 4 derajat kebebasan pada *tower*, 1 derajat kebebasan pada *yaw nacelle*, 1 derajat kebebasan pada *drivetrain* terhadap rotor, 3 derajat kebebasan pada gerak *edgewise rotor blade*, dan 2 derajat kebebasan pada rotor.

Pembebanan hidrodinamis timbul akibat adanya interaksi struktur dengan pergerakan gelombang. Sebagai penyederhanaan pemahaman gelombang irregular di lepas pantai, kalkulasi hidrodinamis dihitung menggunakan pendekatan gelombang regular kemudian dikonversi ke dalam spektrum gelombang yang merepresentasikan suatu perairan. Berikut adalah persamaan Morison semi empiris untuk menentukan gaya gelombang horizontal yang bekerja pada struktur berbentuk silinder.

$$F = C_D \cdot \rho_{water} \cdot \frac{D_C}{2g} |u| \cdot u + C_M \cdot \rho_{water} \cdot \frac{\pi D_C^2}{4g} \cdot a \quad (2.6)$$

Keterangan:

- C_D = Koefisien *drag*
- u = Kecepatan partikel gelombang (m/s)
- D_C = Diameter silinder (m)
- C_M = Koefisien redaman

Efek nonlinear pada struktur terapung sering kali disebabkan oleh dua faktor utama: massa tambahan (*added mass*) dan redaman (*damping*). *Added mass* adalah fenomena di mana air yang dikeluarkan oleh gerakan struktur terapung menyebabkan peningkatan massa efektif sistem. Ketika struktur bergerak, ia mendorong dan menarik air di sekitarnya, menyebabkan penambahan massa pada struktur tersebut. Efek ini dapat signifikan terutama pada frekuensi rendah dan dapat menyebabkan respons yang kompleks pada struktur terapung. Di sisi lain, *damping* merupakan gaya redaman yang dihasilkan oleh pergeseran relatif antara struktur dan air di sekitarnya. *Damping* ini menciptakan gaya tahanan terhadap gerakan struktur, dan pada struktur terapung, dapat *memberikan* kontribusi signifikan terutama dalam meredam osilasi dan getaran yang dapat terjadi. Keduanya, *added mass* dan *damping*, adalah efek nonlinear yang memengaruhi dinamika struktur terapung dan memerlukan perhatian khusus dalam analisis dan desain untuk memahami dan mengatasi kompleksitas respons sistem tersebut. Pembebanan angin, yang selanjutnya disebut aerodinamis, mempengaruhi gerak translasional serta *pitch* dari struktur *tower* turbin dan *gap spacing* pada *column* yang dikenai gaya angin secara langsung.

Kondisi angin bervariasi terhadap waktu serta ketinggian. Maka dari itu, kecepatan angin pada rentang waktu tertentu serta nilai dari *wind shear* perlu didefinisikan untuk menggambarkan kondisi angin secara riil. Berikut adalah perhitungan untuk memperoleh besar gaya angin.

$$F_w = \frac{\rho_{air}}{2g} \cdot C_s \cdot A \cdot V(h)^2 \quad (2.7)$$

Keterangan:

C_s = Koefisien gaya angin

A = Luas penampang tegak lurus terhadap arah datang angin (m)

$V(h)$ = Kecepatan angin di ketinggian- h (m/s)

Kinerja pergerakan bilah turbin dipengaruhi oleh *servo* sebagai rekayasa kontrol sistem turbin angin di segi keamanan operasional dan optimalisasi energi yang dihasilkan. Sistem servodinamis pada turbin angin bekerja dengan mengatur posisi sudut rotor dan *pitch controller* sehingga kecepatan rotasi rotor turbin dapat bergerak dengan stabil dan efisien secara maksimal (Albasyir, 2023).

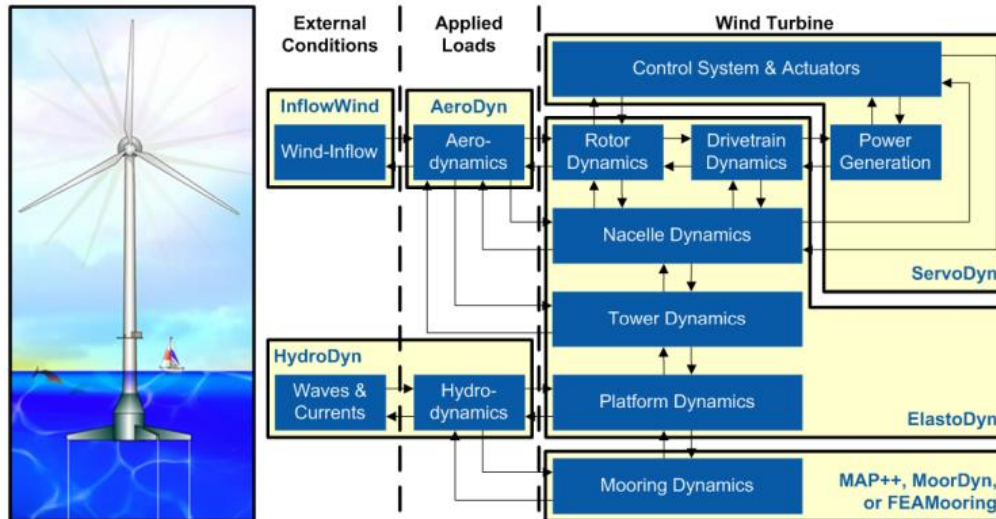
2.2.7 Analisis *Time Domain*

Simulasi suatu sistem dengan faktor-faktor nonlinear seperti beban yang berubah akibat pergerakan gelombang acak dan angin dapat dihitung melalui fungsi waktu atau analisis *time domain* (Vernanda, 2018). Pendekatan *time domain* menghasilkan *time history response* berdasarkan fungsi waktu sehingga memiliki banyak kemudahan. Akan tetapi, simulasi ini membutuhkan waktu komputasi yang lebih lama dibandingkan *frequency domain*. Djatmiko (2012) menyebutkan bahwa rentang waktu minimum simulasi *time domain* adalah selama 3 jam. Akan tetapi, kompleksitas analisis aero-hidro-servo-elastic menyebabkan peningkatan waktu komputasi yang tidak efisien sehingga penyederhanaan waktu simulasi berdasarkan ABS (2024) menyarankan simulasi selama 3600 detik.

Pada kondisi sesungguhnya, model turbin angin yang mengalami transisi dari mode *parked* ke mode *operating* memerlukan waktu untuk menyesuaikan pergerakan bilah turbin hingga bergerak dengan stabil. Fase transisi atau *transient* tidak menjadi perhitungan dalam analisis, sehingga pemodelan simulasi numerik perlu diatur sedemikian hingga analisis hanya berupa data pergerakan di mode *operating*. Menurut Zhang et al. (2020), *build-up time* yang perlu diinput dalam simulasi adalah selama 500 detik hingga struktur turbin dianggap stabil.

2.2.8 OpenFAST

FAST, yang merupakan singkatan dari *fatigue, aerodynamics, structures, and turbulence*, adalah kode modal aeroservoelastis untuk turbin angin sumbu horizontal yang dikembangkan oleh National Renewable Energy Laboratory (NREL). FAST memodelkan turbin angin sebagai kombinasi dari benda-benda yang kaku dan lentur. Benda-benda yang kaku melibatkan bumi, *nacelle*, *hub*, dan pengereman ujung opsional. Benda-benda lentur melibatkan bilah, menara, dan poros penggerak. Model menghubungkan benda-benda ini dengan beberapa Derajat Kebebasan (DOFs), termasuk lentur menara, lentur bilah, *yaw nacelle*, *rotor teeter*, kecepatan rotor, dan fleksibilitas torsi poros penggerak. FAST menggunakan metode Kane untuk menyusun persamaan gerak, yang diselesaikan dengan integrasi numerik. Modul AeroDyn yang dikembangkan oleh Windward Engineering digunakan untuk menghasilkan gaya aerodinamis sepanjang bilah-bilah (Roddier et al., 2010), terlihat pada integrasi modul di Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Komputasi Coupled Simulation pada OpenFAST (Jonkman & Buhl, 2007)

2.2.9 Optimasi

Optimasi merupakan upaya untuk merancang dan menggunakan struktur dengan cara yang memaksimalkan kinerja, kekuatan, atau efisiensi sambil meminimalkan biaya atau berbagai batasan lainnya (Dhaneswara et al., 2023). Dalam rekayasa struktur, optimasi dapat melibatkan penyesuaian dimensi, material, atau konfigurasi geometris untuk memenuhi persyaratan tertentu. Untuk mencapai sebuah optimasi, diperlukan *objective function* yang merupakan sebuah nilai yang akan dicapai. Untuk mencapai nilai tersebut, diperlukan variabel bebas bernama *variable design* yang akan dilakukan iterasi dengan kondisi batas bernama *constraints* (Hastuti et al., 2024).

Optimasi dapat didasarkan oleh metode deterministik maupun probabilistik. *Deterministic design optimization* adalah suatu pendekatan dalam rekayasa dan desain yang berfokus pada pemecahan masalah optimasi dengan mempertimbangkan variabel-variabel desain sebagai nilai yang pasti dan terukur. Variabel desain pada metode deterministik merupakan nilai pasti, sehingga optimasi dilakukan untuk mencapai solusi terbaik di bawah asumsi bahwa nilai-nilai ini diketahui secara pasti (Syalsabila et al., 2022). Metode ini memanfaatkan teknik-teknik matematis, seperti program linier, program kuadrat, dan metode gradien, untuk mencari nilai-nilai desain yang meminimalkan atau memaksimalkan suatu kriteria kinerja (Romero & Queipo, 2017).

Keuntungan dari pendekatan deterministik adalah kemampuannya dalam *memberikan* solusi yang pasti dan dapat diulang, serta interpretasi yang jelas terhadap hasil optimasi. Namun, *deterministic design optimization* juga dapat mengabaikan ketidakpastian atau variasi

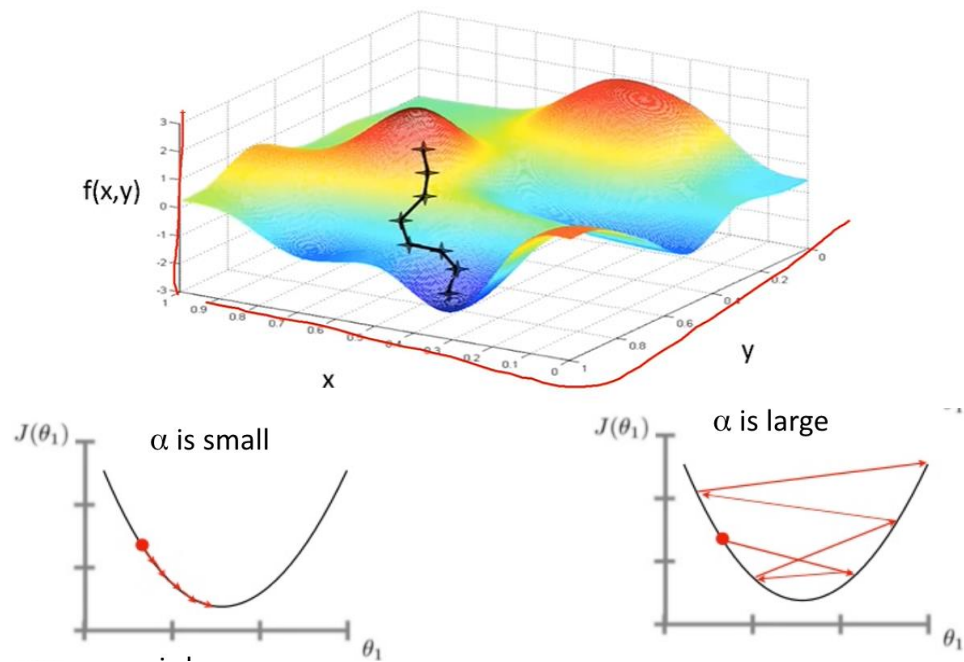
yang mungkin muncul dalam lingkungan nyata, sehingga menjadi kurang sesuai ketika variabilitas atau ketidakpastian adalah faktor penting dalam proses desain atau rekayasa tertentu. Kesesuaian pendekatan ini tergantung pada karakteristik dan kompleksitas masalah desain yang sedang dihadapi (R. W. Prastianto, Syarifudin, et al., 2024).

Metode Newton, atau Newton's Method, adalah teknik iteratif lain yang sering digunakan dalam konteks optimasi matematis. Dalam optimasi, metode Newton digunakan untuk menemukan solusi lokal dari masalah optimasi dengan mendekati minimum atau maksimum fungsi objektif dan mempertimbangkan batasan yang mungkin ada. Metode ini memanfaatkan turunan kedua (hessian) dari fungsi objektif untuk memperbaiki estimasi solusi iteratif.

2.2.9.1 Metode Sequential Quadratic Programming

Metode Sequential Quadratic Programming (SQP) adalah pendekatan yang digunakan dalam optimasi matematis untuk menemukan solusi optimal dari suatu masalah dengan meminimalkan atau memaksimalkan fungsi objektif tertentu, sambil mematuhi sejumlah batasan. SQP adalah metode iteratif yang memanfaatkan strategi pemrograman kuadrat berurutan untuk mendekati solusi optimal. Pada setiap iterasi, SQP mengkonstruksi model kuadrat yang mendekati fungsi objektif dan batasan pada titik iterasi saat ini. Model tersebut kemudian dipecahkan untuk mendapatkan arah pencarian yang dapat meningkatkan solusi.

Keunggulan SQP meliputi kemampuannya menangani masalah optimasi nonlinear dengan efisiensi tinggi dan konvergensi yang baik menuju solusi optimal. Metode ini sering digunakan dalam konteks desain dan rekayasa, di mana batasan kompleks dan hubungan nonlinear dapat ditemui. SQP dapat diimplementasikan dalam berbagai bidang, termasuk rekayasa struktural, desain sistem kendali, dan optimasi proses industri. Meskipun SQP *memberikan* hasil yang kuat, pemilihan metode optimasi harus disesuaikan dengan karakteristik khusus dari masalah yang dihadapi, dan perlu diingat bahwa SQP membutuhkan evaluasi fungsi objektif dan batasan serta turunannya pada setiap iterasi.

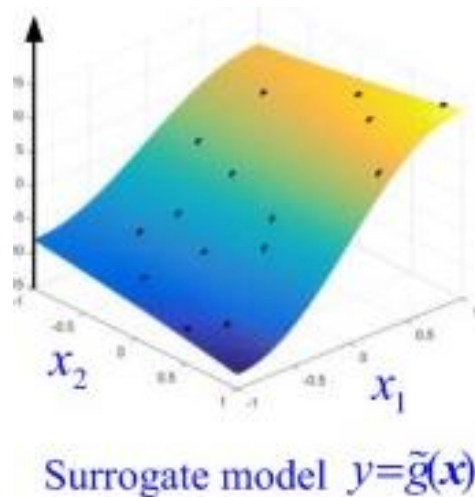


Gambar 2.9 Visualisasi dalam proses optimasi mencapai nilai minimum berdasarkan metode SQP dalam 3 dimensi dan 2 dimensi

Metode SQP biasanya menjawab *single objective function*. Pada pengaplikasiannya, SQP dapat menerima nilai nonlinear, yang banyak ditemui pada simulasi aero-hidro-servo-elastis. Beberapa literatur yang menggunakan metode SQP antara lain Renty (2020) dan Romero & Queipo (2017). Penelitian tersebut menyebutkan bahwa metode SQP memiliki waktu komputasi yang rendah dengan hasil konvergensi yang tinggi. Hal ini dikarenakan metode nya yang berbasis matematis, sehingga hanya terjadi penurunan gradien antar titik, yang diilustrasikan pada Gambar 2.9.

2.2.10 *Surrogate model*

Surrogate model adalah model prediksi berdasarkan suatu pendekatan dari model yang telah tersedia sebelumnya (Prastianto et al., 2023). Model ini digunakan untuk memetakan data *input* ke data *output* ketika hubungan aktual antara keduanya tidak diketahui atau memerlukan komputasi yang mahal untuk dievaluasi. Model ini biasanya dibangun untuk optimasi berbasis *surrogate model* ketika bentuk analisis kurang sesuai untuk digunakan dalam metode optimasi berbasis gradien konvensional (Prastianto et al., 2024). Beberapa teknik telah dikembangkan untuk pembentukan *model surrogate*, seperti Kriging atau *Radial Basis Function* (RBF), yang memerlukan pendekatan sistematis untuk memilih teknik yang sesuai.



Gambar 2.10 Visualisasi *model surrogate* pada ruang 3 dimensi

Pada Gambar 2.10, sumbu X dan Y merupakan rentang ukuran variabel desain, sedangkan sumbu Z merupakan rentang data respons simulasi. Data input berdasarkan respons simulasi yang kompleks dan terbatas direpresentasikan dengan dot berwarna hitam. Untuk memperoleh data pada ruang dimensi yang belum dianalisis, diperlukan proses regresi untuk mengetahui titik-titik di lokasi lainnya. Hal ini dimaksudkan dengan pembuatan *surrogate model*, yang direpresentasikan sebagai permukaan/kontur yang mewakili dot hitam sebagai input simulasi. Metode ini sangat meningkatkan efisiensi kerja dalam hal waktu dan biaya. Akan tetapi, diperlukan sebaran dot hitam sebagai input simulasi yang menyebar secara merata dalam ruang dimensi variabel desain, sehingga *model surrogate* dapat mewakili ruang desain secara keseluruhan.

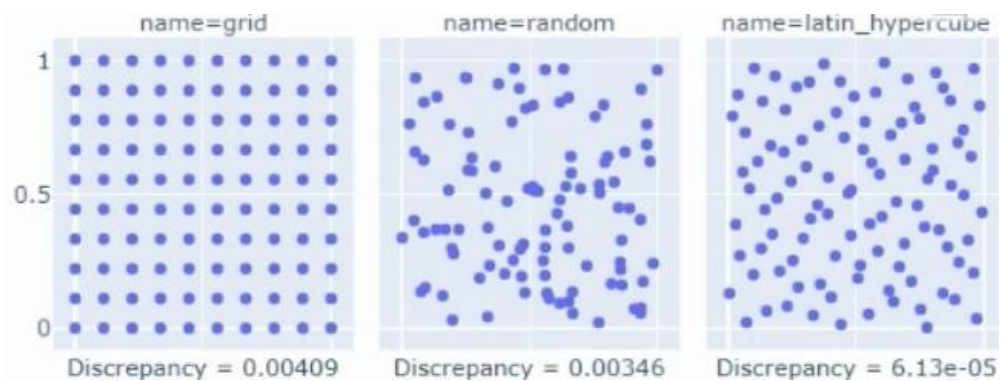
2.2.10.1 Desain Eksperimen (*Design of Experiments/DoE*)

Design of Experiments (DoE) atau desain eksperimen adalah set konfigurasi dari beberapa variabel desain yang tersebar secara sistematis. Desain eksperimen berfungsi untuk membagi konfigurasi eksperimen pada masing-masing blok ruang dimensi variabel sehingga variabilitas dari faktor-faktor yang tidak diinginkan. Semakin banyak desain eksperimen yang disimulasikan, maka *model surrogate* yang terbentuk akan semakin baik. Biasanya, jumlah desain eksperimen pada penelitian bergantung pada jumlah variabel desainnya. Jumlah desain eksperimen (n) yang baik memiliki jumlah dari kelipatan 10 dari n desain variabel. Selain jumlah, sebaran dari variabel pada desain eksperimen mempengaruhi hasil dari *model surrogate* yang akan terbentuk. Salah satu

teknik penentuan desain eksperimen adalah dengan metode sampling Latin Hypercube Sampling.

2.2.10.2 Latin Hypercube Sampling

Latin Hypercube Sampling (LHS) adalah teknik sampling yang digunakan untuk menghasilkan desain eksperimen berdasarkan metode probabilistik, sehingga sebaran variabel desain dapat menyebar dengan baik, mewakili seluruh ruang dimensi desain. Teknik ini bekerja dengan membagi ruang input menjadi interval yang sama besar dalam setiap dimensi, kemudian memilih satu sampel acak dari setiap interval. Sampel dari setiap dimensi kemudian digabungkan untuk membentuk titik-titik unik dalam ruang parameter multidimensi, yang terdistribusi merata di seluruh ruang parameter. Keunggulan LHS meliputi efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan metode sampling acak sederhana, cakupan yang lebih baik dari seluruh ruang parameter, dan pengurangan variabilitas sampel. LHS banyak digunakan dalam simulasi komputer untuk mengurangi jumlah eksperimen yang diperlukan karena sebaran data konfigurasinya memiliki kepadatan yang mewakili ruang secara baik. Sebaran desain eksperimen dalam ruang dimensi dari berbagai teknik sampling dapat dilihat pada Gambar 2.11.

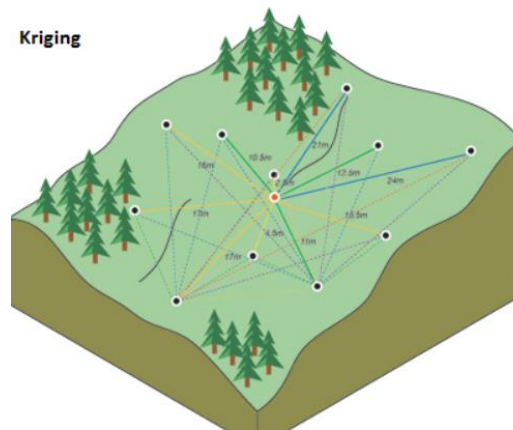


Gambar 2.11 Sebaran desain eksperimen dari berbagai teknik sampling

2.2.10.3 Metode Kriging

Metode yang digunakan dalam pembentukan *surrogate model* adalah metode Kriging. Kriging adalah sebuah algoritma interpolasi multidimensional berbasis *metamodel* yang akurat. Metode ini menggabungkan model polinomial yang mirip dengan permukaan respons standar dengan sebuah istilah deviasi lokal untuk *memberikan* kualitas permukaan respons yang ditingkatkan dengan

menyesuaikan perubahan orde tinggi dalam parameter output. Kriging juga memperhitungkan deviasi lokal yang mungkin terjadi dalam data, sehingga *memberikan* kemampuan untuk memperkirakan variabilitas yang lebih kompleks dalam parameter output. Hal ini menjadikan metode Kriging sebagai algoritma yang kuat untuk interpolasi dalam berbagai konteks, terutama di bidang di mana perubahan orde tinggi dalam parameter output harus diperhitungkan untuk mencapai akurasi yang tinggi (Zou dkk., 2023).



Gambar 2.12 Pembacaan point pada metode Kriging

Kriging model dapat digunakan dalam optimasi deterministik sebagai *metamodel* untuk menggantikan atau memperkirakan fungsi objektif dan kendala dalam masalah optimasi. *Metamodel* kriging memungkinkan penggunaan evaluasi yang lebih sedikit dari fungsi asli, yang sering kali mahal atau rumit untuk dievaluasi langsung. Dengan demikian, penggunaan kriging dalam optimasi deterministik dapat membantu mengurangi jumlah evaluasi langsung dari fungsi objektif dan kendala, sehingga meningkatkan efisiensi proses optimasi.

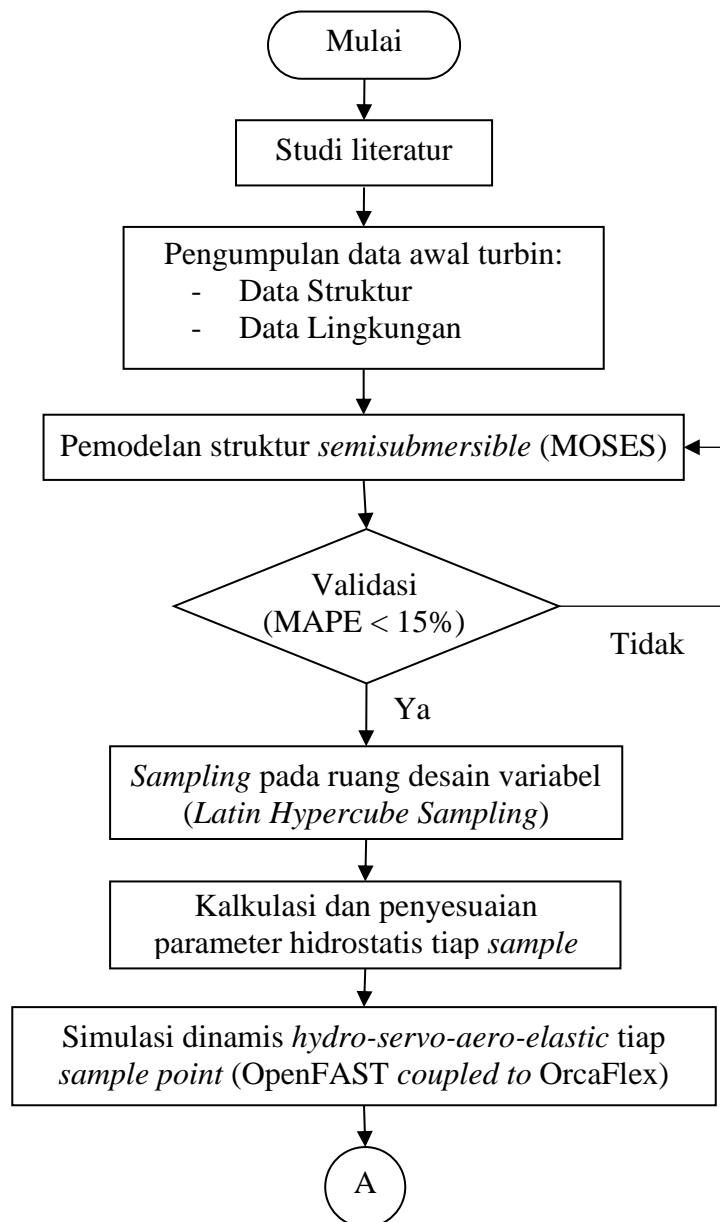
Selain itu, kriging juga dapat membantu dalam pemilihan titik evaluasi yang optimal, karena model ini *memberikan* estimasi yang baik tentang di mana titik-titik evaluasi selanjutnya harus ditempatkan untuk mendapatkan solusi yang lebih baik secara keseluruhan. Algoritma kriging bekerja dengan mencari titik yang berada pada jarak tertentu dari titik awal, seperti pada Gambar 2.12.

BAB III

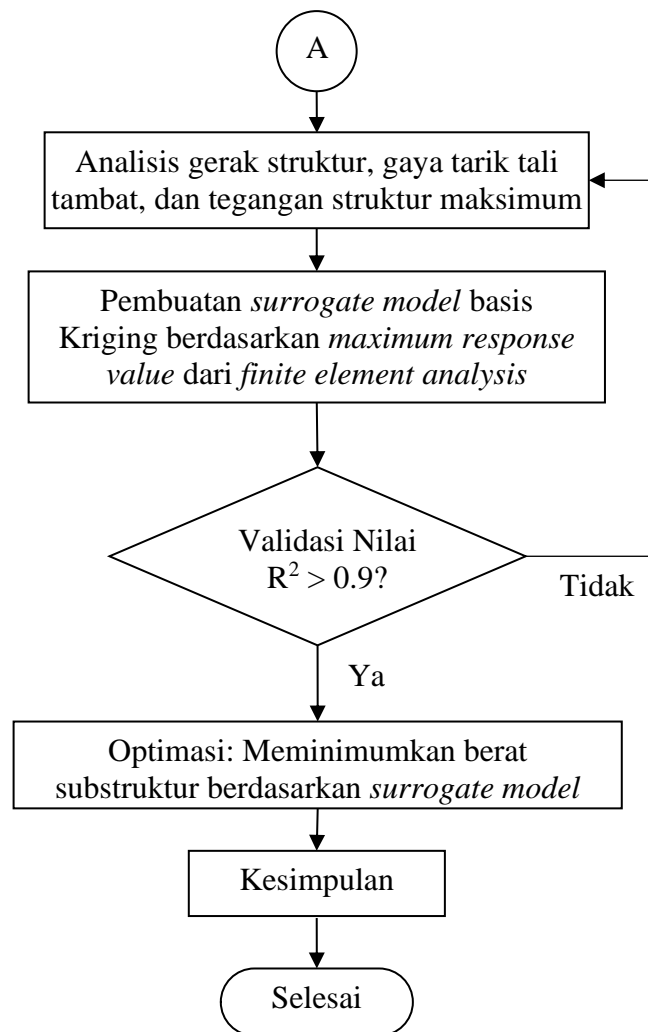
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Diagram alir penelitian ini ditunjukkan oleh Gambar 3.1. Penjelasan terkait setiap kegiatan penelitian dijelaskan pada sub bab 3.2.1 – 3.2.8.



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian (lanjutan)

3.2 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian pada diagram alir pada Gambar 3.1 akan dijelaskan secara rinci sebagai berikut.

3.2.1 Studi Literatur

Tahap studi literatur dilakukan untuk mempelajari literatur yang pernah dipublikasikan terkait dengan topik penelitian tugas akhir ini. Literatur yang dipelajari adalah aero-hidro-servo-elastis, pengaruh bentuk struktur terhadap beban hidrodinamis dan aerodinamis, dan perencanaan optimasi biaya manufaktur struktur. Komponen tersebut dipelajari dengan mencari jurnal atau buku yang membahas *floating offshore wind turbine*, khususnya struktur DeepCWind. Literatur-literatur tersebut juga disesuaikan dengan data serta laporan keuangan

perencanaan turbin angin di dunia sebagai perbandingan. Dengan adanya rujukan dari bidang terkait, permasalahan dalam tugas akhir ini dapat diselesaikan.

3.2.2 Pengumpulan Data

3.2.2.1 Data Struktur

Tahap pengumpulan data merupakan tahap persiapan sebagai basis *input* untuk pemodelan, simulasi, dan analisis numerik yang dilakukan. Beberapa data yang diperlukan adalah data struktur DeepCWind, sistem *seakeeping* DeepCWind, serta parameter hidrostatisnya, yang tercantum pada Tabel 3.1, Tabel 3.2, Tabel 3.3, Tabel 3.4, dan Tabel 3.5.

