

TUGAS AKHIR - TF 234801

**EFEK VARIASI GEOMETRI *CATAMARAN* DAN *TRIMARAN*
PONTOON DENGAN VARIASI JUMLAH *MOORING LINE*
TERHADAP GERAK HIDRODINAMIK PADA *MARINE*
FLOATING PHOTOVOLTAIC (MARINE FPV)
DI PULAU ANAMBAS - KEPULAUAN RIAU**

RELITA SHINTA MARITHO HUTAGAOL

NRP. 5009201043

Dosen Pembimbing

Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.

NIP 19761223 200501 1 001

Program Studi S1 Teknik Fisika

Departemen Teknik Fisika

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2024



Tugas Akhir - TF 234801

EFEK VARIASI GEOMETRI *CATAMARAN* DAN *TRIMARAN PONTOON* DENGAN VARIASI JUMLAH *MOORING LINE* TERHADAP GERAK HIDRODINAMIK PADA *MARINE FLOATING PHOTOVOLTAIC (MARINE FPV)* DI PULAU ANAMBAS - KEPULAUAN RIAU

RELITA SHINTA MARITHO HUTAGAOL
NRP. 5009201043

Dosen Pembimbing

Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.

NIP 19761223 200501 1 001

Program Studi S1 Teknik Fisika
Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2024

Halaman ini sengaja dikosongkan



FINAL PROJECT - TF 234801

EFFECTS OF GEOMETRIC VARIATIONS OF CATAMARAN AND TRIMARAN PONTOON WITH VARIATIONS IN THE NUMBER OF MOORING LINES ON HYDRODYNAMIC MOTION IN MARINE FLOATING PHOTOVOLTAIC (MARINE FPV) ON ANAMBAS ISLAND - RIAU ISLAND

RELITA SHINTA MARITHO HUTAGAOL
NRP 5009201043

Advisor

Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.

NIP 19761223 200501 1 001

Study Program Bachelor of Engineering Physics
Department of Engineering Physics
Faculty of Industrial Technology and System Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2024

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini.

Nama Mahasiswa / NRP : Relita Shinta Maritho Hutagaol

Departemen / Prodi : Teknik Fisika / S1 Teknik Fisika

Dosen Pembimbing / NIP : Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.

dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul "**EFEK VARIASI GEOMETRI CATAMARAN DAN TRIMARAN PONTOON DENGAN VARIASI JUMLAH MOORING LINE TERHADAP GERAK HIDRODINAMIK PADA MARINE FLOATING PHOTOVOLTAIC (MARINE FPV) DI PULAU ANAMBAS - KEPULAUAN RIAU**" adalah hasil karya saya 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, 10 Juli 2024

Mahasiswa,



Relita Shinta Maritho Hutagaol

NRP. 5009201043

Halaman ini sengaja dikosongkan

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

Name of student / NRP : Relita Shinta Maritho Hutagaol / 5009201043

Department : *Engineering Physics*

Advisor / NIP : Dr. Ridho Hantoro / 19761223 200501 1 001

hereby declare that the Final Project with the title of "*Effect of Geometric Variations of Catamaran dan Trimaran Pontoon with Variations in The Number of Mooring Line on Hydrodynamic Motion in Marine Floating Photovoltaic (Marine FPV) on Anambas Island – Riau Island*" 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, July 10th 2024

Student



(Relita Shinta Maritho H.)

NRP. 5009201043

Halaman ini sengaja dikosongkan

**LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR**

**EFEK VARIASI GEOMETRI *CATAMARAN* DAN *TRIMARAN PONTOON*
DENGAN VARIASI JUMLAH *MOORING LINE* TERHADAP GERAK
HIDRODINAMIK *MARINE FLOATING PHOTOVOLTAIC*
(*MARINE FPV*) DI PULAU ANAMBAS
KEPULAUAN RIAU**

Oleh:

Relita Shinta Maritho Hutagaol

NRP. 5009201043

Surabaya,

Menyetujui,

Pembimbing



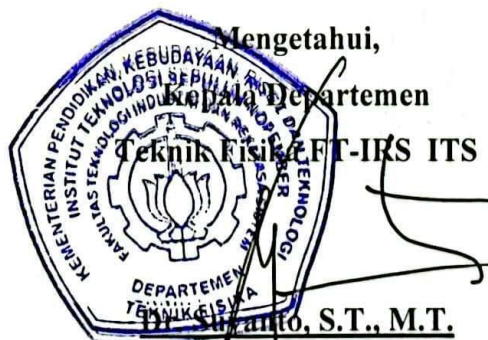
Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.

NIP. 19761223 200501 1 001

Mengetahui,

Koordinator Departemen

Teknik Fisika FT-IRS ITS



Dr. Surianto, S.T., M.T.

NIP. 197111131995121002

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN





**EFEK VARIASI GEOMETRI *CATAMARAN* DAN *TRIMARAN PONTOON*
DENGAN VARIASI JUMLAH *MOORING LINE* TERHADAP GERAK
HIDRODINAMIK *MARINE FLOATING PHOTOVOLTAIC*
(*MARINE FPV*) DI PULAU ANAMBAS
KEPULAUAN RIAU**

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat
memperoleh gelar Sarjana Teknik pada
Program Studi Sarjana Teknik Fisika
Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh: **Relita Shinta Maritho Hutagaol**
NRP. 5009201043

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

- | | | |
|--|--|-----------------|
| 1. Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T. |  | (Pembimbing) |
| 2. Gunawan Nugroho, S.T., M.T., Ph.D. |  | (Ketua Penguji) |
| 3. Erna Septyaningrum, S.T., M.T. |  | (Penguji 1) |
| 4. Prof. Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T. |  | (Penguji 2) |

SURABAYA

Juli, 2024

Halaman ini sengaja dikosongkan

APPROVAL SHEET

***EFFECTS OF GEOMETRIC VARIATIONS OF CATAMARAN AND TRIMARAN
PONTOON WITH VARIATIONS IN THE NUMBER OF MOORING LINES ON
HYDRODYNAMIC MOTION IN MARINE FLOATING PHOTOVOLTAIC
(MARINE FPV) ON ANAMBAS ISLAND – RIAU ISLAND***

FINAL PROJECT

Submitted to fulfill one of the requirements
for obtaining a degree Bachelor of Engineering at
Undergraduate Study Program of Engineering Physics
Department of Engineering Physics
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

RELITA SHINTA MARITHO HUTAGAOL

NRP. 5009201043

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:


1. Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.

 (Advisor)


2. Gunawan Nugroho, S.T., M.T., Ph.D.

 (Chief Examiner)

3. Erna Septyaningrum, S.T., M.T.

 (1st Examiner)

4. Prof. Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.

 (2nd Examiner)

SURABAYA

July 10th, 2024

Halaman ini sengaja dikosongkan

**EFEK VARIASI GEOMETRI CATAMARAN DAN TRIMARAN PONTOON
DENGAN VARIASI JUMLAH *MOORING LINE* TERHADAP GERAK
HIDRODINAMIK *MARINE FLOATING PHOTOVOLTAIC*
(*MARINE FPV*) DI PULAU ANAMBAS
KEPULAUAN RIAU**

Nama Mahasiswa / NRP : **Relita Shinta Maritho Hutagaol**
Departemen : **Teknik Fisika FTIRS – ITS**
Dosen Pembimbing : **Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.**

Abstrak

Studi ini menganalisis pengaruh variasi geometri *pontoon* dan jumlah *mooring line* terhadap respon hidrodinamik pada *Marine FPV* menggunakan metode Simulasi CFD Aqwa. Variasi-variasi yang digunakan adalah bentuk geometri *pontoon*, jumlah *mooring line*, gelombang *irregular*, dan kedalaman perairan. Penelitian menunjukkan bahwa penambahan *hull pontoon Catamaran Single* menjadi *Trimaran Single* dan penggabungan dua *array pontoon (Trimaran Array dan Catamaran Array)* menghasilkan respon hidrodinamik yang lebih rendah dibandingkan yang Model *Catamaran Single*. *Trimaran Array* menunjukkan penurunan respon hidrodinamik sebesar 97% (sumbu-RY), *Catamaran Array* sebesar 94% (sumbu-RX), *Trimaran Array* sebesar 26% (sumbu-X). Selain itu, penggunaan 6 *mooring line* juga dapat mengurangi dampak eksitasi gelombang dan respons hidrodinamik pada keenam DOF. Penambahan *mooring line* rata-rata menghasilkan penurunan RAO pada tiap model dengan penurunan terbesar 28% dan *tension mooring* sebesar 23%. Penelitian ini memberikan wawasan penting dalam desain dan pengembang sistem *Marine FPV* yang efisien dan dapat diandalkan, serta menjadi panduan praktis bagi industri energi terbarukan dalam meningkatkan kinerja dan keberlanjutan sistem *Marine FPV*.

Kata Kunci: *Catamaran Pontoon, Marine FPV, Mooring Line, Response Amplitude Operator (RAO), Trimaran Pontoon.*

Halaman ini sengaja dikosongkan

***EFFECTS OF GEOMETRIC VARIATIONS OF CATAMARAN AND
TRIMARAN PONTOON WITH VARIATIONS IN THE NUMBER OF
MOORING LINES ON HYDRODYNAMIC MOTION IN
MARINE FLOATING PHOTOVOLTAIC
(MARINE FPV) ON ANAMBAS ISLAND
RIAU ISLAND***

Student Name /NRP : **Relita Shinta Maritho Hutagaol /
5009201043**

Department : **Engineering Physics FTIRS – ITS**

Advisor : **Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.**

Abstract

This research analyzes the effect of variations in geometry and the geometry of the number of mooring lines on the hydrodynamic response of Marine FPV using the Aqwa CFD Simulation method. The variations used are the geometric shape of the pontoon, the number of mooring ropes, irregular waves, and water depth. Research shows that the addition of a Single Catamaran pontoon hull to a Single Trimaran and combining two pontoon arrangements (Trimaran Array and Catamaran Array) produces a lower hydrodynamic response compared to the Single Catamaran Model. The Trimaran Array shows a reduction in the hydrodynamic response of 97% (RY axis), the Catamaran Array of 94% (RX axis), and the Trimaran Array of 26% (X-axis). Apart from that, the use of 6 mooring lines can also reduce the impact of wave excitation and hydrodynamic response on the six DOFs. The addition of a mooring line on average resulted in a decrease in RAO for each model with the largest decrease being 28% and tension mooring at 23%. This research provides important insights into the design and development of efficient and reliable Marine FPV systems and provides practical guidance for the renewable energy industry in improving the performance and sustainability of Marine FPV systems.

Keywords: Catamaran Pontoon, Marine FPV, Mooring Line, Response Amplitude Operator (RAO), Trimaran Pontoon.

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis kepada Tuhan karena rahmat dan hikmat-Nya sehingga penulis diberikan kesehatan, kemudahan, dan kelancaran dalam menyusun laporan tugas akhir ini dengan judul “EFEK VARIASI GEOMETRI *CATAMARAN* DAN *TRIMARAN PONTOON* DENGAN VARIASI JUMLAH *MOORING LINE* TERHADAP GERAK HIDRODINAMIK *MARINE FLOATING PHOTOVOLTAIC (MARINE FPV)* DI PULAU ANAMBAS - KEPULAUAN RIAU”. Dalam proses penyelesaian Tugas Akhir ini, penulis banyak mendapatkan bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Keluarga penulis, Pipo (Jinepen Hutagaol), Mimo (Herlina Sirimbang), dan Abang-Kakak penulis (Ka Evel, Ka Risty, Ka Sarah, Ka Cathy, Ka Elsy, Ka Chepy, Bang Ray, Bang Nuar, dll.) atas *support* dan doa yang tiada henti untuk penulis.
2. Bapak Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing Tugas Akhir penulis. Berkat saran, bantuan, dan bimbingan beliau penulis dapat mengerjakan Tugas Akhir ini sampai selesai. Terima kasih untuk setiap ilmu dan kesempatannya, Pak.
3. Bapak Gunawan Nugroho, S.T., M.T., Ph.D selaku Kepala Laboratorium Rekayasa Energi dan Pengondisian Lingkungan serta Ibu Dr. Eng. Nur Laila Hamida, S.T., M.T. selaku dosen Laboratorium KSE atas segala saran dan ilmu yang telah diberikan.
4. Bapak Dr. Dhany Arifianto, S.T., M.Eng. dan Bapak Dr. Ir. Syamsul Arifin, S.T., M.T. selaku dosen wali penulis yang telah memberi saran dan membantu perkuliahan penulis.
5. Bapak Dr. Suyanto, S.T., M.T. selaku Kepala Departement dan seluruh Bapak-Ibu Dosen Teknik Fisika yang telah memberikan ilmu selama penulis berkuliah.
6. Teman-teman TAWan bidang minat Energi 23/24 dan aslab KSE (2021 & 2022)
7. Bu Erna, Mas Wildan, dan Mas-Mbak alumni Teknik Fisika bidang Energi (Mas Agra, Mas Huda, Mas Irhas, Mbak Qori dll.) atas saran dan bantuannya yang diberikan kepada penulis.
8. Teman-teman Teknik Fisika angkatan 2020 (*Targa Faele*).

Semoga laporan Tugas Akhir ini dapat berguna bagi pembacanya. Penulis sangat menghargai apabila ada kritsik dan saran yang membangun.

Surabaya, 10 Juli 2024

Relita Shinta Maritho Hutagaol

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

PERNYATAAN ORISINALITAS	v
LEMBAR PENGESAHAN	ix
LEMBAR PENGESAHAN	xi
APPROVAL SHEET	xiii
Abstrak	xv
Abstract.....	xvii
KATA PENGANTAR.....	xix
DAFTAR ISI	xxi
DAFTAR GAMBAR.....	xxiii
DAFTAR TABEL	xxvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	4
1.3 Tujuan	4
1.4 Batasan Masalah	4
1.5 Sistematika Laporan	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	7
2.1 <i>Floating Photovoltaic (FPV)</i>	7
2.2 Gerakan Benda Terapung	8
2.3 <i>Hydrodynamic Load Model</i>	10
2.4 Sistem <i>Mooring</i>	13
2.5 <i>Cylindrical Surface</i>	15
2.6 <i>Response Amplitude Operator (RAO)</i>	18
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	23
3.1 Diagram Alir Penelitian	23
3.2 Studi Literatur	23
3.3 Identifikasi dan Perumusan Masalah	24
3.4 Perairan Pulau Anambas	25
3.5 <i>Pre-Processing</i>	28
3.6 <i>Processing</i>	32
3.6.1 <i>Mooring Line dan Joint</i>	35
3.6.2 <i>Hydrodynamic Diffraction dan Hydrodynamic Response</i>	37

3.7	<i>Post-processing</i>	39
3.8	Perhitungan Analitik.....	39
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		43
4.1	Verifikasi	43
4.1.1	<i>Setup Software CFD</i>	43
4.1.2	<i>Grid Independent Test (GIT)</i>	44
4.2	Validasi.....	48
4.3	Pengaruh Variasi Geometri Terhadap <i>Response Amplitude Operator (RAO)</i>	49
4.3.1	Respon Gerak <i>Single Pontoon</i> Berdasarkan 6 Sudut Derajat Kebebasan.....	50
4.3.2	Respon Gerak <i>Array Pontoon</i> Berdasarkan 6 Sudut Derajat Kebebasan	65
4.3.3	Perbandingan Nilai RAO pada <i>Single Pontoon</i> dan <i>Array Pontoon</i>	77
4.4	Pengaruh Variasi <i>Mooring Line</i> Terhadap <i>Response Amplitude Operator (RAO)</i> ...	87
4.5	Pengaruh Variasi Kedalaman Perairan dan Gelombang Terhadap RAO.....	95
4.6	Perbandingan Nilai RAO Terhadap <i>Standard PIANC</i>	102
4.7	Diskusi dan Rekomendasi	106
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....		111
5.1	Kesimpulan.....	111
5.2	Saran.....	112
DAFTAR PUSTAKA		113
LAMPIRAN.....		119
BIODATA PENULIS		139

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Sistem dan Komponen <i>Floating PV</i>	7
Gambar 2. 2 Komponen Pendukung FPV.....	7
Gambar 2. 3 Jenis-jenis Sistem FPV Berdasarkan Desain Utama Komponennya	8
Gambar 2. 4 Ilustrasi Gerak 6 DOF dari <i>Pontoon</i> atau Benda Terapung	9
Gambar 2. 5 Arah Gerak 6 DOF Benda Terapung	9
Gambar 2. 6 (a) <i>Catenary Mooring</i> (b) <i>Leg Mooring</i> (Ma et al., 2019b).....	13
Gambar 2. 7 Sistem <i>Catenary Mooring Line</i> (Li & Choung, 2021).....	14
Gambar 2. 8 Aliran Laminar dan Turbulen pada <i>Cylindrical Surface</i>	16
Gambar 2. 9 (a) <i>Velocity Profiles</i> (b) <i>Momentum-flux Profiles</i>	17
Gambar 2. 10 Viskos pada Daerah Permukaan Silinder	18
Gambar 2. 11 <i>Time Domain</i> dan <i>Frequency Domain</i> Gelombang	20
Gambar 2. 12 (a) <i>Regular Wave</i> (b) <i>Irregular Wave</i> (Chakrabarti, 2005).....	21
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian	23
Gambar 3. 2 Orientasi <i>Pontoon</i> di Pulau Anambas	26
Gambar 3. 3 Pengambilan Data <i>Wind Speed Maximum</i>	26
Gambar 3. 4 Pengambilan Data <i>Wind Speed Average</i>	27
Gambar 3. 5 Pengambilan Data <i>Wind Speed Minimum</i>	27
Gambar 3. 6 Ilustrasi Perairan <i>Nearshore</i> (Cornell, 2017).....	28
Gambar 3. 7 <i>Physical Material</i> pada Fusion 360	29
Gambar 3. 8 <i>Properties</i> Detail dari Geometri.....	29
Gambar 3. 9 <i>Working Space</i> pada CFD	30
Gambar 3. 10 <i>Tree Outline Setup</i> pada <i>Design Modeler</i>	30
Gambar 3. 11 <i>Outline Setup</i> pada <i>Mesh</i>	31
Gambar 3. 12 Detail <i>Mesh Setup</i>	32
Gambar 3. 13 Detail <i>Setup Hydrodynamic Diffraction</i> dan <i>Response</i>	34
Gambar 3. 14 Variasi Jumlah 6 <i>Mooring Line</i> pada <i>Trimaran Pontoon</i>	35
Gambar 3. 15 Variasi Jumlah 4 <i>Mooring Line</i> pada <i>Catamaran Pontoon</i>	35
Gambar 3. 16 <i>Tree Outline</i> pada Pengaturan <i>Mooring Line</i>	36
Gambar 3. 17 Detail Pilihan Jenis <i>Joint</i>	37
Gambar 3. 18 <i>Output Hydrodynamic Diffraction</i>	37
Gambar 3. 19 Menu <i>Hydrodynamic Response</i>	38

Gambar 3. 20	<i>Setup Hydrodynamic Response</i>	38
Gambar 3. 21	<i>Input Irregular Wave</i>	38
Gambar 3. 22	<i>Output RAO pada 6 DOF</i>	39
Gambar 4. 1	<i>Tree Outline Pengaturan Design Modeler</i>	43
Gambar 4. 2	<i>Model Trimaran Pontoon pada Design Modeler</i>	44
Gambar 4. 3	<i>Model Catamaran Pontoon pada Design Modeler</i>	44
Gambar 4. 4	<i>Meshing pada Trimaran Pontoon</i>	45
Gambar 4. 5	<i>Grafik Hasil GIT pada Trimaran Pontoon</i>	46
Gambar 4. 6	<i>Meshing pada Catamaran Pontoon</i>	46
Gambar 4. 7	<i>Grafik Hasil GIT pada Catamaran Pontoon</i>	47
Gambar 4. 8	<i>Simulasi 4 Mooring Line pada Trimaran Pontoon (Single)</i>	51
Gambar 4. 9	<i>Simulasi 4 Mooring Line pada Catamaran Pontoon (Single)</i>	51
Gambar 4. 10	<i>Gerak Tranlasional pada Single Pontoon</i>	52
Gambar 4. 11	<i>RAO Surge (X) pada Single Pontoon</i>	53
Gambar 4. 12	<i>RAO Surge 4 Mooring Line pada Single Pontoon (f = 0.51 – 0.89 Hz)</i>	54
Gambar 4. 13	<i>RAO Sway (Y) pada Single Pontoon</i>	55
Gambar 4. 14	<i>RAO Sway 4 Mooring Line pada Single Pontoon (f = 0.43 – 1.01 Hz)</i>	56
Gambar 4. 15	<i>RAO Heave (Z) pada Single Pontoon</i>	57
Gambar 4. 16	<i>RAO Heave 4 Mooring Line pada Single Pontoon (f = 0.51 – 1.11 Hz)</i>	58
Gambar 4. 17	<i>Gerak Rotasional pada Single Pontoon</i>	58
Gambar 4. 18	<i>RAO Roll (RX) pada Single Pontoon</i>	59
Gambar 4. 19	<i>RAO Roll 4 Mooring Line pada Single Pontoon (f = 0.81 – 1.77 Hz)</i>	60
Gambar 4. 20	<i>RAO Pitch (RY) pada Single Pontoon</i>	61
Gambar 4. 21	<i>RAO Pitch 4 Mooring Line pada Single Pontoon (f = 0.81 – 1.77 Hz)</i>	62
Gambar 4. 22	<i>RAO Yaw (RZ) pada Single Pontoon</i>	63
Gambar 4. 23	<i>RAO Yaw 4 Mooring Line pada Single Pontoon (f = 1.15 Hz - 1.88 Hz)</i>	64
Gambar 4. 24	<i>Simulasi 4 Mooring Line pada Catamaran Array</i>	66
Gambar 4. 25	<i>Simulasi 4 Mooring Line pada Trimaran Array</i>	66
Gambar 4. 26	<i>Gerak Translasi pada Array Pontoon</i>	67
Gambar 4. 27	<i>RAO Surge (X) pada Array Pontoon</i>	68
Gambar 4. 28	<i>RAO Surge (X) 4 mooring line pada Array Pontoon (f = 0.51 – 1.11 Hz)</i>	68
Gambar 4. 29	<i>RAO Sway (Y) pada Array Pontoon</i>	69
Gambar 4. 30	<i>RAO Sway (Y) 4 Mooring Line pada Array Pontoon (f = 0.65 – 1.32 Hz)</i>	70