Tabel 3.1 Dimensi Utama *Platform Semisubmersible* DeepCWind

Nama	Kode	Panjang (m)	OD (m)	Ketebalan (m)
<i>Upper Column</i>	UC	26	12	0,06
<i>Base Column</i>	BC	6	24	0,06
<i>Main Column</i>	MC	30	6,5	0,03
<i>Delta Pontoon</i>	DL, DU	50	1,6	0,0175
<i>Y Pontoon</i>	YL, YU	40,87	1,6	0,0175
<i>Cross Brace</i>	CB	50,7	1,6	0,0175

Tabel 3.2 Parameter Utama pada Struktur DeepCWind

Parameter	Nilai	Unit
Massa Platform	$1,42 \times 10^7$	kg
<i>Centre of Mass (CM)</i>	0; 0; -7,53	m
I_{xx} about CM	$1,29 \times 10^{10}$	kg.m ²
I_{yy} about CM	$1,29 \times 10^{10}$	kg.m ²
I_{zz} about CM	$1,42 \times 10^{10}$	kg.m ²
<i>Draft</i>	20	m

Tabel 3.3 Properti *Member* pada *Semisubmersible* DeepCWind

Kode	Massa (kg)	EI (N.m²)
MC	$1,436 \times 10^5$	$6,701 \times 10^{13}$
UC	$4,594 \times 10^5$	$8,423 \times 10^{14}$
BC	$2,125 \times 10^5$	$6,789 \times 10^{15}$
DU	$2,599 \times 10^4$	$5,720 \times 10^{11}$
DL	$1,778 \times 10^4$	$5,720 \times 10^{11}$
YU	$1,329 \times 10^4$	$5,720 \times 10^{11}$
YL	$9,164 \times 10^3$	$5,720 \times 10^{11}$
CB	$2,142 \times 10^4$	$5,720 \times 10^{11}$

Tabel 3.4 Properti Tower DeepCWind

Parameter	Nilai	Unit
Elevasi dari Tower Base di atas SWL	10	m
Elevasi dari Tower Top di atas SWL	87,6	m
Massa Tower	249.718	kg
Posisi CM pada Tower	43,4	m
<i>Structural-Damping Ratio</i> pada Tower	1%	

Tabel 3.5 Properti pada Sistem Tambat DeepCWind

Parameter	Nilai
Jumlah tali tambat	3
Sudut antar tali tambat	120°
Material	Chain R3
Diameter tali tambat	0,0766 m
Densitas material tali tambat	113,35 kg/m
<i>Structural damping</i> tali tambat	2%
<i>Stiffness</i> tali tambat	753,6 MN
Koefisien <i>drag</i> tali tambat	1,1
Koefisien <i>added mass</i> tali tambat	1,0
Koefisien <i>drag</i> pada seabed	1,0

3.2.2.2 Data Lingkungan

Tahap pengumpulan data merupakan tahap persiapan sebagai basis *input* untuk pemodelan, simulasi, dan analisis numerik yang dilakukan. Data lingkungan berasal dari data sekunder oleh penelitian (Albasyir, 2023) tercantum pada Tabel 3.6.

Tabel 3.6 Data lingkungan perairan Arafura

Parameter	Nilai	Satuan
Kecepatan angin (U_{100})	15,07	m/s
Tinggi gelombang signifikan (H_s)	4,37	m
Periode gelombang (T_p)	7,59	s
Kecepatan Arus (V_c)	0,6	m/s

3.2.3 Pemodelan Substruktur Desain Awal

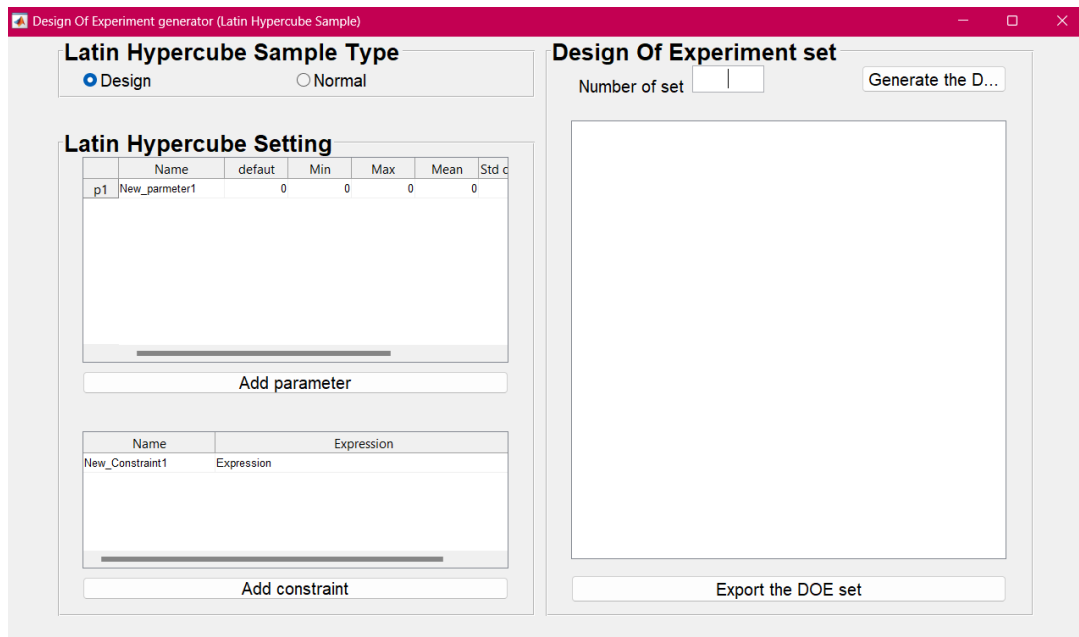
Pemodelan struktur *semisubmersible* dilakukan dengan perangkat lunak MOSES Executive. Pemodelan struktur *semisubmersible* disesuaikan dengan data yang diperoleh dari Report OC4 DeepCWind (Robertson et al., 2014). Output yang diharapkan antara lain *response amplitude operator* (RAO), *load RAO*, dan *wave drift quadratic transfer function* (QTF), untuk selanjutnya menjadi input hidrodinamis pada *software* OrcaFlex.

3.2.4 Validasi Model

Analisis statis menghasilkan beberapa parameter hidrostatis seperti VCG, koefisien *added mass*, dan koefisien *damping*. Hasil pemodelan dibandingkan dengan output yang tersedia dari penelitian Albasyir (2023) yang telah memodelkan model DeepCWind yang tervalidasi dengan model milik Robertson et al (2014). Model dianggap berhasil apabila parameter hidrostatis model memiliki disparitas di bawah 10%.

3.2.5 Sampling pada Ruang Desain Variabel

Penelitian ini melakukan optimasi dimensi, di mana terdapat pengujian terhadap 6 (enam) desain variabel yang terpilih berdasarkan studi oleh Zhou et al. (2021) dan Mas-Soler et al. (2022), antara lain OD dari *column*, *heave plate*, dan *brace*, serta *thickness* dari *column*, *heave plate*, dan *brace*. Penentuan data sample harus merepresentasikan ruang dimensi dari keenam desain variabel untuk menghindari kesalahan estimasi dan bias. Salah satu teknik pengambilan sample yang dapat dijadikan acuan adalah *Latin Hypercube Sampling* (LHS). Metode ini menghasilkan data sampel yang mencakup keseluruhan ruang dimensi variabel tersebut secara lebih efisien daripada metode pengambilan sampel acak sederhana. Berikut merupakan visualisasi 2 dimensi *sample point* desain variabel yang menggunakan LHS sebagai *generator design*-nya pada Gambar 3.2. *Sample-sample point* yang telah dihasilkan akan menjadi data untuk membangun *model surrogate* berdasarkan responsnya.



Gambar 3.2 Tampilan LHS DoE Generator di MATLAB

3.2.6 Penyesuaian Parameter Hidrostatik tiap *Sample Point*

Parameter desain yang telah ditentukan pada *sample point* oleh LHS selanjutnya akan menjadi input pemodelan substruktur DeepCWind. Substruktur dimodelkan pada MOSES Executive yang berbasis *boundary element method*. Teori hidrodinamis yang digunakan untuk melakukan perhitungan interaksi struktur (*surface body*) adalah 3D *diffraction*.

Perubahan dimensi pada *member* terluar, yaitu *column* dan *heave plate*, menjadi krusial apabila ditilik terkait daya apungnya. Pendefinisian daya apung substruktur tiap konfigurasi *sample point* dihitung berdasarkan konsep Archimedes, yang menyatakan bahwa besar dari massa substruktur harus setara dengan volume fluida yang dipindahkan. Parameter dari struktur dalam kondisi *equilibrium* yang ditinjau antara lain titik berat, jari-jari girasi, massa struktur keseluruhan, serta parameter hidrostatik lainnya.

3.2.7 Simulasi Dinamis Aero-Hydro-Servo-Elastic

Analisis dinamis dilakukan secara coupling menggunakan *software* OpenFAST dan OrcaFlex sebagai pengganti modul HydroDyn dan MoorDyn. Hasil output perolehan MOSES akan menjadi input karakteristik hidrostatik substruktur pada OrcaFlex. Selain itu, modul SubDyn digunakan dalam penelitian ini untuk memperoleh *end force* pada tiap *node member* substruktur. Parameter ini akan menjadi perhitungan sederhana untuk memperoleh besar tegangan. Simulasi *time domain* dilakukan selama 3600 detik pada kondisi lingkungan *serviceability limit state*.

3.2.8 Pembentukan *Surrogate model*

Model-model yang telah melewati *finite element analysis* akan menghasilkan respons yang menjadi data untuk membangun model pengganti. Model pengganti, atau biasa disebut *surrogate model*, merupakan model statistik yang digunakan untuk memperkirakan model *machine learning* yang sesuai pada model dengan komputasi yang kompleks. *Surrogate model* bekerja dengan menggantikan *output* data dari model komputasi yang mahal dengan pendekatan fungsional dari model eksperimental yang telah ada, sehingga dapat mengurangi biaya komputasi dengan model yang serupa. Pendekatan fungsional ini memiliki waktu evaluasi yang cepat dan murah.

Surrogate model dibangun dari titik-titik *sample point* pada satu analisis respons yang sama. Pada penelitian ini, terdapat 6 respons yang ditinjau, antara lain gerak *surge* dan *pitch* struktur, *displacement tower top* (*fore-aft* dan *pitch*), tegangan struktur, dan gaya tali tambat

struktur. *Response value* ini akan diplot tiap parameter untuk selanjutnya dilakukan verifikasi. Model respons akan diinterpolasi dengan algoritma yang Kriging.

Metode yang sesuai untuk mengukur keakuratan respons pada jumlah n point yang banyak adalah metode K-Fold *Cross-Validation*. Metode ini membagi subset menjadi beberapa bagian (*folds*), sebagian besar data dilatih sebagai *training data*, dan sebagian kecil data dievaluasi sebagai *testing data*. Pembagian data ini kemudian diulangi hingga seluruh data memiliki peran yang sama. Hasil evaluasi merupakan rata-rata dari nilai akurasi tiap hasil uji *folds*. *Model surrogate* dianggap valid apabila nilai R^2 lebih besar dari 0,9 (Yu et al., 2023).

3.2.9 Optimasi Desain

Optimasi dimensi menitikberatkan *objective function* pada minimisasi berat struktur yang dipengaruhi oleh ukuran struktur. Perubahan dari *outer diameter* dan *thickness* yang lebih kecil akan menurunkan berat struktur secara keseluruhan, tetapi perubahan ini sangat mempengaruhi aspek gerakan struktur dan kekuatan struktur secara signifikan. Hal ini disebabkan oleh karena gaya-gaya hidrodinamis dengan efek non linear yang dikenai pada substruktur.

Surrogate model berdasarkan analisis *aero-hydro-servo-elastic* yang telah dibentuk sebelumnya akan ditinjau parameter gerakan dan deformasi strukturnya. Parameter tersebut akan diverifikasi berdasarkan *constraint* yang telah disebutkan di atas. Apabila suatu desain tidak memenuhi salah satu di antara *constraint* tersebut, maka struktur tidak dapat berlanjut ke tahap selanjutnya. Maka dari itu, metode optimasi dengan *single objective function* yang sesuai untuk memodelkan efek non linear pada berbagai variabel desain adalah metode Sequential Quadratic Programming (SQP). Metode ini dipilih karena dapat memodelkan efek non linear pada berbagai variabel desain dengan hasil konvergensi yang tinggi (Renty, 2020).

Akan tetapi, tidak semua variasi dari spesifikasi desain pada *case* memenuhi kriteria-kriteria umum struktur terapung. Apabila struktur *semisubmersible* tidak memenuhi kriteria umum tersebut, maka keseluruhan struktur FOWT akan mengalami kegagalan, baik dari stabilitas negatif hingga kegagalan tambat.

3.2.9.1 Model Optimasi

Penelitian ini menitikberatkan penurunan berat (W) sebagai fungsi objektif pada proses optimasi secara deterministik. Hal ini menjadikan input dari parameter optimasi bernilai angka riil dengan solusi optimasi yang tidak mempertimbangkan ketidakpastian, sehingga performa desain optimum

direncanakan memiliki nilai yang dekat dengan batas kendala. Solusi dari desain optimum didasarkan pada penentuan *cross-sectional* properties dari *member-member* substruktur seperti terlihat pada Gambar 2.5, kecuali *member* main *column* sebagai *member* penopang tower turbin. Variabel desain yang akan dioptimasi antara lain *outside diameter* (OD) dan ketebalan dari *column*, *heave plate*, dan *brace*. Optimasi dilakukan dengan menurunkan fungsi berat dengan mempertimbangkan berbagai kendala di berbagai aspek. Model matematis dari optimasi dapat terlihat pada persamaan di bawah ini.

Hitung: $OD_1, OD_2, OD_3, t_1, t_2, t_3$

Dengan meminimumkan: $W (OD_1, OD_2, OD_3, t_1, t_2, t_3)$

Dibatasi oleh:

$$g_1 = U_{allow} - U_{max} \geq 0$$

$$g_2 = \theta_{allow} - \theta_{max} \geq 0$$

$$g_3 = 1.25 \frac{H_t}{100} - u_{max} \geq 0$$

$$g_4 = \phi_{allow} - \phi_{max} \geq 0$$

$$g_5 = \sigma_{allow} - \sigma_{max} \geq 0$$

$$g_6 = \frac{MBL}{1.67} - F_{max} \geq 0$$

3.2.9.2 Kendala Optimasi

Agar struktur tidak mengalami kegagalan, diperlukan kondisi batas atau disebut dengan *constraint*, yang berfungsi untuk membatasi area dari daerah *feasible region* pada proses optimasi. *Constraint* pada optimasi deterministik merupakan nilai yang riil serta tidak mempertimbangkan ketidakpastian. Pada penelitian ini, *constraint* yang digunakan tertera dalam Tabel 3.7.

Tabel 3.7 Ketentuan *constraints*

Aspek	Parameter	Model Constraint	
Gerakan platform	<i>Surge</i>	g_1	$U_{allow} - U_{max} \geq 0$
	<i>Pitch</i>	g_2	$\theta_{allow} - \theta_{max} \geq 0$
Perpindahan <i>tower-top</i>	<i>Fore-aft</i>	g_3	$1.25 \frac{H_t}{100} - u_{max} \geq 0$
	<i>Pitch</i>	g_4	$\phi_{allow} - \phi_{max} \geq 0$
Tegangan <i>member</i>		g_5	$\sigma_{yield} - \sigma_{max} \geq 0$
Gaya tarik tali tambat		g_6	$MBL \times SF - F_{max} \geq 0$

Constraints yang telah disebutkan harus memenuhi kode dan standar yang berlaku. Salah satu standar yang akan digunakan adalah standar DNV-OS-J101 dan DNV-OS-J103 mengenai *Design of Floating Wind Turbine Structures*. Besar dari perpindahan *surge* yang diperbolehkan adalah sebesar 30 meter, sedangkan gerakan *pitch* yang diperbolehkan adalah sebesar 10°. Besar perpindahan *tower-top* pada arah *fore-aft* yang diperbolehkan adalah sebesar $1.25 \frac{H_t}{100}$, di mana H_t (tinggi struktur dari SWL) sebesar 87 meter, sehingga besar u_{allow} adalah 1,22 meter. Sedangkan pada perpindahan *tower-top* arah *pitch*, besar ϕ_{allow} yang diperkenankan adalah 0,5°. Untuk tegangan *member*, besar tegangan maksimum harus kurang dari *yield stress* nya, yaitu sebesar 355 MPa. Pada gaya tarik tali tambat, besar F_{allow} harus berada di bawah besar *minimum breaking load* dikalikan dengan *safety factor* sebesar 1,67 pada kondisi *serviceability limit state, intact condition* berdasarkan acuan dari DNV GL-ST-N001, sehingga F_{allow} sebesar 2924,5 kN.

3.2.9.3 Variabel Desain

Variabel desain dalam optimasi adalah parameter-parameter yang dapat diubah dalam proses optimasi untuk mencapai tujuan tertentu, seperti meminimalkan biaya, memaksimalkan efisiensi, atau mencapai keseimbangan optimal dalam suatu sistem. Variabel desain pada optimasi dilampirkan pada Tabel 3.8.

Tabel 3.8 Variabel desain pada optimasi

Variabel Desain	Kode Member	Batas Atas	Batas Bawah
OD ₁	UC	12	6
OD ₂	HP	24	12
OD ₃	DL, DU, YL, YU, CB	1,6	1,0
t ₁	UC	0,0600	0,0200
t ₂	HP	0,0600	0,0200
t ₃	DL, DU, YL, YU, CB	0,0175	0,0050

3.2.10 Kesimpulan

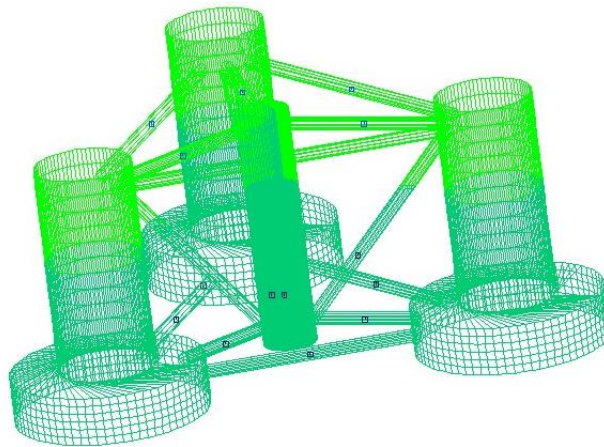
Kesimpulan merupakan tahap akhir sebagai penarikan informasi dari analisis-analisis yang telah dilakukan untuk menjawab rumusan masalah penelitian.

BAB IV

ANALISA DAN PEMBAHASAN

4.1 Pemodelan Substruktur pada MOSES

Pemodelan struktur *semisubmersible* merujuk pada data yang tersedia pada report OC4 DeepCWind National Renewable Energy Laboratory. Substruktur dibagi menjadi tiga bagian utama, yaitu *column*, *heave plate*, dan *brace*. Struktur *column* dan *heave plate* dimodelkan berdasarkan *potential flow theory* dengan metode 3D *diffraction*, sedangkan struktur *brace* dimodelkan berdasarkan *morison theory*. Gambar 4.1 adalah model *semisubmersible* desain awal yang dimodelkan pada *software* MOSES.

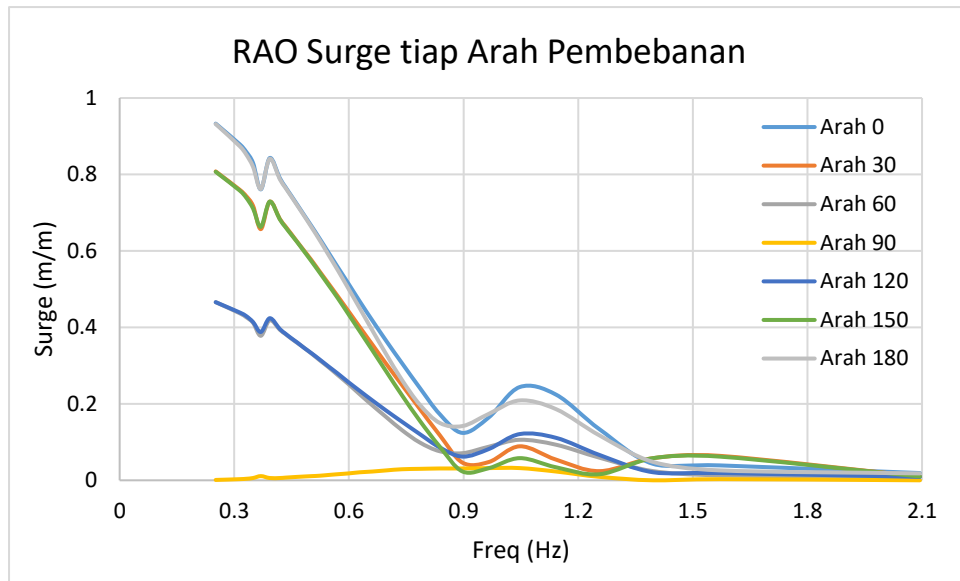


Gambar 4.1 Model *Semisubmersible* DeepCWind Tampak Isometrik

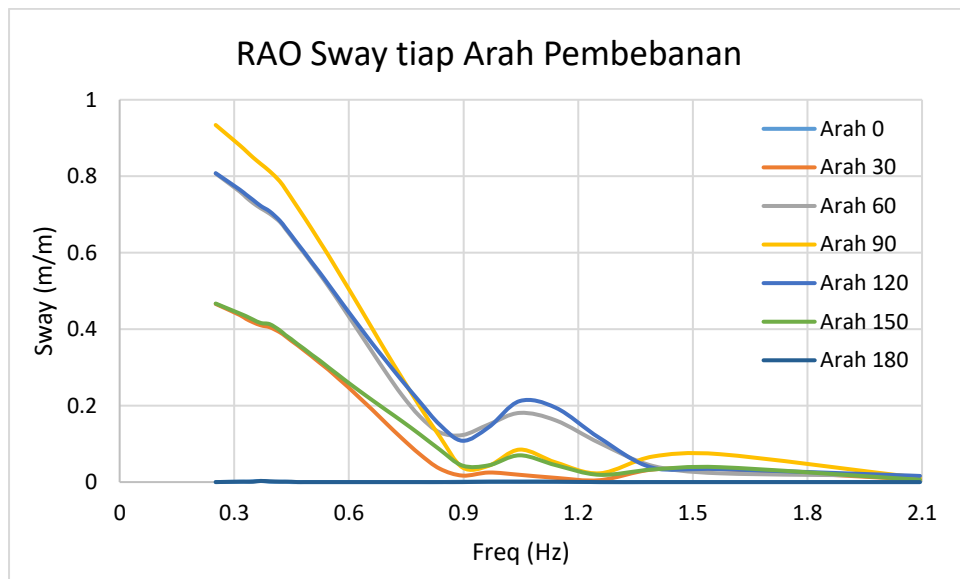
Substruktur yang dimodelkan pada *software* MOSES dapat menganalisis beberapa parameter, antara lain koefisien hidrostatis (koefisien *added mass* dan koefisien *damping*), tinggi GM, dan respons gerak struktur pada *frequency-domain*, yang ditunjukkan pada Tabel 4.1. Gambar 4.2 merupakan grafik RAO *frequency domain* pada 7 arah pembebanan beserta parameter hidrostatis yang dikeluarkan oleh MOSES.

Tabel 4.1 Parameter Hidrostatis Substruktur

Parameter	Nilai	Unit
Displacement	13.563,51	mT
VCG	6,48	m
Tinggi GM	12,79	m
Radius Girasi (Kxx, Kyy, Kzz)	20,49; 20,49; 29,62	m

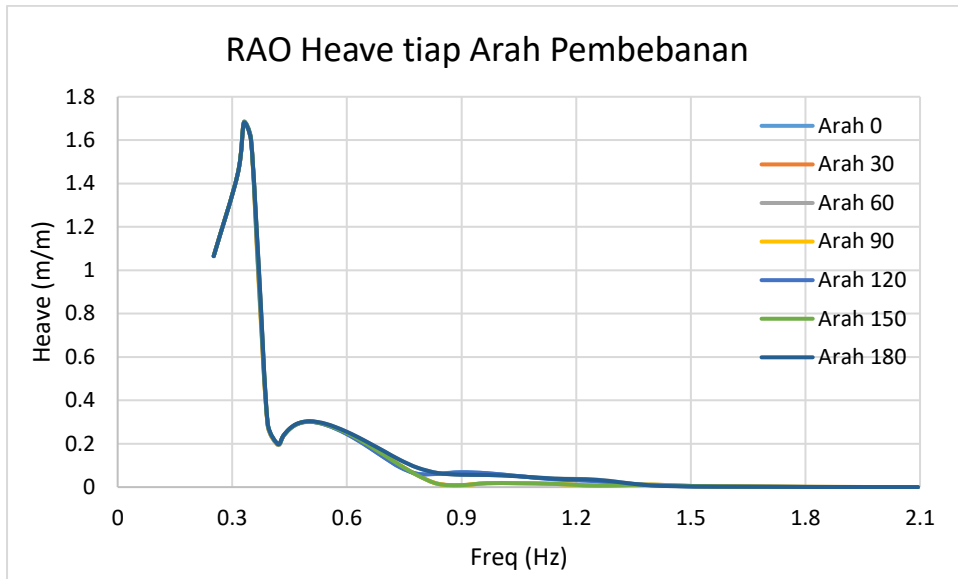


(a)

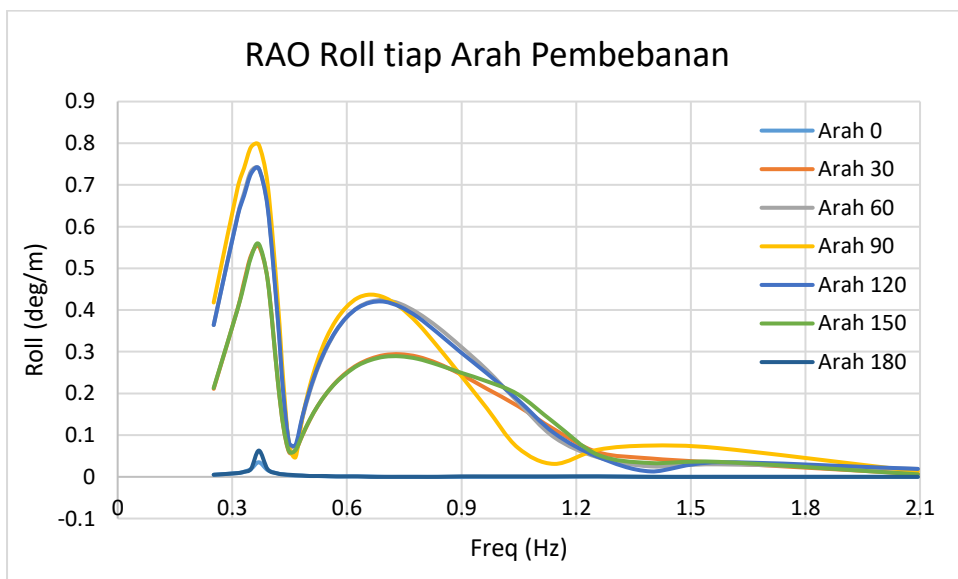


(b)

Gambar 4.2 Grafik RAO pada (a) *surge*, (b) *sway*, (c) *heave*, (d) *roll*, (e) *pitch*, (f) *yaw*

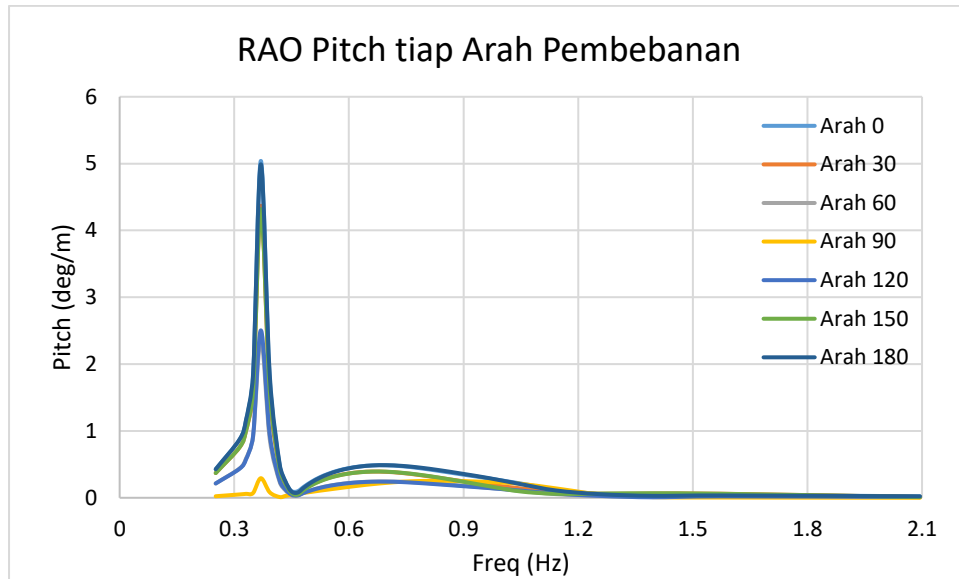


(c)

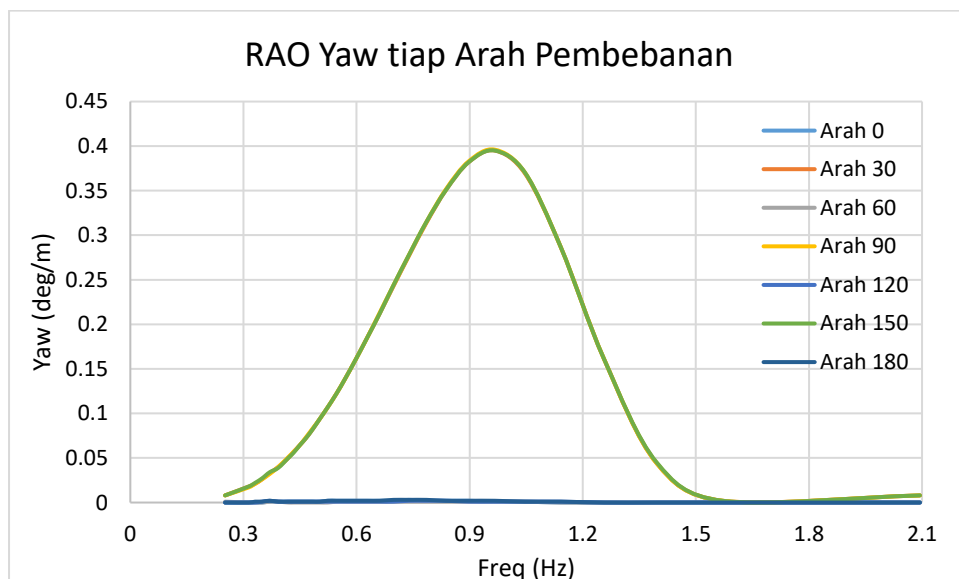


(d)

Gambar 4.2 Grafik RAO pada (a) *surge*, (b) *sway*, (c) *heave*, (d) *roll*, (e) *pitch*, (f) *yaw* (lanjutan)



(e)



(f)