Gambar 4. 31 RAO <i>Heave</i> (Z) pada <i>Array Pontoon</i>	71
Gambar 4. 32 Gerak Rotasional pada <i>Array Pontoon</i>	72
Gambar 4. 33 RAO <i>Roll</i> (RX) pada <i>Array Pontoon</i>	72
Gambar 4. 34 RAO <i>Roll</i> (RX) 4 <i>Mooring Line</i> pada <i>Array Pontoon</i> ($f = 0.89 - 1.77$ Hz).....	73
Gambar 4. 35 RAO <i>Pitch</i> (RY) pada <i>Array Pontoon</i>	74
Gambar 4. 36 RAO <i>Pitch</i> (RY) 4 <i>Mooring Line</i> pada <i>Array Pontoon</i> ($f = 0.81 - 1.77$ Hz) ..	74
Gambar 4. 37 RAO <i>Yaw</i> (RZ) pada <i>Array Pontoon</i>	75
Gambar 4. 38 RAO <i>Yaw</i> (RZ) 4 <i>Mooring Line</i> pada <i>Array Pontoon</i> ($f = 0.89 - 1.77$ Hz)	76
Gambar 4. 39 Nilai RAO Translasi pada <i>Trimaran Single Pontoon</i>	78
Gambar 4. 40 Nilai RAO Translasi pada <i>Trimaran Array Pontoon</i>	78
Gambar 4. 41 Nilai RAO Rotasi pada <i>Trimaran Single Pontoon</i>	79
Gambar 4. 42 Nilai RAO Rotasi pada <i>Trimaran Array Pontoon</i>	79
Gambar 4. 43 Nilai RAO Translasi pada <i>Catamaran Single Pontoon</i>	80
Gambar 4. 44 Nilai RAO Translasi pada <i>Catamaran Array Pontoon</i>	81
Gambar 4. 45 Nilai RAO Rotasi pada <i>Catamaran Single Pontoon</i>	82
Gambar 4. 46 Nilai RAO Rotasi pada <i>Catamaran Array Pontoon</i>	82
Gambar 4. 47 Penambahan <i>Hull Pontoon</i> pada <i>Trimaran Single</i>	84
Gambar 4. 48 Sisi <i>Trimaran Array Pontoon</i> Tampak Bawah	84
Gambar 4. 49 Nilai RAO 6 DOF pada <i>Trimaran Array</i> (meter)	86
Gambar 4. 50 Nilai RAO 6 DOF pada <i>Trimaran Single</i> (meter).....	87
Gambar 4. 51 Model <i>Single Pontoon</i> dengan 6 <i>Mooring Line</i>	88
Gambar 4. 52 Model <i>Single Pontoon</i> dengan 4 <i>Mooring Line</i>	88
Gambar 4. 53 <i>Trimaran Single</i> – Perbandingan 4 dan 6 <i>Mooring Line</i>	89
Gambar 4. 54 <i>Catamaran Single</i> – Perbandingan 4 dan 6 <i>Mooring Line</i>	90
Gambar 4. 55 Model <i>Array Pontoon</i> dengan 6 <i>Mooring Line</i>	91
Gambar 4. 56 Model <i>Array Pontoon</i> dengan 4 <i>Mooring Line</i>	91
Gambar 4. 57 <i>Trimaran Array</i> – Perbandingan 4 dan 6 <i>Mooring Line</i>	92
Gambar 4. 58 <i>Catamaran Array</i> – Perbandingan 4 dan 6 <i>Mooring Line</i>	92
Gambar 4. 59 RAO <i>Surge</i> (X) pada <i>Trimaran Single</i>	96
Gambar 4. 60 RAO <i>Surge</i> (X) pada <i>Catamaran Single</i>	96
Gambar 4. 61 RAO <i>Surge</i> (X) pada <i>Trimaran Array</i>	97
Gambar 4. 62 RAO <i>Surge</i> (X) pada <i>Catamaran Array</i>	97
Gambar 4. 63 RAO <i>Surge</i> Variasi Kedalaman pada <i>Trimaran Array</i>	99

Gambar 4. 64 RAO <i>Surge</i> Variasi Kedalaman pada <i>Trimaran Single</i>	99
Gambar 4. 65 RAO <i>Surge</i> Variasi Kedalaman pada <i>Catamaran Array</i>	100
Gambar 4. 66 RAO <i>Surge</i> Variasi Kedalaman pada <i>Catamaran Single</i>	100

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Parameter Penelitian	25
Tabel 3. 2 <i>Power Law Wind Profile</i>	28
Tabel 3. 3 Tabel Variasi Matrix	33
Tabel 3. 4 Detail Parameter <i>Irregular Wave</i>	34
Tabel 3. 5 <i>Properties Mooring line</i> (Kanotra & Shankar, 2022).....	36
Tabel 3. 6 Data <i>Wind Speed</i>	40
Tabel 3. 7 Detail Ukuran <i>Pontoon</i>	41
Tabel 4. 1 GIT pada <i>Trimaran Pontoon</i>	45
Tabel 4. 2 GIT pada <i>Catamaran Pontoon</i>	47
Tabel 4. 3 Konfigurasi <i>Meshing Geometri Pontoon</i>	48
Tabel 4. 4 <i>Properties Trimaran Pontoon</i>	49
Tabel 4. 5 Presentase <i>Error Validasi</i>	49
Tabel 4. 6 <i>Properties</i> dari Variasi Geometri <i>Trimaran</i> dan <i>Catamaran Pontoon</i>	50
Tabel 4. 7 Ringkasan Perbandingan Nilai RAO <i>Single Pontoon</i>	65
Tabel 4. 8 Ringkasan Perbandingan Nilai RAO <i>Array Pontoon</i>	77
Tabel 4. 9 Persen Penurunan Nilai RAO <i>Single Pontoon</i> Terhadap <i>Array Pontoon</i>	83
Tabel 4. 10 Pengurangan <i>Mooring Line Tension</i>	93
Tabel 4. 11 Pengurangan Nilai RAO Setelah Penambahan Jumlah <i>Mooring Line</i>	94
Tabel 4. 12 Peningkatan RAO pada Variasi Gelombang <i>Irregular</i>	98
Tabel 4. 13 Peningkatan Nilai RAO pada Variasi Kedalaman.....	101
Tabel 4. 14 <i>Standard RAO</i> untuk <i>Floating Photovoltaic</i> (Tajali & Shafieefar, 2011)	102
Tabel 4. 15 RAO <i>Surge</i> Terhadap <i>Standard PIANC</i>	103
Tabel 4. 16 RAO <i>Sway</i> Terhadap <i>Standard PIANC</i>	103
Tabel 4. 17 RAO <i>Heave</i> Terhadap <i>Standard PIANC</i>	104
Tabel 4. 18 RAO <i>Roll</i> Terhadap <i>Standard PIANC</i>	104
Tabel 4. 19 RAO <i>Pitch</i> Terhadap <i>Standard PIANC</i>	105
Tabel 4. 20 RAO <i>Yaw</i> Terhadap <i>Standard PIANC</i>	105
Tabel A. 1 RAO <i>Single Pontoon</i>	119
Tabel A. 2 Nilai RAO <i>Surge Single Pontoon</i> (10 meter)	120
Tabel A. 3 Nilai RAO <i>Surge Single Pontoon</i> (20 meter)	120
Tabel A. 4 Nilai RAO <i>Sway Single Pontoon</i> (10 meter)	121

Tabel A. 5 Nilai RAO <i>Sway Single Pontoon</i> (20 meter).....	121
Tabel A. 6 Nilai RAO <i>Heave Single Pontoon</i> (10 meter).....	122
Tabel A. 7 Nilai RAO <i>Heave Single Pontoon</i> (20 meter).....	122
Tabel A. 8 Nilai RAO <i>Roll Single Pontoon</i> (10 meter).....	123
Tabel A. 9 Nilai RAO <i>Roll Single Pontoon</i> (20 meter).....	124
Tabel A. 10 Nilai RAO <i>Pitch Single Pontoon</i> (10 meter).....	124
Tabel A. 11 Nilai RAO <i>Pitch Single Pontoon</i> (20 meter).....	125
Tabel A. 12 Nilai RAO <i>Yaw Single Pontoon</i> (10 meter)	125
Tabel A. 13 Nilai RAO <i>Yaw Single Pontoon</i> (20 meter)	126
Tabel B. 1 RAO Perbandingan 4 dan 6 <i>Mooring Line Single Pontoon</i>	127
Tabel B. 2 RAO Perbandingan 4 dan 6 <i>Mooring Line Array Pontoon</i>	127
Tabel C. 1 Raw Data Translational <i>Array Pontoon</i> (10 meter)	129
Tabel C. 2 Raw Data Rotasional <i>Array Pontoon</i> (10 meter).....	130
Tabel C. 3 Raw Data Translational <i>Array Pontoon</i> (20 meter)	131
Tabel C. 4 Raw Data Rotasional <i>Array Pontoon</i> (20 meter).....	133
Tabel D. 1 Nilai 6 <i>Mooring Tension</i> (10 meter).....	134
Tabel D. 2 Nilai 4 <i>Mooring Tension</i> (10 meter).....	135
Tabel D. 3 Nilai 4 <i>Mooring Tension</i> (20 meter).....	135
Tabel D. 4 Nilai 6 <i>Mooring Tension</i> (20 meter).....	136
Tabel D. 5 Penurunan Nilai RAO Setelah Penambahan Jumlah <i>Mooring Line</i>	136
Tabel E. 1 Perbandingan Nilai RAO Terhadap Kedalaman 10 Meter (<i>Single</i>)	137
Tabel E. 2 Perbandingan Nilai RAO Terhadap Kedalaman 20 Meter (<i>Single</i>)	137
Tabel E. 3 Perbandingan Nilai RAO Kedalaman 10 Meter (<i>Array</i>)	137
Tabel E. 4 Perbandingan Nilai RAO Kedalaman 20 Meter (<i>Array</i>)	137
Tabel F. 1 Perhitungan <i>Irregular Wave</i>	138
Tabel F. 2 <i>Irregular Wave Calculation</i> (JONSWAP).....	138

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sumber energi listrik merupakan salah satu kebutuhan yang penting dalam kehidupan sehari-hari. Kebutuhan akan penggunaan energi pun semakin meningkat diiringi dengan bertumbuhnya daerah pemukiman, perkantoran, industri, dan lain sebagainya yang menjadikan sumber energi salah satu pendukung berjalannya aktivitas yang diinginkan. Menurut data dari Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) Republik Indonesia, menyatakan bahwa penggunaan listrik per kapita nasional pada tahun 2019 mengalami peningkatan sebesar 2.26% dari tahun sebelumnya dengan kenaikan mencapai 1.084 kWh per kapita. Kemudian, pada tahun 2020 mengalami peningkatan kembali sebesar 1.089 kWh per kapita (Elektro et al., n.d.). Di sisi lain, ketersediaan listrik di Indonesia masih terbelakang belum merata untuk memenuhi kebutuhan masyarakat. Pencapaian tingkat elektrifikasi di Indonesia baru mencapai 71.2% atau di bawah beberapa negara ASEAN, seperti Malaysia dan Singapura yang mencapai 85% dan 100%. Dengan kata lain, ada sekitar 28.8% beberapa daerah di Indonesia yang masih belum teraliri listrik (Adam et al., n.d.). Hal ini pun terjadi di daerah yang tergolong 3T di Indonesia, yaitu daerah yang tertinggal, terbelakang, dan terluar (Idrus et al., 2012).

Saat ini, sumber energi terbarukan menjadi perhatian penting semua negara, termasuk Indonesia. Berdasarkan geografis, Indonesia adalah negara kepulauan yang terletak di garis katulistiwa. Artinya, pemanfaatan sumber energi matahari memberikan potensi bagi Indonesia untuk mengurangi ketergantungan terhadap energi fosil sebagai sumber energi primer. Peran energi matahari merupakan sumber energi yang ramah lingkungan, sehingga dapat mengurangi adanya efek gas rumah kaca (Bayu & Windarta, 2021). Penggunaan energi terbarukan sebagai alternatif pun semakin banyak disuarakan terutama dengan adanya perhelatan G20 Presidential Indonesia pada tahun 2022, dengan salah satu isu utama yang dibahas ialah terkait transisi energi dari *fossil fuel* menuju energi terbarukan (Arif Arfanda Rudini, 2022). Komitmen dan usaha yang dilakukan pemerintah Indonesia sudah menunjukkan beberapa hasil dan karya dalam mewujudkan energi yang bersih dan terbarukan. Pada sektor energi terbarukan ini, pemerintah sudah membuat sebuah penangkaran *floating photovoltaic* (FPV) yang ada di Waduk Cirata sebagai bukti dari pengabdian pemerintah dalam mewujudkan energi terbarukan di Indonesia (Hidayat et al., 2022).

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) terapung dibangun dengan menempatkan modul-modul surya di atas *floaters* atau *pontoons* di perairan, seperti waduk, sungai, danau, atau bahkan laut. Di Asia sendiri PLTS terapung mulai mendapatkan perhatian yang serius karena banyaknya daerah perairan yang bisa menjadi tempat pembuatan PLTS terapung (IESR, 2022). Sistem FPV juga memanfaatkan permukaan air (*water body*) sebagai lokasi instalasi modul panel surya. Tujuannya adalah untuk memaksimalkan penggunaan lahan dan meningkatkan efisiensi modul dengan adanya *natural cooling* yang berasal dari *water body* di bawahnya. Pemanfaatan *natural cooling* yang berasal dari *water body* dapat meningkatkan efisiensi dari sistem sebesar 11% (Kim et al., 2019).

Beberapa bagian FPV yang penting yaitu *floaters* atau *pontoons* dan *mooring line* pada sebuah FPV berperan untuk memastikan peralatan penghasil tenaga (*power generating equipment*) tetap berada dalam kondisi terapung serta dapat menyediakan akses untuk operasi dan pemeliharaan (As, 2021). Sebuah *floaters* atau *pontoons* FPV umumnya menggunakan *platform* yang berbentuk *rectangular* dan *square* dimana panel dan komponen pendukung lainnya akan diletakkan pada bagian atas *pontoons* (Rebelo et al., n.d.). *Pontoons* berbentuk *rectangular* umum digunakan karena bentuknya memiliki nilai gaya angkat paling besar diantara bentuk geometri lainnya seperti *square* (Kuswanto, 2013). Desain FPV semacam ini banyak digunakan pada beberapa penelitian, baik penelitian yang secara spesifik membahas mengenai *floating photovoltaic* maupun penelitian yang berkaitan dengan *floating platform* tertentu. Studi mengenai kestabilan *pontoons* pada FPV penting untuk dilakukan karena dapat berpengaruh terhadap produksi energi dan *lifetime* dari sistem (Rebelo et al., n.d.). Pada penelitian-penelitian sebelumnya juga dipaparkan mengenai beberapa konfigurasi dan bentuk *pontoons* antara lain tipe *cylindrical* (Friel, et al., 2020), *multi-body-pier* (Fenerci et al., 2022), dan *single vertical cylindrical* (Song, Kim, et al., 2023). Pengembangan yang dilakukan pada sistem FPV umumnya berupa analisis perilaku aerodinamis dari sistem terutama pada FPV yang di-*install* pada sebuah *water body* tertentu (Blengini, 2020). Saat ini telah dikembangkan *Marine* FPV yang dapat di-*install* pada *marine environment*, dengan kemampuan material yang tahan terhadap korosi dan lingkungan ekstrim di perairan laut (Dallán Friel, 2020). Akan tetapi, teknologi ini masih belum banyak diterapkan di Indonesia. Studi-studi yang dilakukan terkait FPV belum dapat membahas banyak terkait respon hidrodinamik sistem dan pengaruh parameter-parameter fisis terhadap stabilan sistem. Pemilihan jenis *floaters* atau *pontoons* pun perlu diperhatikan sesuai dengan lingkungannya.

Di sisi lain, sistem *mooring* pada FPV merupakan hal pendukung utama sebagai alat bantu dalam mempertahankan posisi *pontoon* FPV. Jumlah *mooring line* pun dapat mempengaruhi kestabilan dari *pontoon* ketika menerima *environment challenge* berupa gelombang atau pun angin. Dalam *Marine* FPV, akan ada banyak parameter yang dapat mempengaruhi kestabilan *pontoon* dan mempengaruhi efisiensi penerimaan energi matahari yang ada di solar panel. Oleh karena itu, perlu pengkajian ulang terkait pengaruh dari jumlah *mooring lines* pada sebuah *Marine* FPV terhadap gerak hidrodinamikanya.

Di sisi lain, penelitian-penelitian yang sebelumnya belum ada percobaan yang memanfaatkan bentuk struktur kapal untuk dijadikan geometri *pontoon* pada FPV. Struktur *pontoon* pada kapal yang umum ialah *Monohull*, *Catamaran*, dan *Trimaran*. *Monohull* merupakan jenis *pontoon* yang memiliki satu lambung, *Catamaran* merupakan jenis *pontoon* yang memiliki dua lambung yang terhubung bersampingan, dan *Trimaran* merupakan *pontoon* yang memiliki tiga lambung yang terhubung bersampingan (Siagian et al., 2022) (Gibson, 2016). Berdasarkan penelitian terdahulu, bentuk *Trimaran Pontoon* memiliki satu *mainhull* dan dua *side-hull* atau disebut juga *outriggers*, sehingga mempunyai nilai stabilitas yang tinggi (Hasil et al., 2020). Kemudian, pada *Catamaran Pontoon* memiliki stabilitas yang baik kedua setelah *Trimaran Pontoon* karena memiliki dua buah *main hull* yang sama besar. Hal ini pun dibuktikan bahwa ternyata perbandingan *Catamaran* dan *Trimaran Pontoon* memiliki keunggulan masing-masing dalam menerima *environment challenge* di perairan laut. Dari penelitian terkait bentuk *Catamaran* dan *Trimaran Pontoon* ini berpotensi dijadikan sebagai benda pelampung dari struktur FPV yang dapat diteliti pengaruh gerak hidrodinamikanya.

Hal ini pun dapat diimplementasikan pada pulau-pulau di Indonesia yang dikelilingi oleh luasnya daerah perairan, seperti Pulau Anambas, Kepulauan Riau. Kepulauan Anambas sendiri merupakan salah satu kepulauan yang ada di Indonesia yang berada di kabupaten termuda di Kepulauan Riau berdasarkan undang-undang nomor 33 tahun 2008. Pulau ini terletak di sisi utara Provinsi Kepulauan Riau dengan memiliki wilayah 98,73% lautan dan 1,27% lainnya adalah daratan. Adapun total dari jumlah pulau yang ada di kabupaten ini yaitu 255 pulau, membentang dari Pulau Tokong Malang Biru hingga Tokong Berlayar. Pulau Anambas memiliki 26 pulau yang telah jadi pemukiman penduduk, sedangkan 229 pulau lainnya tidak berpenghuni (Prayuda et al., n.d.). Maka, perairan di Pulau Anambas memiliki potensi yang besar untuk diteliti dalam membuat sebuah *floating photovoltaic* sebagai wujud dari integrasi sebuah *photovoltaic* di perairan lepas. Kemudian, dari segi persediaan listrik pun dapat membantu

penduduk sekitar dengan penambahan sumber energi listrik terbarukan yaitu *floating photovoltaic*.