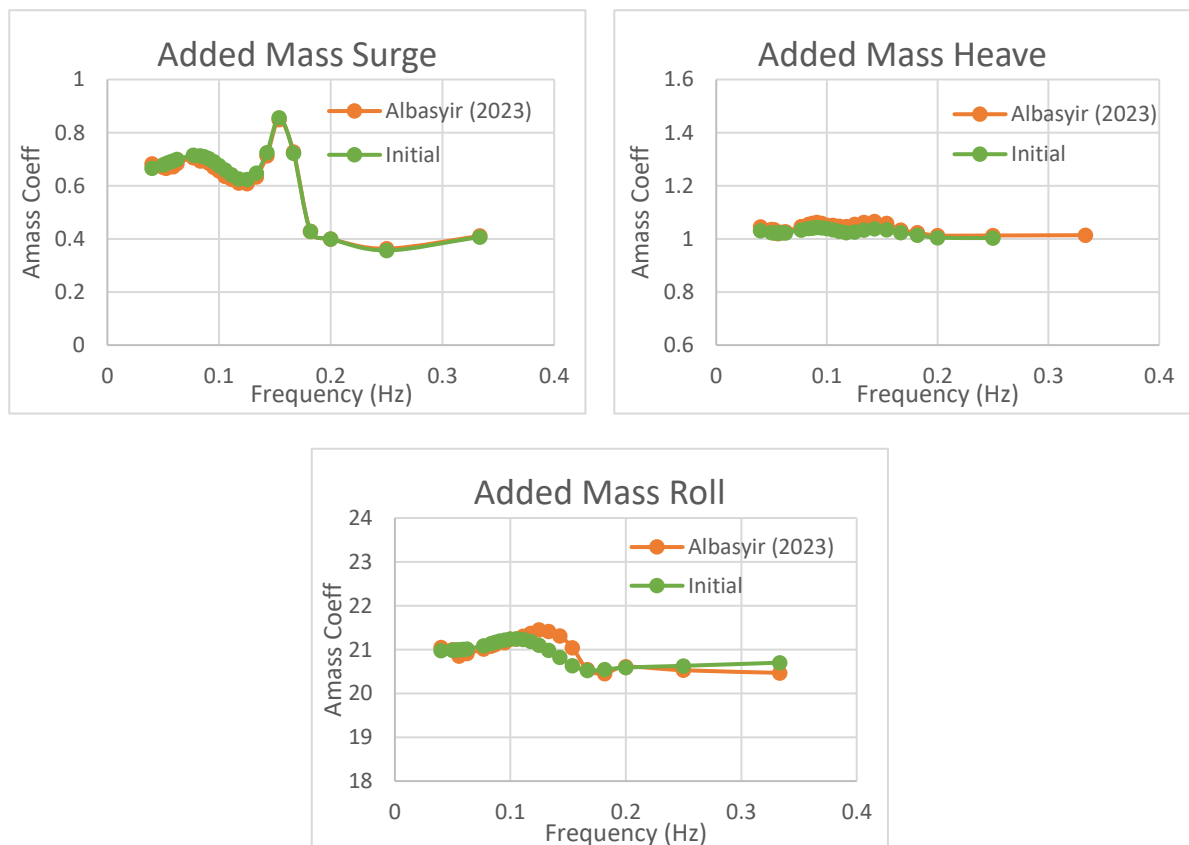
Gambar 4.2 Grafik RAO pada (a) *surge*, (b) *sway*, (c) *heave*, (d) *roll*, (e) *pitch*, (f) *yaw* (lanjutan)

Berdasarkan Gambar 4.2, terlihat bahwa substruktur dari DeepCWind memiliki bentuk simetris terhadap bidang XZ dikarenakan distribusi massa struktur pada sumbu X dan sumbu Y bernilai sama. Nilai ini tercermin pada radius girasi K_{xx} dan K_{yy} yang memiliki nilai yang serupa. DeepCWind pada desain awal juga memiliki nilai GM yang tinggi, yaitu 12,79 meter, yang menandakan bahwa struktur mengalami stabilitas positif. Pada respons gerak dengan arah pembebanan 0 derajat, gerak struktur yang mendominasi adalah gerak *pitch*, disusul oleh gerak

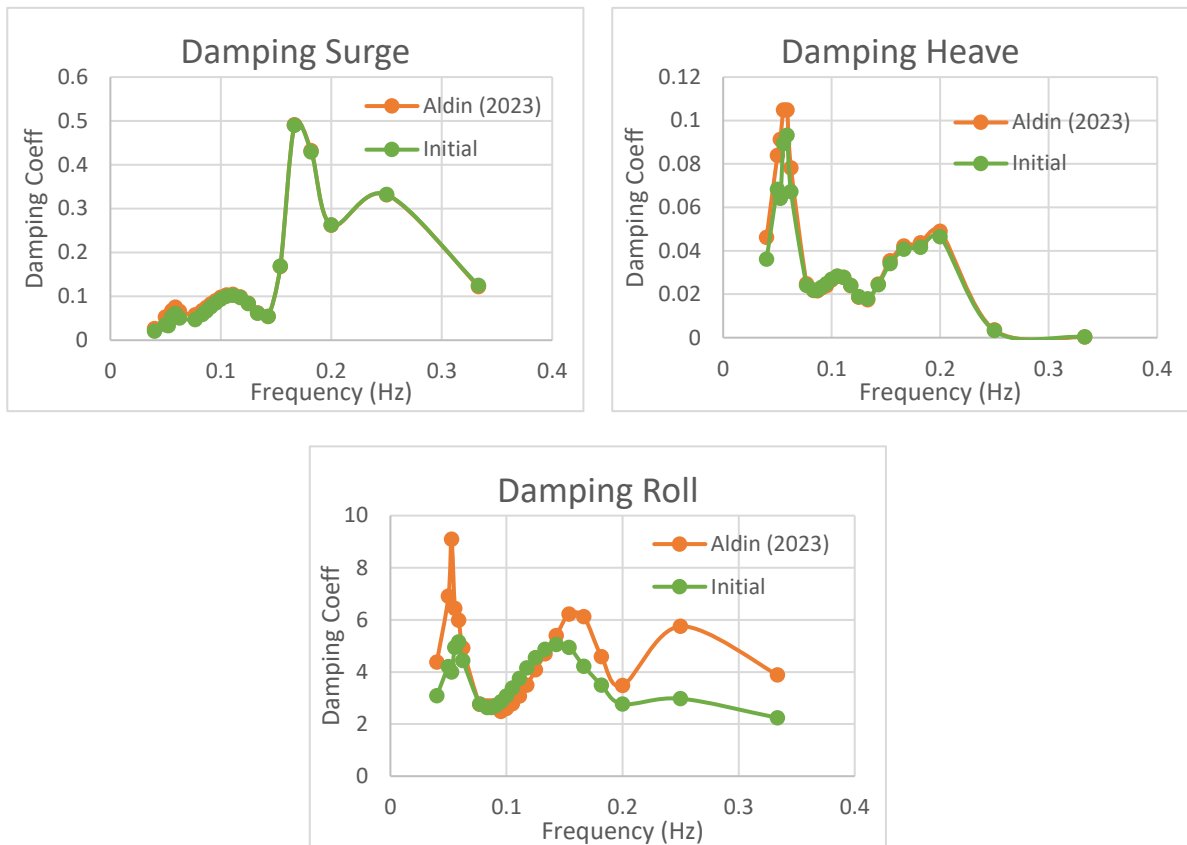
heave dan surge. Nilai *pitch* maksimum mencapai 5° pada frekuensi 0,3491 Hz atau pada periode 18 detik. Pada kasus serupa di berbagai arah pembebanan, gerak maksimum struktur terjadi pada periode 18 detik, sehingga dapat disimpulkan bahwa periode natural substruktur bernilai 18 detik.

4.2 Validasi Model Substruktur

Validasi dilakukan dengan membandingkan parameter hidrostatik dan hidrodinamis pada model substruktur DeepCWind berdasarkan *report* dari OC4 serta penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya. Parameter yang ditinjau antara lain volume *displacement*, VCG, koefisien *added mass*, dan koefisien *damping*, yang ditunjukkan pada Tabel 4.2, Gambar 4.4, dan Gambar 4.5. Kriteria validasi hidrostatik merujuk pada IMO Guidance, sedangkan kriteria validasi hidrodinamis merujuk pada nilai disparitas dengan metode MAPE kurang dari 20%.



Gambar 4.3 Grafik validasi koefisien *added mass* oleh Albasyir (2023)



Gambar 4.4 Grafik validasi koefisien *damping* oleh Albasyir (2023)

Tabel 4.2 Validasi parameter hidrostatis

Parameter	Model Moses	Ref. OC4	MAPE	Status
<i>Displacement</i> (ton)	13.563	13.473	-0,67%	PASS
VCG (m)	6,48	6,54	0,92%	PASS

Tabel 4.3 Nilai MAPE parameter hidrodinamis antara model dengan penelitian terdahulu

Parameter	<i>Surge</i>	<i>Sway</i>	<i>Heave</i>	<i>Roll</i>	<i>Pitch</i>	<i>Yaw</i>
Koefisien <i>Added Mass</i>	-2%	-1%	1%	0%	0%	-1%
Koefisien <i>Damping</i>	9%	9%	5%	11%	-5%	3%

Berdasarkan data perolehan antara model yang digunakan dengan penelitian Albasyir (2023) dan Vernanda (2018), model memiliki disparitas dengan nilai MAPE < 20% dengan kriteria baik. Maka dari itu, berdasarkan **Tabel 4.3** dapat disimpulkan bahwa model dapat dilanjutkan ke tahap berikutnya karena memenuhi syarat validasi.

4.3 Penentuan Desain Eksperimen

Design of experiments (DoE) atau desain eksperimen merupakan rancangan desain dengan variasi variabel desain sesuai dengan ruang dimensi dari variabel. Salah satu teknik penentuan desain eksperimen yang memiliki kemampuan untuk mendistribusikan variabel pada ruang secara merata adalah teknik Latin Hypercube Sampling.

Penentuan desain eksperimen dengan teknik Latin Hypercube Sampling dapat dihasilkan oleh generator dari MATLAB, yaitu LHS DoE Generator, terlihat pada Gambar 4.5. Parameter yang diinputkan pada *tools* antara lain batas atas, batas bawah, rata-rata, dan varians dari setiap variabel desain. Hubungan antara variabel desain dengan batasan yang mengacu pada variabel desain juga dapat ditambahkan. Setelah menentukan jumlah dari set desain eksperimen yang diinginkan, MATLAB akan mengeluarkan variasi dari variabel desain tiap desain eksperimen yang mewakili setiap ruang dalam dimensi variabel.

Teknik sampling ini menghasilkan desain eksperimen yang mencakup keseluruhan ruang dimensi variabel secara lebih efisien daripada metode pengambilan sampel acak sederhana. Jumlah desain eksperimen pada penelitian ini adalah 120 desain eksperimen, di mana desain eksperimen yang telah terbentuk ini selanjutnya disimulasikan pada *software* berbasis aero-hydro-servo-elastic, yaitu OpenFAST.

Name	default	Min	Max	Mean	Std devia.	Precision	Avialbe
p1 OD_Column	12	6	12	9	2.7000	0.1000	<input checked="" type="checkbox"/>
p2 OD_HeavePlate	24	12	24	18	5.4000	0.1000	<input checked="" type="checkbox"/>
p3 OD_Brace	1.0000	0.0000	1.0000	1.1000	0.3300	0.0100	<input checked="" type="checkbox"/>
p4 L_Column	0.0600	0.0200	0.0600	0.0400	0.0120	1.0000e-03	<input checked="" type="checkbox"/>
p5 L_HeavePlate	0.0600	0.0200	0.0600	0.0400	0.0120	1.0000e-03	<input checked="" type="checkbox"/>
p6 L_Brace	0.0175	0.0050	0.0175	0.0150	0.0034	1.0000e-01	<input checked="" type="checkbox"/>

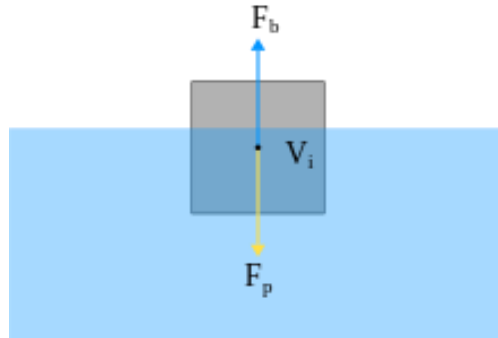
	OD_Column	OD_HeavePlate	OD_Brace	L_Column	L_HeavePlate	L_Brace
DP1	6	21	1.200	0.0470	0.0330	0.0143
DP2	6.1000	20.1000	0.9400	0.0540	0.0220	0.0156
DP3	6.1000	21.7000	1.2000	0.0290	0.0600	0.0172
DP4	6.2000	13.1000	0.6800	0.0430	0.0500	0.0092
DP5	6.2000	14.3000	0.9200	0.0330	0.0220	0.0151
DP6	6.3000	15.2000	1.3800	0.0400	0.0440	0.0059
DP7	6.3000	23.8000	1.4200	0.0370	0.0320	0.0104
DP8	6.4000	12.2000	1.5900	0.0330	0.0420	0.0127
DP9	6.4000	22.6000	1.4400	0.0480	0.0340	0.0057
DP10	6.5000	18.5000	0.6600	0.0560	0.0380	0.0067
DP11	6.5000	20.8000	1.2200	0.0210	0.0250	0.0149
DP12	6.6000	20.7000	0.9800	0.0590	0.0570	0.0059
DP13	6.6000	22.5000	1.0300	0.0220	0.0380	0.0082
DP14	6.7000	16.3000	0.6200	0.0420	0.0520	0.0125
DP15	6.7000	23.2000	0.7200	0.0440	0.0450	0.0132
DP16	6.8000	22	1.3300	0.0400	0.0260	0.0107
DP17	6.8000	23	1.0100	0.0310	0.0590	0.0123
DP18	6.9000	12.9000	1.0900	0.0380	0.0310	0.0080
DP19	6.9000	13.9000	1.3000	0.0340	0.0360	0.0170
DP20	7	17.4000	1.5800	0.0250	0.0280	0.0158
DP21	7	22.8000	0.8500	0.0430	0.0490	0.0063
DP22	7.1000	13.2000	1.3800	0.0540	0.0390	0.0093
DP23	7.1000	15	1.0900	0.0480	0.0550	0.0174
DP24	7.2000	13	0.7500	0.0470	0.0420	0.0086
DP25	7.2000	19.5000	1.1300	0.0410	0.0560	0.0083
DP26	7.3000	14.8000	0.8900	0.0530	0.0430	0.0056
DP27	7.3000	21.7000	1.4500	0.0390	0.0210	0.0158
DP28	7.4000	17	0.8600	0.0290	0.0440	0.0094
DP29	7.4000	18.3000	1.2400	0.0460	0.0400	0.0096
DP30	7.5000	18.5000	0.8400	0.0350	0.0200	0.0079

Gambar 4.5 Input distribusi variabel desain pada LHS DoE Generator di MATLAB

Desain eksperimen yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebanyak 120 sampel data. Konfigurasi dimensi tiap desain eksperimen dicantumkan pada LAMPIRAN A DESAIN EKSPERIMEN.

4.4 Penyesuaian Daya Apung Struktur

4.4.1 Penerapan Prinsip Archimedes



Gambar 4.6 Ilustrasi Hukum Archimedes

Pada Gambar 4.6, Hukum Archimedes menyatakan bahwa gaya angkat yang diberikan oleh fluida terhadap suatu benda yang tercelup sama dengan berat fluida yang dipindahkan oleh benda tersebut. Pada keadaan struktur yang mengapung, prinsip Archimedes dinyatakan dalam persamaan berikut.

$$F_B = W \quad (4.1)$$

$$\rho_w \times g \times V_{submerged} = \rho_s \times g \times V_T$$

Dengan:

W : Gaya berat (N)

B : Gaya angkat (N)

ρ_s : Massa jenis baja (kg/m^3)

g : Percepatan gravitasi (kg/m^2)

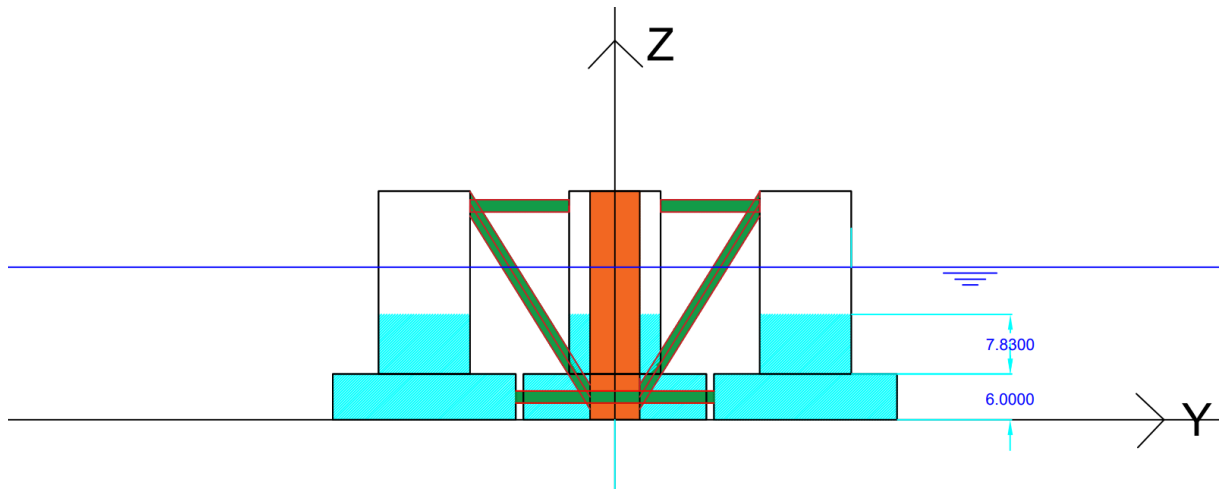
V_T : Volume total struktur (m^3)

ρ_w : Massa jenis air (kg/m^3)

$V_{submerged}$: Volume tercelup struktur (m^3)

Dalam kasus ini, berat total yang dimiliki struktur didapat dari penjumlahan massa baja dan massa air pemberat (*ballast*). Sesuai dengan Report OC4, *ballast water* berada di dalam

heave plate dan *column*, tetapi tidak berada pada *main column* dan *brace*. Posisi *ballast water* yang direkomendasikan adalah dimulai dari dasar struktur. Ilustrasi *ballast water* dapat dilihat pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7 Posisi *Ballast Water*

Dengan:

- : *Column (unflooded)*
- : *Column & Heave plate (flooded)*
- : *Main Column (unflooded)*
- : *Brace (unflooded)*

Untuk mencapai kesetimbangan, besar gaya berat struktur harus setara dengan gaya apungnya. Perolehan gaya berat (W) didapatkan dari perkalian antara massa jenis baja (ρ_s) dengan volume struktur keseluruhan (V_T) dikalikan percepatan gravitasi (g), sedangkan gaya apung (F_B) diperoleh dari perkalian antara massa jenis fluida (ρ_w) dengan volume struktur yang tercelup ($V_{\text{submerged}}$) dikalikan percepatan gravitasi (g).

4.4.2 Perhitungan Daya Apung pada Dimensi Tereduksi

Sebagai contoh perhitungan, diasumsikan terdapat perubahan sebagaimana tercantum pada desain eksperimen nomor 1 pada LAMPIRAN A DESAIN EKSPERIMEN, dengan dimensi OD *column* (OD_1) sebesar 12 meter menjadi 6 meter, OD *heave plate* (OD_2) sebesar 24 meter menjadi 20,5 meter, OD *brace* (OD_3) sebesar 1,6 meter menjadi 0,7 meter, *thickness column* (t_1) sebesar 0,06 meter menjadi 0,044 meter, *thickness heave plate* (t_2) sebesar 0,06 meter menjadi 0,055 meter, dan *thickness brace* (t_3) sebesar 0,0175 meter menjadi 0,0110 meter, sedangkan dimensi OD dan *thickness* pada *main column* adalah tetap. Dilakukan perhitungan secara analitik untuk memperoleh gaya berat struktur secara

keseluruhan (W) dengan dimensi yang telah disebutkan sebelumnya. Perhitungan gaya berat dilakukan per *member* dengan *properties*-nya masing-masing, sebagaimana contoh perhitungan *member column* yang akan dijabarkan pada penjelasan berikut ini.

- Dimensi Member

Terdapat penyesuaian panjang pada *brace*. Hal ini disebabkan karena *brace* menjadi penghubung antara *column* dengan *column* (pada *delta upper brace/DU*), *heave plate* dengan *heave plate* (pada *delta lower brace/DL*), *column* dengan *main column* (pada *Y upper brace/YU*), *heave plate* dengan *main column* (pada *Y lower brace/YL*), dan *main column* dengan *column* (pada *cross brace/CB*) sehingga perubahan dimensi OD pada member tersebut sangat sensitif terhadap panjang *brace*. Berikut merupakan fungsi dari perhitungan berat panjang tiap *brace*.

$$L_{DU} = 2 \times \left(25 - \left(\frac{OD_1}{2} \right) \right) \quad (4.2)$$

$$L_{DL} = 2 \times \left(25 - \left(\frac{OD_2}{2} \right) \right) \quad (4.3)$$

$$L_{YU} = 25,6175 \times \left(\frac{OD_1}{2} \right) \quad (4.4)$$

$$L_{YL} = 25,6175 \times \left(\frac{OD_2}{2} \right) \quad (4.5)$$

$$L_{CB} = \sqrt{\left(25,6175 - \left(\frac{OD_1}{2} \right) \right)^2 + 25,33^2} \quad (4.6)$$

Berdasarkan perhitungan di atas, diperoleh panjang masing-masing *brace* tertera pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Hasil perhitungan panjang *brace* (desain eksperimen no.1)

Member	OD (m)	t (m)	Panjang (m)
Delta pontoon upper	0,7	0,011	44
Delta pontoon lower	0,7	0,011	29,5
Y pontoon upper	0,7	0,011	22,6175
Y pontoon lower	0,7	0,011	15,3675
Cross brace	0,7	0,011	33,958

- Volume Steel

Volume member didefinisikan dengan volume OD dikurangi dengan volume ID, sebagaimana tertera pada perhitungan berikut ini.

$$V_m = V_{OD} - V_{ID} \quad (4.7)$$

$$V_m = \left[\left(\frac{\pi}{4} \times OD^2 \times h \right) - \left(\frac{\pi}{4} \times ID^2 \times h \right) \right] m^3$$

$$V_m = \left[\left(\frac{\pi}{4} \times OD^2 \times h \right) - \left(\frac{\pi}{4} \times (OD - 2 \cdot t)^2 \times h \right) \right] m^3$$

Berdasarkan persamaan tersebut, maka diperoleh volume member (*steel*) secara keseluruhan pada desain eksperimen nomor 1 tertera pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Hasil perhitungan volume *steel* (desain eksperimen no.1)

Member	Volume OD (m3)	Volume ID (m3)	Volume OD-ID (m3)	Steel Volume (m3)
Main Column	995,49	977,20	18,29	18,29
Column 1	735,13	713,73	21,41	21,41
Column 2	735,13	713,73	21,41	21,41
Column 3	735,13	713,73	21,41	21,41
Heave Plate 1	1980,38	1959,19	21,20	21,20
Heave Plate 2	1980,38	1959,19	21,20	21,20
Heave Plate 3	1980,38	1959,19	21,20	21,20
Delta Pontoon Upper 1	16,93	15,89	1,05	1,05
Delta Pontoon Upper 2	16,93	15,89	1,05	1,05
Delta Pontoon Upper 3	16,93	15,89	1,05	1,05
Delta Pontoon Lower 1	11,35	10,65	0,70	0,70
Delta Pontoon Lower 2	11,35	10,65	0,70	0,70
Delta Pontoon Lower 3	11,35	10,65	0,70	0,70
Y Pontoon Upper 1	8,70	8,17	0,54	0,54
Y Pontoon Upper 2	8,70	8,17	0,54	0,54
Y Pontoon Upper 3	8,70	8,17	0,54	0,54
Y Pontoon Lower 1	5,91	5,55	0,37	0,37
Y Pontoon Lower 2	5,91	5,55	0,37	0,37
Y Pontoon Lower 3	5,91	5,55	0,37	0,37
Cross Brace 1	13,07	12,26	0,81	0,81
Cross Brace 2	13,07	12,26	0,81	0,81
Cross Brace 3	13,07	12,26	0,81	0,81
UCTC 1				1,21
UCTC 2				1,21
UCTC 3				1,21
UCBC 1				1,21
UCBC 2				1,21
UCBC 3				1,21
BCTC 1				16,75
BCTC 2				16,75
BCTC 3				16,75
BCBC 1				17,96
BCBC 2				17,96
BCBC 3				17,96
MCBC				0,98
Total Volume				268,84

- Massa Substruktur

Massa dari substruktur merupakan penjumlahan dari massa *steel* dan massa ballast. Berikut merupakan perhitungan dari massa *steel* substruktur pada desain eksperimen nomor 1.

$$m_s = \rho_s \times V_m \quad (4.8)$$

$$m_s = 7.850 \frac{kg}{m^3} \times 268,84 m^3$$

$$m_s = 2.110.420,19 kg$$

- Gaya *Buoyancy*

Gaya angkat ke atas merupakan fungsi dari massa jenis air laut dikalikan gravitasi dikalikan volume benda tercelup. Struktur *semisubmersible* direncanakan untuk memiliki sarat air setinggi 20 meter. Tabel 4.6 merupakan perhitungan dari volume yang tercelup pada desain eksperimen nomor 1.

Tabel 4.6 Perhitungan volume tercelup (desain eksperimen no.1)

No	Member	OD (m)	Height of Draft (m)	Submerged Volume (m3)
1	Main Column	6,5	20	663,66
2	Column 1	6	14	395,84
3	Column 2	6	14	395,84
4	Column 3	6	14	395,84
5	Heave Plate 1	20,5	6	1980,38
6	Heave Plate 2	20,5	6	1980,38
7	Heave Plate 3	20,5	6	1980,38
8	Delta Pontoon Upper 1	0,7	0	0,00
9	Delta Pontoon Upper 2	0,7	0	0,00
10	Delta Pontoon Upper 3	0,7	0	0,00
11	Delta Pontoon Lower 1	0,7	29,5	11,35
12	Delta Pontoon Lower 2	0,7	29,5	11,35
13	Delta Pontoon Lower 3	0,7	29,5	11,35
14	Y Pontoon Upper 1	0,7	0	0,00
15	Y Pontoon Upper 2	0,7	0	0,00
16	Y Pontoon Upper 3	0,7	0	0,00
17	Y Pontoon Lower 1	0,7	15,3675	5,91
18	Y Pontoon Lower 2	0,7	15,3675	5,91
19	Y Pontoon Lower 3	0,7	15,3675	5,91
20	Cross Brace 1	0,7	12,665	4,87
21	Cross Brace 2	0,7	12,665	4,87
22	Cross Brace 3	0,7	12,665	4,87
			Volume Submerged	7858,75

Berikut merupakan perhitungan dari gaya *buoyancy* yang dimiliki struktur dengan dimensi menyesuaikan desain eksperimen nomor 1.

$$F_B = \rho_w \times g \times V_{submerged} \quad (4.9)$$

$$F_B = 1.025 \times 9,81 \times 7.858,75$$

$$F_B = 79.021.707,81 \text{ N}$$

- Penyesuaian Massa *Ballast*

Gaya berat struktur secara keseluruhan substruktur pada kondisi *free-floating* (W) harus setara dengan gaya apung struktur (F_B). Hal ini dapat diatasi dengan penyesuaian berat *ballast* yang dapat diatur sedemikian hingga total keseluruhan gaya berat sama besar dengan gaya apung. Berikut merupakan rincian perhitungan gaya apung struktur (F_B) serta gaya berat struktur secara keseluruhan (W).

$$F_B = W_{steel} + W_{ballast} \quad (4.10)$$

$$F_B = (m_{steel} \times g) + W_{ballast}$$

$$79.021.707,81 = (2.110.420,19 \times 9.81) + W_{ballast}$$

$$W_{ballast} = 58.318.485,75 \text{ N}$$

$$\left(\rho_w \cdot g \cdot \left(\left(\frac{\pi}{4} \cdot ID_{hp}^2 \cdot h_{bal_{hp}} \right) + \left(\frac{\pi}{4} \cdot ID_{col}^2 \cdot h_{bal_{col}} \right) \right) \right) = 58.318.485,75$$

$$\left(1025 \cdot 9,81 \cdot \left(\left(\frac{\pi}{4} \cdot 20,39^2 \cdot h_{bal_{hp}} \right) + \left(\frac{\pi}{4} \cdot 5,912^2 \cdot h_{bal_{col}} \right) \right) \right) = 58.318.485,75$$

Tinggi dari *ballast* maksimum pada *heave plate* adalah 6 meter, sedangkan pada *column* adalah 26 meter. Oleh karena pengisian *ballast* dimulai dari *member* terbawah, maka penentuan tinggi *ballast* dapat dimulai dengan mengasumsikan *ballast heave plate* terisi penuh, yaitu dengan tinggi 6 meter. Apabila nilai dari tinggi *ballast column* bernilai negatif, maka perhitungan dapat langsung dicari menggunakan tinggi *ballast heave plate* dengan mengasumsikan tinggi *ballast column* bernilai 0. Maka dari itu, tinggi *ballast* dapat diketahui besarnya.

4.5 Pemodelan Struktur DeepCWind

Simulasi dinamis dari aero-hidro-servo-elastic akan dilakukan secara *time domain analysis* dengan bantuan software OpenFAST dan OrcaFlex. Model yang telah memiliki karakteristik gerak dari RAO berdasarkan output MOSES akan menjadi input bagi software

OrcaFlex untuk analisis hidrodinamisnya, sedangkan input pembebanan aerodinamis, servodinamis, dan elastodinamis akan dilakukan di OpenFAST. Analisis aero-hidro-servo-elastic akan berjalan secara simultan sesuai dengan *guide* “OrcaFlexInterface in OpenFAST”. Berikut adalah penjelasan dari tahap pemodelan tiap software.

4.5.1 Pemodelan Substruktur pada MOSES

Substruktur dari DeepCWind yang merupakan sebuah *semisubmersible* dimodelkan pada MOSES dengan kondisi *free-floating* yang telah dijelaskan pada 4.1. Dalam analisis pembebanan statis untuk mendapatkan RAO berdasarkan *frequency domain analysis*, MOSES memerlukan dua input file, yaitu file dengan ekstensi .dat yang mendefinisikan *surface model*, dan file .cif yang merupakan *command prompt* untuk menjalankan analisis.

Perubahan ukuran pada variabel desain tiap desain eksperimen mempengaruhi *surface model* secara keseluruhan. Maka dari itu, penyesuaian file .dat tiap desain eksperimen dilakukan dengan memasukkan input data jari-jari, tinggi, serta koordinat tiap member tiap desain eksperimen. Selain itu, pemberian massa dari berat ballast serta berat baja substruktur berdasarkan perhitungan di 4.4.2 juga didefinisikan pada tahap ini.

Analisis pembebanan lingkungan secara statis berdasarkan *frequency domain* di MOSES menghasilkan karakteristik gerak substruktur yang direpresentasikan dengan RAO, *load* RAO, *mean drift force*, dan matriks 6x6 dari *added mass* dan *damping*. Data ini akan menjadi input karakteristik gerak substruktur di kondisi *free-floating* untuk melakukan analisis hidrodinamis, yaitu *mooring analysis*, di software OrcaFlex.

4.5.2 Pemodelan Substruktur pada OrcaFlex

Analisis hidrodinamis berdasarkan *time domain analysis* dilakukan di OrcaFlex dikarenakan keterbatasan peneliti untuk menggunakan modul HydroDyn dan MoorDyn sebagai modul analisis hidrodinamis di OpenFAST. Pada OpenFAST, terdapat *guide* terkait pengintegrasian kedua software dengan *compiler* FASTlinkDLL.dll. Beban-bahan hidrodinamis pada substruktur dan sistem tambat akan dihitung menggunakan OrcaFlex, sedangkan beban dinamis struktural turbin dan tower (elastodinamis), beban dinamis substruktur, aerodinamis, dan beban dinamis kontrol dan penggerak turbin akan dihitung oleh OpenFAST. *Compiler* yang digunakan akan dipanggil oleh OpenFAST selama simulasi untuk mengintegrasikan beban hidrodinamis di OrcaFlex dengan beban lainnya di OpenFAST. Simulasi di OpenFAST mengasumsikan substruktur sebagai *rigid body* dengan 6 derajat kebebasan. Pada setiap *time step*, OrcaFlex menerima posisi, orientasi, dan kecepatan 6 DOF

platform dari OpenFAST, menghitung beban hidrodinamis dari substruktur dan sistem tambat, dan mengembalikannya ke OpenFAST dalam bentuk matriks *added mass* 6x6 dan vektor beban 6x1 (3 gaya dan 3 momen). OpenFAST akan mengambil data tersebut beriringan dengan percepatan platform 6 DOF, kemudian menghitung total enam komponen beban hidrodinamis dan tambatan yang akan diterapkan ke platform di ElastoDyn, termasuk efek *added mass* hidrodinamis.

Struktur DeepCWind ditambahkan ke *seabed* dengan properti tali tambat terlampir pada Tabel 4.7. Penambahan sistem tambat pada substruktur untuk menyerupai kondisi asli akan mempengaruhi performa struktur secara keseluruhan. Maka dari itu, input data ke OrcaFlex meliputi parameter dari MOSES (RAO, *mean drift force*, matriks *added mass* dan *damping* 6x6) serta massa tali tambat. Penyesuaian kondisi *equilibrium* pada OrcaFlex dilakukan dengan *static calculation*, menyesuaikan substruktur dengan draft yang sudah diinputkan dari output MOSES dan sistem tali tambat yang memberikan gaya tarik ke arah -Z. Kondisi *equilibrium* tercapai secara iteratif menyesuaikan panjang *grounded length* dari tali tambat, dengan substruktur dapat mengampung di draft 20 meter akibat penambahan tali tambat dari software OrcaFlex, ditunjukkan pada Gambar 4.8.

Tabel 4.7 Properti Tali Tambat

Parameter	Nilai	Unit
Type	3x1 Chain R3S Studless	
Diameter	0,0766	m
Weight (in Air)	0,11335	ton/m
Minimum Breaking Load	555,96	ton
Pretension (15% MBL)	83,39	ton
Kedalaman	80	m
Mooring Line Length	412,5	m

Summary Results for Platform in static state
 OrcaFlex 10.2a: Case28.dat (modified 11:43 AM on 6/21/2024 by OrcaFlex 10.2a)

Position (m)			Orient
X	Y	Z	Rotation 1
0.0	0.0	-20.0	0.0

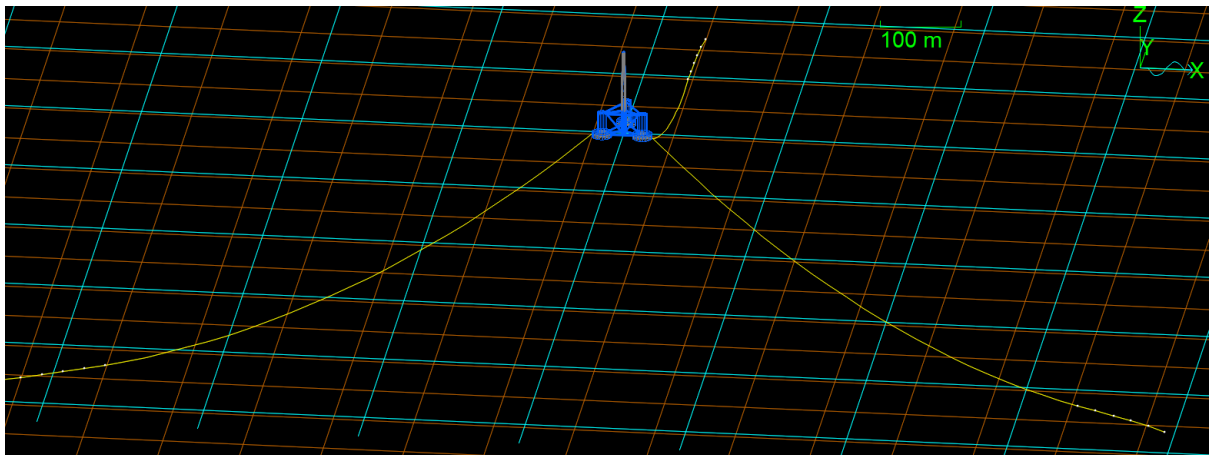
→ Draft

Loads in Global Axes Directions			
Source	Force (kN)		
	X	Y	Z
Connections	15.3372	-3.2392	-2164.0852

→ Beban Tali Tambat

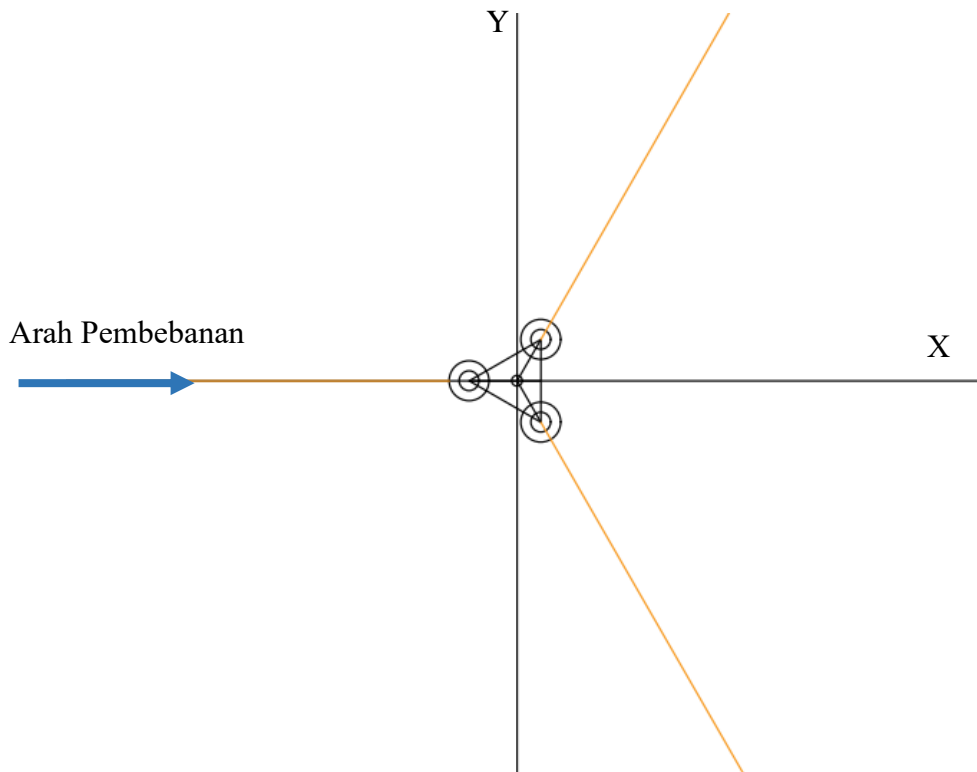
Gambar 4.8 Static calculation pada OrcaFlex

Struktur yang telah mencapai kondisi *equilibrium* akan dilanjutkan ke analisis dinamis berdasarkan *dynamic calculation*. Analisis hidrodinamis dilakukan selama 3600 detik berdasarkan ABS (2024) pada kondisi *serviceability limit state*. Gambar 4.9 merupakan ilustrasi dari visualisasi substruktur di OrcaFlex.



Gambar 4.9 Visualisasi *semisubmersible* pada OrcaFlex

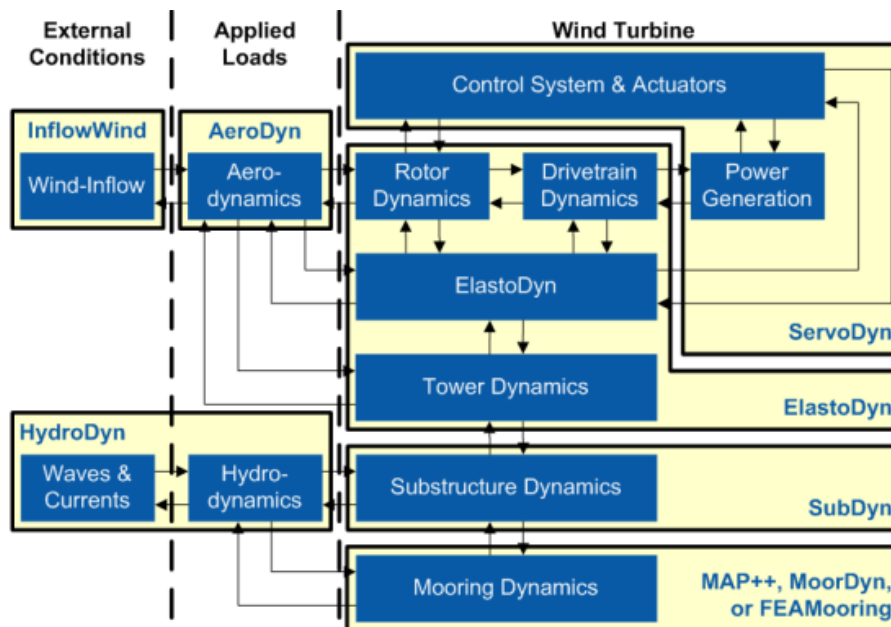
Arah pembebanan lingkungan dilakukan secara tegak lurus arah bilah turbin, yaitu 180°, yang ditunjukkan pada Gambar 4.10.



Gambar 4.10 Konfigurasi sistem tambat

4.5.3 Pemodelan Struktur pada OpenFAST

Analisis dalam *software* OpenFAST meliputi analisis aerodinamis, servodinamis, hidrodinamis, dan elastodinamis pada modul tertera pada Gambar 4.11. Modul yang digunakan dalam penelitian ini antara lain ElastoDyn, AeroDyn, ServoDyn, dan SubDyn.



Gambar 4.11 Coupling antar modul OpenFAST

4.5.3.1 ElastoDyn

Modul ElastoDyn berisikan input data beban titik berupa gaya inersia dan momen struktur *tower*, *nacelle*, dan *blade* berdasarkan *report* DeepCWind oleh NREL (2012). Pada penelitian ini, data yang diinputkan adalah data ketika turbin sedang beroperasi (*operating condition*). Tabel 4.8 adalah data input untuk Modul ElastoDyn.

Tabel 4.8 Parameter input pada ElastoDyn

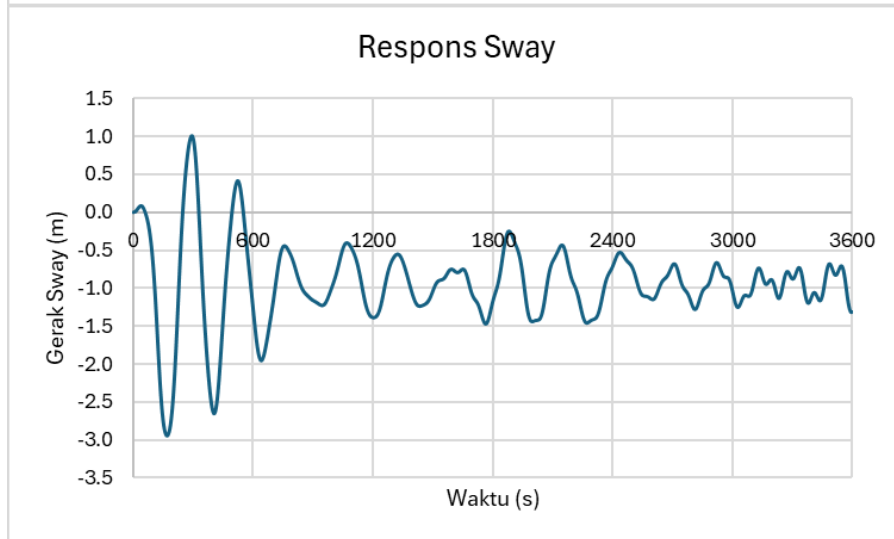
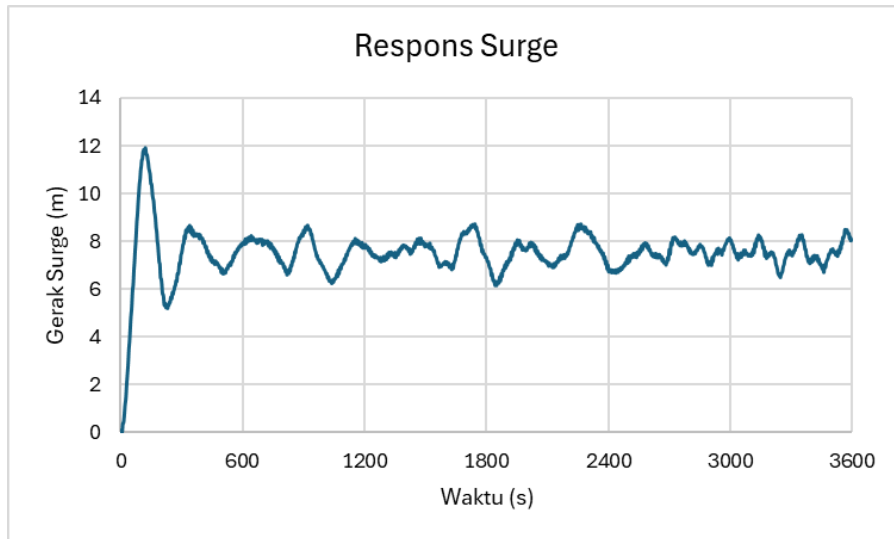
Parameter	Nilai	Unit
Massa Substruktur	$3,85 \times 10^6$	kg
Inersia Roll	$2,56 \times 10^9$	kg.m ²
Inersia <i>Pitch</i>	$2,56 \times 10^9$	kg.m ²
Inersia Yaw	$4,24 \times 10^9$	kg.m ²

4.5.3.2 AeroDyn dan ServoDyn

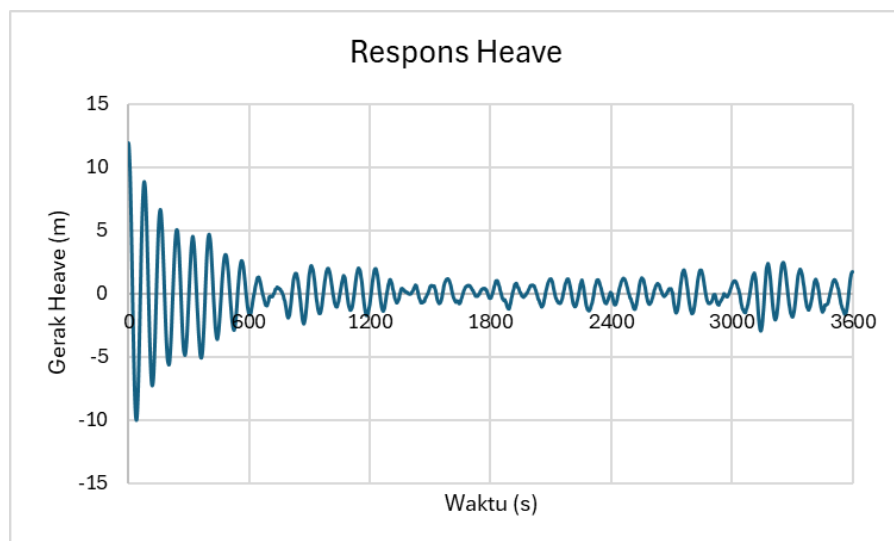
Modul AeroDyn berisikan input model aerodinamis yang bekerja pada tower, rotor, dan blade. Modul AeroDyn membaca input data struktur bilah *blade* serta *tower*. Oleh karena tujuan penelitian berfokus pada dimensi substruktur, dimensi *tower* dan *blade* tidak diubah, menyesuaikan dengan *report* dari NREL (2012). Hal tersebut juga berlaku dengan modul ServoDyn yang berfungsi mengatur output daya keluaran turbin.

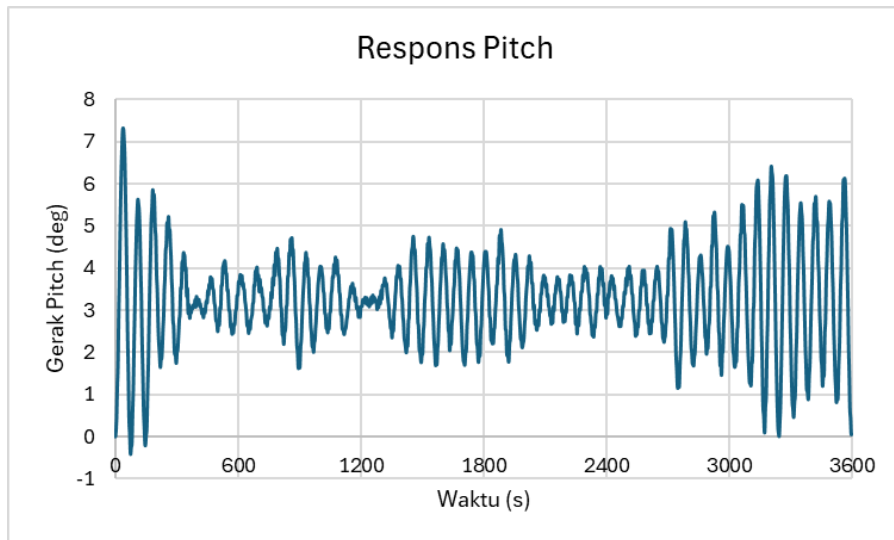
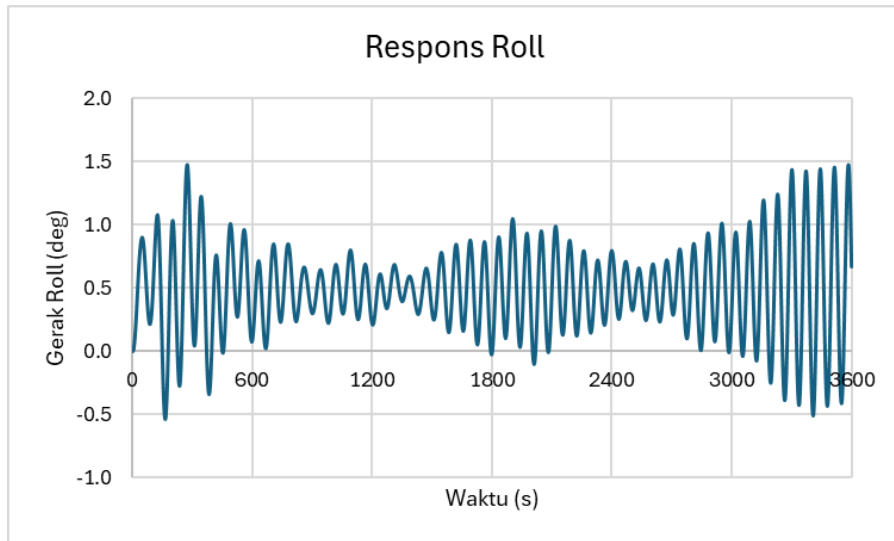
4.6 Analisis Respons Substruktur

Model DeepCWind disesuaikan dengan data lingkungan perairan Arafura. Simulasi numerik berbasis *time domain* dilakukan selama 3600 detik untuk memunculkan hasil respons dengan waktu komputasi rata-rata mencapai 7 jam. Parameter yang menjadi kajian antara lain gerak maksimum substruktur pada 6 derajat kebebasan, gaya tarik tali tambat pada *fairlead*, serta tegangan maksimum *member*. Gambar 4.12 merupakan respons gerak dari simulasi *time domain* 3600 detik.

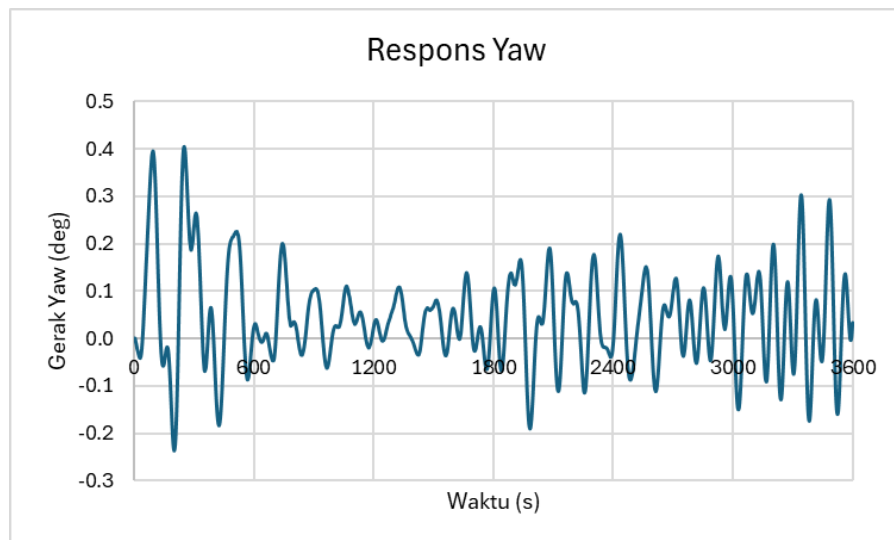


Gambar 4.12 Respons gerak substruktur *time domain*





Gambar 4.12 Respons gerak substruktur *time domain* (lanjutan)



Gambar 4.12 Respons gerak substruktur *time domain* (lanjutan)

Pada hasil simulasi *time domain* di atas, terdapat daerah *transient* yang merupakan daerah pembangkitan gelombang dan beban lingkungan lainnya. Maka dari itu, hasil 500 detik pertama pada simulasi tidak akan dianggap dalam analisis perhitungan selanjutnya. Tabel 4.9 merupakan nilai *root mean square* (RMS) dari setiap parameter yang dianalisis.

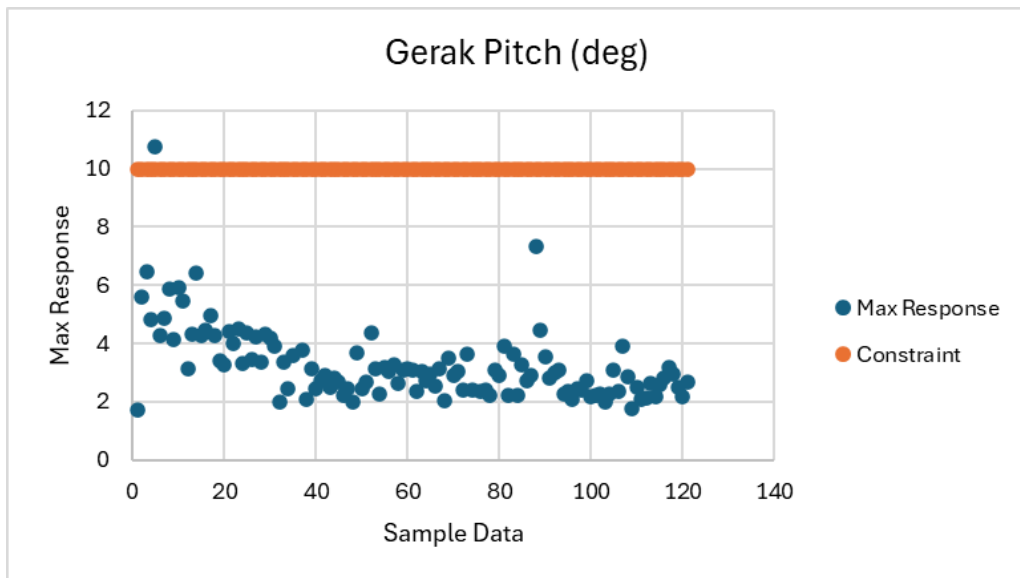
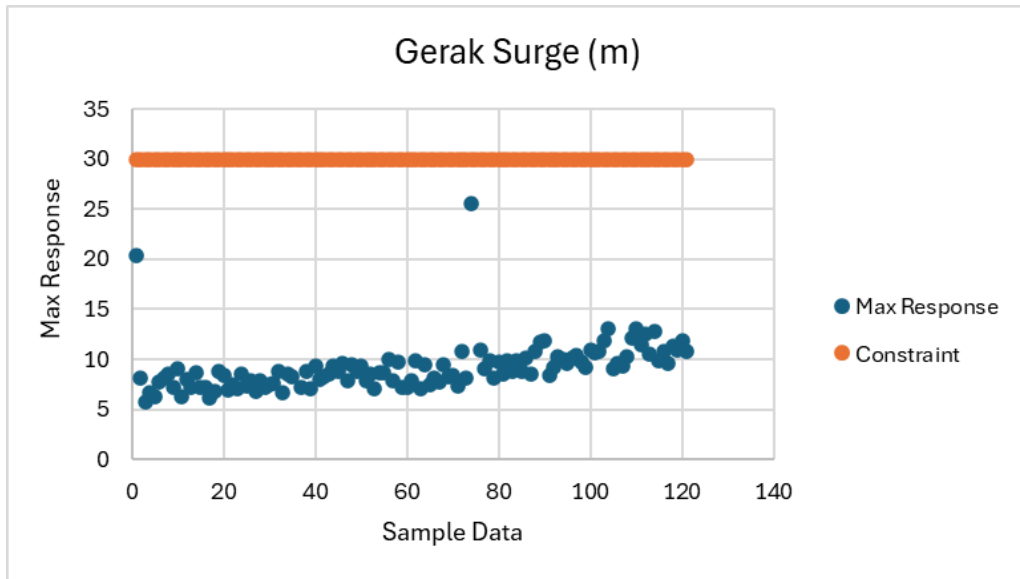
Tabel 4.9 RMS dan nilai maksimum dari 6 gerak DOF

Gerakan	<i>Surge</i> (m)	<i>Sway</i> (m)	<i>Heave</i> (m)	<i>Roll</i> (deg)	<i>Pitch</i> (deg)	<i>Yaw</i> (deg)
RMS	9,597	4,351	0,286	0,163	0,738	0,316
Maksimum	20,373	13,651	3,493	0,514	1,718	0,986

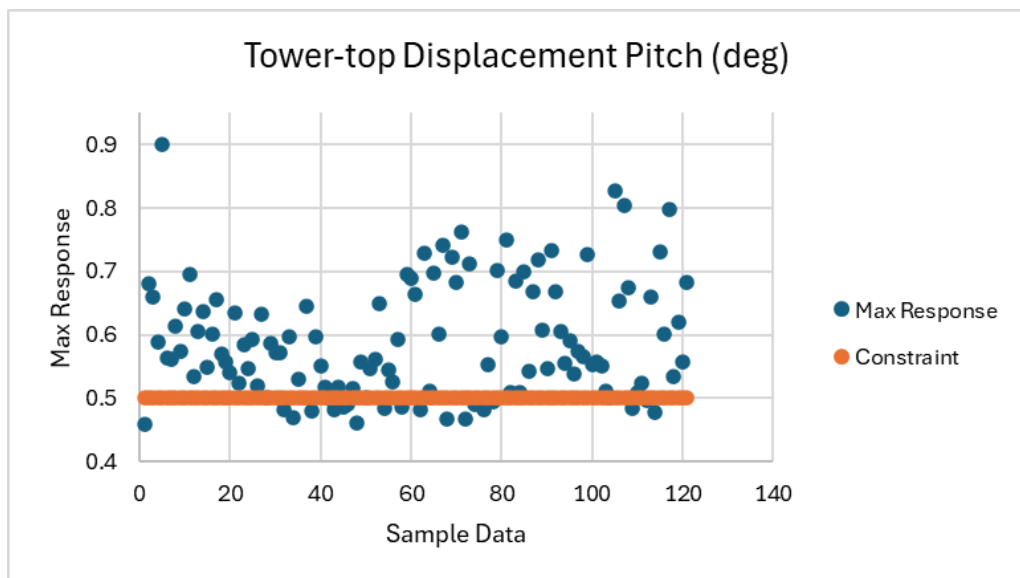
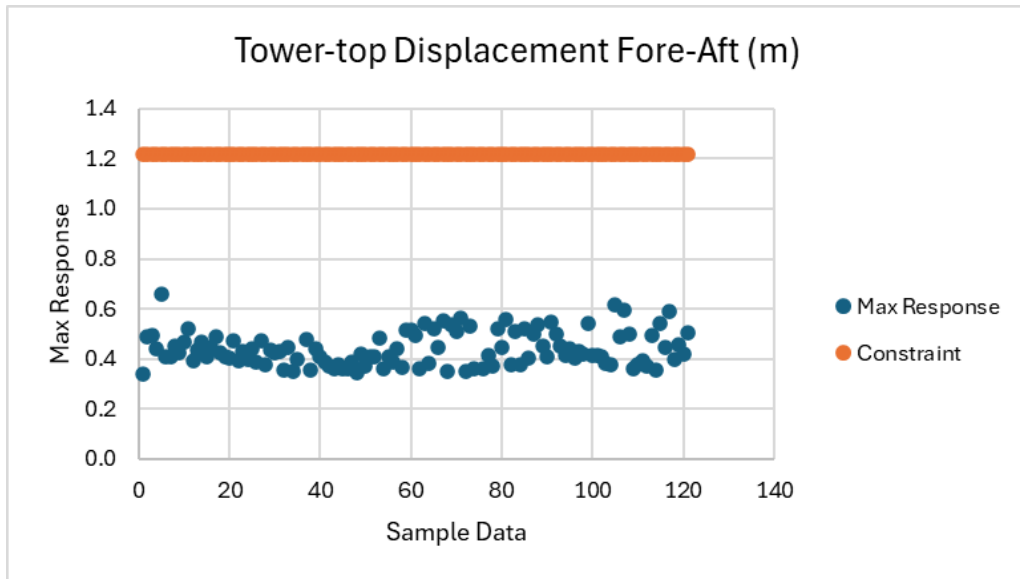
4.7 Respons Maksimum tiap Desain Eksperimen

Sebagai penyederhanaan dari analisis, hanya respons *platform surge*, *platform pitch*, *tower-top displacement (fore-aft)*, *tower-top displacement (pitch)*, tegangan *member*, dan gaya tarik tali tambat yang akan menjadi pertimbangan dalam pembuatan *surrogate model*, menyesuaikan dengan studi dari Zhou et al. (2021).