Oleh karena itu, adapun potensi pengembangan sebagai penambah dan pelengkap penelitian mengenai respon hidrodinamik dari *Marine Floating Photovoltaic (Marine FPV)*. Maka, dirasa perlu untuk membuat suatu inovasi penelitian simulasi terkait Analisis Pengaruh Geometri *Catamaran* dan *Trimaran Pontoon* dan Variasi Jenis dan Jumlah *Mooring Line* Terhadap Respon Hidrodinamik pada *Marine Floating Photovoltaic (Marine FPV)*.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah yang akan dibahas pada penelitian Tugas Akhir ini ialah sebagai berikut:

- a) Bagaimana pengaruh variasi geometri *Catamaran* dan *Trimaran Pontoon* terhadap respon gerak hidrodinamik pada *Marine Floating Photovoltaic (Marine FPV)*?
- b) Bagaimana pengaruh variasi jumlah *mooring line* terhadap respon gerak hidrodinamik pada *Marine Floating Photovoltaic (Marine FPV)*?

1.3 Tujuan

Berdasarkan rumusan permasalahan yang telah dirumuskan, diperoleh tujuan dari penelitian ini sebagai berikut:

- a) Mengetahui pengaruh variasi geometri *Catamaran* dan *Trimaran Pontoon* terhadap respon gerak hidrodinamik pada *Marine Floating Photovoltaic (Marine FPV)*
- b) Mengetahui pengaruh variasi jumlah *mooring line* terhadap respon gerak hidrodinamik pada *Marine Floating Photovoltaic (Marine FPV)*

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a) Bentuk *pontoon* yang digunakan adalah *Catamaran* dan *Trimaran Pontoon*
- b) Banyaknya *pontoon* yang akan di-*array* ialah 2 *units*
- c) Variasi yang digunakan ialah jumlah *mooring line* (4 dan 6)
- d) Respon hidrodinamik yang akan dihitung dalam simulasi ini adalah *Respon Amplitude Operator (RAO)* dimana frekuensi natural struktur tidak diperhitungkan
- e) Lokasi yang digunakan pada penelitian adalah Pulau Anambas dengan variasi *wind speed* 2 m/s, 3 m/s, dan 4 m/s

- f) Variasi kedalaman yang dianalisis ialah daerah *nearshore*, yaitu kedalaman 10 meter dan 20 meter
- g) Bahan dari *mooring line* yang digunakan pada penelitian ini ialah *polyester* dengan *stiffness* 596,244.3217 N/m²

1.5 Sistematika Laporan

Sistematika laporan yang tersusun dalam penulisan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

BAB I. PENDAHULUAN

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

BAB III. METODOLOGI PENELITIAN

BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

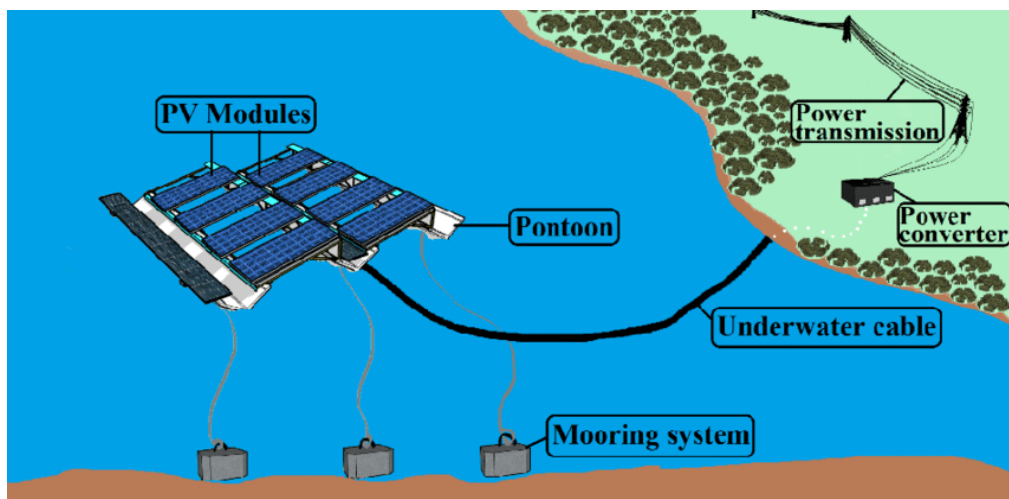
Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II

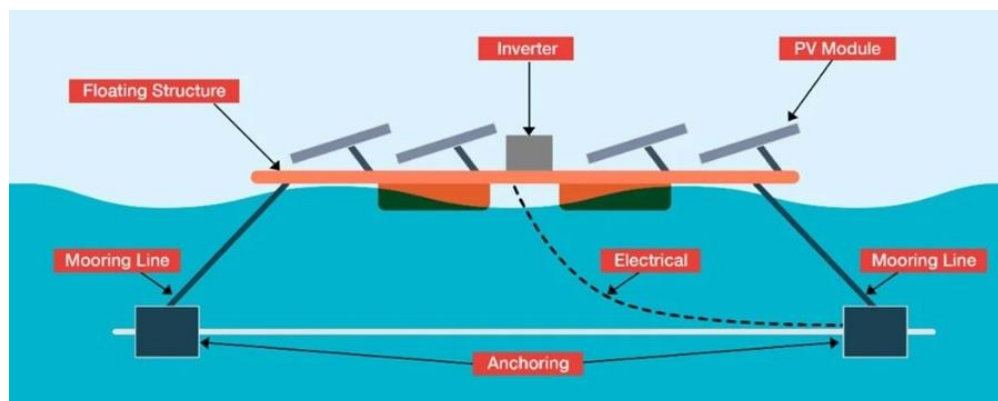
TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 *Floating Photovoltaic (FPV)*

Floating Photovoltaic (FPV) merupakan salah satu pengembangan dari penggunaan sumber energi terbarukan yang memanfaatkan daerah perairan sebagai tempat *Photovoltaic (PV)* diinstal di atas pelampung (*float* atau *pontoon*). Jenis PV ini biasanya diinstal pada daerah perairan yang tidak jauh dari daerah daratan yang menjadi tempat transmisi, seperti *reservoir*, waduk, kolam, danau, atau laut. Sistem FPV memiliki struktur apung yang tetap sebagai tempat solar panel dipasang dengan cara menambahkan jangkar dan tali tambat sebagai penahan struktur apung (Seth Block et al., 2019).

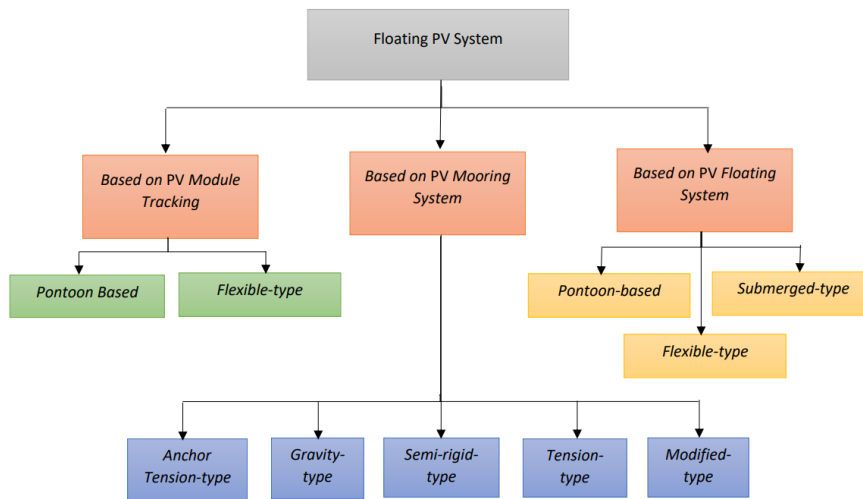


Gambar 2. 1 Sistem dan Komponen *Floating PV*



Gambar 2. 2 Komponen Pendukung FPV

Secara umum adapun pembagian jenis dari sistem FPV seperti berikut ini:



Gambar 2. 3 Jenis-jenis Sistem FPV Berdasarkan Desain Utama Komponennya

Komponen yang paling utama pada sebuah FPV ialah *floater* atau *pontoon*, *mooring* (tali tambat), PV panel, kabel, dan konektor (Gorjian et al., 2021).

- a. *Floater* atau *pontoon* merupakan struktur apung dari sebuah FPV yang menjadi tempat untuk instalasi solar panel.
- b. Sistem *mooring line* merupakan salah satu komponen yang mendukung struktur dari FPV. *Mooring* berfungsi untuk menjaga posisi dan pergerakan *pontoon* dari terjangan ombak atau angin. Desain dan jenis *mooring line* sangat memengaruhi kemampuan tambat untuk menahan beban. Oleh karena itu, perlu diperhatikan besar sudut dari *mooring line* yang ada di struktur FPV (Song, Kim, et al., 2023).

2.2 Gerakan Benda Terapung

Floater atau *pontoon* merupakan benda jenis terapung yang memiliki gerakan dipengaruhi oleh adanya gelombang air atau arus aliran air. Sebuah *floating structure* atau *pontoon* memiliki massa yang diketahui dan terdistribusi. Analisis gerakan benda terapung dapat ditinjau dari *coupled equation of motion* dalam 6 *Degree of Freedom* (DOF), yaitu *Surge*, *Heave*, *Sway*, *Pitch*, *Yaw*, dan *Roll*. Dari beberapa jenis gerakan tersebut dapat diklasifikasikan menjadi dua hal berbeda, yaitu gerak translasi dan gerak rotasi. Gerak translasi ialah *Surge*, *Heave*, dan *Sway*. Sementara itu, untuk gerak rotasi ialah *Pitch*, *Yaw*, dan *Roll*. Analisis gerak 6 DOF didasari oleh Hukum Newton Kedua yaitu sebagai berikut (Journée & Massie, 2001):

$$\sum_{j=1}^6 m_{ij} \cdot \ddot{x}A_j = F_i \quad (2.1)$$

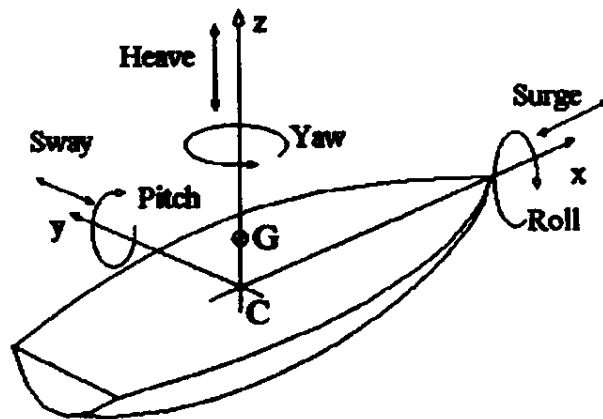
Keterangan:

m_{ij} = 6×6 matriks dari *solid mass* dan *inertia of the body* (kg)

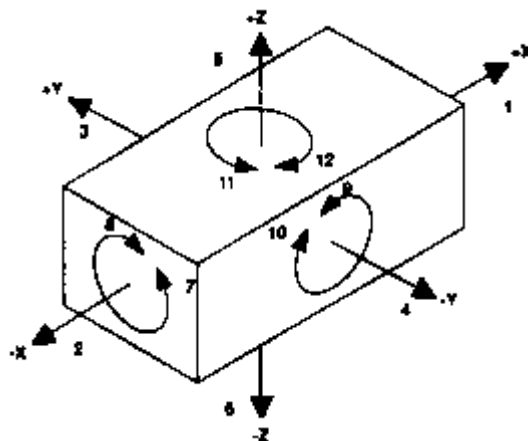
$\ddot{x}A_j$ = percepatan *floating body* pada arah j (m/s^2)

F_i = total gaya atau momentum yang bekerja pada arah i (N)

Pemodelan gerakan 6 DOF dapat diilustrasikan sebagai berikut:



Gambar 2. 4 Ilustrasi Gerak 6 DOF dari *Pontoon* atau Benda Terapung



Gambar 2. 5 Arah Gerak 6 DOF Benda Terapung

Persamaan gerakan pada sebuah *floating body* dapat dituliskan sebagai berikut:

$$(m_j + a_{jj})\ddot{x}_j(t) + b_{jj}\dot{x}_j(t) + c_{jj}x_j(t) = f_j(t) \quad (2.2)$$

Keterangan:

m_j = Amplitudo gerakan

a_{jj} = Added mass (kg)

b_{jj} = Damping coefficient

c_{jj} = Kekakuan (*stiffness*)

x = Perpindahan (m)

\dot{x} = Kecepatan (m/s)

\ddot{x} = Percepatan (m/s²)

$f_{j(t)}$ = Exciting force (N)

Sementara itu untuk menghitung perpindahan dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$x_{j(t)} = x_{j(o)} \cos(\omega t - \varepsilon_j) \quad (2.3)$$

Keterangan:

$x_{j(o)}$ = Amplitudo gerakan

Dalam menghitung kecepatan, dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\dot{x}_{j(t)} = -x_{j(o)} \omega \sin(\omega t - \varepsilon_j) \quad (2.4)$$

Adapun percepatan dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\ddot{x}_{j(t)} = -x_{j(o)} \omega^2 \sin(\omega t - \varepsilon_j) \quad (2.5)$$

Kemudian, pada *exciting force* dapat dituliskan sebagai berikut:

$$f_{j(t)} = f_{j(o)} \cos(\omega t) \quad (2.6)$$

2.3 Hydrodynamic Load Model

Mekanisme pergerakan sebuah FPV memiliki tiga jenis prinsip utama apabila ditempatkan di sebuah lautan atau perairan luas, yaitu *Inertia* (Inersia), *Gravity* (Gravitasi), dan *Viscous Efeect* (Efek Viskositas) (Dallán Friel, 2020).

$$F^H = \sum \Delta F_n^{FK} + \sum \Delta F_n^S + \sum \Delta F_n^R + \Delta F_n^D \quad (2.7)$$

Dimana arti dari tiap simbol:

F_n^H = Hidrodinamik Force (N)

F_n^{FK} = Froude -Krylov Force (N)

F_n^R = Radiation Force (*added mass*) (N)

F_n^S = Diffraction Force (simplified representation) (N)

F_n^D = Viscous Force (Marisons Formula) atau Drag Force (N)

Metode perhitungan ini memperhatikan *hydrodynamic force* setiap waktu menggunakan posisi *elemen instant (instaneous element position)*, kinematik struktur (*structural kinematic*) dan properti kinematik gelombang (*wave kinematic properties*) pada *centre of bouyancy* dari *sub-element*.

a) Froude-Krylov Force (N)

$$\Delta F_n^{FK} = f_n^{FK} = f_n^{Buay} + \rho A_s \dot{u}_n \Delta x \quad (2.8)$$

Keterangan:

f_n^{Buay} = Bouyancy force (N)

A_s = Inst. Immersed *cross-sectional area* of sub-element (m²)

\dot{u}_n = Vektor komponen partikel air yang berakselerasi normal

ρ = Densitas air (kg/m³)

Δx = Panjang sub-element (m)

b) Added Mass Force (N)

$$\Delta F_n^R = f_n^R \Delta x = (\rho A_s \ddot{v}_y C_{my} \Delta x - \rho A_s \ddot{v}_z C_{mz} \Delta x) \quad (2.9)$$

Keterangan:

C_{my} dan C_{mz} = local 2d *fully sub-merged added mass coefficient* \ddot{v}_y dan \ddot{v}_z = akselerasi komponen *local structure* (m/s²)

c) Diffraction Force

$$\Delta F_n^S = f_n^S \Delta x = (\rho A_s \dot{u}_y C_{my} \Delta x - \rho A_s \dot{u}_z C_{mz} \Delta x) \quad (2.10)$$

Keterangan:

\dot{u}_y dan \dot{u}_z = komponen akselerasi *local water particle*

d) Viscous Drag Force (Marrison's Formula)

$$\Delta F_n^D = f_n^D \Delta x = \frac{1}{2} \rho C_{Dy} h_{rel} \Delta x + \frac{1}{2} \rho C_{Dz} b_{rel} \Delta x \quad (2.11)$$

Keterangan:

A = *cross-section area*

b = characteristic-length sumbu-X

h = characteristic-length sumbu-Z

C_{Dy} dan C_{Dz} = Fully submerged drag coeff

Pada persamaan *Hydrodynamic Load Model*, persamaan utama yang digunakan adalah *Marrison Equation*. *Marrison Equation* untuk sebuah benda terapung bergerak pada sebuah fluida yang bergerak dijabarkan pada Persamaan 2.12 (Tchet, 2004).

$$\Delta F_n^D = \rho V \dot{u} + \rho C_a V (\dot{u} - \dot{v}) + \frac{1}{2} \rho C_d A (u - v) |u - v| \quad (2.12)$$

Keterangan:

ΔF_n^D = Gaya *Marrison* (N)

ρ = Densitas Air (kg/m³)

V = Volume Benda Tercelup (m³)

u = Kecepatan Aliran Air (m/s)

\dot{u} = Percepatan Aliran Air (m/s²)

C_a = Koefisien *Added mass*

v = Kecepatan Struktur (m/s)

\dot{v} = Percepatan Struktur Terapung (m/s²)

C_d = Koefisien *Drag*

A = *Cross-section Area* (m²)

Persamaan 2.13 dan Persamaan 2.14 merupakan persamaan matematis yang digunakan untuk menentukan besar kecepatan dan percepatan gerak gelombang pada *centerline* struktur untuk waktu t dan arah z pada perairan.

$$u(x = 0, z, t) = \frac{h\omega}{2} \frac{\cosh [k(z + H)]}{\sinh kH} \cos (\omega t) \quad (2.13)$$

$$\dot{u}(x = 0, z, t) = -\alpha\omega^2 \frac{h\omega}{2} \frac{\cosh [k(z + H)]}{\sinh kH} \sin (\omega t) \quad (2.14)$$

Keterangan:

u = Kecepatan Aliran Air (m/s)

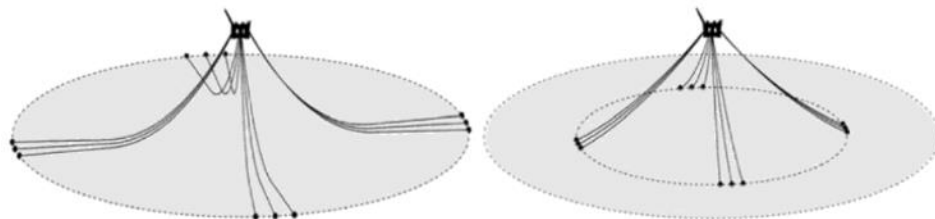
\dot{u} = Percepatan Aliran Air (m/s²)

h = Ketinggian Gelombang (m)

- ω = Frekuensi Angular (rad/s)
 k = Bilangan Gelombang
 H = Kedalaman Perairan (m)

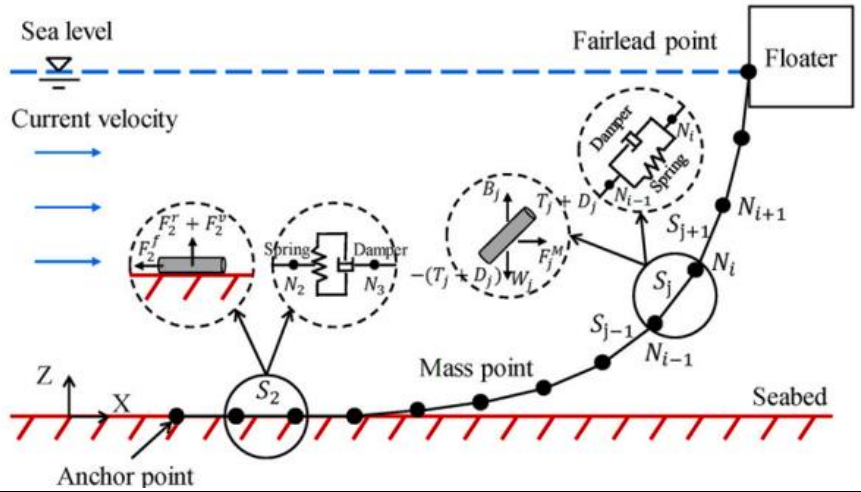
2.4 Sistem Mooring

Sistem *mooring* atau *mooring line* merupakan salah satu komponen yang penting pada benda terapung termasuk struktur *Floating Photovoltaic* (FPV). *Mooring line* sendiri digunakan untuk mengaitkan atau mengikat benda terapung ke dasar perairan dengan tujuan untuk mengikat agar benda terapung tetap pada posisi yang diinginkan. Terdapat dua jenis sistem *mooring line*, yaitu *Catenary* dan *Leg mooring*. *Catenary mooring* merupakan metode mengikat benda terapung dengan menggunakan tali yang terhubung ke tiang pengikat di dasar laut. Tali tersebut mengalir ke bawah dengan bentuk melengkung seperti garis *catenary*, sehingga mampu menyerap gaya tarik yang terjadi saat benda terapung terombang-ambing. Sistem ini biasanya digunakan pada benda terapung yang tidak membutuhkan stabilitas tinggi, seperti *platform* pengulingan minyak atau pembangkit listrik tenaga air (Ma et al., 2019b). Sistem *leg mooring* merupakan metode mengikat benda terapung dengan menggunakan tiang pengikat yang terhubung langsung ke benda terapung. Tiang pengikat tersebut biasanya terletak di sisi-sisi benda terapung, sehingga mampu menopang benda terapung dengan baik. Sistem ini biasanya digunakan pada benda terapung yang membutuhkan stabilitas tinggi, seperti *platform* pengeboran minyak dan gas atau pertambangan laut dasar. Pada sistem *floating photovoltaic* yang digunakan pada penelitian ini ialah jenis *Catenary Mooring* karena pada sistem FPV sendiri memerlukan jenis *mooring line* yang dapat mengikat struktur *floater* dengan stabil.



Gambar 2. 6 (a) *Catenary Mooring* (b) *Leg Mooring* (Ma et al., 2019b)

Pada sebuah *mooring* yang tertambat pada benda terapung akan menerima gaya, terutama pada tali *mooring* tersebut. Tali *mooring* akan menerima banyak gaya yang akan memengaruhi gerak benda terapung.



Gambar 2. 7 Sistem *Catenary Mooring Line* (Li & Choung, 2021)

Pada Gambar 2.7, terdapat ilustrasi dari tali *mooring* yang tertambat ke benda terapung, pada gambar tersebut diasumsikan tali *mooring* dibagi menjadi beberapa titik dan beberapa segmen. Oleh karena itu, dapat dilakukan pertimbangan gaya yang diterima oleh tali *mooring* seperti berikut:

$$W_i = (\rho_w - \rho)gAl \quad (2.15)$$

$$T_i = K_{j+1}(\varepsilon_{j+1}, \varepsilon_{j+1})\varepsilon_{j+1} - K_j(\varepsilon_j, \dot{\varepsilon}_j)\varepsilon_j \quad (2.16)$$

$$D_i = (2\zeta\sqrt{E\rho})lA(\dot{\varepsilon}_{j+1} - \varepsilon_j) \quad (2.17)$$

$$F_i^M = \rho V_o \ddot{r}_i + C_a \rho V_o (\dot{V} - \dot{r}_i) + \frac{1}{2} C_d \rho A |V - V - \dot{r}_i| \quad (2.18)$$

$$F_i^r = K_b(z_r - z_i) \left(\frac{d_{j+1} \cdot l_{j+1}}{2} + \frac{d_j \cdot l_j}{2} \right) \quad (2.19)$$

$$F_i^v = C_b \left(\frac{d_{j+1} l_{j+1}}{2} + \frac{d_j \cdot l_j}{2} \right) \dot{z}_i \quad (2.20)$$

$$F_i^f = C_f D_f v_{h,i} \quad (2.21)$$

$$F_i^{tot} = W_i + T_i + D_i + F_i^M + F_i^r + F_i^v + F_i^f \quad (2.22)$$

Berdasarkan persamaan di atas terdapat beberapa gaya yang memengaruhi tali *mooring* seperti gaya berat (W_i), tegangan tali *mooring* (T_i), damping tali *mooring* (D_i), gaya morison (F_i^M), gaya reaksi dari *seabed* (F_i^r), gaya damping dari *seabed* (F_i^v), dan gaya gesek yang dipengaruhi oleh *seabed* (F_i^f). Dalam mengekspresikan gaya yang diterima oleh mooring terdapat keterangan sebagai berikut:

$$\rho_w = \text{Massa jenis air (kg/m}^3\text{)}$$

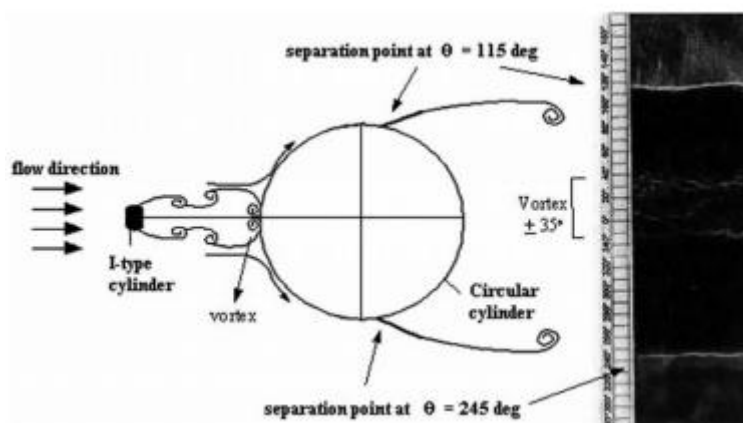
ρ	= Massa jenis tali <i>mooring</i> (kg/m ³)
g	= Gaya gravitasi (N)
A	= Luas penampang tali <i>mooring</i> (m ²)
l	= Panjang tali <i>mooring</i> (m)
K_j	= Kekakuan tali <i>mooring</i> (N/m)
ε_j	= Regangan tali <i>mooring</i> (%)
ζ	= Rasio <i>damping</i> ($c/2m\omega$)
E	= Modulus Young (N/m ²)
V_0	= Volume yang dipindahkan oleh tali <i>mooring</i> (m ³)
\dot{r}_i	= Nodal <i>velocity vector</i> (m/s)
C_a	= Koefisien penambahan massa (N/m ²)
C_d	= Koefisien <i>drag</i>
V	= Kecepatan aliran (m/s)
\dot{V}	= Percepatan aliran (m/s ²)
K_b	= Koefisien kekakuan <i>seabed</i> (N/m)
z	= Faktor evaluasi <i>seabed</i>
d	= Diameter tali <i>mooring</i> (m)
C_b	= Koefisien <i>damping</i> dari <i>seabed</i> (N/m/s)
C_f	= Koefisien gesekan dari <i>seabed</i>
D_f	= Koefisien <i>damping</i> dari <i>seabed</i> (N/m/s)
$v_{h,i}$	= Kecepatan nodal horizontal (m/s)

2.5 Cylindrical Surface

Penempatan sistem *Marine Floating Photovoltaic* (FPV) hal yang harus diperhatikan ialah karakteristik dari air laut itu sendiri. Gelombang adalah pergerakan naik dan turunnya air dengan arah tegak lurus permukaan air laut yang membentuk kurva atau grafik sinusoidal. Gelombang laut sendiri adalah salah satu karakteristik yang dimiliki oleh perairan laut dan besarnya gelombang ini sangat dipengaruhi oleh angin. Gelombang laut merupakan salah satu komponen laut yang memiliki pengaruh penting pada aktivitas kehidupan di laut, seperti transportasi laut, penangkapan ikan, dan lain sebagainya. Adanya gelombang laut disebabkan karena gesekan angin dengan permukaan laut yang kemudian dipengaruhi dengan adanya

angin, sehingga akan ada pergerakan gelombang ke perairan dangkal yang mengalami deformasi dan pecah di dekat pantai (Mulyabakti et al., 2016).

Pemilihan bentuk geometri *pontoon*, mampu memberikan pengaruh terhadap gerak hidrodinamik pada sebuah benda terapung. Maka dari itu, pemilihan bentuk *pontoon* harus disesuaikan dengan karakteristik daerah perairan yang menjadi tempat instalasi sistem *floating photovoltaic*. Berdasarkan penelitian terdahulu, bentuk *cylindrical* memiliki standar yang sesuai pada bentuk sebuah *pontoon* di perairan. Adapun beberapa alasan mengapa bentuk *cylindrical pontoon* dapat representatif untuk menjadi media benda apung yang diam di suatu perairan laut, yaitu *cylindrical* memiliki resistensi gelombang yang lebih rendah daripada bentuk lainnya, seperti bentuk *rectangular* (Cheng et al., 2021). Hal ini dikarenakan bentuk *cylindrical* memiliki permukaan lebih halus dan tidak memiliki sudut tajam. Bentuk *cylindrical* sendiri memiliki stabilitas yang lebih tinggi dari pada bentuk lain apabila di *marine environment*. Permukaan halus dari bentuk *cylindrical* artinya tidak memiliki sudut tajam yang dapat menyulitkan aliran perairan sulit untuk melewati permukaan. Dengan begitu, permukaan *cylindrical* ini memudahkan adanya proses terjadinya aliran ketika laminar sampai terjadi proses aliran turbulen ketika struktur dikenai gelombang. Jenis *pontoon* ini pun representatif apabila digunakan untuk perairan laut karena mengingat bahwa rata-rata tinggi gelombang di Pulau Anambas 2.5 – 4 meter apabila sedang mengalami musim ekstrem (PresMedia, 2023).



Gambar 2. 8 Aliran Laminar dan Turbulen pada *Cylindrical Surface*

Aliran pada sebuah benda mengalir di sekeliling area bentuk benda dengan viskositas fluida tertentu akan menimbulkan adanya sebuah tegangan yang berada pada titik stagnasi sebagai interaksi antara fluida yang mengalir dan permukaan benda yang diam, maka fluida

akan terdeformasi secara kontinu (Sudirman, 2015). Pada Gambar 2.8 menjelaskan bahwa adanya hubungan dari bentuk sebuah benda *cylindrical* dengan gerak aliran di sekelilingnya. Hal ini dapat diketahui karena adanya gradien kecepatan yang terbentuk dari kecepatan terkecil pada daerah dekat *wall* dan apabila semakin menjauhi *wall* akan membuat kecepatan bertambah hingga menjadi kecepatan *freestream* (Zulfa Faridatus, n.d.). Aliran yang terbentuk karena adanya lapisan tipis di area batas permukaan disebut *boundary layer*.

Boundary layer sendiri terdiri dari laminar dan turbulen. Pada keadaan aliran laminar, boundary layer terdiri dari aliran-aliran yang halus dan menghasilkan gaya hambat karena besar gaya geseknya lebih rendah dari besar aliran turbulen. Namun, alirannya lebih tidak stabil jika dibandingkan dengan aliran turbulen (Uruba, 2019). Besar nilai dari aliran laminar diikuti dengan bertambahnya nilai bilangan Reynold dan hal ini akan merubah aliran menjadi turbulen. Aliran laminar akan terbentuk saat bilangan Reynold < 2000 sedangkan antara $R > 2000$ dan $R < 4000$ akan mengalami *critical flow* dan turbulen akan terbentuk saat $R > 4000$ (Guo, 2005). Aliran turbulen pada *bondary layer* akan terbentuk apabila aliran laminar telah melewati *critical flow*.

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot d}{\mu} \quad (2.23)$$

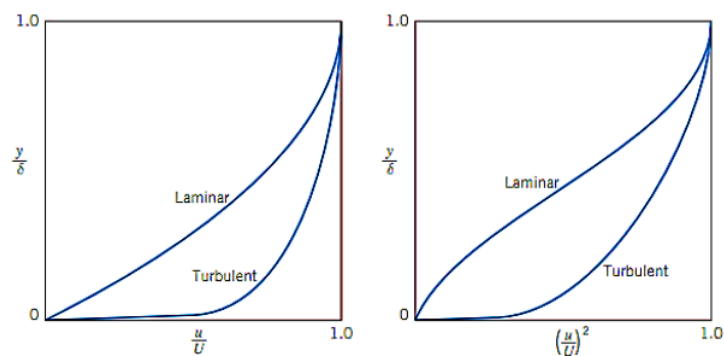
Keterangan:

Re = Bilangan Reynold Number (tanpa dimensi)

ρ = Massa jenis fluida (kg/m^3)

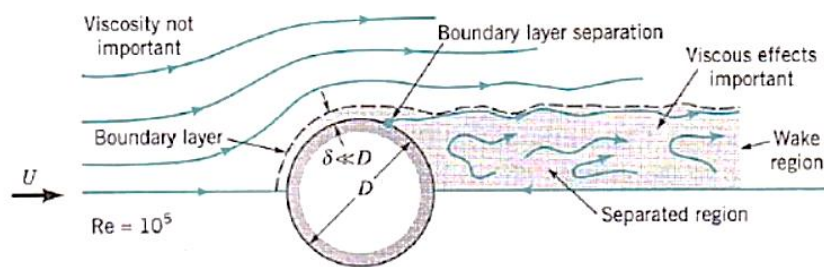
V = Kecepatan fluida (m/s)

D = Diameter karakteristik



Gambar 2. 9 (a) *Velocity Profiles* (b) *Momentum-flux Profiles*

Pada Gambar 2.9a merupakan ilustrasi dimana kecepatan aliran turbulen lebih penuh apabila dibandingkan dengan aliran laminar. Pada diagram momentum-*flux* (Gambar 2.9b), dapat dilihat bahwa aliran turbulen lebih besar dibandingkan pada aliran laminar. Karakteristik aliran di sekitar permukaan silinder pun akan menghasilkan karakteristik aliran yang sangat tergantung pada beberapa parameter, seperti bentuk benda atau permukaan, kondisi permukaan, atau orientasi benda. Adapun parameter dari aliran luar (*external flow*) adalah parameter yang tidak berdimensi (*dimensionless parameters*), yaitu bilangan Reynolds. Bilangan Reynolds merupakan perbandingan efek inersia dan efek viskos seperti yang dirumuskan pada Persamaan 2.23 di paragraf sebelumnya (Sudirman, 2015).



Gambar 2. 10 Viskos pada Daerah Permukaan Silinder

Pada aliran yang melewati *bluff body* dapat mengakibatkan adanya efek viskos di daerah yang mendekati permukaan silinder semakin berkurang dengan diikuti peningkatan nilai bilangan Reynolds. Akan tetapi, hal tersebut berbanding terbalik dengan keadaan di *downstream* yang justru akan terbentuk olakan (*wake*) (Aries Widodo et al., n.d.).

2.6 Response Amplitude Operator (RAO)

RAO merupakan nilai yang digunakan untuk menentukan respon sebuah *floating body* saat beroperasi pada sebuah *water body* tertentu. Secara matematis, RAO merupakan fungsi transfer yang hanya dapat didefinisikan saat gerakan sebuah *floating body* diasumsikan bersifat linier. RAO pada perairan laut (*marine environment*) dengan frekuensi gelombang yang beragam biasanya dapat ditentukan dengan menggunakan pendekatan analitik, eksperimental maupun simulasi numerik untuk memprediksi respon pergerakan *floating body*, seperti gerak *Surge*, *Sway*, *Heave*, *Roll*, *Pitch*, dan *Yaw* (Ibinabo & Tamunodukobipi, 2019). Secara matematis persamaan umum gerakan dalam domain frekuensi dapat dituliskan sebagai berikut:

$$[M + \Delta F_n^R(\omega)]\ddot{x} + B(\omega)\dot{x} + Cx = F(\omega) \quad (2.24)$$

Keterangan:

x = Gerakan *rigid body*

ω = Frekuensi osilasi (Hz)

- M = Massa dan inersia struktur terapung (kg)
 ΔF_n^R = *Added mass* (kg)
 $B(\omega)$ = *Linear damping*
 C = *Restoring force coefficient*

Sementara itu, RAO secara matematis dapat didefinisikan sebagai rasio antara *response amplitude* terhadap *wave amplitude* untuk sistem linear yang diplot terhadap *wave frequency* atau *wave periods* (Malayjerdi & Tabeshpour, 2015):

$$RAO_x = \frac{X_i(\omega)}{\xi_a} \quad (2.25)$$

Keterangan:

- $X_i(\omega)$ = Respon sistem (m)
 ξ_a = Amplitudo Gelombang (m)

Persamaan 2.25 dijabarkan menjadi persamaan berikut:

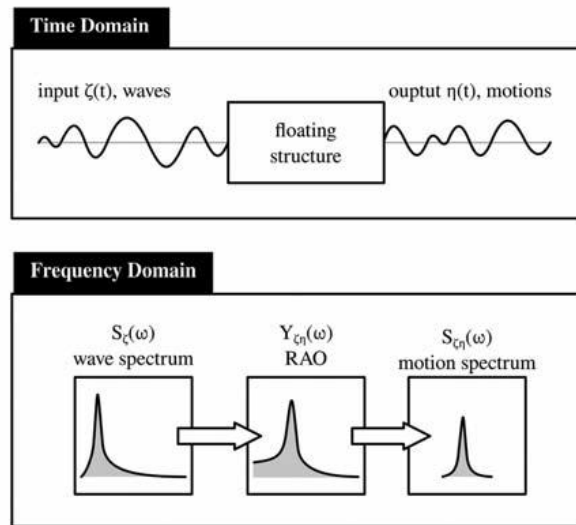
$$RAO(\omega) = \frac{a}{\zeta_a} = \frac{F_0}{C - (M + A(\omega))\omega^2 + iB(\omega)} \quad (2.26)$$

Berdasarkan persamaan di atas, dapat diketahui bahwa RAO dituliskan dalam domain frekuensi (*frequency dependent*) dan menggunakan fungsi kompleks (*i*). Dalam pemodelan RAO, umum digunakan model RAO dengan menambahkan variabel sudut arah datang gelombang (θ). Persamaan di bawah ini menunjukkan persamaan RAO pada frekuensi (ω) dan arah (θ) (Baghfalaki et al., 2012).

$$RAO(\omega, \theta) = \frac{[X_k(\omega)]}{D_j} \quad (2.27)$$

Keterangan:

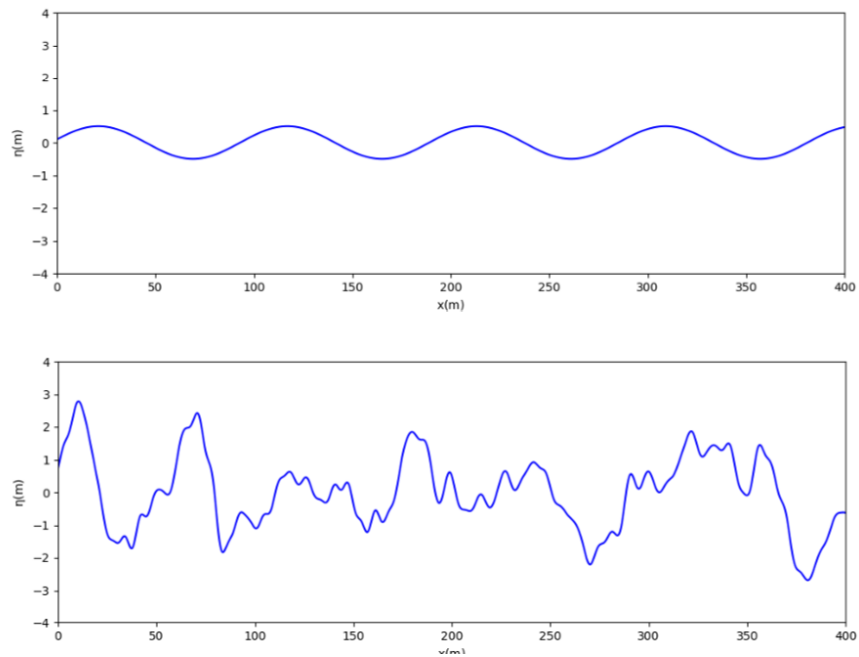
- $RAO(\omega, \theta)$ = *Response Amplitude Operator* pada frekuensi ω dan arah θ
 $X_k(\omega)$ = Perpindahan (m)
 D_j = Amplitudo Gelombang (m)
 F_0 = Gaya eksitasi gelombang yang bekerja pada struktur (N)



Gambar 2. 11 *Time Domain* dan *Frequency Domain* Gelombang

Berdasarkan Gambar 2.11 adapun perbedaan dari *time domain* gelombang dengan *frequency domain* gelombang. Pada penelitian ini digunakan *frequency domain* dalam mensimulasikan CFD *Aqwa* karena jenis gelombang ini yang biasa dihasilkan pada *Response Amplitude Operator* pada sebuah struktur terapung, seperti kapal atau *pontoon*. *Time domain* merupakan analisis respon struktur yang bersifat sementara atau menunjukkan perilaku dinamis gelombang secara langsung, seperti analisis studi propagasi gelombang akustik, respon struktur terhadap gempa bumi, atau pemrosesan sinyal dalam elektronik. Sedangkan, untuk *frequency domain* gelombang yang menunjukkan adanya kontribusi energi pada berbagai frekuensi komponen yang membentuk gelombang. Dimana *domain* ini digunakan untuk menganalisis perilaku jangka panjang dalam spektrum frekuensi (Yanghua Wang, 2022).