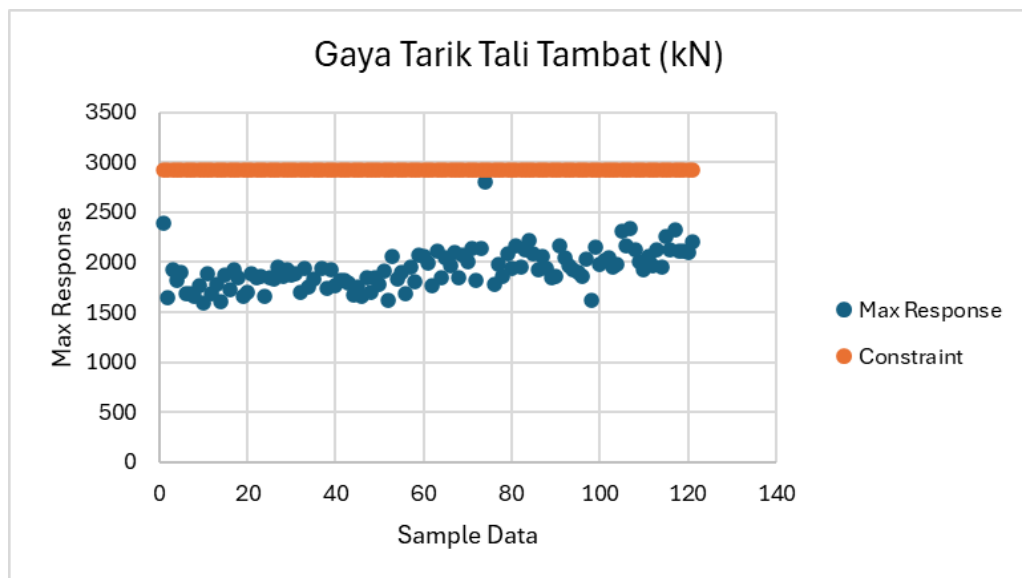
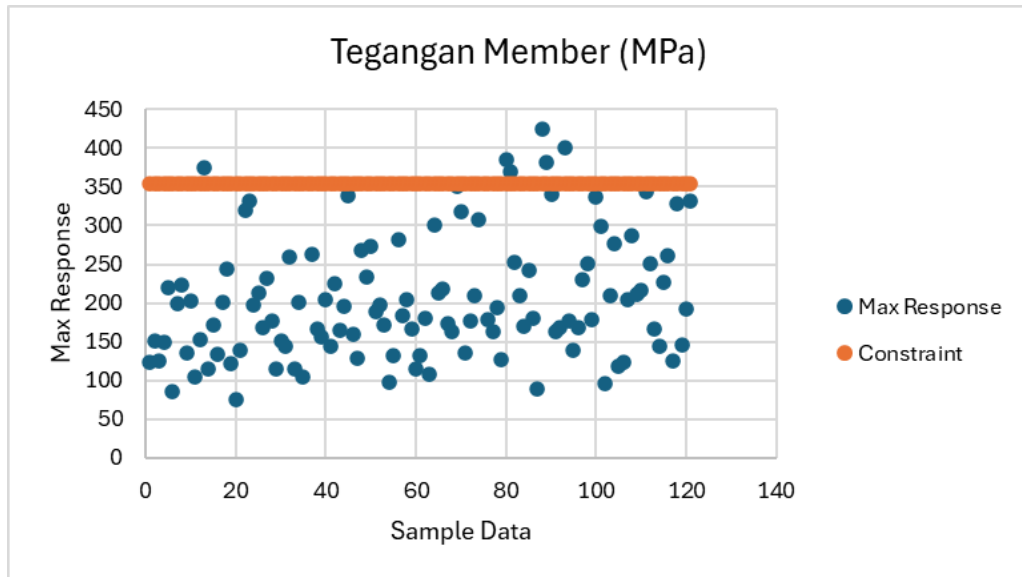
Respons dari setiap desain eksperimen akan diambil sebagai input data pembentukan *surrogate model*. Gambar 4.13 merupakan sebaran dari respons maksimum setiap *model surrogate* yang dibangun dari keenam aspek output.



Gambar 4.13 Sebaran respons maksimum tiap desain eksperimen



Gambar 4.13 Sebaran respons maksimum tiap desain eksperimen (lanjutan)



Gambar 4.13 Sebaran respons maksimum tiap desain eksperimen (lanjutan)

4.8 Validasi *Surrogate model*

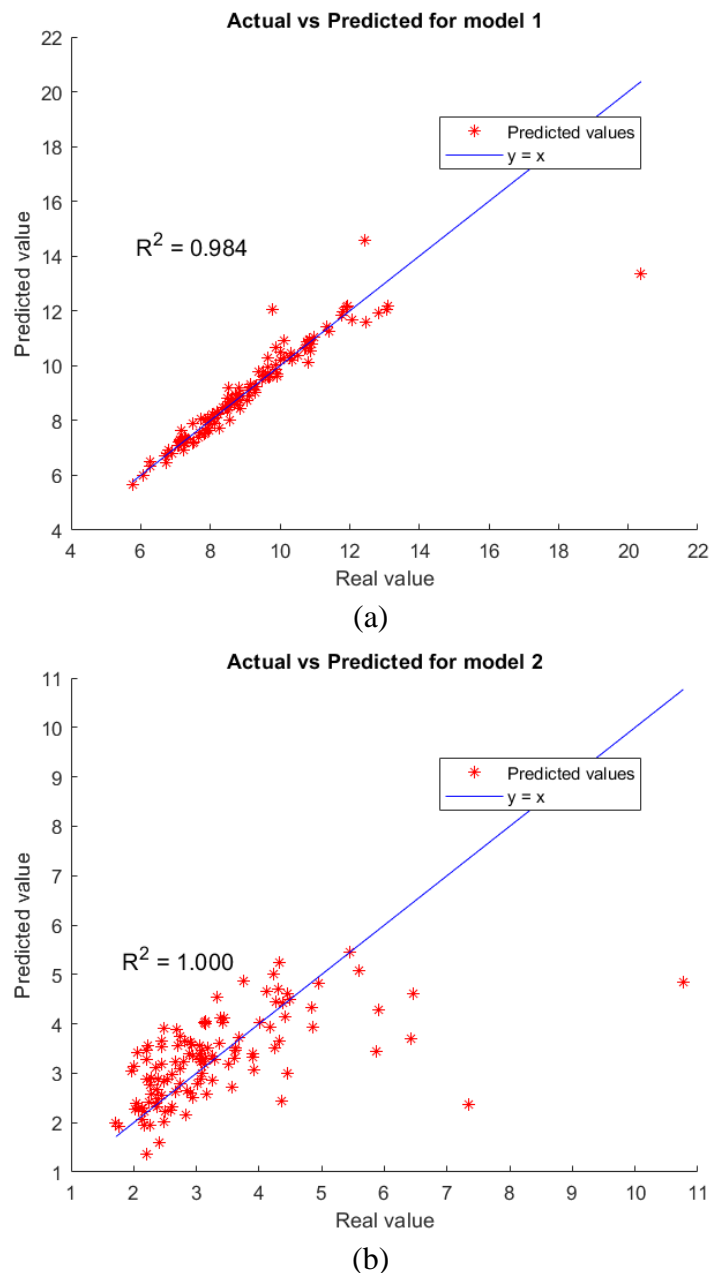
4.8.1 Metode Kriging

Penelitian ini menggunakan Metode Kriging dalam pembentukan *surrogate model* karena kemampuannya yang mengkalkulasi prediksi berdasarkan jarak kedekatan point awal ke point di sekitarnya pada range tertentu, sehingga dapat menangani data dengan dimensi tinggi serta menangkap kompleksitas hubungan non-linear antara input dan output.

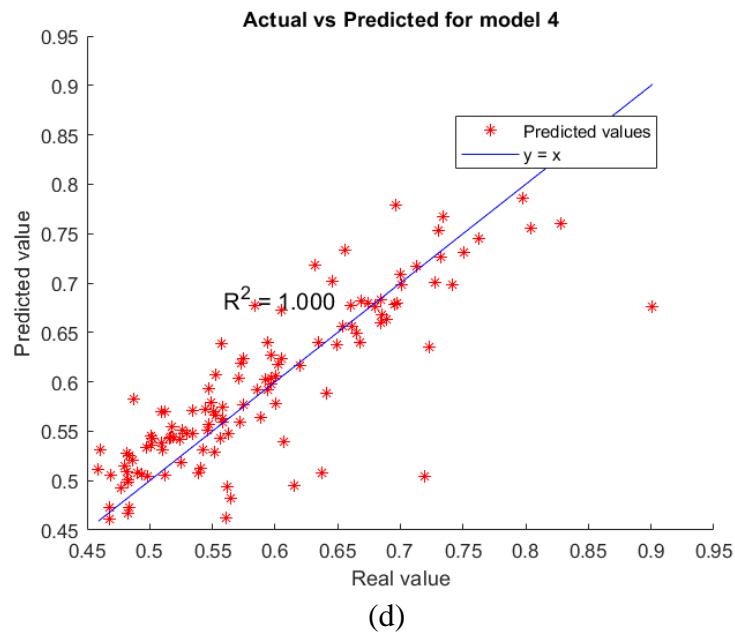
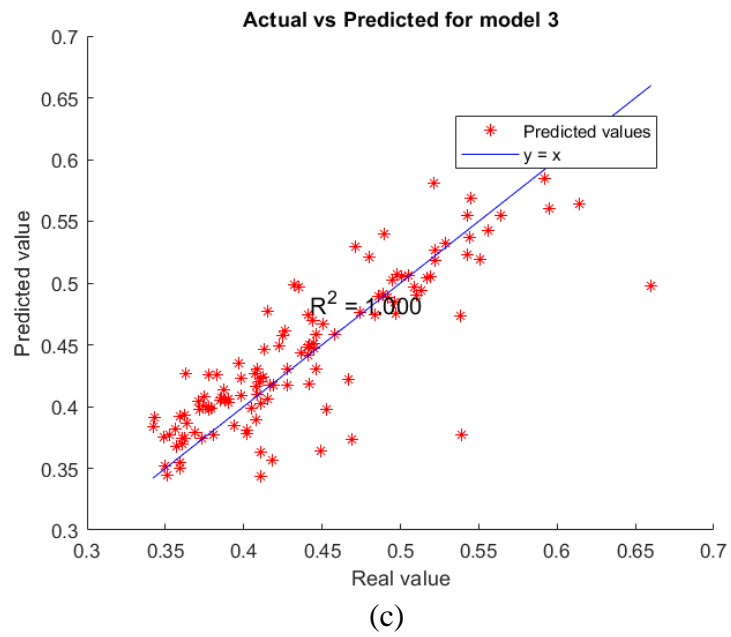
Model surrogate yang telah dibentuk menggunakan metode Kriging selanjutnya akan divalidasi. Ukuran statistik yang menjadi alat pengukuran validitas model adalah R^2 .

4.8.2 Validasi Model

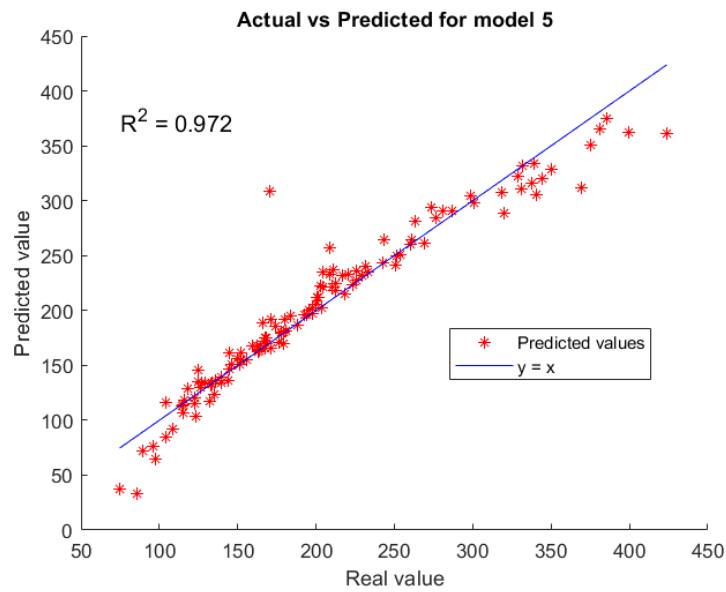
R^2 mengukur kesesuaian data eksperimen pada sumbu X dengan data prediksi pada sumbu Y. *Model surrogate* dapat dikatakan valid apabila nilai R^2 bernilai lebih dari 0,9 (Li et al., 2019). Pada keenam *model surrogate* yang dibentuk berdasarkan parameter constraint, tercantum pada Gambar 4.14, masing-masing memiliki nilai R^2 sebesar 0,984; 1; 1; 1; 0,972; dan 0,926; dengan nilai rata-rata R^2 pada *model surrogate* keseluruhan adalah 0,982. Maka dari itu, *model surrogate* dapat dianggap valid sehingga model dapat dilanjutkan ke proses optimasi.



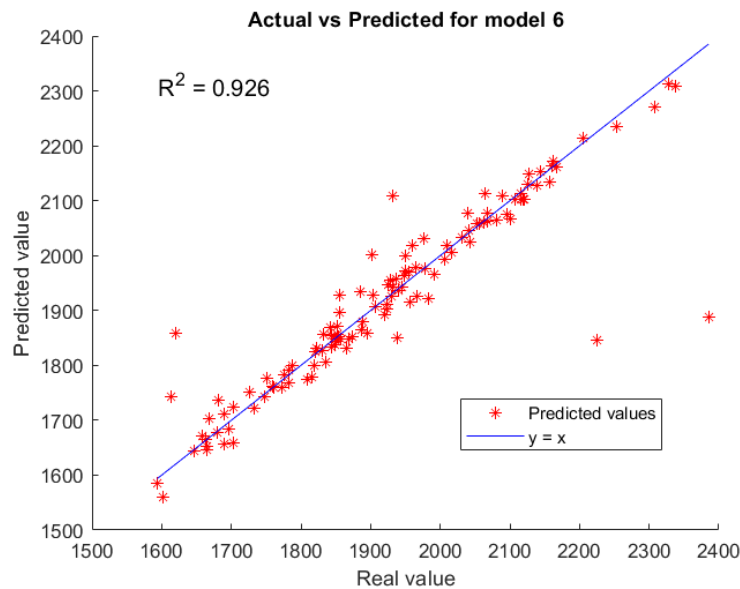
Gambar 4.14 Validasi R^2 *model surrogate* yang dibangun dari performa tiap desain eksperimen pada model (a) perpindahan *surge*, (b) perpindahan *pitch*, (c) perpindahan tower-top fore-aft, (d) perpindahan tower-top pitch, (e) tegangan member, (f) gaya tarik tali tambat.



Gambar 4.14 Validasi R^2 model surrogate yang dibangun dari performa tiap desain eksperimen (a) perpindahan surge, (b) perpindahan pitch, (c) perpindahan tower-top fore-aft, (d) perpindahan tower-top pitch, (e) tegangan member, (f) gaya tarik tali tambat. (lanjutan)



(e)



(f)

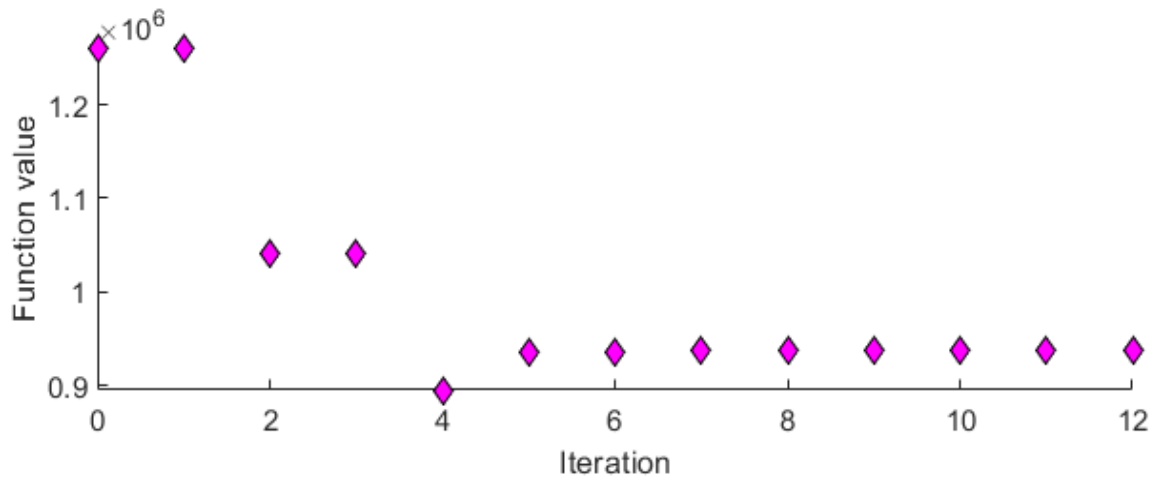
Gambar 4.14 Validasi R^2 model surrogate yang dibangun dari performa tiap desain eksperimen (a) perpindahan surge, (b) perpindahan pitch, (c) perpindahan tower-top fore-aft, (d) perpindahan tower-top pitch, (e) tegangan member, (f) gaya tarik tali tambat. (lanjutan)

4.9 Optimasi Desain Berbasis Surrogate model

Optimasi dilakukan menggunakan penyelesaian Sequential Quadratic Programming, di mana merupakan adalah pendekatan yang digunakan dalam optimasi matematis untuk menemukan solusi optimal dari suatu masalah dengan meminimalkan atau memaksimalkan fungsi objektif tertentu, sambil mematuhi sejumlah batasan. Pada setiap iterasi, SQP mengkonstruksi model kuadrat yang mendekati fungsi objektif dan batasan pada titik iterasi

saat ini. Model tersebut kemudian dipecahkan untuk mendapatkan arah pencarian yang dapat meningkatkan solusi.

Pada pengaplikasiannya, SQP dapat menerima nilai nonlinear, yang banyak ditemui pada simulasi aero-hidro-servo-elastis. Beberapa literatur yang menggunakan metode SQP antara lain Renty (2020) dan Romero & Queipo (2017). Penelitian tersebut menyebutkan bahwa metode SQP memiliki waktu komputasi yang rendah dengan hasil konvergensi yang tinggi.



Gambar 4.15 Proses Iterasi pada Optimasi

Proses optimasi mencapai optimum di iterasi ke-12 terlihat pada Gambar 4.15. Desain yang optimum berdasarkan metode SQP dapat dilihat pada Tabel 4.10.

Tabel 4.10 Persentase reduksi desain optimum tiap variabel desain

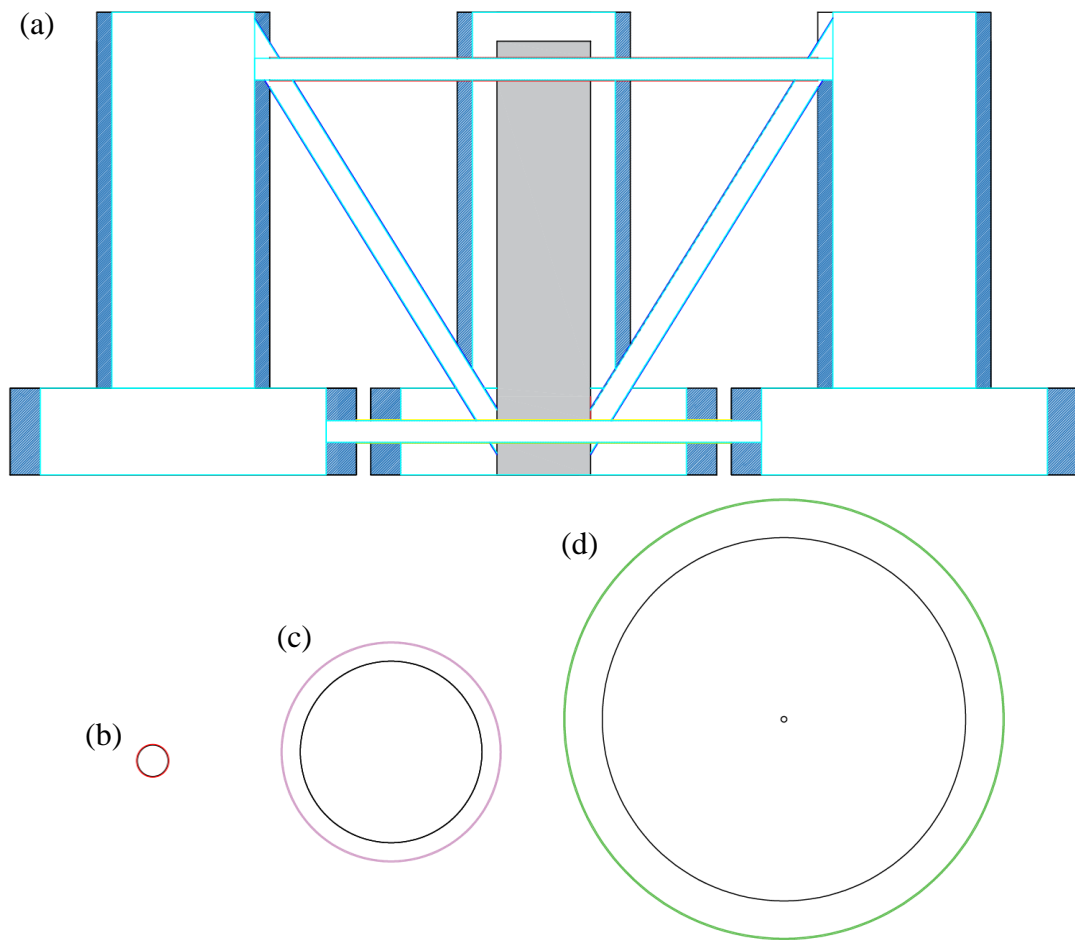
Variabel Desain	Desain Awal	Hasil Optimasi	Reduksi
OD ₁ (m)	12	9,8489	↓ 18%
OD ₂ (m)	24	19,7549	↓ 18%
OD ₃ (m)	1,6	1,5000	↓ 6%
t ₁ (m)	0,06	0,02	↓ 67%
t ₂ (m)	0,06	0,02	↓ 67%
t ₃ (m)	0,0175	0,0050	↓ 71%
Berat Substruktur (ton)	3.854,14	1.104,92	↓ 71%

4.10 Desain Optimum

Dimensi dari desain optimum akan dibulatkan berdasarkan ukuran pasaran *tubular member*. Berdasarkan data dari fabrikasi PT Gunung Raja Paksi Tbk, dimensi dari *cross-sectional member* berada di kelipatan 10 inci, dengan variasi tebal setiap 1 mm, sedangkan *steel plate* memiliki variasi *thickness* tiap 1 mm dengan sisi *plate* dalam inci. Maka dari itu, sebagai penyesuaian, desain optimum substruktur tertera pada Tabel 4.11 dan Tabel 4.12. Visualisasi reduksi dimensi dapat dilihat pada Gambar 4.16.

Tabel 4.11 Desain optimum sesuai kesediaan fabrikasi

<i>Member</i>	Kode	Panjang	OD		Ketebalan
		(m)	(m)	(in)	(mm)
<i>Column</i>	UC	26	9,906	390	20
<i>Heave plate</i>	HP	6	19,812	780	20
<i>Delta Upper Brace</i>	DU	40,094	1,524	60	5
<i>Delta Lower Brace</i>	DL	30,188	1,524	60	5
<i>Y Upper Brace</i>	YU	20,665	1,524	60	5
<i>Y Lower Brace</i>	YL	15,712	1,524	60	5
<i>Cross Brace</i>	CB	32,690	1,524	60	5



Gambar 4.16 Ilustrasi reduksi dimensi (a) tampak atas, (b) OD *brace*, (c) OD *column*, (d) OD *heave plate*

Tabel 4.12 Perbandingan desain awal dan desain optimum

<i>Member</i>	Desain Awal			Hasil Optimasi			Desain Optimum		
	OD		t	OD		t	OD		t
	m	in	mm	m	in	mm	m	in	mm
<i>Column</i>	12	472,441	60	9,849	387,752	20	9,906	390	20
<i>Heave plate</i>	24	944,882	60	19,755	777,756	20	19,812	780	20
<i>Brace</i>	1,6	62,9921	17,5	1,5000	59,055	5	1,524	60	5

4.11 Performa Desain Optimum

Performa dari desain optimum menunjukkan beberapa parameter memiliki lebih mendekati batas kegagalan, yaitu pada *tower-top displacement (pitch)* dan tegangan *member*. Perbandingan antara performa desain awal dan desain optimum dapat dilihat pada Tabel 4.13.

Tabel 4.13 Performa desain optimum dibandingkan dengan desain awal

Variabel Desain	Desain Awal	Desain Optimum	Reduksi
Gerak <i>Surge</i> (m)	20,373	9,381	↓ 54%
Gerak <i>Pitch</i> (°)	1,718	2,451	↑ 43%
<i>Tower-top displacement fore-aft</i> (m)	0,342	0,393	↑ 15%
<i>Tower-top displacement pitch</i> (°)	0,459	0,494	↑ 8%
Tegangan <i>Member</i> (MPa)	123,572	193,933	↑ 57%
Gaya Tarik Tali Tambat (kN)	2.385,458	1.321,418	↓ 45%

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan, optimasi dimensi dari substruktur DeepCwind mengalami penurunan berat hingga 71% dari desain awal. Performa dari desain optimum DeepCWind menunjukkan bahwa tidak ada performa yang melebihi dari batas kegagalan. Terdapat beberapa penurunan dan peningkatan respons yang signifikan. Pada gerak *surge*, terlihat bahwa desain optimum mengalami gerakan *surge* maksimum sebesar 9,3 meter, di mana mengalami penurunan hingga 54%. Pada respons lainnya terdapat kontradiksi, yakni tegangan dari *member* desain optimum, yang mengalami kenaikan hingga 57% menjadi 194 MPa. Selain itu, respons dari *tower-top displacement pitch* menunjukkan maksimum di angka 0,494°, di mana sangat mendekati batas kegagalan dari kendala yang diberikan, yaitu 0,5°.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut.

1. Model optimasi pada penelitian ini adalah menghitung desain dari OD dan *thickness* dari *column*, *heave plate*, dan *brace* yang optimal untuk meminimumkan berat dari substruktur DeepCWind sebagai fungsi dari keenam variabel desain, dibatasi pada kendala gerakan struktur dengan nilai $U_{allow} = 30$ m dan $\theta_{allow} = 10^\circ$, kendala *tower-top displacement* dengan nilai $u_{allow} = 1,22$ m dan $\phi_{allow} = 0,5^\circ$, kendala tegangan *member* sebesar $\sigma_{allow} = 355$ MPa, dan kendala gaya tarik tali tambat sebesar $F_{allow} = 2.924,5$ kN.
2. Desain optimal dari substruktur DeepCWind adalah OD *column* sebesar 390 in, OD *heave plate* sebesar 780 in, OD *brace* sebesar 60 in, *thickness column* sebesar 2 cm, *thickness heave plate* sebesar 2 cm, dan *thickness brace* sebesar 5 mm.
3. Performa desain optimum DeepCWind menunjukkan bahwa respons struktur mengalami perubahan signifikan. Respons gerak *surge* dan gaya tarik tali tambat mengalami penurunan hingga 54%, sedangkan respons gerak *pitch* dan tegangan *member* mengalami peningkatan hingga 57%. Sementara itu, respons *tower-top displacement* mengalami kenaikan hingga mendekati batas kegagalan, yaitu $0,494^\circ$ dari $0,5^\circ$.

5.2 Saran

Berikut merupakan saran penelitian yang menjadi masukan pada penelitian selanjutnya.

1. Melakukan studi terkait kelelahan desain optimum DeepCWind berdasarkan kondisi perairan Arafura.
2. Mengembangkan studi terkait *wind farm* dengan desain optimum DeepCWind.

DAFTAR PUSTAKA

- ABS. (2024). *Guide for Building and Classing Floating Offshore Wind Turbines 2020*. January, 1–184. <https://www.siemensgamesa.com/es-es>
- Albasyir, M. A. (2023). *Analisis Respon Dinamis Floating Offshore Wind Turbine Kapasitas 5 MW dengan Variasi Struktur Penopang Semisubmersible Berbasis Analisis Couple Aero-Hydro-Servo-Elastic*. Tugas Akhir S-1, Departemen Teknik Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Berkeley Lab. (2016). *The Future of Wind Energy, Part 3: Reducing Wind Energy Costs through Increased Turbine Size: Is the Sky the Limit?* <https://emp.lbl.gov/news/future-wind-energy-part-3-reducing-wind>
- BVG Associates. (2023). *Guide to a Floating Offshore Wind Farm*. <https://guidetofloatingoffshorewind.com/wp-content/uploads/2023/10/BVGA-16444-Floating-Guide-r2.pdf>
- Chakrabarti, S. . (2005). *Handbook of Offshore Engineering: Vol. I* (1st ed.). Elsevier Ltd.
- Desalegn, B., Gebeyehu, D., Tamrat, B., Tadiwose, T., & Lata, A. (2023). Onshore versus offshore wind power trends and recent study practices in modeling of wind turbines' life-cycle impact assessments. *Cleaner Engineering and Technology*, 17(November), 100691. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2023.100691>
- Dhaneswara, I. P. D., Prastianto, R. W., & Rosyid, D. M. (2023). Design Optimization of Braces for Three-Legged Minimum Jacket Offshore Structure. *5th International Conference on Mechanical Engineering, ICOMME 2021*.
- Djarmiko, E. B. (2012). *Perilaku dan Operabilitas Bangunan Laut di Atas Gelombang Acak*. ITS Press.
- DNV-OS-J101. (2014). *Design of Offshore Wind Turbine Structures*.
- DNV-OS-J103. (2012). *Design of Floating Wind Turbine Structures*.
- DNV-RP-C205. (2010). *Recommended Practice: DNV-RP-C205 Environmental Conditions and Environmental Testing*. <https://doi.org/10.1109/INTLEC.1993.388591>
- DNV GL-ST-N001. (2016). *Marine Warranty Services*. 1–57.
- ECMWF ERA5. (2023). *ECMWF ERA5*. <https://cds.climate.copernicus.eu/>
- ESMAP. (2021). Offshore Wind Technical Potential in Indonesia. In *Energy Sector Management Assistance Program*. <https://globalwindatlas.info/area/Indonesia>
- Hastuti, Prastianto, R. W., Rosyid, D. M., Syalsabila, F., & Syarifudin, M. R. (2024). Reliability Analysis of a Four-legged Jacket Offshore Platform: A Case Study. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1298(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1298/1/012016>
- Hidayat, T. (2022). Wind Power in Indonesia: Potential, Challenges, and Current Technology Overview. *Indonesia Post-Pandemic Outlook: Strategy towards Net-Zero Emissions by 2060 from the Renewables and Carbon-Neutral Energy Perspectives*, 109–132.

<https://doi.org/10.55981/brin.562.c7>

- James, R., & Ros, M. C. (2015). *Floating Offshore Wind: Market and Technology Review*. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2016.01.012>
- Jonkman, J. M., & Buhl, M. L. (2007). Loads Analysis of a Floating Offshore Wind Turbine Using Fully Coupled Simulation. In *National Renewable Energy Laboratory*.
- Kementerian ESDM. (2021). *Technology Data for the Indonesian Power Sector*. https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Globalcooperation/technology_data_for_the_indonesian_power_sector_-_final.pdf
- Liu, S., Chuang, Z., Wang, K., Li, X., Chang, X., & Hou, L. (2022). Structural Parametric Optimization of the VoltturnUS-S Semi-Submersible Foundation for a 15 MW Floating Offshore Wind Turbine. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(9). <https://doi.org/10.3390/jmse10091181>
- Mas-Soler, J., do Amaral, G. A., da Silva, L. Z. M., Malta, E. B., Carmo, L. H. S., Ruggeri, F., & Simos, A. N. (2022). A parametric optimization approach for the initial design of FOWT's substructure and moorings in Brazilian deep-water fields. *Journal of Physics: Conference Series*, 2362, 01025. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2362/1/012025>
- Oberti, L., Bracco, G., & Niosi, F. (2022). *Cost Analysis and Design Optimization for Floating Offshore Wind Platforms*. <http://webthesis.biblio.polito.it/id/eprint/22146>
- Prastianto, R., Syalsabila, F., Rosyid, D., Mulyadi, Y., & Sambodho, K. (2023). *Surrogate model-Based Optimization of Offshore Jacket Structure to Develop Minimum Structure*. July. <https://doi.org/10.4108/eai.11-10-2022.2326422>
- Prastianto, R. W., Syalsabila, F., Hastuti, Syarifudin, M. R., & Rosyid, D. M. (2024). Meta model-based optimization of jacket offshore platform for resilient marine infrastructures. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1350(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1350/1/012042>
- Prastianto, R. W., Syarifudin, M. R., Hastuti, Syalsabila, F., & Rosyid, D. M. (2024). Designing sustainable ocean infrastructure using reliability based design optimization: A case study of three-legged jacket offshore platform. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1350(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1350/1/012020>
- PT Gunung Raja Paksi Tbk. (n.d.). *Product Catalogue PT Gunung Raja Paksi Tbk*.
- Renty, B. De. (2020). *Gradient-based design optimization of a semi-submersible floating wind turbine*. July.
- Robertson, A., Jonkman, J., Masciola, M., & Song, H. (2014). *Definition of the Semisubmersible Floating System for Phase II of OC4*.
- Roddier, D., Cermelli, C., Aubault, A., & Weinstein, A. (2010). WindFloat: A floating foundation for offshore wind turbines. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2, 033104. <https://doi.org/10.1063/1.3435339>
- Romero, J., & Queipo, N. (2017). Reliability-based and deterministic design optimization of a FSAE brake pedal: a risk allocation analysis. In *Structural and Multidisciplinary Optimization* (Vol. 56, Issue 3). <https://doi.org/10.1007/s00158-017-1747-8>
- Syalsabila, F., Prastianto, R. W., & Rosyid, D. M. (2022). Sizing Optimization Using Genetic

- Algorithm to Achieve Minimal Offshore Structure. *Rekayasa*, 15(2), 129–136. <https://doi.org/10.21107/rekayasa.v15i2.15102>
- Vernanda, Z. A. (2018). *Analisis Respons Dinamis Floating Offshore Wind Turbine Tipe Semi-Sub Dengan Variasi Desain Wind Turbine 1,5 MW, 2,5 MW DAN 5 MW Untuk Perairan Natuna*. Tugas Akhir S-1, Departemen Teknik Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Wind Energy Technologies. (2018). *How Wind Turbines Work*. <https://www.energy.gov/eere/wind/how-do-wind-turbines-work>
- Yu, C., Lv, X., Huang, D., & Jiang, D. (2023). Reliability-based design optimization of offshore wind turbine support structures using RBF surrogate model. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 17(7). <https://doi.org/10.1007/s11709-023-0976-8>
- Zhang, L., Shi, W., Karimirad, M., Michailides, C., & Jiang, Z. (2020). Second-order hydrodynamic effects on the response of three semisubmersible floating offshore wind turbines. *Ocean Engineering*, 207(April), 107371. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107371>
- Zhou, S., Müller, K., Li, C., Xiao, Y., & Cheng, P. W. (2021). Global sensitivity study on the semisubmersible substructure of a floating wind turbine: Manufacturing cost, structural properties and hydrodynamics. *Ocean Engineering*, 221, 108585. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.108585>

LAMPIRAN A
DESAIN EKSPERIMEN

- Parameter Setup

<i>Parameter</i>	<i>Variable Design</i>	<i>Default</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>Mean</i>	<i>Std_dvtn</i>	<i>Precision</i>
P1	<i>OD_Column</i>	12	6	12	9	2,7	0,1
P2	<i>OD_HeavePlate</i>	24	12	24	18	5,4	0,1
P3	<i>OD_Brace</i>	1,6	0,6	1,6	1,1	0,33	0,01
P4	<i>t_Column</i>	0,06	0,02	0,06	0,04	0,012	0,001
P5	<i>t_HeavePlate</i>	0,06	0,02	0,06	0,04	0,012	0,001
P6	<i>t_Brace</i>	0,0175	0,005	0,0175	0,015	0,003375	0,0001

- Desain Eksperimen

<i>Design of Experiment</i>	P1	P2	P3	P4	P5	P6
DP1	6	20,5	1,03	0,044	0,055	0,011
DP2	6,1	13,7	0,7	0,025	0,029	0,0095
DP3	6,1	16	1,24	0,037	0,043	0,0067
DP4	6,2	13,5	0,75	0,056	0,053	0,0098
DP5	6,2	19,7	1,49	0,02	0,05	0,0097
DP6	6,3	20,5	0,97	0,026	0,056	0,007
DP7	6,3	21,4	0,98	0,04	0,031	0,0058
DP8	6,4	16,7	1,29	0,056	0,038	0,0094
DP9	6,4	22,7	0,97	0,054	0,056	0,0103
DP10	6,5	12,6	1,54	0,056	0,057	0,0111
DP11	6,5	19,2	1,53	0,058	0,029	0,0069
DP12	6,6	16,4	0,64	0,057	0,056	0,0075
DP13	6,6	23,1	1,51	0,056	0,028	0,0099
DP14	6,7	16,9	0,68	0,02	0,049	0,0091
DP15	6,7	18,3	1,02	0,053	0,022	0,0109
DP16	6,8	12,9	1,12	0,055	0,026	0,0063
DP17	6,8	14,8	1	0,049	0,054	0,0065
DP18	6,9	22	1,1	0,044	0,029	0,0112
DP19	6,9	22,1	1,4	0,022	0,021	0,0091
DP20	7	14,2	1,54	0,051	0,05	0,0078
DP21	7	16,3	0,83	0,038	0,058	0,0056
DP22	7,1	15,3	0,88	0,058	0,032	0,0055
DP23	7,1	21	1,01	0,048	0,053	0,0095
DP24	7,2	16,2	0,87	0,052	0,022	0,0078
DP25	7,2	17,2	1,05	0,033	0,059	0,0086
DP26	7,3	13,3	0,77	0,046	0,051	0,0087
DP27	7,3	17,3	0,89	0,026	0,057	0,0085
DP28	7,4	15,2	1,56	0,03	0,047	0,0071
DP29	7,4	17	0,82	0,034	0,02	0,0087
DP30	7,5	15,9	1,46	0,039	0,051	0,0073
DP31	7,5	21,7	1,07	0,042	0,045	0,006
DP32	7,6	14,6	1,38	0,024	0,033	0,0062

<i>Design of Experiment</i>	P1	P2	P3	P4	P5	P6
DP33	7,6	20,9	1,05	0,03	0,036	0,006
DP34	7,7	18	1,57	0,034	0,036	0,0085
DP35	7,7	18,4	1,19	0,043	0,031	0,0076
DP36	7,8	14	0,84	0,057	0,047	0,0084
DP37	7,8	21,9	1,04	0,032	0,025	0,007
DP38	7,9	14,5	1,22	0,042	0,042	0,008
DP39	7,9	21,5	0,74	0,033	0,048	0,0106
DP40	8	17,5	1,31	0,049	0,044	0,0098
DP41	8	18,3	1,15	0,043	0,039	0,0061
DP42	8,1	20	1,36	0,026	0,05	0,0063
DP43	8,1	22,6	1,06	0,049	0,059	0,0108
DP44	8,2	19,9	0,71	0,054	0,06	0,0092
DP45	8,2	23,3	1,33	0,059	0,042	0,0107
DP46	8,3	17,5	1,59	0,034	0,054	0,0079
DP47	8,3	23	1,09	0,043	0,035	0,0057
DP48	8,4	18,7	0,76	0,055	0,023	0,01
DP49	8,4	20,6	0,94	0,06	0,034	0,008
DP50	8,5	16,7	1,39	0,033	0,04	0,0052
DP51	8,5	21,2	1,43	0,053	0,047	0,0075
DP52	8,6	13	1,23	0,024	0,057	0,0057
DP53	8,6	19,3	1,37	0,026	0,046	0,0111
DP54	8,7	18,1	0,86	0,024	0,041	0,0112
DP55	8,7	23,7	0,79	0,055	0,048	0,0104
DP56	8,8	15,9	1,15	0,039	0,03	0,0068
DP57	8,8	22,2	1	0,029	0,021	0,0056
DP58	8,9	12,4	1,45	0,04	0,058	0,0068
DP59	8,9	13,4	1,51	0,028	0,033	0,0067
DP60	9	15	1,2	0,046	0,023	0,0102
DP61	9	21,8	1,35	0,059	0,035	0,0092
DP62	9,1	12	1,41	0,035	0,037	0,0093
DP63	9,1	20,2	0,66	0,047	0,03	0,0089
DP64	9,2	13,2	1,56	0,051	0,051	0,0058
DP65	9,2	15,6	1,5	0,039	0,054	0,0052
DP66	9,3	12,7	1,09	0,051	0,038	0,0099
DP67	9,3	20,4	1,28	0,023	0,054	0,0072
DP68	9,4	13,8	0,84	0,052	0,043	0,0065
DP69	9,4	15,6	0,92	0,045	0,026	0,0054
DP70	9,5	12,2	1,48	0,04	0,023	0,0072
DP71	9,5	22,5	1,26	0,032	0,045	0,0077
DP72	9,6	13,2	0,73	0,028	0,035	0,0078
DP73	9,6	21,3	0,7	0,024	0,038	0,006
DP74	9,7	16,2	0,81	0,053	0,046	0,0104
DP75	9,7	23,7	1,3	0,04	0,042	0,0084
DP76	9,8	17,2	0,92	0,028	0,056	0,0108
DP77	9,8	20,7	1,4	0,036	0,037	0,0061

<i>Design of Experiment</i>	P1	P2	P3	P4	P5	P6
DP78	9,9	14,3	1,2	0,028	0,027	0,008
DP79	9,9	17,9	0,72	0,054	0,059	0,0086
DP80	10	13,7	0,64	0,03	0,027	0,005
DP81	10	19,3	0,69	0,021	0,044	0,0073
DP82	10,1	14,4	0,62	0,032	0,055	0,0099
DP83	10,1	22,1	0,9	0,045	0,053	0,0083
DP84	10,2	15,1	1,27	0,048	0,023	0,0057
DP85	10,2	20	0,78	0,036	0,024	0,011
DP86	10,3	15,2	1,36	0,023	0,024	0,0093
DP87	10,3	22,8	0,81	0,052	0,04	0,0066
DP88	10,4	23,5	0,61	0,046	0,052	0,0101
DP89	10,4	23,8	0,61	0,036	0,039	0,0088
DP90	10,5	13	1,16	0,044	0,028	0,0093
DP91	10,5	15,8	1,26	0,044	0,033	0,0088
DP92	10,6	18,5	0,63	0,059	0,041	0,0097
DP93	10,6	18,9	1,33	0,048	0,046	0,0095
DP94	10,7	18,6	1,32	0,048	0,024	0,0109
DP95	10,7	21	1,17	0,038	0,02	0,0082
DP96	10,8	18,1	1,11	0,036	0,036	0,0066
DP97	10,8	23,9	1,47	0,041	0,04	0,0055
DP98	10,9	14,2	1,58	0,057	0,021	0,0076
DP99	10,9	19,4	1,52	0,059	0,052	0,0051
DP100	11	19	0,9	0,047	0,043	0,0081
DP101	11	19,5	1,31	0,022	0,032	0,0107
DP102	11,1	22,4	0,76	0,025	0,032	0,0089
DP103	11,1	23,3	0,65	0,041	0,028	0,0106
DP104	11,2	12,6	0,95	0,022	0,03	0,0101
DP105	11,2	14,8	1,44	0,035	0,045	0,0102
DP106	11,3	12,1	0,67	0,027	0,051	0,0105
DP107	11,3	16,5	1,14	0,05	0,031	0,0064
DP108	11,4	21,6	1,08	0,021	0,048	0,0066
DP109	11,4	23,5	0,99	0,042	0,041	0,0103
DP110	11,5	19,6	0,8	0,034	0,06	0,0074
DP111	11,5	22,4	1,25	0,038	0,032	0,0059
DP112	11,6	16,9	1,45	0,05	0,027	0,009
DP113	11,6	23,1	1,42	0,029	0,025	0,0074
DP114	11,7	13,9	1,21	0,031	0,035	0,0054
DP115	11,7	17,7	1,13	0,029	0,041	0,0053
DP116	11,8	12,5	1,18	0,022	0,034	0,0081
DP117	11,8	19	0,95	0,027	0,046	0,0051
DP118	11,9	17,7	1,59	0,037	0,038	0,0082
DP119	11,9	20,3	0,85	0,031	0,026	0,0096
DP120	12	15,5	0,93	0,045	0,049	0,0071

LAMPIRAN B
MODEL DEEPCWIND (MOSES)

- *Command Input File untuk Macros Generating 3D Panel DeepCWind*

```

$ MACROS                                     &subtitle %subt Picture Top
&set demo = .false.                         &picture top
$                                             &subtitle %subt Picture Bow
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$                       &picture bow
$ macros                                     &subtitle %subt Picture Starboard
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$                       &picture starb
$                                             &endif
&macro su_show names                       &endmacro
&select :n -select %names                  $
&if %demo &then                             $$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
&device -g_default screen                   $ Generate column and heave plate
&subtitle %subt picture Isometric           $$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
&picture iso -parent :n                     $
&local dum = &get(yes/no )                  &dimen -dimen Meters M-TONS
&if &string(match %dum% yes) &then          &surface
&endif                                       $
&subtitle %subt picture Top                 $ Main Column
&picture top                                block MC -location 0 0 0 0 -90 0
&local dum = &get(yes/no )                  plane 0 3 6 9 12 15 18 21 24 27 30 \
&if &string(match %dum% yes) &then          -circular 0 0 6.5/2 0 1 181
&endif                                       end
&subtitle %subt Picture Bow                 $
&picture bow                                $ Heave Plate
&local dum = &get(yes/no )                  block BC1 -location 14.43 25 0 0 -90 0
&if &string(match %dum% yes) &then          plane 0 1 2 3 4 5 6 -circular 0 0 24/2 0 5 37
&endif                                       end
&subtitle %subt Picture Starboard           block BC2 -location -28.87 0 0 0 -90 0
&picture starb                              plane 0 1 2 3 4 5 6 -circular 0 0 24/2 0 5 37
&local dum = &get(yes/no )                  end
&if &string(match %dum% yes) &then          block BC3 -location 14.43 -25 0 0 -90 0
&endif                                       plane 0 1 2 3 4 5 6 -circular 0 0 24/2 0 5 37
&else                                       end
&device -g_default device                   $ Column
&subtitle %subt Picture Isometric           block UC1 -location 14.43 25 6 0 -90 0
&picture iso -parent :n                     plane 0 2 4 6 8 10 11 12 13 14 15 16 17 18 20 23 26 \

```

```

-circular 0 0 12/2 0 5 37
end
move_block UC1 UC2 -43.3 -25 0 0 0 0
move_block UC1 UC3 0 -50 0 0 0 0
$
$ Assembling Columns
$
&subtitle DEEPCWIND FLOATING OFFSHORE WIND TURBINE
union UC1 BC1 Col1
delete_block BC1 UC1
&set subt = union for column 1
su_show Col1
$
union BC2 UC2 Col2
delete_block BC2 UC2
&set subt = union for column 2
su_show Col2
$
union BC3 UC3 Col3
delete_block BC3 UC3
&set subt = union for column 3
su_show Col3
$
union Col1 Col2 Colass_1
delete_block Col1 Col
&set subt = union for colass_1
su_show Colass_1
$
union Colass_1 Col3 Base
delete_block Colass_1 Col3
&set subt = union for Base
su_show Base
$
union Base MC Sem
delete_block Base MC
&set subt = union for Sem
su_show Sem
$ Emitting Model
rename_block Sem
&set subt = final hull
su_show Sem
emit Sem -body Sem
emit Sem -piece ' -diftyp 3ddif -perm 1' \
-USE_NAME YES
$ Finishing
$
&dimen -remember
&finish

```

- *Command Input File untuk Hydrodynamic Analysis*

```

$ INPUT DATA $
&SET name_vessel = sem
&SET loa = 67.3013
&SET breadth = 27.34
&SET height = 30
&SET draught = 20
&SET displacement = 13917
&SET lcg = 0.05
&SET tcg = 0
&SET vcg = 11.37
&SET roll = 0
&SET trim = 0
&SET mdist = 5
&SET heading = 0 30 60 90 120 150 180
$-----$
&title Tugas Akhir - DeepCWind
&subtitle Configuration: INITIAL
$ Set basic parameter $
$
&dimen -dimen METER MTONS

```

```

&device -oecho No -auxin DP0.dat $-cecho yes
$
$ Read model $
$
inmodel
$
$ Set transit condition $
$
&instate -condition %name_vessel %draught %roll %trim
$
$ Environmental properties $
$
&env -spgwater 1.025
$
$ Plot of model $
$
&PLTMODEL VESSEL
    Pic TOP
    Pic Star
    Pic Port
    Pic Iso
    Pic Side
end
$
MEDIT
&COMPART -PERCENT hp.1 100 1.025
&COMPART -PERCENT hp.2 100 1.025
&COMPART -PERCENT hp.3 100 1.025
END
&cmp_bal sem uc.1a uc.2a uc.3a \
-limits 2 100 uc.1a uc.2a uc.3a -hard
&equi
&event_store 1
$
$ Compute weight for condition $
$
&weight -compute %name_vessel %vcg 20.8 20.8 29.6
$

```

```

&equi -iter 50
&status B_W
$
$ Hydrostatics menu $
$
hstatics
EQUI -NUM 50 -TOL 0.000001 -ECHO YES
$
$ Hydrostatics properties $
$
cform 0 0 0 -draft 0.1 10*%draught+1
    report
    end
end
$ Hydrodynamics menu $
$
hydrodynamics
&dimen -dimen METER KNTS
$
$ Stability trans. $
$
&parameter -m_distance %mdist
    g_pressure %name_vessel -heading %heading
    &env SEA
    &status FORCE
&describe body %name_vessel
    hydr_sum
    v_mdriфт %name_vessel
    report
    end
end_hydrodynamics
$
$ Frequency response $
$
freq_response
&dimen -dimen METER KNTS
$

```

```
$ Response $
```

```
$
```

```
rao -speed 0
```

```
$
```

```
$ Post processing $
```

```
$
```

```
&dimen -dimen METER KNTS
```

```
fp_std &body(cg %name_vessel)
```

```
equ_sum
```

```
matrices -FILE YES
```

```
report
```

```
end
```

```
end_freq_response
```

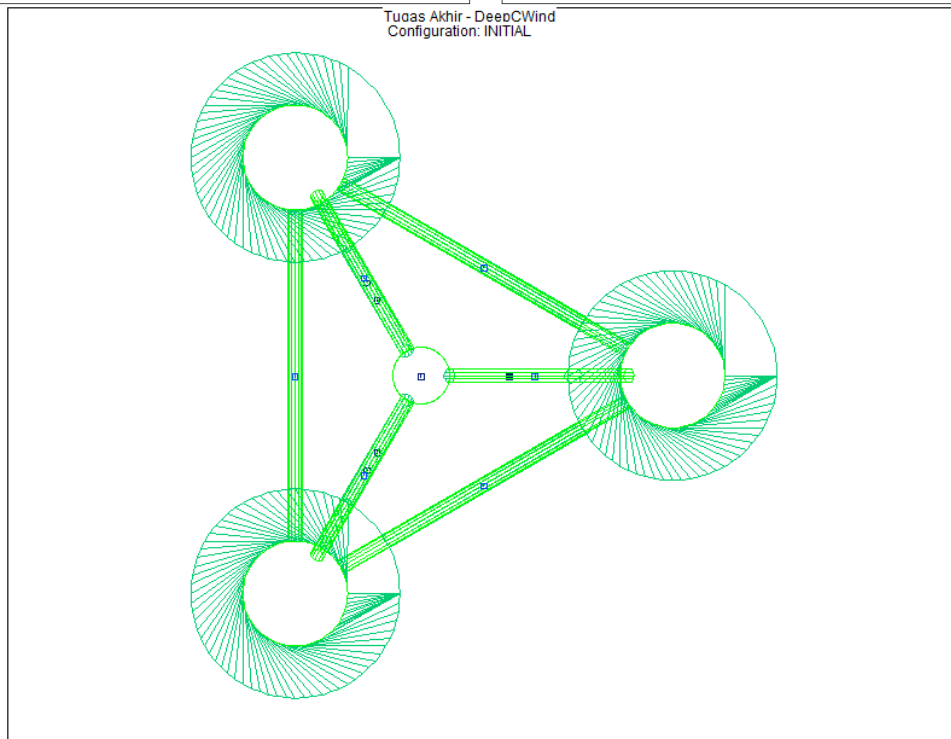
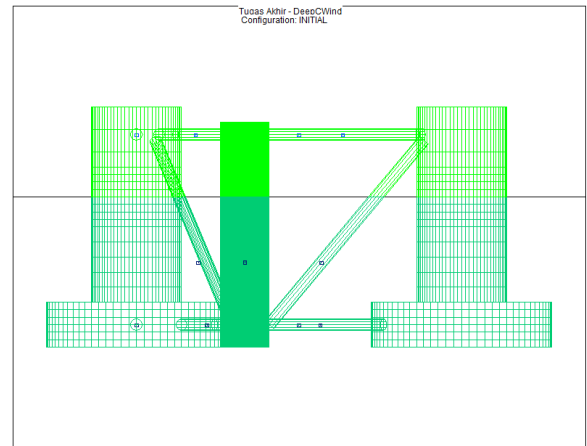
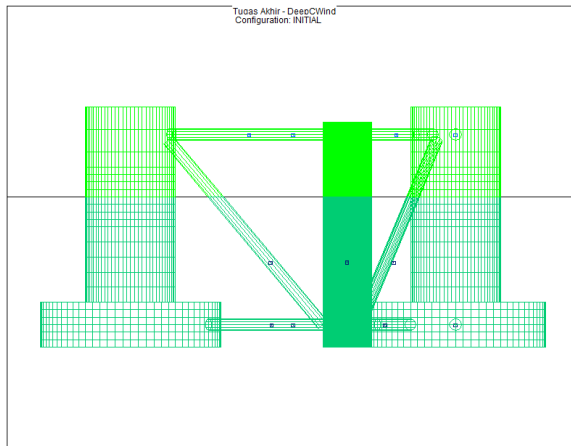
```
$
```

```
$ all done $
```

```
$
```

```
&FINISH
```

- Visualisasi Model DeepCWind



LAMPIRAN C
SKRIP OPENFAST

- *Gluecode* OpenFAST

----- OpenFAST EXAMPLE INPUT FILE -----

FAST Certification Test #25: NREL 5.0 MW Baseline Wind Turbine with OC4-DeepCwind semi configuration, for use in offshore analysis

----- SIMULATION CONTROL -----

True	Echo	- Echo input data to <RootName>.ech (flag)
"FATAL"	AbortLevel	- Error level when simulation should abort (string) {"WARNING", "SEVERE", "FATAL"}
3600	TMax	- Total run time (s)
0.0125	DT	- Recommended module time step (s)
2	InterpOrder	- Interpolation order for input/output time history (-) {1=linear, 2=quadratic}
0	NumCrctn	- Number of correction iterations (-) {0=explicit calculation, i.e., no corrections}
99999	DT_UJac	- Time between calls to get Jacobians (s)
1E+06	UJacSc1Fact	- Scaling factor used in Jacobians (-)

----- FEATURE SWITCHES AND FLAGS -----

1	CompElast	- Compute structural dynamics (switch) {1=ElastoDyn; 2=ElastoDyn + BeamDyn for blades}
1	CompInflow	- Compute inflow wind velocities (switch) {0=still air; 1=InflowWind; 2=external from OpenFOAM}
2	CompAero	- Compute aerodynamic loads (switch) {0=None; 1=AeroDyn v14; 2=AeroDyn v15}
1	CompServo	- Compute control and electrical-drive dynamics (switch) {0=None; 1=ServoDyn}
0	CompHydro	- Compute hydrodynamic loads (switch) {0=None; 1=HydroDyn}
1	CompSub	- Compute sub-structural dynamics (switch) {0=None; 1=SubDyn; 2=External Platform MCKF}
4	CompMooring	- Compute mooring system (switch) {0=None; 1=MAP++; 2=FEAMooring; 3=MoorDyn; 4=OrcaFlex}
0	CompIce	- Compute ice loads (switch) {0=None; 1=IceFloe; 2=IceDyn}
0	MHK	- MHK turbine type (switch) {0=Not an MHK turbine; 1=Fixed MHK turbine; 2=Floating MHK turbine}

----- ENVIRONMENTAL CONDITIONS -----

9.80665	Gravity	- Gravitational acceleration (m/s^2)
1.225	AirDens	- Air density (kg/m^3)
1025	WtrDens	- Water density (kg/m^3)
1.464E-05	KinVisc	- Kinematic viscosity of working fluid (m^2/s)
335	SpdSound	- Speed of sound in working fluid (m/s)
103500	Patm	- Atmospheric pressure (Pa) [used only for an MHK turbine cavitation check]
1700	Pvap	- Vapour pressure of working fluid (Pa) [used only for an MHK turbine cavitation check]
200	WtrDpth	- Water depth (m)
0	MSL2SWL	- Offset between still-water level and mean sea level (m) [positive upward]

----- INPUT FILES -----

"NRELOffshrBsline5MW_OC4DeepCwindSemi_ElastoDyn.dat"	EDFile	- Name of file containing ElastoDyn input parameters (quoted string)
"5MW_Baseline/NRELOffshrBsline5MW_BeamDyn.dat"	BDBldFile(1)	- Name of file containing BeamDyn input parameters for blade 1 (quoted string)
"5MW_Baseline/NRELOffshrBsline5MW_BeamDyn.dat"	BDBldFile(2)	- Name of file containing BeamDyn input parameters for blade 2 (quoted string)
"5MW_Baseline/NRELOffshrBsline5MW_BeamDyn.dat"	BDBldFile(3)	- Name of file containing BeamDyn input parameters for blade 3 (quoted string)
"5MW_Baseline/NRELOffshrBsline5MW_InflowWind_Steady15mps.dat"	InflowFile	- Name of file containing inflow wind input parameters (quoted string)
"NRELOffshrBsline5MW_OC3Hywind_AeroDyn15.dat"	AeroFile	- Name of file containing aerodynamic input parameters (quoted string)

```

"NRELOffshrbaseline5MW_OC4DeepCwindSemi_ServoDyn.dat"  ServoFile - Name of file containing control and electrical-
drive input parameters (quoted string)

"unused"  HydroFile      - Name of file containing hydrodynamic input parameters (quoted string)

"NRELOffshrbaseline5MW_OC3Monopile_SubDyn.dat"         SubFile      - Name of file containing sub-structural input
parameters (quoted string)

"OrcaFlex_Interface.dat"  MooringFile      - Name of file containing mooring system input
parameters (quoted string)

"unused"  IceFile        - Name of file containing ice input parameters (quoted string)

----- OUTPUT -----
True      SumPrint      - Print summary data to "<RootName>.sum" (flag)
          1  SttsTime    - Amount of time between screen status messages (s)
          10800 ChkptTime  - Amount of time between creating checkpoint files for potential restart (s)
          0.0125 DT_Out    - Time step for tabular output (s) (or "default")
          0  TStart      - Time to begin tabular output (s)
          0  OutFileFmt  - Format for tabular (time-marching) output file (switch) {0: uncompressed binary
[<RootName>.outb], 1: text file [<RootName>.out], 2: binary file [<RootName>.outb], 3: both 1 and 2}
True      TabDelim     - Use tab delimiters in text tabular output file? (flag) {uses spaces if false}
"ES15.7E2" OutFmt      - Format used for text tabular output, excluding the time channel. Resulting field
should be 10 characters. (quoted string)

----- LINEARIZATION -----
False     Linearize    - Linearization analysis (flag)
False     CalcSteady   - Calculate a steady-state periodic operating point before linearization? [unused if
Linearize=False] (flag)
          3  TrimCase    - Controller parameter to be trimmed {1:yaw; 2:torque; 3:pitch} [used only if
CalcSteady=True] (-)
          0.001 TrimTo1   - Tolerance for the rotational speed convergence [used only if CalcSteady=True] (-)
          0.01  TrimGain  - Proportional gain for the rotational speed error (>0) [used only if CalcSteady=True]
(rad/(rad/s) for yaw or pitch; Nm/(rad/s) for torque)
          0  Twr_Kdmp    - Damping factor for the tower [used only if CalcSteady=True] (N/(m/s))
          0  Bld_Kdmp    - Damping factor for the blades [used only if CalcSteady=True] (N/(m/s))
          2  NLinTimes   - Number of times to linearize (-) [>=1] [unused if Linearize=False]
          30,        60  LinTimes   - List of times at which to linearize (s) [1 to NLinTimes] [used only when
Linearize=True and CalcSteady=False]
          1  LinInputs   - Inputs included in linearization (switch) {0=none; 1=standard; 2=all module inputs
(debug)} [unused if Linearize=False]
          1  LinOutputs  - Outputs included in linearization (switch) {0=none; 1=from OutList(s); 2=all module
outputs (debug)} [unused if Linearize=False]
False     LinOutJac    - Include full Jacobians in linearization output (for debug) (flag) [unused if
Linearize=False; used only if LinInputs=LinOutputs=2]
False     LinOutMod    - Write module-level linearization output files in addition to output for full system?
(flag) [unused if Linearize=False]

----- VISUALIZATION -----
          0  WrVTK      - VTK visualization data output: (switch) {0=none; 1=initialization data only;
2=animation; 3=mode shapes}
          1  VTK_type    - Type of VTK visualization data: (switch) {1=surfaces; 2=basic meshes (lines/points);
3=all meshes (debug)} [unused if WrVTK=0]
True      VTK_fields   - Write mesh fields to VTK data files? (flag) {true/false} [unused if WrVTK=0]
          15  VTK_fps     - Frame rate for VTK output (frames per second){will use closest integer multiple of
DT} [used only if WrVTK=2 or WrVTK=3]