Dalam menganalisis gerak hidrodinamika, salah satu yang perlu diperhatikan ialah dalam pemilihan jenis gelombang yang akan dianalisis. Pada analisis struktur benda terapung, khususnya pada *Marine Floating Photovoltaic*, kondisi lingkungan yang digunakan ialah *marine environment*. Dimana kondisi perairan yang terjadi akan memiliki gelombang perairan yang akan menjadi salah satu faktor dari nilai respon gerak sebuah benda terapung, khususnya pada *pontoon*. Secara umum, jenis gelombang dibagi menjadi dua, yaitu *regular wave* dan *irregular wave*. *Regular wave* merupakan jenis gelombang yang memiliki nilai frekuensi yang tunggal dengan bentuk gelombang yang beraturan. Sedangkan, untuk *irregular wave* sendiri merupakan bentuk gelombang yang tidak beraturan atau terdiri dari banyak frekuensi yang terbentuk (Chakrabarti, 2005). Adapun gambar perbedaan dari kedua jenis gelombang ini yang dapat dilihat pada Gambar 2.12 di bawah ini.



Gambar 2. 12 (a) *Regular Wave* (b) *Irregular Wave* (Chakrabarti, 2005)

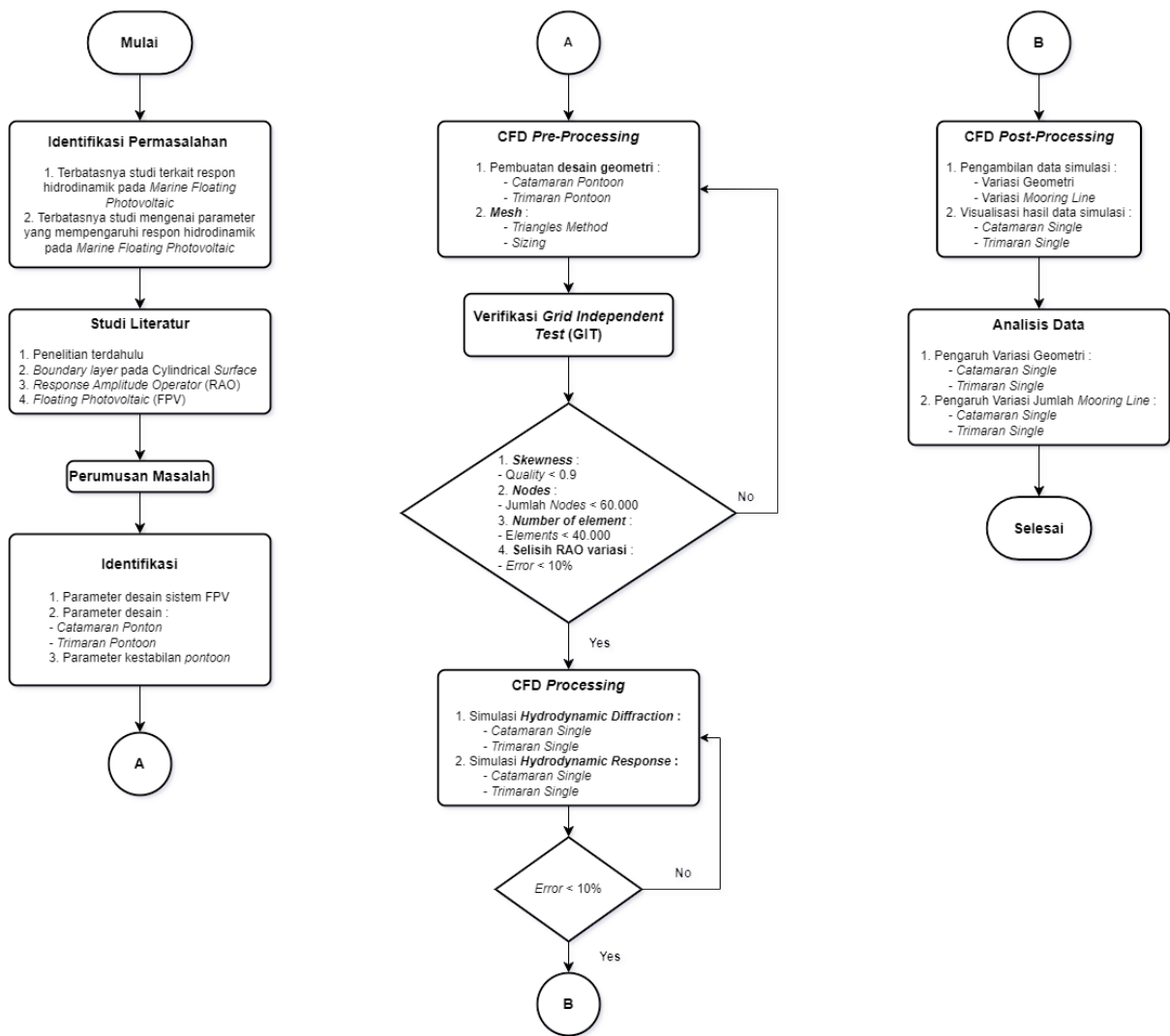
Jenis dari kedua gelombang ini merupakan pendefinisian terhadap keadaan lingkungan pada suatu benda yang dianalisis, seperti pada analisis benda terapung di lingkungan perairan laut. Berdasarkan Gambar 2.12 jenis gelombang *irregular* sendiri merupakan jenis gelombang lebih kompleks dan memiliki bentuk yang berbeda atau tidak berulang secara teratur. Hal ini pun terbentuk karena *irregular wave* memiliki tinggi, periode, dan arah yang berbeda-beda. Sedangkan, untuk *regular wave* sendiri terbentuk karena memiliki tinggi, periode, dan arah yang sama dan berulang secara konsisten (Young, 2017).

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Studi penelitian yang dilakukan terdapat tahapan kegiatan yang akan berjalan sesuai dengan diagram alir pada Gambar 3.1 berikut.



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Studi Literatur

Pada proses studi literatur yang dilakukan ini merupakan tahapan untuk menambah informasi dan pemahaman terkait pengetahuan yang akan dibutuhkan sebagai pendukung dalam pengerjaan penelitian. Studi literatur yang dilakukan pada penelitian Tugas Akhir ini

ialah mengenai *Floating Photovoltaic* (FPV) dan *Response Amplitude Operator* (RAO). Studi kemudian dibagi menjadi beberapa sub bahasan di antara studi literatur mengenai *Catamaran* dan *Trimaran Pontoon* untuk struktur FPV, *mooring line*, *wind speed*, simulasi *hydrodynamic diffraction*, dan simulasi *hydrodynamic response*. Di sisi lain, dilakukan juga studi literatur terkait penelitian terdahulu yang berkaitan dengan penelitian Tugas Akhir ini sebagai bahan referensi penelitian yang akan dilakukan.

3.3 Identifikasi dan Perumusan Masalah

Studi literatur yang dilakukan sebelumnya dijadikan landasan dalam merumuskan permasalahan spesifik yang nantinya akan dibahas dalam penelitian. Permasalahan yang diperoleh adalah kurangnya studi spesifik mengenai respon hidrodinamik pada *Marine Floating Photovoltaic* (*Marine FPV*). Hal ini disebabkan karena pengembangan teknologi FPV yang masih terbilang baru, sehingga artikel atau jurnal masih sedikit yang membahas terkait penelitian ini, khususnya pada bagian *floating structure* dari FPV.

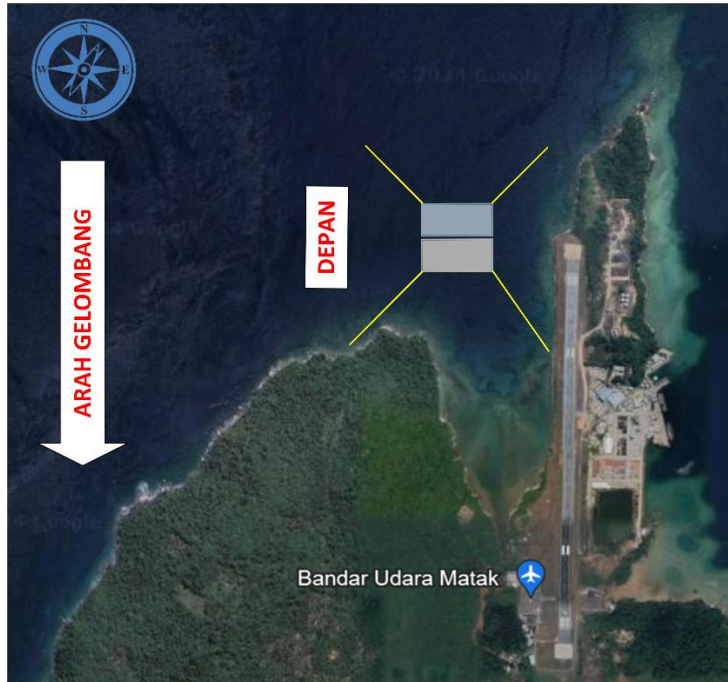
Respon hidrodinamik digunakan sebagai parameter penentuan kestabilan sistem, sehingga analisis mengenai respon hidrodinamik pada sebuah struktur *pontoon* dan parameter yang memengaruhinya sangat penting untuk dilakukan. Permasalahan ini diharapkan dapat diteliti lebih mendalam dengan menggunakan analisis pada struktur *Trimaran Pontoon* dan variasi jenis *mooring line*. Hal ini karena pergerakan struktur sistem pada *water body* akan mempengaruhi sudut kemiringan panel (*tilt angle*) dan sudut *incident* antara matahari dan panel surya, sehingga akan berdampak terhadap produksi energi dari sistem *Floating Photovoltaic* (Babatunde et al., 2018). Oleh karena itu, analisis mengenai respon hidrodinamik pada sebuah *marine floating photovoltaic* dan parameter yang memengaruhinya sangat penting untuk dilakukan. Permasalahan ini diharapkan dapat diteliti lebih mendalam dengan menggunakan analisis pada variasi geometri *Catamaran* dan *Trimaran Pontoon* dengan variasi jumlah *mooring line* serta pengaruh dari parameter-parameter tersebut terhadap kestabilan *marine floating photovoltaic* berkapasitas 2.79 kWP. Secara detail, berikut merupakan parameter *input* dan *output* pada penelitian Tugas Akhir ini beserta variasi penelitian yang dapat dilihat pada Tabel 3.1 di bawah ini.

Tabel 3. 1 Parameter Penelitian

Parameter Input		Parameter Output
Variabel Kontrol	Variabel Bebas	Hasil Simulasi dan Perhitungan
<ul style="list-style-type: none"> • Kapasitas panel surya = 310 Wp • <i>Massa</i> PV = 18,5 kg 	<ul style="list-style-type: none"> • Model geometri <i>pontoon</i> = <i>Catamaran</i> dan <i>Trimaran</i> • <i>Wind speed</i> = 2 m/s, 3 m/s, dan 4 m/s • Jumlah <i>mooring line</i> = 4 buah dan 6 buah • Kedalaman perairan: 10 meter dan 20 meter • <i>Peak periode</i> = 2.3 s, 3.0 s, dan 3.4 s 	<p><i>Response Amplitude Operator</i> (RAO):</p> <ul style="list-style-type: none"> • Gerakan translasional adalah <i>Surge</i> (sumbu-X), <i>Sway</i> (sumbu-Y), dan <i>Heave</i> (sumbu-Z) • Gerakan rotasional adalah <i>Roll</i> (sumbu-RX), <i>Pitch</i> (sumbu-RY), dan <i>Yaw</i> (sumbu-RZ)

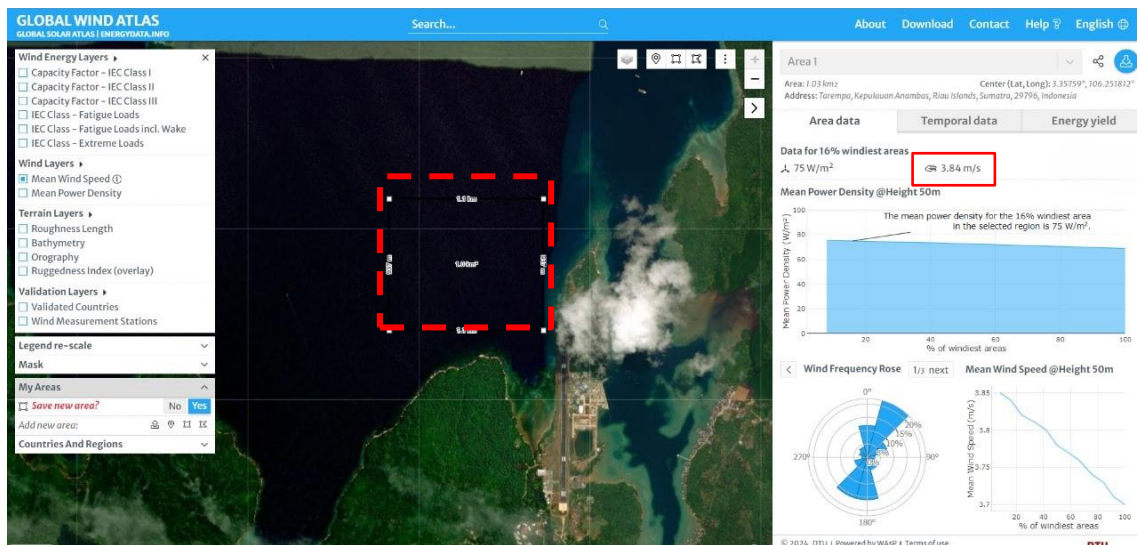
3.4 Perairan Pulau Anambas

Analisis yang dilakukan pada penelitian ini ialah menggunakan kondisi perairan laut di Pulau Anambas, Kepulauan Riau. Penempatan orientasi *pontoon* di perairan laut dapat dilihat pada Gambar 3.2 dimana arah gelombang yang terjadi sesuai dengan yang terjadi pada perairan Pulau Anambas. Kondisi perairan Pulau Anambas menjadi acuan dalam mengambil data *wind speed* menggunakan *Solar Wind Atlas* untuk dilakukan perhitungan *irregular wave* seperti pada sub-bab sebelumnya. Pengambilan data angin yang dilakukan ialah pada ketinggian 10 meter dimana data angin yang diambil ialah *minimum*, *average*, dan *maximum* pada daerah *nearshore* Pulau Anambas. Detail gambar orientasi arah *pontoon* dapat dilihat pada Gambar 3.2 di bawah ini.

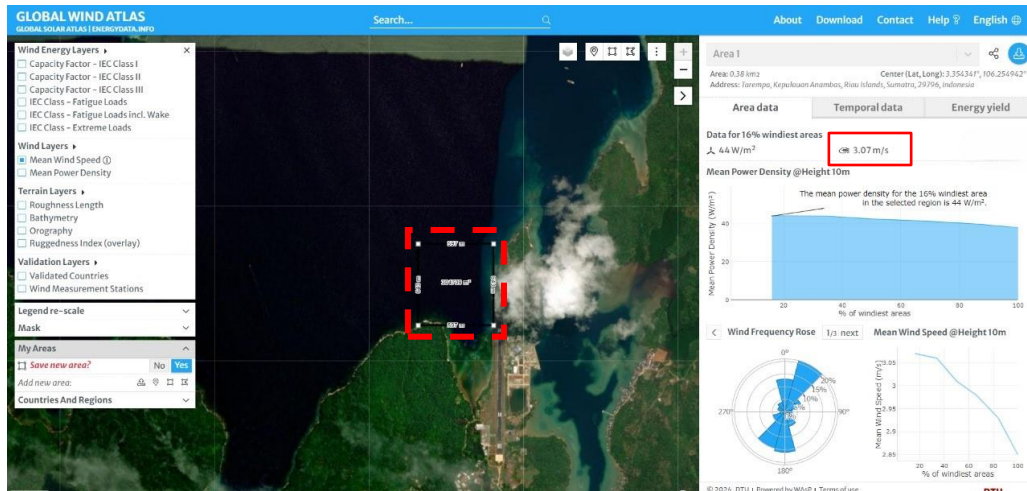


Gambar 3. 2 Orientasi *Pontoon* di Pulau Anambas

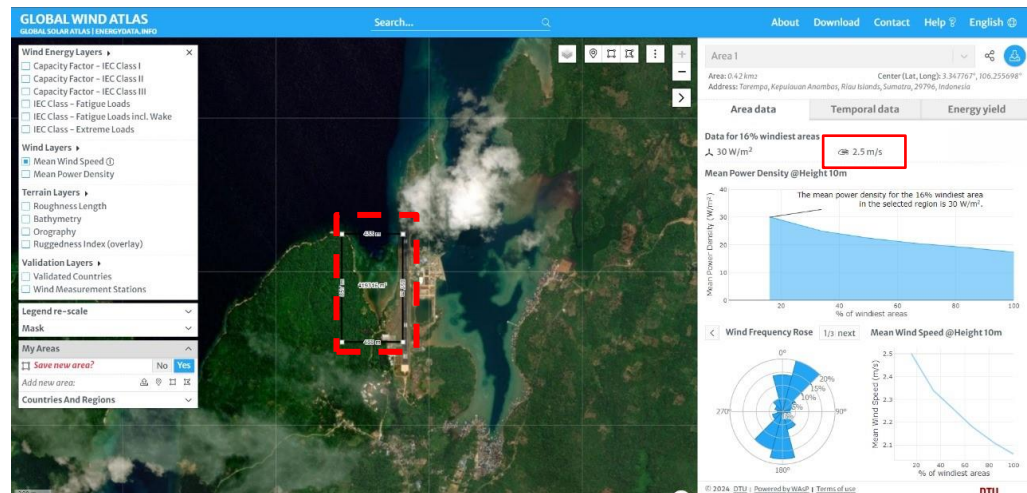
Kabupaten Kepulauan Anambas memiliki luas wilayah $\pm 46.664,15$ kilometer persegi dimana perairan laut dari pulau ini sebesar $\pm 46.056,43$ kilometer persegi (98,73%) dan daratan $\pm 607,72$ kilometer persegi (1,3%). Perairan laut selat Matak terhubung dengan Laut Cina Selatan dimana perairan selat umumnya memiliki karakteristik yang unik, dimana selalu ada kanal yang relatif dalam di bagian tengah selatan (Riyadi et al., 2013). Kondisi perairan Pulau Anambas menjadi acuan untuk dilakukannya pengambilan data angin untuk dijadikan data *input* simulasi CFD Aqwa. Dimana adapun pengambilan data yang dilakukan sesuai pada Gambar 3.3 sampai 3.5 di bawah ini.



Gambar 3. 3 Pengambilan Data *Wind Speed Maximum*



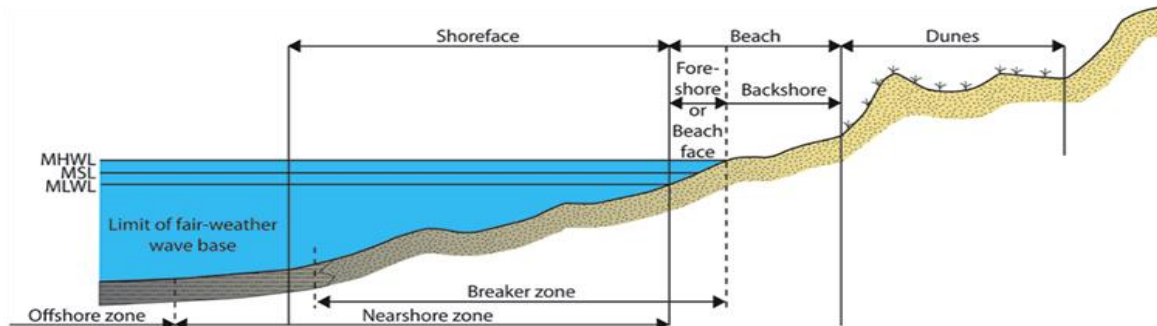
Gambar 3. 4 Pengambilan Data *Wind Speed Average*



Gambar 3. 5 Pengambilan Data *Wind Speed Minimum*

Pengambilan data *wind speed* menggunakan *Global Wind Atlas* dilakukan dengan cara menentukan luasan daerah perairan dari yang terdangkal hingga yang terdalam dalam skala *nearshore*. Dimana *nearshore* sendiri merupakan perairan yang diklasifikasikan sebagai wilayah yang terbentang dari antarmuka air darat (garis pantai) hingga lokasi perairan tepat di luar tempat pecahnya gelombang (Cornell, 2017). Data *wind speed* yang diambil kemudian dibulatkan angkanya untuk memberikan perbedaan yang signifikan dari nilai *wind speed minimum*, *average*, dan *maximum* yang dapat dilihat pada Tabel 3.3 detail dari variasi *matrix*. Pulau Anambas memiliki wilayah perairan yang cukup luas sehingga memiliki variasi kedalaman yang beragam. Dimana pada bagian tengah selatan kedalaman perairan mencapai 38 meter dan secara membujur utara-selatan memiliki kedalaman yang cukup signifikan. Pada bagian utara selat kedalaman yang terlihat mencapai 20 meter, sedangkan untuk bagian selatan mencapai 36 meter (Riyadi et al., 2013). Di sisi lain, penelitian ini menggunakan perairan

nearshore ke arah utara selat (sampai kedalaman 20 meter) untuk dijadikan batasan penelitian dalam simulasi CFD *Aqwa*. Dimana gambaran perairan *nearshore* dapat dilihat pada Gambar 3.6 di bawah ini.