```

- Modul ElastoDyn

```

----- ELASTODYN for OpenFAST INPUT FILE -----

NREL 5.0 MW Baseline Wind Turbine for Use in Offshore Analysis. Properties from Dutch Offshore Wind Energy Converter
(DOWEC) 6MW Pre-Design (10046_009.pdf) and REpower 5M 5MW (5m_uk.pdf).

----- SIMULATION CONTROL -----

False      Echo      - Echo input data to "<RootName>.ech" (flag)
           3 Method    - Integration method: {1: RK4, 2: AB4, or 3: ABM4} (-)
"DEFAULT"  DT          - Integration time step (s)

----- DEGREES OF FREEDOM -----

True       FlapDOF1    - First flapwise blade mode DOF (flag)
True       FlapDOF2    - Second flapwise blade mode DOF (flag)
True       EdgeDOF     - First edgewise blade mode DOF (flag)
False      TeetDOF     - Rotor-teeter DOF (flag) [unused for 3 blades]
True       DrTrDOF    - Drivetrain rotational-flexibility DOF (flag)
True       GenDOF     - Generator DOF (flag)
True       YawDOF     - Yaw DOF (flag)
True       TwFADOF1   - First fore-aft tower bending-mode DOF (flag)
True       TwFADOF2   - Second fore-aft tower bending-mode DOF (flag)
True       TwSSDOF1   - First side-to-side tower bending-mode DOF (flag)
True       TwSSDOF2   - Second side-to-side tower bending-mode DOF (flag)
True       PtfmSgDOF  - Platform horizontal surge translation DOF (flag)
True       PtfmSwDOF  - Platform horizontal sway translation DOF (flag)
True       PtfmHvDOF  - Platform vertical heave translation DOF (flag)
True       PtfmRDOF   - Platform roll tilt rotation DOF (flag)
True       PtfmPDOF   - Platform pitch tilt rotation DOF (flag)
True       PtfmYDOF   - Platform yaw rotation DOF (flag)

----- INITIAL CONDITIONS -----

0 OoPDef1  - Initial out-of-plane blade-tip displacement (meters)
0 IPDef1   - Initial in-plane blade-tip deflection (meters)
0 BlPitch(1) - Blade 1 initial pitch (degrees)
0 BlPitch(2) - Blade 2 initial pitch (degrees)
0 BlPitch(3) - Blade 3 initial pitch (degrees) [unused for 2 blades]
0 TeetDef1  - Initial or fixed teeter angle (degrees) [unused for 3 blades]
0 Azimuth  - Initial azimuth angle for blade 1 (degrees)
9 RotSpeed  - Initial or fixed rotor speed (rpm)
0 NacYaw    - Initial or fixed nacelle-yaw angle (degrees)

```


0	TTDspFA	- Initial fore-aft tower-top displacement (meters)
0	TTDspSS	- Initial side-to-side tower-top displacement (meters)
0	PtfmSurge	- Initial or fixed horizontal surge translational displacement of platform (meters)
0	PtfmSway	- Initial or fixed horizontal sway translational displacement of platform (meters)
0	PtfmHeave	- Initial or fixed vertical heave translational displacement of platform (meters)
0	PtfmRoll	- Initial or fixed roll tilt rotational displacement of platform (degrees)
0	PtfmPitch	- Initial or fixed pitch tilt rotational displacement of platform (degrees)
0	PtfmYaw	- Initial or fixed yaw rotational displacement of platform (degrees)

----- TURBINE CONFIGURATION -----

3	NumBl	- Number of blades (-)
63	TipRad	- The distance from the rotor apex to the blade tip (meters)
1.5	HubRad	- The distance from the rotor apex to the blade root (meters)
-2.5	PreCone(1)	- Blade 1 cone angle (degrees)
-2.5	PreCone(2)	- Blade 2 cone angle (degrees)
-2.5	PreCone(3)	- Blade 3 cone angle (degrees) [unused for 2 blades]
0	HubCM	- Distance from rotor apex to hub mass [positive downwind] (meters)
0	UndSling	- Undersling length [distance from teeter pin to the rotor apex] (meters) [unused for 3 blades]
0	Delta3	- Delta-3 angle for teetering rotors (degrees) [unused for 3 blades]
0	AzimB1Up	- Azimuth value to use for I/O when blade 1 points up (degrees)
-5.0191	OverHang	- Distance from yaw axis to rotor apex [3 blades] or teeter pin [2 blades] (meters)
1.912	ShftGagL	- Distance from rotor apex [3 blades] or teeter pin [2 blades] to shaft strain gages [positive for upwind rotors] (meters)
-5	ShftTilt	- Rotor shaft tilt angle (degrees)
1.9	NacCMxn	- Downwind distance from the tower-top to the nacelle CM (meters)
0	NacCMyn	- Lateral distance from the tower-top to the nacelle CM (meters)
1.75	NacCMzn	- Vertical distance from the tower-top to the nacelle CM (meters)
-3.09528	NcIMUxn	- Downwind distance from the tower-top to the nacelle IMU (meters)
0	NcIMUyn	- Lateral distance from the tower-top to the nacelle IMU (meters)
2.23336	NcIMUzn	- Vertical distance from the tower-top to the nacelle IMU (meters)
1.96256	Twr2Shft	- Vertical distance from the tower-top to the rotor shaft (meters)
87.6	TowerHt	- Height of tower above ground level [onshore] or MSL [offshore] (meters)
10	TowerBsHt	- Height of tower base above ground level [onshore] or MSL [offshore] (meters)
0	PtfmCMxt	- Downwind distance from the ground level [onshore] or MSL [offshore] to the platform CM (meters)
0	PtfmCMyt	- Lateral distance from the ground level [onshore] or MSL [offshore] to the platform CM (meters)
-8.6588	PtfmCMzt	- Vertical distance from the ground level [onshore] or MSL [offshore] to the platform CM (meters)

0 PtfmRefzt - Vertical distance from the ground level [onshore] or MSL [offshore] to the platform reference point (meters)

----- MASS AND INERTIA -----

0 TipMass(1) - Tip-brake mass, blade 1 (kg)
0 TipMass(2) - Tip-brake mass, blade 2 (kg)
0 TipMass(3) - Tip-brake mass, blade 3 (kg) [unused for 2 blades]
56780 HubMass - Hub mass (kg)
115926 HubIner - Hub inertia about rotor axis [3 blades] or teeter axis [2 blades] (kg m²)
534.116 GenIner - Generator inertia about HSS (kg m²)
240000 NacMass - Nacelle mass (kg)
2.60789E+06 NacYIner - Nacelle inertia about yaw axis (kg m²)
0 YawBrMass - Yaw bearing mass (kg)
13563510 PtfmMass - Platform mass (kg)
5868116966 PtfmRIner - Platform inertia for roll tilt rotation about the platform CM (kg m²)
5868116966 PtfmPIner - Platform inertia for pitch tilt rotation about the platform CM (kg m²)
11883804922 PtfmYIner - Platform inertia for yaw rotation about the platform CM (kg m²)

----- BLADE -----

17 BldNodes - Number of blade nodes (per blade) used for analysis (-)
"SMW_Baseline/NRELOffshrbSlineSMW_Blade.dat" BldFile(1) - Name of file containing properties for blade 1 (quoted string)
"SMW_Baseline/NRELOffshrbSlineSMW_Blade.dat" BldFile(2) - Name of file containing properties for blade 2 (quoted string)
"SMW_Baseline/NRELOffshrbSlineSMW_Blade.dat" BldFile(3) - Name of file containing properties for blade 3 (quoted string) [unused for 2 blades]

----- ROTOR-TEETER -----

0 TeetMod - Rotor-teeter spring/damper model {0: none, 1: standard, 2: user-defined from routine UserTeet} (switch) [unused for 3 blades]
0 TeetDmpP - Rotor-teeter damper position (degrees) [used only for 2 blades and when TeetMod=1]
0 TeetDmp - Rotor-teeter damping constant (N-m/(rad/s)) [used only for 2 blades and when TeetMod=1]
0 TeetCDmp - Rotor-teeter rate-independent Coulomb-damping moment (N-m) [used only for 2 blades and when TeetMod=1]
0 TeetSSStP - Rotor-teeter soft-stop position (degrees) [used only for 2 blades and when TeetMod=1]
0 TeetHStP - Rotor-teeter hard-stop position (degrees) [used only for 2 blades and when TeetMod=1]
0 TeetSSSp - Rotor-teeter soft-stop linear-spring constant (N-m/rad) [used only for 2 blades and when TeetMod=1]
0 TeetHSSp - Rotor-teeter hard-stop linear-spring constant (N-m/rad) [used only for 2 blades and when TeetMod=1]

----- DRIVETRAIN -----

100 GBoxEff - Gearbox efficiency (%)
97 GBRatio - Gearbox ratio (-)

```

8.67637E+08  DTTorSpr  - Drivetrain torsional spring (N-m/rad)

6.215E+06    DTTorDmp  - Drivetrain torsional damper (N-m/(rad/s))

----- FURLING -----
False        Furling   - Read in additional model properties for furling turbine (flag) [must currently be FALSE]
"unused"     FurlFile  - Name of file containing furling properties (quoted string) [unused when Furling=False]

----- TOWER -----

20  TwrNodes  - Number of tower nodes used for analysis (-)

"NRELOffshrBslne5MW_OC4DeepCwindSemi_ElastoDyn_Tower.dat"  TwrFile  - Name of file containing tower properties
(quoted string)

----- OUTPUT -----

True         SumPrint  - Print summary data to "<RootName>.sum" (flag)

2  OutFile   - Switch to determine where output will be placed: {1: in module output file only; 2: in glue
code output file only; 3: both} (currently unused)

True         TabDelim  - Use tab delimiters in text tabular output file? (flag) (currently unused)

"ES10.3E2"   OutFmt    - Format used for text tabular output (except time). Resulting field should be 10 characters.
(quoted string) (currently unused)

0  TStart    - Time to begin tabular output (s) (currently unused)

1  DecFact   - Decimation factor for tabular output {1: output every time step} (-) (currently unused)

1  NTwGages  - Number of tower nodes that have strain gages for output [0 to 9] (-)

10 TwrGagNd  - List of tower nodes that have strain gages [1 to TwrNodes] (-) [unused if NTwGages=0]

1  NBlGages  - Number of blade nodes that have strain gages for output [0 to 9] (-)

9  BldGagNd  - List of blade nodes that have strain gages [1 to BldNodes] (-) [unused if NBlGages=0]

OutList      - The next line(s) contains a list of output parameters. See OutListParameters.xlsx for a
listing of available output channels, (-)

"PtfmSurge, PtfmSway, PtfmHeave, PtfmPitch, PtfmYaw "

"TTDspFA, TTDspSS, TTDspAx, TTDspRoll, TTDspPtch, TTDspTwst"

END of input file (the word "END" must appear in the first 3 columns of this last OutList line)-----
-----

```

- Modul SubDyn

```

----- SubDyn MultiMember Support Structure Input File -----
OC3 Monopile configuration (pile only).

----- SIMULATION CONTROL -----
False      Echo      - Echo input data to "<rootname>.SD.ech" (flag)
"DEFAULT"  SDeltaT    - Local Integration Step. If "default", the glue-code integration step will be used.
          3  IntMethod - Integration Method [1/2/3/4 = RK4/AB4/ABM4/AM2].
True       SttcSolve - Solve dynamics about static equilibrium point
True       GuyanLoadCorrection - Include extra moment from lever arm at interface and rotate FEM for floating.

----- FEA and CRAIG-BAMPTON PARAMETERS -----
          3  FEMMod    - FEM switch: element model in the FEM. [1= Euler-Bernoulli(E-B); 2=Tapered E-B (unavailable); 3= 2-node Timoshenko; 4= 2-node tapered Timoshenko (unavailable)]
          1  NDiv      - Number of sub-elements per member
True       CBMod      - [T/F] If True perform C-B reduction, else full FEM dofs will be retained. If True, select Nmodes to retain in C-B reduced system.
          0  Nmodes    - Number of internal modes to retain (ignored if CBMod=False). If Nmodes=0 --> Guyan Reduction.
          1  JDampings - Damping Ratios for each retained mode (% of critical) If Nmodes>0, list Nmodes structural damping ratios for each retained mode (% of critical), or a single damping ratio to be applied to all retained modes. (last entered value will be used for all remaining modes).
          0  GuyanDampMod - Guyan damping {0=none, 1=Rayleigh Damping, 2=user specified 6x6 matrix}
0.000, 0.000 RayleighDamp - Mass and stiffness proportional damping coefficients (Rayleigh Damping) [only if GuyanDampMod=1]
          6  GuyanDampSize - Guyan damping matrix (6x6) [only if GuyanDampMod=2]
0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00
0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00
0.0000e+00 0.0000e+00 1.065100e+06 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00
0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00
0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00
0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00

---- STRUCTURE JOINTS: joints connect structure members (~Hydrodyn Input File) -----
          19 NJoints   - Number of joints (-)

JointID      JointXss      JointYss      JointZss      JointType JointDirX  JointDirY  JointDirZ  JointStiff  ![[Coordinates of Member joints in SS-Coordinate System][JointType={1:cantilever, 2:universal joint, 3:revolute joint, 4:spherical joint}]]

```

(-)	(m)	(m)	(m)	(-)	(-)	(-)	(-)	(Nm/rad)
1	0.00000	0.00000	-20.00000	1	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.00000	0.00000	-17.00000	1	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.00000	0.00000	10.00000	1	0.0	0.0	0.0	0.0
4	-28.87000	0.00000	-20.00000	1	0.0	0.0	0.0	0.0
5	-28.87000	0.00000	-17.00000	1	0.0	0.0	0.0	0.0
6	-28.87000	0.00000	-14.00000	1	0.0	0.0	0.0	0.0
7	-28.87000	0.00000	10.00000	1	0.0	0.0	0.0	0.0
8	-28.87000	0.00000	12.00000	1	0.0	0.0	0.0	0.0
9	14.43500	25.00000	-20.00000	1	0.0	0.0	0.0	0.0
10	14.43500	25.00000	-17.00000	1	0.0	0.0	0.0	0.0
11	14.43500	25.00000	-14.00000	1	0.0	0.0	0.0	0.0
12	14.43500	25.00000	10.00000	1	0.0	0.0	0.0	0.0
13	14.43500	25.00000	12.00000	1	0.0	0.0	0.0	0.0
14	14.43500	-25.00000	-20.00000	1	0.0	0.0	0.0	0.0
15	14.43500	-25.00000	-17.00000	1	0.0	0.0	0.0	0.0
16	14.43500	-25.00000	-14.00000	1	0.0	0.0	0.0	0.0
17	14.43500	-25.00000	10.00000	1	0.0	0.0	0.0	0.0
18	14.43500	-25.00000	12.00000	1	0.0	0.0	0.0	0.0
19	-28.87000	0.00000	-8.00000	1	0.0	0.0	0.0	0.0

----- BASE REACTION JOINTS: 1/0 for Locked/Free DOF @ each Reaction Node -----

0 NReact - Number of Joints with reaction forces; be sure to remove all rigid motion DOFs of the structure (else det([K])=0)

RJointID RctTDXss RctTDYss RctTDZss RctRDXss RctRDYss RctRDZss SSIfilename ![Global Coordinate System]

(-) (flag) (flag) (flag) (flag) (flag) (flag) (string)

----- INTERFACE JOINTS: 1/0 for Locked (to the TP)/Free DOF @each Interface Joint (only Locked-to-TP implemented thus far (=rigid TP)) -----

1 NInterf - Number of interface joints locked to the Transition Piece (TP): be sure to remove all rigid motion dofs

IJointID ItfTDXss ItfTDYss ItfTDZss ItfRDXss ItfRDYss ItfRDZss ![Global Coordinate System]

(-) (flag) (flag) (flag) (flag) (flag) (flag)

3 1 1 1 1 1 1

----- MEMBERS -----

30 NMembers - Number of members (-)

MemberID	MJointID1	MJointID2	MPropSetID1	MPropSetID2	MType	COSMID	![MType={1:beam circ., 2:cable, 3:rigid, 4:beam arb.}. COSMID={-1:none}]			
(-)		(-)				(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
1		1				2	1	1	1	!mc
2		2				3	1	1	1	!mc
3		4				5	2	2	1	!hp_bwh
4		5				6	2	2	1	!hp_ats
5		6				19	3	3	1	!col_submrg
6		7				8	3	3	1	!col_frbrd
7		9				10	2	2	1	!hp_bwh
8		10				11	2	2	1	!hpatslowpnt
9		11				12	3	3	1	!colsublowpnt
10		12				13	3	3	1	!colfbdlowpnt
11		14				15	2	2	1	!hp_bwh
12		15				16	2	2	1	!hpatslowpnt
13		16				17	3	3	1	!colsublowpnt
14		17				18	3	3	1	!col_frbrd
15		5				10	4	4	1	!lowerpntn
16		10				15	4	4	1	!lower pontoon
17		15				5	4	4	1	!lower pontoon
18		7				12	4	4	1	!upper pontoon
19		12				17	4	4	1	!upper pontoon
20		17				7	4	4	1	!upper pontoon
21		5				2	4	4	1	!Y_lower
22		10				2	4	4	1	!Y_lower
23		15				2	4	4	1	!Y_lower
24		7				3	4	4	1	!Y_upper
25		12				3	4	4	1	!Y_upper
26		17				3	4	4	1	!Y_upper
27		7				2	4	4	1	!cross brace
28		12				2	4	4	1	!cross brace
29		17				2	4	4	1	!cross brace

----- CIRCULAR BEAM CROSS-SECTION PROPERTIES -----

4 NPropSets - Number of structurally unique cross-sections

PropSetID	YoungE	ShearG	MatDens	XsecD	XsecT
(-)	(N/m2)	(N/m2)	(kg/m3)	(m)	(m)
1	2.10000e+11	8.07690e+10	7850.00	6.500000	0.030000 !mc
2	2.10000e+11	8.07690e+10	7850.00	18.40000	0.031000 !hp
3	2.10000e+11	8.07690e+10	7850.00	7.700000	0.043000 !col
4	2.10000e+11	8.07690e+10	7850.00	1.190000	0.007600 !brc

----- ARBITRARY BEAM CROSS-SECTION PROPERTIES -----

0 NXPropSets - Number of structurally unique non-circular cross-sections (if 0 the following table is ignored)

PropSetID	YoungE	ShearG	MatDens	XsecA	XsecAsx	XsecAsy	XsecJxx	XsecJyy	XsecJ0
(-)	(N/m2)	(N/m2)	(kg/m3)	(m2)	(m2)	(m2)	(m4)	(m4)	(m4)

----- CABLE PROPERTIES -----

0 NCablePropSets - Number of cable cable properties

PropSetID	EA	MatDens	T0	CtrlChannel
(-)	(N)	(kg/m)	(N)	(-)

----- RIGID LINK PROPERTIES -----

0 NRigidPropSets - Number of rigid link properties

PropSetID	MatDens
(-)	(kg/m)

----- MEMBER COSINE MATRICES COSM(i,j) -----

0 NCOSMs - Number of unique cosine matrices (i.e., of unique member alignments including principal axis rotations); ignored if NXPropSets=0 or 9999 in any element below

COSMID	COSM11	COSM12	COSM13	COSM21	COSM22	COSM23	COSM31	COSM32	COSM33
(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)

----- JOINT ADDITIONAL CONCENTRATED MASSES-----

0 NCmass - Number of joints with concentrated masses; Global Coordinate System

CMJointID	JMass	JMXX	JMYX	JMZZ	JMXY	JMZ	JMYZ	MCGX	MCGY	MCGZ
(-)	(kg)	(kg*m^2)	(kg*m^2)	(kg*m^2)	(kg*m^2)	(kg*m^2)	(kg*m^2)	(m)	(m)	(m)

----- OUTPUT: SUMMARY & OUTFILE -----

True SumPrint - Output a Summary File (flag)

```

0          OutCBModes - Output Guyan and Craig-Bampton modes {0: No output, 1: JSON output}, (flag)
0          OutFEMModes - Output first 30 FEM modes {0: No output, 1: JSON output} (flag)
False     OutCOSM    - Output cosine matrices with the selected output member forces (flag)
False     OutA11     - [T/F] Output all members' end forces
          2 OutSwch   - [1/2/3] Output requested channels to: 1=<rootname>.SD.out; 2=<rootname>.out (generated by FAST); 3=both files.
True      TabDelim   - Generate a tab-delimited output in the <rootname>.SD.out file
          1 OutDec    - Decimation of output in the <rootname>.SD.out file
"ES11.4e2" OutFmt    - Output format for numerical results in the <rootname>.SD.out file
"A11"     OutSFmt    - Output format for header strings in the <rootname>.SD.out file
----- MEMBER OUTPUT LIST -----
          8 NMOutputs - Number of members whose forces/displacements/velocities/accelerations will be output (-) [Must be <= 99].
MemberID  NOutCnt  NodeCnt  !NOutCnt=how many nodes to get output for [< 10]; NodeCnt are local ordinal numbers from the start of the member, and must be >=1 and <= NDiv+1] If NMOutputs=0 leave blank as well.
(-)       (-)       (-)
          3         1         1         ! hp base
          4         1         2         ! hp up
          30        1         1         ! col ms1
          15        1         1         ! lower pontoon
          18        1         1         ! upper pontoon
          22        1         1         ! lower Y
          25        1         1         ! upper Y
          28        1         1         ! cross brace
----- SSOutList: The next line(s) contains a list of output parameters that will be output in <rootname>.SD.out or <rootname>.out. -----
"M8N1FKxe, M8N1FKye, M8N1FKze" - The local side-to-side and fore-aft bending moments at node 1 of member 2 (located at -10 m, i.e. half way between MSL and mudline).
"M7N1FKxe, M7N1FKye, M7N1FKze" - The local side-to-side and fore-aft bending moments at node 1 of member 2 (located at -10 m, i.e. half way between MSL and mudline).
"M6N1FKxe, M6N1FKye, M6N1FKze" - The local side-to-side and fore-aft bending moments at node 1 of member 2 (located at -10 m, i.e. half way between MSL and mudline).
"M5N1FKxe, M5N1FKye, M5N1FKze" - The local side-to-side and fore-aft bending moments at node 1 of member 2 (located at -10 m, i.e. half way between MSL and mudline).
"M4N1FKxe, M4N1FKye, M4N1FKze" - The local side-to-side and fore-aft bending moments at node 1 of member 2 (located at -10 m, i.e. half way between MSL and mudline).
"M3N1FKxe, M3N1FKye, M3N1FKze" - The local side-to-side and fore-aft bending moments at node 1 of member 2 (located at -10 m, i.e. half way between MSL and mudline).
"M2N1FKxe, M2N1FKye, M2N1FKze" - The local side-to-side and fore-aft bending moments at node 1 of member 2 (located at -10 m, i.e. half way between MSL and mudline).
"M1N1FKxe, M1N1FKye, M1N1FKze" - The local side-to-side and fore-aft bending moments at node 1 of member 2 (located at -10 m, i.e. half way between MSL and mudline).
END of output channels and end of file. (the word "END" must appear in the first 3 columns of this line)

```


- OrcaFlex Interface

```
----- OrcaFlex Interface v1.00.* INPUT FILE -----  
OC4 OrcaFlex interface to FAST v8  
----- SIMULATION DATA -----  
False          Echo          - Echo input data to "<RootName>.ech" (flag)  
Orca_Input  OrcaIptFileName  - name of OrcaFlex input file without file extension (relative, or including the full path)  
input\FASTLinkDLL_x64.dll  DLL_FileName      - name of dll to use for OrcaFlex  
-----
```

- Sumber (Modul Lainnya):

https://github.com/OpenFAST/r-test/tree/main/glue-codes/openfast/5MW_OC4Semi_WSt_WavesWN

LAMPIRAN D
MAXIMUM RESPONSE VALUE (DATA EKSPERIMEN)

- Input Pembentukan *Model surrogate* (sample.xlsx)

DoE	OD ₁	OD ₂	OD ₃	t ₁	t ₂	t ₃	U_{max}	θ_{max}	u_{max}	ϕ_{max}	σ_{max}	F_{max}
1	12,0	24,0	1,60	0,060	0,060	0,0175	20,37	1,718	0,34	0,46	123,57	2385,46
2	11,0	22,0	1,40	0,050	0,050	0,0150	12,42	2,132	0,36	0,48	126,55	1931,83
3	6,0	20,5	1,03	0,044	0,055	0,0110	8,097	5,6	0,49	0,68	151,04	1646,61
4	6,1	13,7	0,70	0,025	0,029	0,0095	5,762	6,458	0,5	0,66	124,64	1922,99
5	6,1	16,0	1,24	0,037	0,043	0,0067	6,719	4,837	0,44	0,59	149,5	1815,7
6	6,2	13,5	0,75	0,056	0,053	0,0098	6,285	10,77	0,66	0,9	220,63	1895,71
7	6,2	19,7	1,49	0,020	0,050	0,0097	7,727	4,258	0,41	0,56	85,76	1690,3
8	6,3	20,5	0,97	0,026	0,056	0,0070	8,119	4,86	0,41	0,56	200,12	1679,96
9	6,3	21,4	0,98	0,040	0,031	0,0058	8,554	5,865	0,45	0,62	223,15	1664,45
10	6,4	16,7	1,29	0,056	0,038	0,0094	7,268	4,12	0,43	0,58	135,89	1761,77
11	6,4	22,7	0,97	0,054	0,056	0,0103	9,066	5,907	0,47	0,64	202,68	1593,6
12	6,5	12,6	1,54	0,056	0,057	0,0111	6,258	5,446	0,52	0,7	104,37	1885,29
13	6,5	19,2	1,53	0,058	0,029	0,0069	7,954	3,153	0,39	0,53	152,18	1690,3
14	6,6	16,4	0,64	0,057	0,056	0,0075	7,265	4,331	0,44	0,61	375,38	1782,69
15	6,6	23,1	1,51	0,056	0,028	0,0099	8,725	6,415	0,47	0,64	115,16	1602,55
16	6,7	16,9	0,68	0,020	0,049	0,0091	7,257	4,265	0,41	0,55	171,32	1868,55
17	6,7	18,3	1,02	0,053	0,022	0,0109	7,173	4,452	0,45	0,6	133,45	1726,07
18	6,8	12,9	1,12	0,055	0,026	0,0063	6,077	4,943	0,49	0,66	200,67	1922,93
19	6,8	14,8	1,00	0,049	0,054	0,0065	6,806	4,299	0,42	0,57	243,73	1843,12
20	6,9	22,0	1,10	0,044	0,029	0,0112	8,849	3,419	0,41	0,56	122,69	1664,94
21	6,9	22,1	1,40	0,022	0,021	0,0091	8,456	3,291	0,4	0,54	74,683	1703,47
22	7,0	14,2	1,54	0,051	0,050	0,0078	6,904	4,418	0,47	0,64	139,49	1888,34
23	7,0	16,3	0,83	0,038	0,058	0,0056	7,487	4,011	0,39	0,53	319,86	1848,64
24	7,1	15,3	0,88	0,058	0,032	0,0055	7,087	4,486	0,43	0,58	331,04	1857,28
25	7,1	21,0	1,01	0,048	0,053	0,0095	8,535	3,332	0,4	0,55	197,49	1662,61
26	7,2	16,2	0,87	0,052	0,022	0,0078	7,304	4,381	0,44	0,59	212,47	1850,24
27	7,2	17,2	1,05	0,033	0,059	0,0086	7,85	3,444	0,39	0,52	168,15	1830,44
28	7,3	13,3	0,77	0,046	0,051	0,0087	6,765	4,233	0,47	0,63	231,59	1948,03
29	7,3	17,3	0,89	0,026	0,057	0,0085	7,923	3,388	0,37	0,5	177,64	1853,58
30	7,4	15,2	1,56	0,030	0,047	0,0071	7,246	4,318	0,44	0,59	115,65	1919,45
31	7,4	17,0	0,82	0,034	0,020	0,0087	7,533	4,177	0,43	0,57	151,98	1873,09
32	7,5	15,9	1,46	0,039	0,051	0,0073	7,66	3,892	0,43	0,57	144,81	1887,25
33	7,5	21,7	1,07	0,042	0,045	0,0060	8,863	2,011	0,35	0,48	259,96	1695,99
34	7,6	14,6	1,38	0,024	0,033	0,0062	6,699	3,367	0,44	0,6	114,67	1944,64
35	7,6	20,9	1,05	0,030	0,036	0,0060	8,502	2,452	0,35	0,47	201,27	1747,45
36	7,7	18,0	1,57	0,034	0,036	0,0085	8,247	3,602	0,4	0,53	104,01	1836,44
37	7,8	14,0	0,84	0,057	0,047	0,0084	7,257	3,76	0,48	0,65	263,02	1939,27
38	7,8	21,9	1,04	0,032	0,025	0,0070	8,807	2,066	0,36	0,48	166,33	1732,92
39	7,9	14,5	1,22	0,042	0,042	0,0080	7,134	3,125	0,44	0,6	155,9	1932,56
40	7,9	21,5	0,74	0,033	0,048	0,0106	9,291	2,451	0,41	0,55	203,8	1772,34
41	8,0	17,5	1,31	0,049	0,044	0,0098	7,972	2,737	0,39	0,52	143,98	1820,68