Gambar 3. 6 Ilustrasi Perairan *Nearshore* (Cornell, 2017)

Pengambilan data dan analisis data yang dilakukan ini menggunakan data perairan Pulau Anambas yang diambil dari *Global Wind Atlas* atau dengan kata lain tidak diambil datanya secara langsung. Hal ini pun menunjukkan ada perhitungan *error* atau selisih pada data *wind speed* yang diambil. Pengambilan data *wind speed* diambil pada ketinggian 10 meter dimana hal ini menimbulkan adanya perbedaan dengan nilai *wind speed* pada ketinggian 1 meter. Maka dari itu, adapun selisih perbedaan yang telah dihitung apabila *wind speed* di ketinggian 1 meter. Berdasarkan Tabel 3.2 telah dihitung nilai *wind speed* pada ketinggian 1 meter (*Power Law Wind Profile*) dimana hasilnya menunjukkan ada perbedaan selesai sebesar 20,57%. Artinya, perbedaan selisih ini dapat menjadi acuan bahwa analisis yang telah dilakukan masih menunjukkan keadaan *environment challenge* dari variasi kecepatan angin di ketinggian 10 meter.

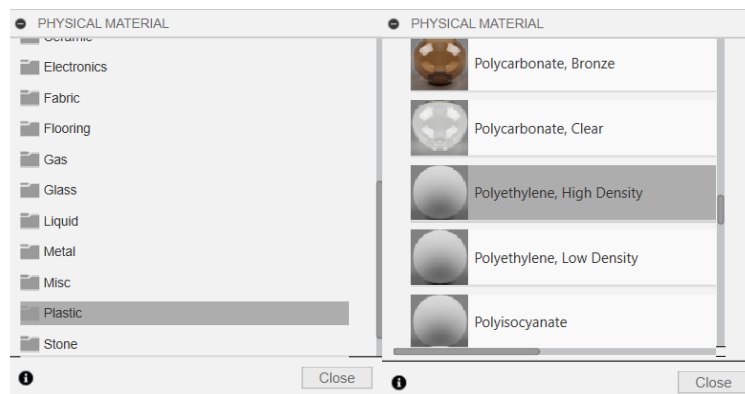
Tabel 3. 2 *Power Law Wind Profile*

No.	Wind Speed 20 m (m/s)	Power Law Exponent (α)	Power Law Wind Profile
1.	2.0	0.1	1.9
2.	3.0		2.4
3.	4.0		3.1

3.5 Pre-Processing

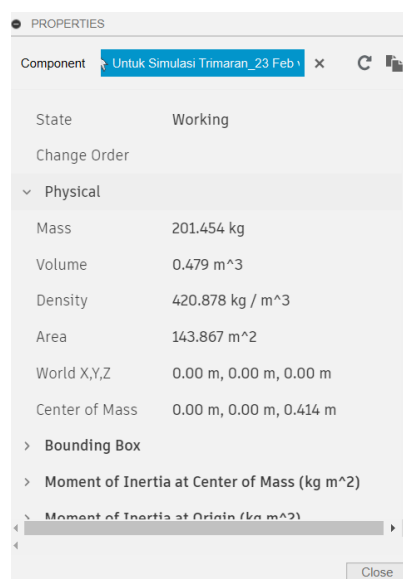
Tahap *pre-processing* merupakan tahapan yang dilakukan dengan membuat desain geometri dari sistem *floating photovoltaic* dengan variasi geometri *Catamaran Pontoon* dan *Trimaran Pontoon*. Desain dari masing-masing *pontoon* dibuat dengan menggunakan *software Fusion 360*. Adapun pemilihan material yang dilakukan pada *software* tersebut untuk bagian tiap variasi *pontoon* yang dapat dilihat pada Gambar 3.7 secara detail. Jenis material dilakukan

untuk dapat memastikan massa atau berat dari *pontoon* dapat dipastikan. Material yang dipilih pada *pontoon* ialah *Polyethylene High Density* (HDPE) yang mana material ini merupakan material yang paling umum digunakan untuk benda terapung seperti *floaters* pada *floating photovoltaic*. Material ini pun memiliki kelebihan yaitu ketahanannya dalam menerima UV dari cahaya matahari, tahan korosi, memiliki biaya pemeliharaan yang murah, dan bahan ini pun dapat diolah kembali karena bahan HDPE merupakan salah satu material yang ramah lingkungan. Selain itu, material HDPE memiliki kekuatan daya tarik yang baik dibandingkan material jenis lain (Essak & Ghosh, 2022).



Gambar 3. 7 *Physical Material* pada Fusion 360

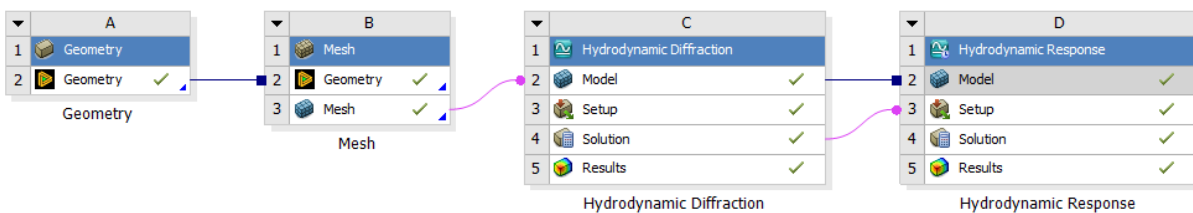
Pemilihan dari bahan material akan menentukan berat dari *pontoon* dimana berat ini pun yang nantinya akan di-*input* pada *setup* di *Hydrodynamic Diffraction*. Berat atau *massa* dari *pontoon* dapat dilihat pada bagian *Properties* di *Software* Fusion 360 yang ditunjukkan pada Gambar 3.8 di bawah ini.



Gambar 3. 8 *Properties* Detail dari Geometri

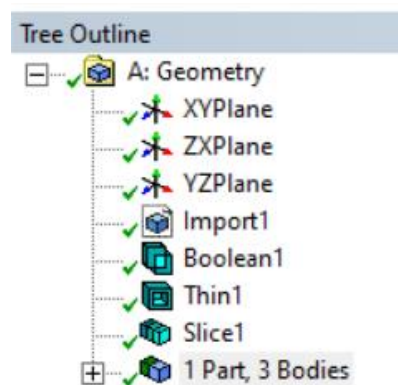
Setelah menentukan jenis material, selanjutnya perlu dilakukan pengondisian posisi geometri dengan meletakkan *Centre of Gravity* (CoG) geometri pada titik pusat sumbu koordinat (0,0,0) pada bidang X-Y dengan ketinggian pada sumbu-Z positif. Hal ini dimaksud untuk memudahkan *preprocessing* dan simulasi pada *Software CFD*. Penentuan batas air atau *draft structure* (kedalaman tercelup) dengan cara memindahkan posisi geometri sejauh kedalaman tercelup yang ditentukan, yaitu 0.167 m pada sumbu-Z negatif.

Properties dari tiap variasi geometri akan memperoleh nilai *input* pada simulasi CFD, yaitu *input* geometri (*point of mass*, *point of bouyancy*, *massa*, dan *volume*). *Input* ini berfungsi untuk mendeskripsikan kondisi fisik model geometri yang akan dijadikan basis utama simulasi. Model geometri akan di-*export* menjadi format *STEP Files* (.step) untuk di-*input* pada *software CFD*. Tahap *preprocessing Software CFD* akan dilakukan menggunakan dua fitur yakni *Design Modeler* dan *Mesh*. Adapun *working space* CFD yang secara detail pada Gambar 3.9 di bawah ini.



Gambar 3. 9 *Working Space* pada CFD

Tahap berikutnya ialah pada fitur *Design Modeler* yang ditunjukkan pada Gambar 3.10 dimana fitur CFD ini untuk memverifikasi kebenaran pengaturan simulasi yang dilakukan. proses pada fitur ini menggunakan beberapa model yang dibuat untuk nantinya dapat diproses pada simulasi CFD sebagai *initial condition*.

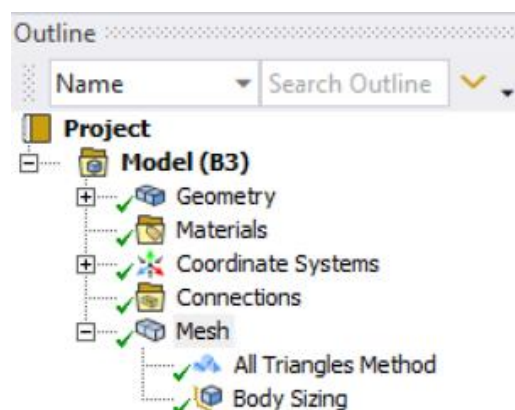


Gambar 3. 10 *Tree Outline Setup* pada *Design Modeler*

Model geometri yang di-*input* pada *setup Design Modeler* ialah *file* dengan format STEP (.step) yang kemudian akan diatur kembali menggunakan beberapa fitur untuk menyesuaikan

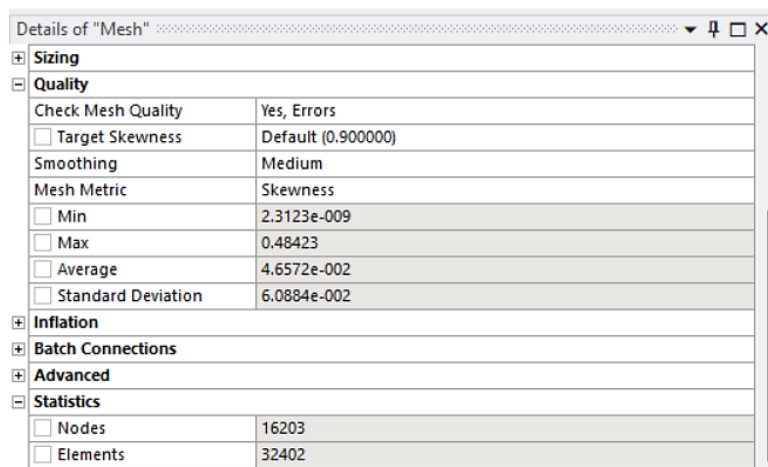
model geometri agar dapat diproses pada Simulasi *Hydrodynamics Diffraction* dan *Hydrodynamics Response*. Terdapat dua fitur utama yang perlu diperhatikan dalam setiap *setup Software CFD*, khususnya di *Design Modeler* (Gambar 3.10), yaitu *Thin Surface* (Thin1) dan *Slice* (Slice1). *Thin surface* digunakan untuk mengubah model geometri kompleks menjadi lebih sederhana yang dimodelkan sebagai bentuk geometri tipis, sehingga lebih memudahkan pada proses komputasi. Adapun mode *slice* digunakan untuk menentukan batas air dan membagi geometri menjadi dua bagian utama, yaitu *Lower Part* (bagian tercelup) dan *Upper part* (bagian tidak tercelup). Mode *Slice* dilakukan dengan bidang X-Y agar yang terbagi sesuai dengan bentuk geometrinya (Gabriel, 2012). Selain dua fitur tersebut, model geometri juga perlu diposisikan pada posisi bidang X-Y, dengan ketinggian pada sumbu-Z positif. Hal ini dilakukan karena pada *input Hydrodynamic Diffraction* dan *Hydrodynamic Response*, orientasi model geometri (sebagai *floating platform*) dan kondisi lingkungan (*environment condition*) mengikuti aturan yang sama (berada pada bidang X-Y, dengan ketinggian pada sumbu-Z positif).

Setelah melakukan *setup* model pada *Design Modeler*, selanjutnya perlu dilakukan *meshing* untuk setiap model karena basis komputasi pada *Software CFD* adalah menghitung interaksi antara permukaan benda terapung dengan permukaan air. Oleh karena itu, jenis *meshing* yang digunakan adalah *surface meshing*, yaitu *mesh* yang dimana *element* dan *nodes* pada *meshing* hanya akan dibuat pada permukaan model saja (Gabriel, 2012). Pada tahap *meshing*, dilakukan verifikasi dan optimisasi konfigurasi *meshing* agar dapat diperoleh hasil (*output*) yang maksimal dengan *load* komputasi minimal. Proses verifikasi *meshing* dilakukan menggunakan *Grid Independent Test* (GIT) dengan memvariasikan *element size meshing* dan membandingkan hasil *output* RAO (*Response Amplitude Operator*) pada masing-masing variasi. Berikut detail dari *outline setup* pada *mesh* di Gambar 3.11 di bawah ini.



Gambar 3. 11 *Outline Setup* pada *Mesh*

Selain itu, *setup* pada *mesh* (Gambar 3.11) juga menggunakan *mesh metric quality* dengan fitur *skewness*. Dimana kualitas ini menggambarkan seberapa optimal ukuran tiap *cell* yang ada di permukaan struktur dan maksimum *skewness* yang dianggap baik dan layak untuk dilakukan perhitungan simulasi CFD ialah di bawah 0,99 (Moriassi, 2007). Nilai maksimum dan minimum *skewness* dipengaruhi dari besarnya *element size*. Di sisi lain, *element size* pun mempengaruhi nilai dari *nodes* dan *elements statistics* jika semakin besar *element size*, maka semakin bertambah nilai dari *nodes* dan *element* tiap *cell* yang terbentuk (ANSYS Inc, 2015).



Gambar 3. 12 Detail *Mesh Setup*

Grid Independent Test (GIT) akan dilakukan dengan cara membandingkan tiap variasi nilai *element size* yang nantinya akan dibandingkan *output* dari *skewness*, *nodes*, *elements*, dan RAO (*Hydrodynamic Diffraction*). Gambar 3.12 merupakan contoh detail *output mesh* yang nantinya akan dibandingkan dari tiap variasi *element size* untuk menentukan berapa nilai *element size* yang memiliki nilai RAO paling stabil dengan standar *mesh metric* yang sesuai.

3.6 Processing

Tahap *processing* dilakukan dengan mensimulasikan model 3D *Marine FPV* dengan bantuan *Software CFD*. Simulasi CFD menggunakan fitur *Hydrodynamic Diffraction* dan *Hydrodynamic Response* untuk mencari nilai *Response Amplitude Operator* (RAO). *Hydrodynamic Diffraction* merupakan salah satu fitur dari CFD untuk menganalisis gerakan dan respon struktur terapung di perairan. Adapun Tabel 3.3 variasi *matrix* yang menyimpulkan variasi data yang akan dilakukan pada tahap *processing* sebagai berikut:

Tabel 3. 3 Tabel Variasi Matrix

Variasi Geometri		Kedalaman Air	Jumlah Mooring Line	Wind Speed (m/s)	Irregular Wave (m)	Peak Periode (s)
Catamaran Pontoon	Single	10	4	2	0.2	2.3
				3	0.3	3.0
				4	0.4	3.4
			6	2	0.2	2.3
				3	0.3	3.0
				4	0.4	3.4
	Array (2 units)	20	4	2	0.2	2.3
				3	0.3	3.0
				4	0.4	3.4
			6	2	0.2	2.3
				3	0.3	3.0
				4	0.4	3.4
Trimaran Pontoon	Single	10	4	2	0.2	2.3
				3	0.3	3.0
				4	0.4	3.4
			6	2	0.2	2.3
				3	0.3	3.0
				4	0.4	3.4
	Array (2 units)	20	4	2	0.2	2.3
				3	0.3	3.0
				4	0.4	3.4
			6	2	0.2	2.3
				3	0.3	3.0
				4	0.4	3.4

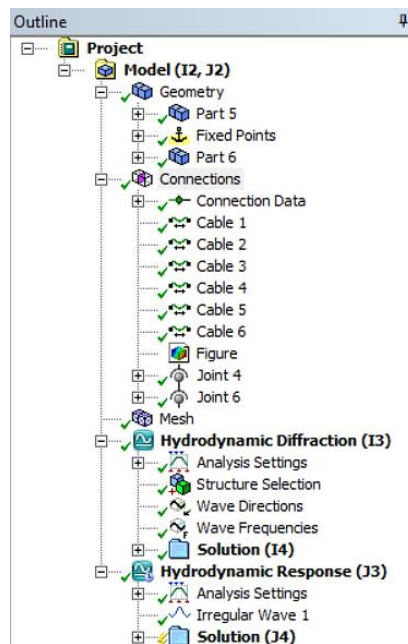
Pada tahap *processing* dilakukan beberapa langkah untuk memodelkan sistem dan medeklarasikan jenis simulasi yang akan dilakukan. Tahapan tersebut saling berkaitan satu sama lain, sehingga perlu dilakukan secara berurutan dan mengikuti *Project Schematic* seperti

terlampir pada Gambar 3.9 dan untuk detail dari *properties* gelombang *irregular* yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 3.4 di bawah ini.

Tabel 3. 4 Detail Parameter *Irregular Wave*

<i>Irregular Properties</i>			<i>Gamma</i>	<i>Range</i>	
<i>Irregular Wave 1</i>	Hs	0.2 m	1.00	F low:	0.21 Hz
	Tp	2.3 s		F high:	1.88 Hz
	Fp	0.44 Hz			
<i>Irregular Wave 2</i>	Hs	0.3 m	1.00	F low:	0.21 Hz
	Tp	3.0 s		F high:	1.88 Hz
	Fp	0.36 Hz			
<i>Irregular Wave 3</i>	Hs	0.4 m	1.00	F low:	0.21 Hz
	Tp	3.4 s		F high:	1.88 Hz
	Fp	0.31 Hz			

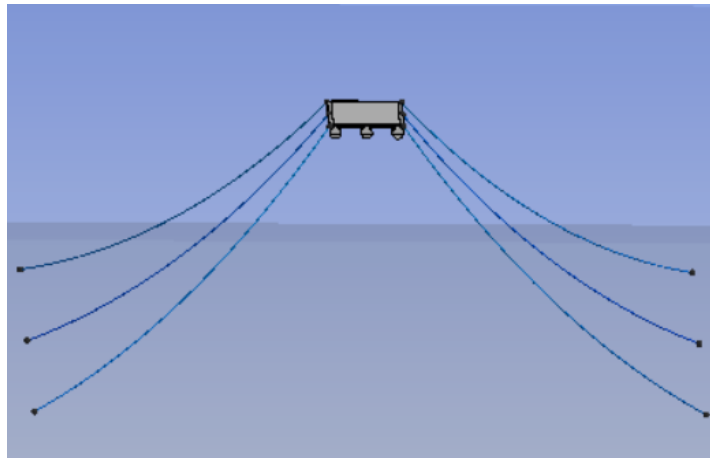
Data *irregular wave* di Tabel 3.4 merupakan data rata-rata nilai angin pada Pulau Anambas di daerah *nearshore* (rentan kedalaman 10 – 20 meter) seperti yang sudah dijelaskan pada sub-bab sebelumnya. Dimana rata-rata tersebut telah dibulatkan berdasarkan data yang tertera di laman *Global Wind Atlas*. *Irregular wave 1* disebabkan oleh kecepatan angin 2 m/s, *irregular wave 2* disebabkan oleh kecepatan angin 3 m/s, dan *irregular wave 3* disebabkan oleh kecepatan angin 4 m/s. Parameter-parameter pada tabel variasi di atas merupakan data *input* untuk simulasi CFD pada *Hydrodynamic Diffraction* dan *Hydrodynamic Response*. Berikut adalah *setup* simulasi hidrodinamik yang ditunjukkan oleh Gambar 3.13 di bawah ini.



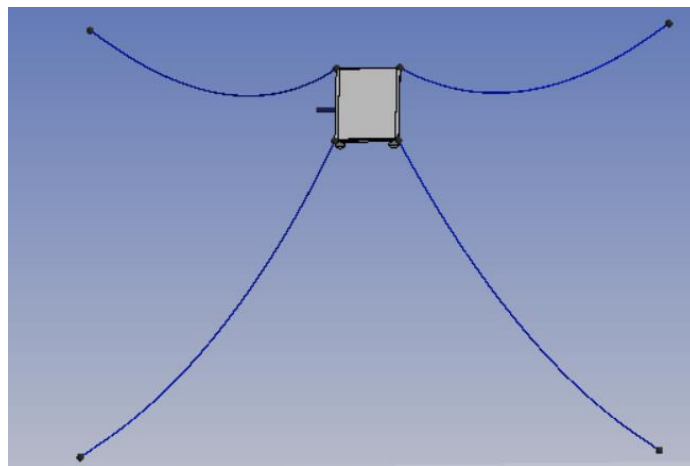
Gambar 3. 13 Detail *Setup Hydrodynamic Diffraction dan Response*

3.6.1 Mooring Line dan Joint

Proses pembuatan *mooring line* dilakukan pada *Hydrodynamic Diffraction* dengan jumlah *mooring line* sesuai dengan Tabel 3.3 di sub-bab sebelumnya. Adapun gambar dari pembuatan *mooring line* dengan variasi jumlah 4 *mooring line* dan 6 *mooring line* yang ada pada Gambar 3.14 dan Gambar 3.15 di bawah ini. *Properties* yang digunakan pada simulasi ini diambil dari referensi jurnal acuan sebagai nilai *input* yang akan digunakan pada *setup* di *Hydrodynamic Diffraction*. Kemudian, pada Gambar 3.14 dan 3.15 merupakan hasil pembuatan *mooring line* dengan jumlah 4 buah dan 6 buah pada simulasi CFD.



Gambar 3. 14 Variasi Jumlah 6 *Mooring Line* pada *Trimaran Pontoon*



Gambar 3. 15 Variasi Jumlah 4 *Mooring Line* pada *Catamaran Pontoon*

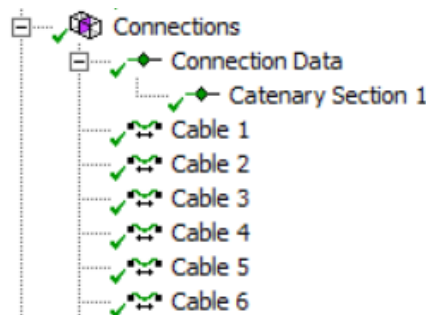
Mooring line berfungsi sebagai tali tambat yang akan membatasi pergerakan sistem saat diberikan impuls berupa variasi gelombang *irregular*, variasi kedalaman perairan, dan variasi kecepatan angin. Simulasi yang dilakukan menggunakan *mooring line* dengan jumlah 4 dan 6 buah untuk masing-masing jenis variasi geometri. Adapun panjang *mooring line* yang digunakan mengikuti variasi kedalaman yang digunakan (variasi kedalaman: 10 meter dan 20

meter). Berdasarkan variasi kedalaman tersebut, maka panjang *mooring line* yang digunakan berkisar 15 – 25 meter dengan sudut antara *mooring line* dan dasar perairan sekitar 30° - 40° (Ghigo & Faraggiana, 2022). Berikut detail *properties* dari *mooring line* yang digunakan pada simulasi ditunjukkan pada Tabel 3.5 di bawah ini.

Tabel 3. 5 *Properties Mooring line* (Kanoetra & Shankar, 2022)

Parameter	Nilai
Diameter (m)	0.018
Unit Weight (kg/m)	27887
Stiffness (N/m ²)	596244.32
Tension Maximum (Pa)	27301.4048
Tipe	Non-linear Catenary
Material	Polyester

Nilai dari tiap *properties* pada Tabel 3.5 akan di-*input* pada bagian *Catenary Data* pada menu *Connection* yang dapat dilihat pada Gambar 3.16 lebih detail. Hal yang harus diperhatikan dalam membuat *mooring line* ialah saat melakukan *input* data, khususnya pada pemilihan *fixed point* dan *connection point* karena akan berpengaruh terhadap pemodelan *mooring line* pada simulasi.

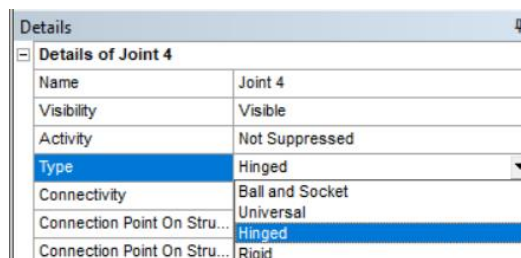


Gambar 3. 16 *Tree Outline* pada Pengaturan *Mooring Line*

Pemodelan *mooring line* dilakukan dengan menentukan *connection point* pada geometri dan *fixed point* pada *seabed* (dasar perairan) yang kemudian akan dihubungkan oleh sebuah *catinery nonlinear* yang berfungsi sebagai *mooring line* sekaligus konektor antara *connection point* dan *fixed point*. Pemodelan pada *connection point* dan *fixed point* perlu ditentukan koordinat lokasi untuk masing-masing *point*. Koordinat ini dapat ditentukan dengan menyesuaikan jarak dengan dimensi geometri dan *water size* (ukuran perairan) pada *Software CFD*. Oleh karena itu, tahapan desain 3D geometri, penting untuk memperhatikan posisi dari

Center of Mass geometri pada titik pusat koordinat (0, 0, 0) agar memudahkan saat dilakukan simulasi dan penentuan lokasi untuk *Connection Point* dan *Fixed Point*.

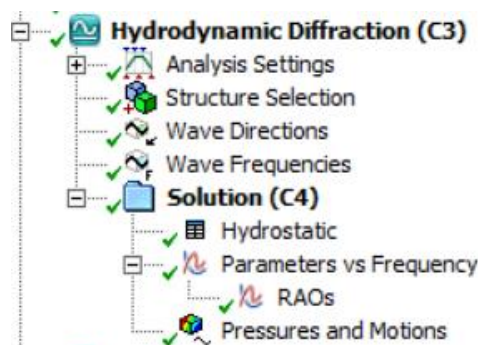
Selain pembuatan *mooring line*, pada simulasi ini juga dilakukan penggabungan dua jenis geometri yang sama dari tiap variasi geometri menggunakan penghubung yang disebut *joint*. Adapun beberapa jenis *joint* yang tersedia pada CFD *Aqwa* seperti pada Gambar 3.17, tetapi pada simulasi ini *joint* yang digunakan ialah jenis *Hinged Joint*. Jenis *Hinged Joint* merupakan salah satu jenis *joint* yang paling umum digunakan pada suatu struktur benda terapung untuk disimulasikan dengan *Software CFD*. Oleh karena itu, simulasi ini tidak menganalisis pengaruh *joint* terhadap respon gerak bendanya, maka jenis *joint* yang digunakan ialah yang paling umum yaitu *Hinged Joint* (Song, Imani, et al., 2023).



Gambar 3. 17 Detail Pilihan Jenis *Joint*

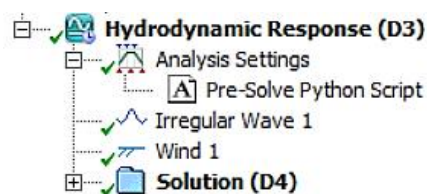
3.6.2 *Hydrodynamic Diffraction* dan *Hydrodynamic Response*

Pada tahap *processing* perlu dilakukan *setup* pada fitur *Hydrodynamic Diffraction* dan *Hydrodynamic Response* pada *Software CFD*. Kedua fitur ini digunakan untuk menganalisis respon sistem setelah diberikan variasi impuls dari parameter *environment challenge* (*irregular wave* dan *wind*) dengan *output* berupa *Response Amplitude Operator* (RAO) dalam *frequency domain*. Kedua fitur ini saling berhubungan, dimana *output Hydrodynamic Diffraction* merupakan *input* untuk *Hydrodynamic Response*. Gambar 3.18 menunjukkan parameter-parameter yang harus ditentukan pada pengaturan *Hydrodynamic Diffraction*.



Gambar 3. 18 *Output Hydrodynamic Diffraction*

Parameter *Wave Direction* yang digunakan bernilai -180° sampai 180° atau menuju arah sumbu-X positif dengan nilai *Wave Frequency* otomatis yang ditentukan oleh sistem berdasarkan hasil *meshing* geometri. Adapun *output* yang diperoleh dari *Hydrodynamic Diffraction* adalah *Hydrostatic Properties* berupa *Center of Gravity*, *Center of Buoyancy*, dan *Metacentre Position*. Setelah mensimulasikan model pada *Hydrodynamic Diffraction*, selanjutnya model akan disimulasikan menggunakan *Hydrodynamic Response* untuk memperoleh *Response Amplitude Operator* (RAO) dalam Domain Frekuensi (*frequency domain*). Gambar 3.19 sampai Gambar 3.21 merupakan *setting* dan jenis analisis pada *Hydrodynamic Response*.



Gambar 3. 19 Menu *Hydrodynamic Response*

Details	
Details of Analysis Settings	
Name	Analysis Settings
Computation Type	Frequency Statistical Analysis
External Operation before...	Stability Analysis
External Operation after ...	Time Response Analysis
Parallel Processing	Program Controlled
Use Cable Dynamics	Yes

Gambar 3. 20 Setup *Hydrodynamic Response*

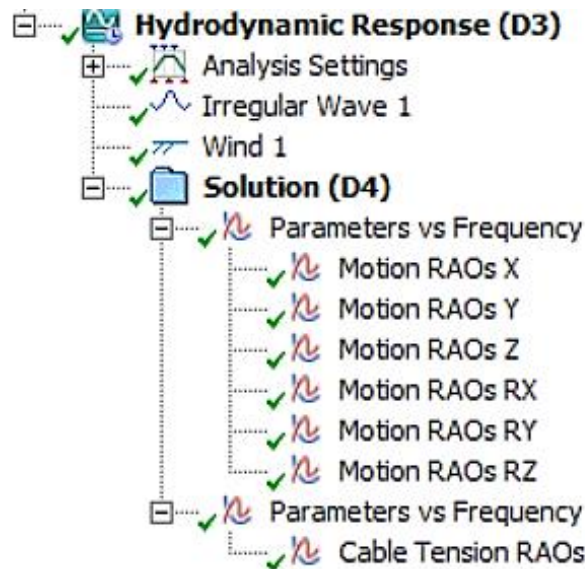
Setelah semua komponen dan parameter diinputkan dapat dapat dilakukan simulasi pada fitur *Solve* pada *Solution*, hasil simulasi berupa nilai RAO akan didapatkan setelah komputasi selesai.

Details	
Visibility	Visible
Activity	Not Suppressed
Wave Range Defined By	Frequency
Wave Spectrum Details	
Wave Type	JONSWAP (Hs)
<input type="checkbox"/> Direction of Spectrum	0.0°
Wave Spreading	None (Long-Crested Waves)
Spectrum Presentation M...	1D Graph
Seed Definition	Program Controlled
Number of Spectral Lines...	Program Controlled
Omit Calculation of Drift F...	No
Start and Finish Frequen...	Program Controlled
Start Frequency	0.1798 Hz
Finish Frequency	1.58413 Hz
<input type="checkbox"/> Significant Wave Hei...	0.4 m
<input type="checkbox"/> Gamma	1
<input type="checkbox"/> Peak Frequency	0.31 Hz
Export CSV File	Select CSV File...

Gambar 3. 21 Input *Irregular Wave*

3.7 Post-processing

Tahap *post-processing* yang dilakukan adalah berupa data *collecting* and data *visualization*. Data yang akan diambil meliputi data *Response Amplitude Operator* (RAO) pada masing-masing variasi. RAO yang dihasilkan pada simulasi merupakan respon sistem pada 6 *Degree of Freedom* (DOF) yakni gerakan *translational motion* (*Sway*, *Surge*, dan *Heave*) dan *rotational motion* (*Pitch*, *Roll*, dan *Yaw*). Visualisasi data hasil simulasi menampilkan grafik-grafik yang menunjukkan kecenderungan gerakan sistem pada setiap variasi (grafik RAO-*frequency*). Gambar 3.22 menggambarkan detail *output* yang akan dihasilkan dari simulasi tiap variasi.



Gambar 3. 22 Output RAO pada 6 DOF

3.8 Perhitungan Analitik

Hasil yang dilakukan untuk melakukan validasi pada bab selanjutnya ialah beberapa parameter perhitungan analitik, seperti *irregular wave*, *centre of bouyancy*, dan *centre of gravity*. Penjelasan perhitungan analitik dapat dilihat di bawa berikut.

3.8.1 Perhitungan *Irregular Wave*

Dalam menganalisis respon gerak FPV menggunakan *software* CFD, dilakukan perhitungan analitik untuk menjadi perbandingan validasi terhadap *output* CFD. Berdasarkan Tabel 3.6, adapun perhitungan *irregular wave* dengan metode JONSWAP yang dapat dilihat pada penjelasan di bawah ini.

Tabel 3. 6 Data *Wind Speed*

No	Speed	Note
1	2.000 m/s	<i>min</i>
2	3.000 m/s	<i>avg</i>
3	4.000 m/s	<i>max</i>

Data *wind speed* Tabel 3.5 akan menjadi nilai utama dalam perhitungan *irregular wave*. Dimana perhitungan yang digunakan ialah Persamaan 3.1 sampai Persamaan 3.8 untuk menghitung *irregular wave*.

$$\hat{H}_s = 0.0016 \hat{F}_{eff}^{\frac{1}{2}} \quad (3.1)$$

$$\hat{T}_p = 0.286 \hat{F}_{eff}^{\frac{1}{3}} \quad (3.2)$$

$$\hat{t}_{min} = 68.8 \hat{F}^{2/3} \quad (3.3)$$

$$\hat{F} = \frac{g F}{U^2} \quad (3.4)$$

$$\hat{t} = \frac{g t}{U} \quad (3.5)$$

$$\hat{H}_s = \frac{g H_s}{U^2} \quad (3.6)$$

$$H_s = \hat{H}_s \times \frac{U^2}{g} \quad (3.6)$$

$$\hat{F}_{eff} = \left(\frac{\hat{t}}{68.8} \right)^{3/2} \quad (3.7)$$

$$T_p = \hat{T}_p \times \frac{U}{g} \quad (3.8)$$

$$H_s = \hat{H}_s \times \frac{U^2}{g} \quad (3.6)$$

$$\hat{F}_{eff} = \left(\frac{\hat{t}}{68.8} \right)^{3/2} \quad (3.7)$$

$$T_p = \hat{T}_p \times \frac{U}{g} \quad (3.8)$$

Adapun perhitungan yang dilakukan menggunakan persamaan-persamaan di atas dimana akan diambil contoh perhitungan pada salah satu jenis *wind speed* yaitu 2 m/s dengan perhitungan pertama dimulai dari mencari \hat{F}_{eff} sebagai berikut.

$$\hat{F}_{eff} = \left(\frac{\hat{t}}{68.8} \right)^{\frac{3}{2}} = 245000$$

$$\hat{t} = \frac{g t}{U} = \frac{9.8 \frac{m}{s} \times 21600s}{2 \frac{m}{s^2}} = 105840s$$

$$\hat{t}_{min} = 68.8 \hat{F}^{\frac{2}{3}} = 269380.297s$$

$$\hat{H}_s = 0.0016 \hat{F}_{eff}^{\frac{1}{2}} = 0.0016 \times 30169.082 = 0.39302$$

$$H_s = \hat{H}_s \times \frac{U^2}{g} = 0.39302 \times \left(\frac{4}{9.8} \right) = 0.16 \sim 0.2 \text{ meter}$$

$$\hat{T}_p = 0.286 \hat{F}_{eff}^{\frac{1}{3}} = 0.286 \times 20112.72 = 11.2175$$

$$T_p = \hat{T}_p \times \frac{U}{g} = 11.2175 \times \left(\frac{2}{9.8} \right) = 2.28 \sim 2.3 \text{ meter}$$

Berdasarkan Persamaan 3.6 dan Persamaan 3.8 maka diperoleh nilai *irregular wave* dan *peak periode* yang nantinya akan digunakan untuk data input di CFD *Hydrodynamic Response*. Tahapan-tahapan tersebut merupakan cara mendapatkan nilai *irregular wave* dan *peak periode* yang nantinya akan dilakukan hal yang sama pada jenis *wind speed* lainnya.

3.8.2 Perhitungan *Centre of Bouyancy* dan *Centre of Gravity*

Adapun perhitungan analitik dari *centre of bouyancy* (COB) dan *centre of gravity* (COG) yang dijadikan perbandingan antara hasil simulasi dan perhitungan analitik sebagai validasi. Dimana contoh perhitungan validasi yang dilakukan ialah menggunakan data *Trimaran Pontoon*. Perhitungan dari COB dan COG mengacu pada data *pontoon* yang ditunjukkan pada Tabel 3.7 di bawah ini.

Tabel 3. 7 Detail Ukuran *Pontoon*

Ukuran lambung (m)		Luas (m ²)	Parameter	Nilai
Panjang	5.1	16.83	Catamaran (m ²)	16.83
Lebar	3.3		Trimaran (m ²)	16.83
Diameter	0.5	0.022	Volume Displacement (m ³)	7.820876

Adapun persamaan COB dan COG yang ditunjukkan pada Persamaan 3.9 dan Persamaan 3.10 di bawah ini.

$$\text{COB} = \frac{\text{volume displacement}}{L \times \text{draft}} \quad (3.9)$$

$$\text{COG} (X_{pm}) = \frac{\sum_{n=1}^N X_n m_n}{M} \quad (3.10)$$

$$\text{COG} (Y_{pm}) = \frac{\sum_{n=1}^N Y_n m_n}{M} \quad (3.11)$$

$$\text{COG} (Z_{pm}) = \frac{\sum_{n=1}^N Z_n m_n}{M} \quad (3.12)$$

Berdasarkan persamaan di atas, maka didapat nilai COB dan COG sebagai berikut:

$$\text{COB} = 7.82088 \text{ m}$$

$$\text{COG} (X_{pm}) = 0$$

$$\text{COG} (Y_{pm}) = 0$$

$$\text{COG} (Z_{pm}) = -0.05$$

Pada perhitungan analitik nilai COB dan COG tersebut kemudian dijadikan perbandingan terhadap hasil dari simulasi CFD hidrostatis yang dihasilkan *Hydrodynamic Diffraction*.

BAB IV

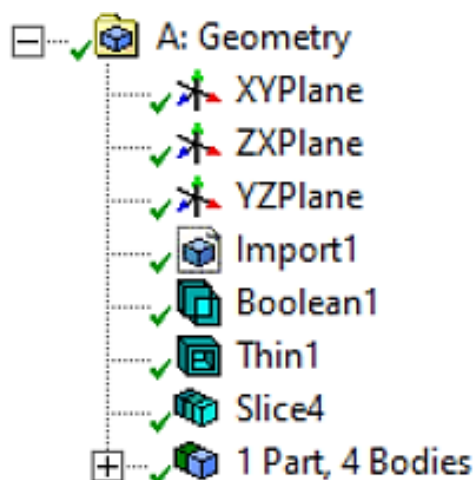
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Verifikasi

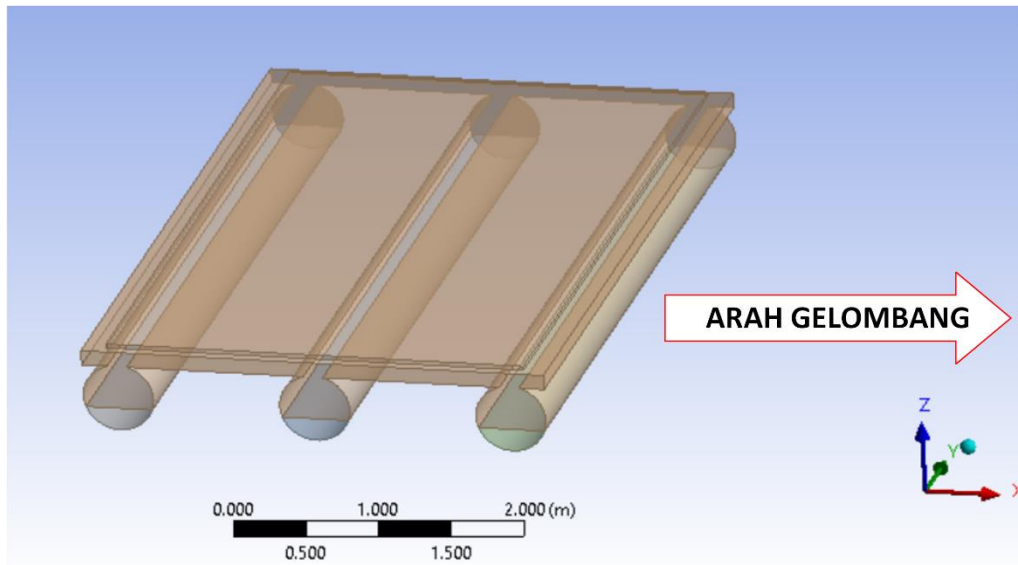
Verifikasi merupakan tahapan untuk mengetahui kebenaran model dan pengaturan yang digunakan dalam simulasi di penelitian ini. Oleh karena itu, dilakukan metode verifikasi berupa *Grid Independent Test* (GIT) dengan tujuan membandingkan *output* hasil RAO yang divariasikan ukuran *element* yang akan mempengaruhi *number of elements* pada *meshing*, di mana batas maksimal *number of elements* untuk simulasi hidrodinamik tidak boleh lebih dari 40.000 *elements* (Gabriel, 2012). Verifikasi dengan metode ini dilakukan untuk mendapatkan nilai RAO yang sudah stabil dari beberapa variasi ukuran *element*. Oleh karena itu, apabila sudah didapat nilai RAO yang paling stabil dari beberapa variasi ukuran *element*, maka konfigurasi *meshing* tersebut yang digunakan untuk simulasi.