DoE	OD ₁	OD ₂	OD ₃	t ₁	t ₂	t ₃	U_{max}	θ_{max}	u_{max}	ϕ_{max}	σ_{max}	F_{max}
42	8,0	18,3	1,15	0,043	0,039	0,0061	8,24	2,93	0,37	0,5	225,7	1822,86
43	8,1	20,0	1,36	0,026	0,050	0,0063	8,601	2,478	0,36	0,48	164,15	1788,29
44	8,1	22,6	1,06	0,049	0,059	0,0108	9,396	2,816	0,38	0,52	195,35	1667,82
45	8,2	19,9	0,71	0,054	0,060	0,0092	8,863	2,691	0,36	0,49	339,35	1750,31
46	8,2	23,3	1,33	0,059	0,042	0,0107	9,658	2,202	0,36	0,49	159,67	1659,08
47	8,3	17,5	1,59	0,034	0,054	0,0079	7,935	2,441	0,39	0,52	129,48	1850,18
48	8,3	23,0	1,09	0,043	0,035	0,0057	9,522	1,974	0,34	0,46	269,01	1703,47
49	8,4	18,7	0,76	0,055	0,023	0,0100	8,798	3,684	0,42	0,56	233,13	1843,52
50	8,4	20,6	0,94	0,060	0,034	0,0080	9,271	2,474	0,37	0,5	273,8	1782,59
51	8,5	16,7	1,39	0,033	0,040	0,0052	7,878	2,661	0,41	0,55	188,46	1907,14
52	8,5	21,2	1,43	0,053	0,047	0,0075	8,527	4,356	0,41	0,56	197,62	1613,4
53	8,6	13,0	1,23	0,024	0,057	0,0057	7,091	3,137	0,48	0,65	171,39	2052,99
54	8,6	19,3	1,37	0,026	0,046	0,0111	8,634	2,285	0,36	0,48	97,436	1832,81
55	8,7	18,1	0,86	0,024	0,041	0,0112	8,699	3,182	0,41	0,54	132,37	1903,47
56	8,7	23,7	0,79	0,055	0,048	0,0104	10,01	3,053	0,39	0,53	281,09	1682,12
57	8,8	15,9	1,15	0,039	0,030	0,0068	7,921	3,265	0,44	0,59	183,91	1955,23
58	8,8	22,2	1,00	0,029	0,021	0,0056	9,71	2,619	0,36	0,49	204,59	1808,64
59	8,9	12,4	1,45	0,040	0,058	0,0068	7,143	3,075	0,52	0,7	167,47	2067,68
60	8,9	13,4	1,51	0,028	0,033	0,0067	7,186	3,129	0,51	0,69	115,32	2056,13
61	9,0	15,0	1,20	0,046	0,023	0,0102	7,844	3,076	0,5	0,67	132,98	1991,24
62	9,0	21,8	1,35	0,059	0,035	0,0092	9,891	2,347	0,36	0,48	179,71	1759,86
63	9,1	12,0	1,41	0,035	0,037	0,0093	7,055	3,055	0,54	0,73	108,37	2115,18
64	9,1	20,2	0,66	0,047	0,030	0,0089	9,476	2,709	0,38	0,51	300,89	1851,8
65	9,2	13,2	1,56	0,051	0,051	0,0058	7,512	2,95	0,52	0,7	212,28	2040,39
66	9,2	15,6	1,50	0,039	0,054	0,0052	8,074	2,53	0,45	0,6	218,33	1964,87
67	9,3	12,7	1,09	0,051	0,038	0,0099	7,684	3,151	0,55	0,74	173,85	2096,04
68	9,3	20,4	1,28	0,023	0,054	0,0072	9,529	2,044	0,35	0,47	162,69	1852,03
69	9,4	13,8	0,84	0,052	0,043	0,0065	8,205	3,522	0,54	0,72	350,41	2067
70	9,4	15,6	0,92	0,045	0,026	0,0054	8,421	2,91	0,51	0,68	318,59	2010,46
71	9,5	12,2	1,48	0,040	0,023	0,0072	7,295	3,062	0,56	0,76	135,45	2138,91
72	9,5	22,5	1,26	0,032	0,045	0,0077	10,8	2,393	0,35	0,47	176,17	1819,58
73	9,6	13,2	0,73	0,028	0,035	0,0078	8,112	3,625	0,53	0,71	210,08	2144,06
74	9,7	23,7	1,30	0,040	0,042	0,0084	10,92	2,369	0,36	0,48	179,24	1775,47
75	9,8	17,2	0,92	0,028	0,056	0,0108	9,097	2,393	0,41	0,55	162,79	1976,57
76	9,8	20,7	1,40	0,036	0,037	0,0061	9,929	2,246	0,37	0,49	193,93	1864,94
77	9,9	14,3	1,20	0,028	0,027	0,0080	8,186	3,087	0,52	0,7	126,72	2089,31
78	9,9	17,9	0,72	0,054	0,059	0,0086	9,7	2,887	0,45	0,6	385,26	1935,98
79	10,0	13,7	0,64	0,030	0,027	0,0050	8,481	3,903	0,56	0,75	369,53	2160,77
80	10,0	19,3	0,69	0,021	0,044	0,0073	9,879	2,202	0,38	0,51	253,42	1950,7
81	10,1	14,4	0,62	0,032	0,055	0,0099	8,817	3,633	0,51	0,69	209,1	2127,89
82	10,1	22,1	0,90	0,045	0,053	0,0083	9,879	2,202	0,38	0,51	170,65	2224,94
83	10,2	15,1	1,27	0,048	0,023	0,0057	8,794	3,258	0,52	0,7	242,55	2080,95
84	10,2	20,0	0,78	0,036	0,024	0,0110	10,13	2,739	0,41	0,54	180,46	1929,07
85	10,3	15,2	1,36	0,023	0,024	0,0093	8,591	2,902	0,5	0,67	89,406	2064,37
86	10,3	22,8	0,81	0,052	0,040	0,0066	10,85	7,341	0,54	0,72	423,88	1939,1

DoE	OD ₁	OD ₂	OD ₃	t ₁	t ₂	t ₃	U_{max}	θ_{max}	u_{max}	ϕ_{max}	σ_{max}	F_{max}
87	10,4	23,5	0,61	0,046	0,052	0,0101	11,77	4,461	0,45	0,61	381,42	1842,45
88	10,4	23,8	0,61	0,036	0,039	0,0088	11,82	3,563	0,41	0,55	340,27	1856,18
89	10,5	13,0	1,16	0,044	0,028	0,0093	8,364	2,799	0,55	0,73	162,93	2161,93
90	10,5	15,8	1,26	0,044	0,033	0,0088	9,161	3,015	0,5	0,67	167,8	2039,94
91	10,6	18,5	0,63	0,059	0,041	0,0097	10,31	3,082	0,45	0,61	399,85	1960,38
92	10,6	18,9	1,33	0,048	0,046	0,0095	10	2,273	0,42	0,56	177,86	1925,85
93	10,7	18,6	1,32	0,048	0,024	0,0109	9,668	2,364	0,44	0,59	139,81	1901,67
94	10,7	21,0	1,17	0,038	0,020	0,0082	10,12	2,081	0,4	0,54	168,27	1855,76
95	10,8	18,1	1,11	0,036	0,036	0,0066	10,36	2,437	0,43	0,58	229,52	2031,18
96	10,8	23,9	1,47	0,041	0,040	0,0055	9,793	2,414	0,42	0,57	250,61	1620,73
97	10,9	14,2	1,58	0,057	0,021	0,0076	9,165	2,739	0,54	0,73	179,54	2157,73
98	10,9	19,4	1,52	0,059	0,052	0,0051	10,89	2,178	0,41	0,55	337,7	1977,6
99	11,0	19,0	0,90	0,047	0,043	0,0081	10,71	2,228	0,42	0,56	298,83	2017,05
100	11,0	19,5	1,31	0,022	0,032	0,0107	10,75	2,265	0,41	0,55	95,873	2042,92
101	11,1	22,4	0,76	0,025	0,032	0,0089	11,93	2,014	0,38	0,51	209,02	1950,09
102	11,1	23,3	0,65	0,041	0,028	0,0106	13,12	2,264	0,38	0,5	276,35	1983,23
103	11,2	12,6	0,95	0,022	0,030	0,0101	9,129	3,071	0,61	0,83	118,18	2307,22
104	11,2	14,8	1,44	0,035	0,045	0,0102	9,65	2,356	0,49	0,65	122,84	2166,55
105	11,3	12,1	0,67	0,027	0,051	0,0105	9,337	3,924	0,6	0,8	204,42	2337,67
106	11,3	16,5	1,14	0,050	0,031	0,0064	10,28	2,854	0,5	0,67	286,87	2120,28
107	11,4	21,6	1,08	0,021	0,048	0,0066	12,07	1,765	0,36	0,48	211,25	2005,86
108	11,4	23,5	0,99	0,042	0,041	0,0103	13,05	2,508	0,38	0,51	217,07	1930,92
109	11,5	19,6	0,80	0,034	0,060	0,0074	11,41	2,086	0,39	0,52	343,94	2062,1
110	11,5	22,4	1,25	0,038	0,032	0,0059	12,47	2,126	0,37	0,5	251,66	1966,9
111	11,6	16,9	1,45	0,050	0,027	0,0090	10,51	2,614	0,49	0,66	166,59	2119,16
112	11,6	23,1	1,42	0,029	0,025	0,0074	12,84	2,2	0,36	0,48	144,48	1956,38
113	11,7	13,9	1,21	0,031	0,035	0,0054	9,914	2,596	0,54	0,73	226,02	2252,49
114	11,7	17,7	1,13	0,029	0,041	0,0053	10,85	2,83	0,45	0,6	261,1	2125,33
115	11,8	12,5	1,18	0,022	0,034	0,0081	9,587	3,171	0,59	0,8	124,75	2328,25
116	11,8	19,0	0,95	0,027	0,046	0,0051	11,35	2,937	0,4	0,53	328,67	2107,63
117	11,9	17,7	1,59	0,037	0,038	0,0082	10,99	2,477	0,46	0,62	146,26	2116,02
118	11,9	20,3	0,85	0,031	0,026	0,0096	11,91	2,162	0,42	0,56	192,83	2100,92
119	12,0	15,5	0,93	0,045	0,049	0,0071	10,8	2,664	0,51	0,68	331,87	2204,44

LAMPIRAN E
SKRIP OPTIMASI (MATLAB)

```

clc;
clear all;
close all;

% Load data from Excel file
data = xlsread('sample.xlsx');

% Assign design variables (X) and response data (Y) from the loaded data
X = data(:, 1:6);
Y = data(:, 7:12);

% Set lower and upper bounds for design variables
lb = [6 12 0.6 0.02 0.02 0.005]; % Lower bounds
ub = [12 24 1.6 0.02 0.02 0.0175]; % Upper bounds

% Initialize the initial design variable values from the loaded data
x0 = X(1, :);

k = 5; % Jumlah k pada k-fold CV
cv = cvpartition(size(X, 1), 'KFold', k); % Membuat objek k-fold CV

% Pilih model surrogate
disp('Pilih model surrogate:');
disp('1. Kriging');
disp('2. Radial Basis Function (RBF)');
model_choice = input('Masukkan pilihan Anda (1 atau 2): ');

% Membuat model surrogate berdasarkan pilihan
models = cell(6, 1);
errors = zeros(size(X, 1), 6);
predicted_values_all = cell(6, 1);
actual_values_all = cell(6, 1);

switch model_choice
    case 1
        disp('Menggunakan model Kriging. ');
        for i = 1:6
            train_Y = Y(:, i);
            models{i} = fitrgp(X, train_Y, ...
                'Basis', 'linear', ...
                'KernelFunction', 'squaredexponential', ...
                'FitMethod', 'exact', ...
                'PredictMethod', 'exact', ...
                'Standardize', true, ...
                'Optimizer', 'lbfgs');
        end
end

```

```

case 2
    disp('Menggunakan model RBF.');
```

```

for i = 1:6
    train_Y = Y(:, i);
    models{i} = fitrsvm(X, train_Y, ...
        'KernelFunction', 'rbf', ...
        'Standardize', true, ...
        'OptimizeHyperparameters', 'auto', ...
        'HyperparameterOptimizationOptions', struct('AcquisitionFunctionName', 'expected-improvement-plus'));
end
otherwise
    error('Pilihan model tidak valid.');
```

```

end

% K-Fold CV untuk menghitung kesalahan prediksi
for i = 1:6
    train_Y = Y(:, i);
    predicted_values_fold = [];
    actual_values_fold = [];
    for fold = 1:cv.NumTestSets
        train_idx = cv.training(fold);
        test_idx = cv.test(fold);
        train_X = X(train_idx, :);
        train_Y_fold = train_Y(train_idx);

        % Melatih model surrogate pada data pelatihan dari fold saat ini
        switch model_choice
            case 1
                kfold_model = fitrgp(train_X, train_Y_fold, ...
                    'Basis', 'linear', ...
                    'KernelFunction', 'squareexponential', ...
                    'FitMethod', 'exact', ...
                    'PredictMethod', 'exact', ...
                    'Standardize', true, ...
                    'Optimizer', 'lbfgs');
            case 2
                kfold_model = fitrsvm(train_X, train_Y_fold, ...
                    'KernelFunction', 'rbf', ...
                    'Standardize', true, ...
                    'OptimizeHyperparameters', 'auto', ...
                    'HyperparameterOptimizationOptions', struct('AcquisitionFunctionName', 'expected-improvement-
plus'));
        end

        % Memprediksi data validasi pada fold saat ini
        predicted_values = predict(kfold_model, X(test_idx, :));
    end
end

```



```

    % Menyimpan nilai prediksi dan aktual untuk fold saat ini
    predicted_values_fold = [predicted_values_fold; predicted_values];
    actual_values_fold = [actual_values_fold; Y(test_idx, i)];

    % Menghitung kesalahan prediksi untuk data validasi pada fold saat ini
    errors(test_idx, i) = abs(predicted_values - Y(test_idx, i));
end

% Menyimpan semua nilai prediksi dan aktual untuk constraint saat ini
predicted_values_all{i} = predicted_values_fold;
actual_values_all{i} = actual_values_fold;
end

% Menghitung statistik kesalahan
mean_errors = mean(errors);
mse_errors = mean(errors .^ 2);
rmse_errors = sqrt(mse_errors);
r2_scores = zeros(1, 6);

for i = 1:6
    y_true = Y(:, i);
    y_pred = predict(models{i}, X);
    ss_res = sum((y_true - y_pred) .^ 2);
    ss_tot = sum((y_true - mean(y_true)) .^ 2);
    r2_scores(i) = 1 - (ss_res / ss_tot);
end

% Menampilkan hasil kesalahan
for i = 1:6
    fprintf('Model %d:\n', i);
    fprintf(' Mean error (MAE): %f\n', mean_errors(i));
    fprintf(' Mean squared error (MSE): %f\n', mse_errors(i));
    fprintf(' Root mean squared error (RMSE): %f\n', rmse_errors(i));
    fprintf(' R-squared (R2): %f\n', r2_scores(i));
end

% Plot nilai prediksi dan aktual untuk setiap constraint
for i = 1:6
    figure;
    scatter(actual_values_all{i}, predicted_values_all{i}, 'r*');
    hold on;
    plot([min(actual_values_all{i}), max(actual_values_all{i})], ...
         [min(actual_values_all{i}), max(actual_values_all{i})], 'b-');
    xlabel('Real value');
    ylabel('Predicted value');
    title(sprintf('Actual vs Predicted for model %d', i));
end

```

```

legend('Predicted values', 'y = x', 'Location', 'Best');
text(min(actual_values_all{i})+0.1, max(predicted_values_all{i})-0.1, sprintf('R^2 = %.3f', r2_scores(i)),
'FontSize', 12);
hold off;
end

% Pilih solver optimasi desain
disp('Pilih solver optimasi desain:');
disp('1. sqp');
disp('2. ga');
solver_choice = input('Masukkan pilihan Anda (1 atau 2): ');

% Definisikan masalah optimasi berdasarkan pilihan solver
switch solver_choice
case 1
options = optimoptions('fmincon', ...
    'Algorithm', 'sqp', ... % Menggunakan SQP sebagai solver
    'Display', 'iter', ... % Menampilkan iterasi
    'PlotFcn', {@optimplotfval, @optimplotconstrviolation}, ...
    'MaxIterations', 1000, ... % Jumlah maksimum iterasi
    'MaxFunctionEvaluations', 5000, ... % Jumlah maksimum evaluasi fungsi objektif
    'OptimalityTolerance', 1e-6, ... % Toleransi optimitas
    'ConstraintTolerance', 1e-6, ... % Toleransi batasan
    'StepTolerance', 1e-6); % Toleransi langkah

% Call fmincon with the objective function and constraints
[x, fval, exitflag, output] = fmincon(@objective_function, x0, [], [], [], [], lb, ub, @(input)
constraint_function(input, models), options);
case 2
options = optimoptions('ga', ...
    'Display', 'iter', ...
    'PlotFcn', {@gaplotbestf, @gaplotstopping}, ...
    'MaxGenerations', 1000, ... % Maximum number of generations
    'MaxStallGenerations', 15, ... % Maximum number of stall generations
    'MaxTime', 3600, ... % Maximum time in seconds
    'FunctionTolerance', 1e-12, ... % Tolerance for average change in fitness value
    'ConstraintTolerance', 1e-8, ... % Tolerance for constraint violation
    'EliteCount', 2, ... % Number of individuals to keep as elite
    'PopulationSize', 200, ... % Increased size of the population
    'MutationFcn', @mutationadaptfeasible, ... % Adaptive mutation function
    'CrossoverFraction', 0.8, ... % Fraction of population for crossover
    'SelectionFcn', @selectiontournament); % Tournament selection

% Call ga with the objective function and constraints
[x, fval, exitflag, output] = ga(@objective_function, 6, [], [], [], [], lb, ub, @(input)
constraint_function(input, models), options);
otherwise

```

```

        error('Pilihan solver tidak valid.');
```

end

```

disp('Optimal Objective Function Value:');
disp(fval);
disp('Optimal Solution:');
disp(x);

function f = objective_function(input)

    % Variabel Desain
    x = input(1);
    y = input(2);
    z = input(3);
    w = input(4);
    u = input(5);
    v = input(6);

    % Variabel Tetap
    Rho = 7850;
    MCD = 6.5;
    MCT = 0.03;
    MCh = 30;
    COh = 26;
    HPh = 6;
    % PUh = 38;
    % PLh = 26;
    % YUh = 19.6175;
    % YLh = 13.6175;
    %CBh = 32.04;
    UCTC = (1/4) * pi * x^2 * w * Rho;
    UCBC = (1/4) * pi * (x-2*w)^2 * w * Rho;
    BCTC = ((1/4) * pi * (y-2*x)^2 * x * Rho) - ((1/4) * pi * (x-2*w)^2 * w * Rho);
    BCBC = (1/4) * pi * (y-2*x)^2 * x * Rho;
    MCBC = 7671;
    Tower = 118189.46;

    % Komponen massa
    masses = [...
        (pi * ((MCD / 2)^2 - ((MCD - 2 * MCT) / 2)^2) * MCh) * Rho + MCBC;
        3 * (pi * ((x / 2)^2 - ((x - 2 * w) / 2)^2) * COh) * Rho + 3 * UCTC + 3 * UCBC;
        3 * (pi * ((y / 2)^2 - ((y - 2 * u) / 2)^2) * HPh) * Rho + 3 * BCTC + 3 * BCBC;
        3 * (pi * ((z / 2)^2 - ((z - 2 * v) / 2)^2) * (25 - (x / 2)) * 2) * Rho;
        3 * (pi * ((z / 2)^2 - ((z - 2 * v) / 2)^2) * (25 - (y / 2)) * 2) * Rho;
        3 * (pi * ((z / 2)^2 - ((z - 2 * v) / 2)^2) * (25.6175 - (x / 2))) * Rho;
        3 * (pi * ((z / 2)^2 - ((z - 2 * v) / 2)^2) * (25.6175 - (y / 2))) * Rho;

```

```

    3 * (pi * ((z / 2)^2 - ((z - 2 * v) / 2)^2) * (sqrt((25.6175 - x / 2)^2 + (25.33)^2))) * Rho;
];

% Fungsi objektif
f = sum(masses) + Tower ;
end

function [c, ceq] = constraint_function(input, models)
    c = zeros(7, 1); % Initialize constraint vector
    ceq = []; % No equality constraint

    % Evaluate each constraint using the models
    c(1) = predict(models{1}, input) - 28;
    c(2) = predict(models{2}, input) - 10;
    c(3) = predict(models{3}, input) - 1.22;
    c(4) = predict(models{4}, input) - 0.5;
    c(5) = predict(models{5}, input) - 355;
    c(6) = predict(models{6}, input) - 2924.55;
    c(7) = input(3) / input(6) < 300
end

```

LAMPIRAN F
DATA FABRIKASI

Specification	S355 material
Test certificates	with 3.2 certification to EN10204
Uses	<ul style="list-style-type: none"> • Construction • Yellow goods • Rail • Bridge construction • Tanks • Energy & Power Industry • Engineering
Value Added Services	<ul style="list-style-type: none"> • Laser Cutting • Drilling • Annealing • Saw Cutting • Metal Processing • Grinding • Shearing • Oxy-propane Flame Cutting • Surface Grinding
Length	Up to 12m meters long
Thickness	5 mm to 200mm
Width	Up to 3.5 meters wide
Grade	J2 / JR / JO
Standards	EN 10025, DIN 17102, EN 10025-2: 2004, DIN 17100, ASTM, JIS G3106, GB/T700,

Calculated Plate Weight (From Thickness & Size)

Width x Length (in mm)	1219 x 2438	1219 x 6096	1524 x 3048	1524 x 6096	1524 x 9144	1524 x 12192	1829 x 6096	1829 x 12192	2133 x 6096	2133 x 12192	2438 x 6096	2438 x 12192	2743 x 6096	2743 x 12192	3048 x 6096	3048 x 12192
Width x Length (in ft)	4' x 8'	4' x 20'	5' x 10'	5' x 20'	5' x 30'	5' x 40'	6' x 20'	6' x 40'	7' x 20'	7' x 40'	8' x 20'	8' x 40'	9' x 20'	9' x 40'	10' x 20'	10' x 40'
Width x Length (in inch)	48 x 96	48 x 240	60 x 120	60 x 240	60 x 360	60 x 480	72 x 240	72 x 480	84 x 240	84 x 480	96 x 240	96 x 480	108 x 240	108 x 480	120 x 240	120 x 480
Thickness (mm)																
8	187	467	292	583	875	1.167	700	1.400	817	1.633	933	1.867	1.050	2.100	1.167	2.334
9	210	525	328	656	985	1.313	788	1.575	919	1.837	1.050	2.100	1.181	2.363	1.313	2.625
10	233	583	365	729	1.094	1.459	875	1.750	1.021	2.041	1.167	2.333	1.313	2.625	1.459	2.917
12	280	700	438	875	1.313	1.750	1.050	2.101	1.225	2.450	1.400	2.800	1.575	3.150	1.750	3.501
12.7	296	741	463	926	1.389	1.852	1.112	2.223	1.296	2.593	1.482	2.963	1.667	3.334	1.852	3.705
14	327	817	511	1.021	1.532	2.042	1.225	2.451	1.429	2.858	1.633	3.267	1.838	3.675	2.042	4.084
15	350	875	547	1.094	1.641	2.188	1.313	2.626	1.531	3.062	1.750	3.500	1.969	3.938	2.188	4.376
16	373	933	583	1.167	1.750	2.334	1.400	2.801	1.633	3.266	1.867	3.733	2.100	4.200	2.334	4.667
18	420	1.050	656	1.313	1.969	2.625	1.575	3.151	1.837	3.675	2.100	4.200	2.363	4.725	2.625	5.251
19	443	1.108	693	1.386	2.078	2.771	1.663	3.326	1.939	3.879	2.217	4.433	2.494	4.988	2.771	5.543
20	467	1.167	729	1.459	2.188	2.917	1.750	3.501	2.041	4.083	2.333	4.667	2.625	5.250	2.917	5.834
22	513	1.283	802	1.604	2.407	3.209	1.926	3.851	2.246	4.491	2.567	5.133	2.888	5.776	3.209	6.418
24	560	1.400	875	1.750	2.625	3.501	2.101	4.201	2.450	4.899	2.800	5.600	3.150	6.301	3.501	7.001
25	583	1.458	912	1.823	2.735	3.646	2.188	4.376	2.552	5.104	2.917	5.833	3.282	6.563	3.646	7.293
25.4	593	1.482	926	1.852	2.779	3.705	2.223	4.446	2.593	5.185	2.963	5.927	3.334	6.668	3.705	7.410
26	607	1.517	948	1.896	2.844	3.792	2.276	4.551	2.654	5.308	3.033	6.067	3.413	6.826	3.792	7.585
28	653	1.633	1.021	2.042	3.063	4.084	2.451	4.901	2.858	5.716	3.267	6.533	3.675	7.351	4.084	8.168
30	700	1.750	1.094	2.188	3.282	4.376	2.626	4.251	3.062	6.124	3.500	7.000	3.938	7.876	4.376	8.751
32	747	1.867	1.167	2.334	3.501	4.667	2.801	5.602	3.266	6.533	3.733	7.467	4.200	8.401	4.667	9.335
36	840	2.100	1.313	2.625	3.938	5.251	3.151	6.302	3.675	7.349	4.200	8.400	4.725	9.451	5.251	10.502
38	887	2.217	1.386	2.771	4.157	5.543	3.326	6.652	3.879	7.757	4.433	8.867	4.988	4.976	5.543	11.085
40	933	2.333	1.459	2.917	4.376	5.834	3.501	7.002	4.083	8.166	4.667	9.333	5.250	10.501	5.834	11.669
45	1.050	2.625	1.641	3.282	4.923	6.564	3.939	7.877	4.593	9.186	5.250	10.500	5.907	11.814	6.564	13.127
50	1.166	2.917	1.823	3.646	5.470	7.293	4.376	8.752	5.104	10.207	5.833	11.667	6.563	13.126	7.293	14.586
55	1.283	3.208	2.006	4.011	6.017	8.022	4.814	9.628	5.614	11.228	6.417	12.833	7.219	14.439	8.022	16.044
60	1.400	3.500	2.188	4.376	6.564	8.751	5.251	10.503	6.124	12.249	7.000	14.000	7.876	15.751	8.751	17.503
65	1.516	3.792	2.370	4.740	7.111	9.481	5.689	11.378	6.635	13.269	7.583	15.167	8.532	17.064	9.481	18.962
70	1.633	4.083	2.553	5.105	7.658	10.210	6.127	12.253	7.145	14.290	8.167	16.333	9.188	18.377	10.210	20.420
75	1.750	4.375	2.735	5.470	8.204	10.939	6.564	13.129	7.655	15.311	8.750	17.500	9.845	19.689	10.939	21.879
80	1.866	4.667	2.917	5.834	8.751	11.669	7.002	14.004	8.166	16.331	9.333	18.667	10.501	21.002	11.669	23.337
85	1.983	4.958	3.099	6.199	9.298	12.398	7.440	14.879	8.676	17.352	9.917	19.833	11.157	22.315	12.398	24.796
90	2.100	5.250	3.282	6.564	9.845	13.127	7.877	15.754	9.186	18.373	10.500	21.500	11.814	23.627	13.127	26.254
95	2.216	5.542	3.464	6.928	10.392	13.856	8.315	16.630	9.697	19.394	11.083	22.167	12.470	24.940	13.856	27.713
100	2.333	5.833	3.646	7.293	10.939	14.586	8.752	17.505	10.207	20.414	11.667	23.333	13.126	26.252	14.586	29.172

Conculated considering specific gravity of steel as 7.85 Kg/mm², and dimension in mm. Not Available Size

UCAPAN TERIMA KASIH

Dalam pengerjaan tugas akhir ini, banyak pihak yang turut membantu penulis baik secara langsung maupun tidak langsung. Tugas Akhir ini tidak akan dapat dikerjakan dengan baik dan lancar tanpa bantuan-bantuan yang telah diberikan kepada penulis. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar besarnya kepada:

1. Allah SWT atas segala rahmat, karunia, dan hidayah-Nya, penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
2. Kedua orang tua saya, Darisman dan Nurjanah, atas do'a yang tak henti mengalir secara tulus ikhlas dengan dibantu dukungan moral dan materiil yang sangat berarti bagi penulis.
3. Kedua saudara saya, Huwaiza Ismail Darisman dan Hafidza Alya Darisman, yang selalu memberikan dukungan dan semangat kepada penulis.
4. Dosen pembimbing pertama saya, Dr. Eng. Rudi Walujo Prastianto, S.T., M.T. Terima kasih karena telah membimbing dan mendorong penulis dalam pengerjaan tugas akhir dari awal hingga akhir.
5. Dosen pembimbing kedua saya, Prof. Ir. Daniel Mohammad Rosyid, Ph.D. Terima kasih atas segala saran dan pembelajaran selama proses penyusunan tugas akhir.
6. Kedua dosen penguji saya, Dr. Eng. Yeyes M., S.T., M.Sc dan Dr. Eng. Kriyo Sambodho, S.T., M.Eng. yang telah memberikan saran dan masukan serta bimbingan selama proses sidang tugas akhir di Laboratorium Konstruksi Bangunan Laut.
7. Mas Udin, Mbak Tasya, dan Mbak Madea yang telah memberi masukan positif, pembelajaran, dan dukungan selama tugas akhir.
8. Tim Anglung (Mas Aldin, Mas Adiy, Mbak Aul) yang telah memotivasi serta memberikan pengalaman berharga kepada penulis dari awal hingga akhir perkuliahan.
9. Shafrina Putri Selvia dan Adinda Anggraeni Rahmawati Sukarsa yang telah menemani penulis dalam suka dan duka perkuliahan selama 4 tahun terakhir.
10. Alif Defa Muhammad yang telah menemani serta memberikan dukungan positif yang berarti bagi penulis.
11. Uci, Bella, dan Audrey yang telah menemani penulis dalam melakukan pengerjaan tugas akhir bersama di Laboratorium Konstruksi Bangunan Laut dengan segala naik dan turunnya gejolak tugas akhir.
12. Akmal dan Sela yang telah membantu pengerjaan tugas akhir ini, serta Aslab Opres '21 lainnya yang telah menemani penulis dalam pengerjaan tugas akhir.
13. Teman-teman WASTRAYAKSA P-60 L-38 dalam setiap langkah perjuangan.

Peneliti sadar bahwa masih terdapat banyak kekurangan dalam penelitian ini. Meskipun begitu, peneliti berharap tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi orang lain khususnya terkait analisis *floating offshore wind turbine* dan proses pengerjaan optimasi dimensi.

BIODATA PENULIS



Hudzwah Azzahrawani Darisman dilahirkan di Jakarta pada 11 Oktober 2003. Penulis telah menempuh pendidikan formal di SMPN 1 Kota Bekasi, SMAN 1 Kota Bekasi, dan melanjutkan studi di Departemen Teknik Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember pada tahun 2020 untuk memperoleh gelar sarjana. Selama menjadi mahasiswa, penulis sempat aktif mengikuti beberapa organisasi, antara lain pengurus Koperasi Mahasiswa ITS, staff LKKI Bahrul Ilmi, kepala divisi keilmiah HIMATEKLA ITS, dan telah melakukan beberapa studi terkait bidang kelautan. Penulis menjadi peserta dalam Pekan Ilmiah Mahasiswa Nasional (PIMNAS) ke-34 dan ke-35 bersama para mahasiswa lainnya. Penulis menjalani

kehidupan perkuliahan dengan baik dan penuh semangat, dengan kegiatan magang di mitra PT Pelindo serta kerja praktik di konsultan bangunan apung di PT IMEC Internasional Services. Penulis menekuni bidang hidrodinamika dan memiliki kemampuan untuk mengoperasikan komputasi hidrodinamika secara numerik pada software SACS, Maxsurf, MOSES, OrcaFlex, ANSYS Aqwa, dan OpenFAST. Penulis cukup tertarik pada pengambilan keputusan yang bersifat kuantitatif, salah satunya adalah optimasi. Maka dari itu, penulis merancang Tugas Akhir ini untuk menerapkan kemampuan serta memperdalam keingintahuan dari penulis. Kritik dan saran yang membangun ditujukan pada Penulis dapat disampaikan melalui email hudzwahdarisman@gmail.com.

Ditetapkan di Surabaya

REKTOR INSTITUT TEKNOLOGI
SEPULUH NOPEMBER,

BAMBANG PRAMUJATI
NIP 196912031994031001