4.1.1 Setup Software CFD

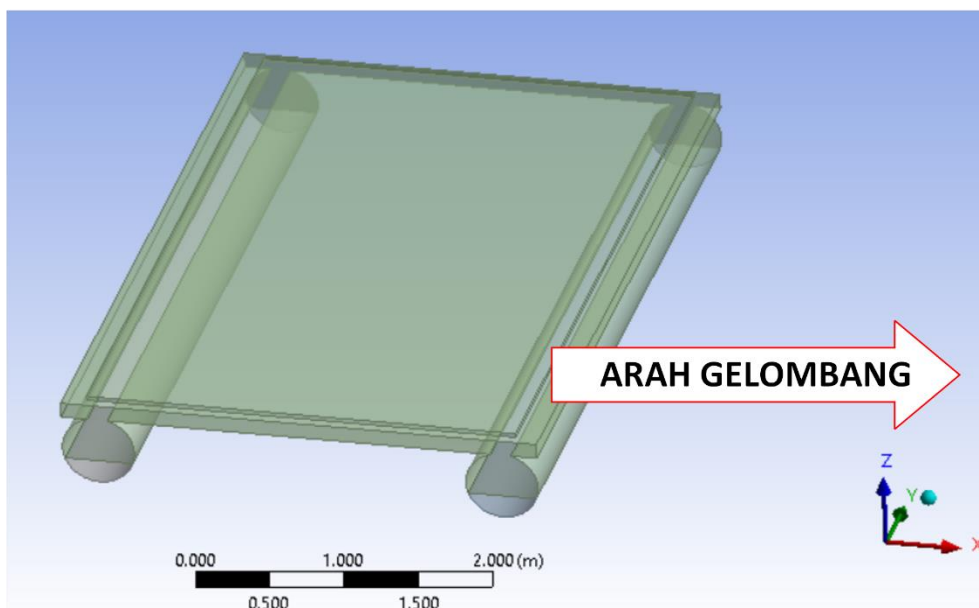
Pada bagian *setup*, model geometri perlu dikondisikan menggunakan beberapa fitur agar dapat diproses pada simulasi CFD sebagai *initial condition* model. *Setup* pada *Design Modeler* untuk setiap Model Geometri ditunjukkan pada Gambar 4.1 sampai Gambar 4.3.



Gambar 4. 1 *Tree Outline* Pengaturan *Design Modeler*



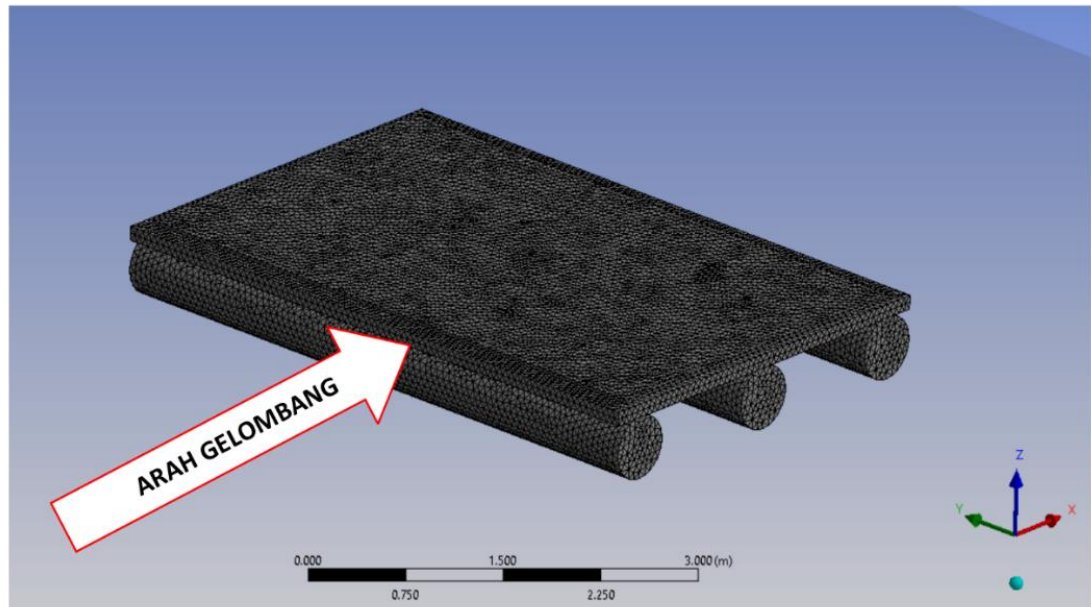
Gambar 4. 2 Model *Trimaran Pontoon* pada *Design Modeler*



Gambar 4. 3 Model *Catamaran Pontoon* pada *Design Modeler*

4.1.2 *Grid Independent Test (GIT)*

Pada tahap *meshing* dilakukan verifikasi dan optimisasi konfigurasi *meshing* agar dapat diperoleh *output* (hasil) yang maksimal dengan *load* komputasi yang minimal. Proses verifikasi *meshing* dilakukan menggunakan *Grid Independent Test (GIT)*, dengan cara memvariasikan *element size meshing* dan membandingkan hasil *output* RAO pada masing-masing variasi. Berikut pada Gambar 4.4 sampai Gambar 4.7 menunjukkan hasil *meshing* dan GIT pada keempat model geometri *pontoon*.

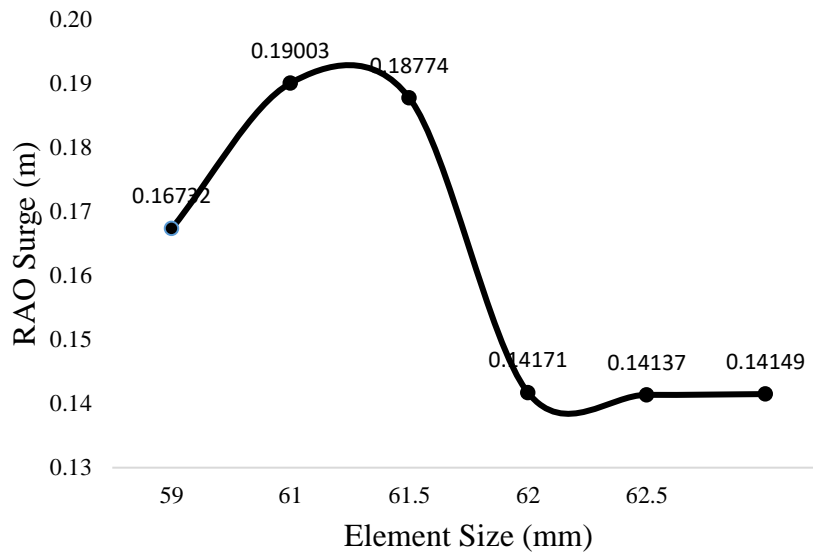


Gambar 4. 4 Meshing pada *Trimaran Pontoon*

Berdasarkan hasil GIT yang telah dilakukan pada *Trimaran Pontoon*, adapun nilai RAO (*Response Amplitude Operator*) yang diperoleh ketika dilakukan enam kali percobaan simulasi yang ditunjukkan pada Tabel 4.1 di bawah ini. Berdasarkan tabel tersebut, dapat dilihat bahwa ketika *element size* pada *meshing* 62.5 mm menunjukkan nilai RAO Surge (X) yang didapat mulai stabil sampai pada percobaan keenam yaitu ketika *element size* yang digunakan 63 mm.

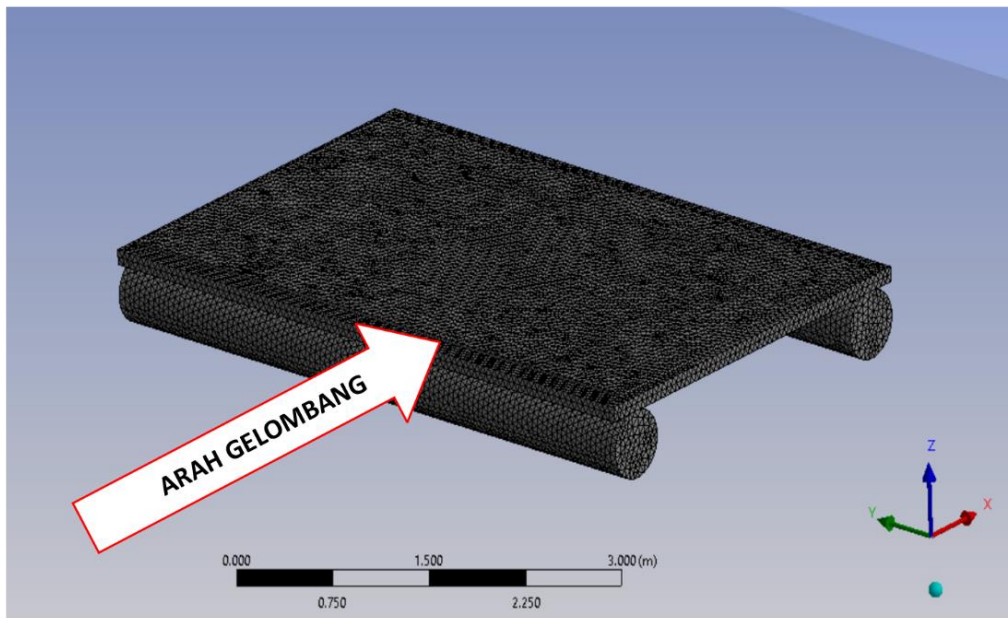
Tabel 4. 1 GIT pada *Trimaran Pontoon*

Parameter	Variasi 1	Variasi 2	Variasi 3	Variasi 4	Variasi 5	Variasi 6
Metode	<i>Triangle</i>	<i>Triangle</i>	<i>Triangle</i>	<i>Triangle</i>	<i>Triangle</i>	<i>Triangle</i>
<i>Element size</i> (mm)	59	61	61.5	62	62.5	63
Jumlah <i>nodes</i>	18332	17948	17113	16908	16645	15923
Jumlah <i>element</i>	36660	35892	34222	33812	33286	31842
<i>Skewness</i>	0.50	0.51	0.49	0.46	0.48	0.45
RAO Surge ($f = 0.5 \text{ Hz}$) (m)	0.17	0.19	0.19	0.142	0.141	0.142
Selisih (%)	100.0	12.0	1.2	32.5	0.2	0.1



Gambar 4. 5 Grafik Hasil GIT pada *Trimaran Pontoon*

Kemudian, adapun hasil perhitungan GIT untuk *Catamaran Pontoon* yang telah didapatkan berdasarkan gambar dan Tabel 4.2 berikut.



Gambar 4. 6 Meshing pada *Catamaran Pontoon*

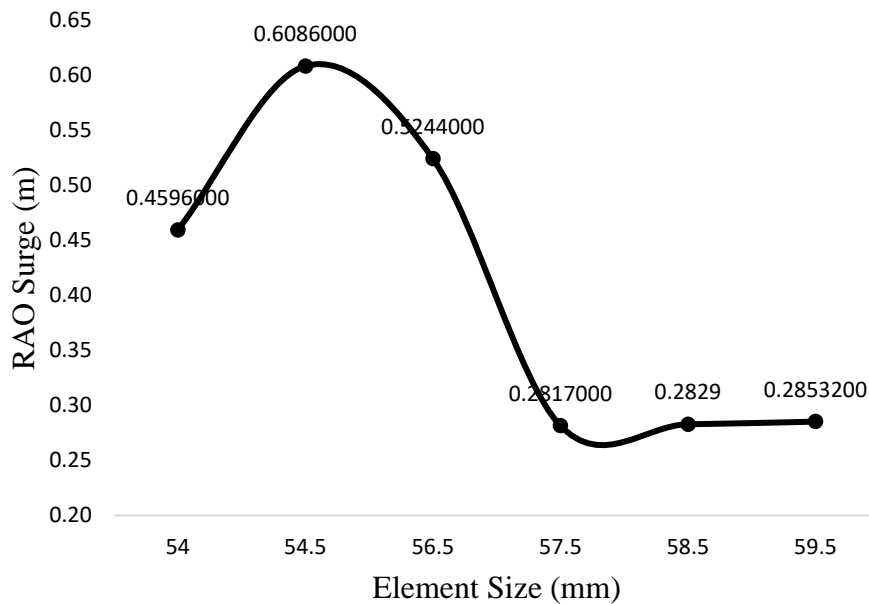
Gambar 4.6 menunjukkan geometri *mesh* pada *Catamaran Pontoon* saat dilakukan simulasi. Kemudian, adapun hasil GIT pada *Catamaran Pontoon* yang dapat dilihat pada Tabel 4.2. berdasarkan Tabel 4.2 dilakukan enam kali percobaan dengan enam variasi ukuran *element size*

yang berbeda. Pada percobaan kelima menunjukkan kestabilan nilai RAO *Surge* yang diperoleh ketika *element size* 58.5 mm.

Tabel 4. 2 GIT pada *Catamaran Pontoon*

Parameter	Variasi 1	Variasi 2	Variasi 3	Variasi 4	Variasi 5	Variasi 6
Metode	<i>Triangle</i>	<i>Triangle</i>	<i>Triangle</i>	<i>Triangle</i>	<i>Triangle</i>	<i>Triangle</i>
<i>Element size</i> (mm)	54	54.5	56.5	57.5	58.5	59.5
Jumlah <i>nodes</i>	18435	18080	17071	16558	16210	15713
Jumlah <i>element</i>	36866	36156	34138	33112	32416	31422
<i>Skewness</i>	0.45	0.49	0.52	0.50	0.54	0.55
RAO <i>Surge</i> ($f = 0.5 \text{ Hz}$)(m)	0.46	0.61	0.52	0.28	0.28	0.29
Selisih (%)	100.0	24.5	16.1	86.2	0.4	0.8

Hasil perbandingan nilai RAO *Surge* yang diperoleh pada tiap variasi ditunjukkan pada Gambar 4.7 di bawah ini. Dimana dapat dilihat kestabilan pada variasi 5 dan 6 dengan perolehan selisih (%) berturut-turut ialah 0.4% dan 0.8% sesuai yang tertera pada Tabel 4.2 di atas.



Gambar 4. 7 Grafik Hasil GIT pada *Catamaran Pontoon*

Berdasarkan Tabel 4.1 dan Tabel 4.2 dapat dipilih variasi *element size* yang akan digunakan simulasi berdasarkan perbandingan nilai RAO *Surge* yang nilai *error*-nya lebih kecil dari 10% dari variasi ukuran *element* lainnya dan yang memiliki nilai paling stabil RAO *Surge* (Novia et al., 2023).

Tabel 4. 3 Konfigurasi *Meshing* Geometri *Pontoon*

Parameter	<i>Trimaran Pontoon</i>	<i>Catamaran Pontoon</i>
Metode	<i>Triangle</i>	<i>Triangle</i>
<i>Element size</i> (mm)	62.5	58.5
Jumlah <i>Nodes</i>	16645	16210
Jumlah <i>Element</i>	33286	32416
<i>Skewness</i>	0.48	0.55
RAO <i>Surge</i> ($f = 0.5$ Hz) (m)	0.14	0.28

Metode *triangle meshing* dianggap sebagai metode *mesh* CFD yang paling efisien untuk menganalisis sebuah struktur (Shewchuk, 1996). Nilai *element size* yang digunakan pada simulasi ini ialah yang tertera pada Tabel 4.3 dengan detail dari jumlah *element* dan *nodes* yang ditunjukkan seperti di tabel tersebut. Pemilihan *element size* pada masing-masing *pontoon* didasarkan pada presentase perbedaan antara hasil *output* RAO dengan toleransi sebesar 10% (Lukiantchuki et al., 2018). Pada presentase *error* tersebut, nilai *output* pada masing-masing simulasi tidak berubah secara signifikan. Adapun nilai dari *number of nodes*, *number of elements*, dan *skewness* merupakan hasil simulasi yang diperoleh setelah model disimulasikan menggunakan konfigurasi *meshing* yang dipilih. Nilai RAO *Surge* (sumbu-X) adalah *output* yang dibandingkan pada proses *Grid Independence Test*. Nilai RAO *Surge* pada frekuensi 0.50 Hz dipilih untuk dibandingkan agar diketahui nilai *element size* paling optimal untuk mensimulasikan model, dengan *load* komputasi yang minimal dan hasil yang optimal.

4.2 Validasi

Validasi adalah proses yang digunakan untuk memastikan keabsahan *pontoon* dari hasil simulasi. Proses validasi yang dilakukan, nilai hidrostatis hasil simulasi CFD akan dibandingkan dengan nilai hidrostatis hasil perhitungan analitik dengan toleransi nilai selisih maksimal sebesar 10% (Moriasi, 2007). Metode yang sama digunakan oleh Ibinabo & Tamunodukobipi (2019) untuk memvalidasi hasil simulasi CFD pada *software* CFD dengan membandingkan nilai *output* simulasi dengan hasil perhitungan analitik (manual). Variabel hidrostatis yang akan dibandingkan adalah CoG (*Center of Gravity*) pada sumbu-Z, *Volume Displacement*, dan *Water Plane Area*. Model yang dipilih untuk validasi adalah *Trimaran Pontoon*. Berikut adalah tabel hasil validasi yang telah dilakukan pada *Trimaran Pontoon*.

Tabel 4. 4 *Properties Trimaran Pontoon*

Properties Pontoon	Nilai
Luas Permukaan Lambung	37.022 m ²
Volume Pontoon	4.1083 m ³
Massa Pontoon	260.180 Kg
Berat Pontoon	2601.8 N
Volume Displacement	6.00511 m ³
Water Plane Area	7.820 m ²

Nilai dari *Volume Displacement*, *Water Plane Area*, dan *Center of Gravity (CoG)* sumbu-Z kemudian dibandingkan dengan hasil simulasi hidrostatik pada *Hydrodynamic Diffraction*. Hasil perbandingan antara perhitungan analitik dengan simulasi hidrostatik dapat dilihat pada Tabel 4.5.

Tabel 4. 5 *Presentase Error Validasi*

Parameter	Simulasi	Perhitungan	Error
<i>Volume Displacement</i> (m ³)	6.000	6.005	0.0064%
<i>Water Plane Area</i> (m ²)	7.23	7.82	7.73%
<i>CoG Vertical</i> sumbu-Z (m)	-0.05	-0.05	0.00%

Berdasarkan nilai *error* yang ada di Tabel 4.5, maka dapat disimpulkan bahwa dilakukan toleransi nilai *error* antara simulasi dengan perhitungan analitik adalah maksimal 10% (Moriasi, 2007).

4.3 Pengaruh Variasi Geometri Terhadap *Response Amplitude Operator (RAO)*

Pada penelitian yang dilakukan, terdapat dua jenis variasi geometri *pontoon* yang dianalisis, yaitu *Trimaran Pontoon* dan *Catamaran Pontoon*. Kemudian, dua model geometri ini dibagi menjadi dua kelompok, yaitu *single pontoon* dan *array pontoon*. Kedua model geometri memiliki bentuk dan ukuran silinder *pontoon* yang sama, tetapi untuk keduanya dibedakan dari jumlah lambung silinder dari tiap jenis geometri. Kemudian, adapun desain

geometri dari kedua model geometri yang telah dibuat menggunakan *Software 3D Modelling* yang ditunjukkan pada Gambar 4.2 dan Gambar 4.3. Sedangkan, untuk model *single pontoon* dan *array pontoon* ditunjukkan pada sub-bab 4.3.1 dan 4.3.2. Adapun model geometri pada *Marine FPV* yang dibuat memiliki detail ukuran pada tiap variasi geometri yang ditunjukkan pada Tabel 4.6 di bawah berikut.

Tabel 4. 6 *Properties* dari Variasi Geometri *Trimaran* dan *Catamaran Pontoon*

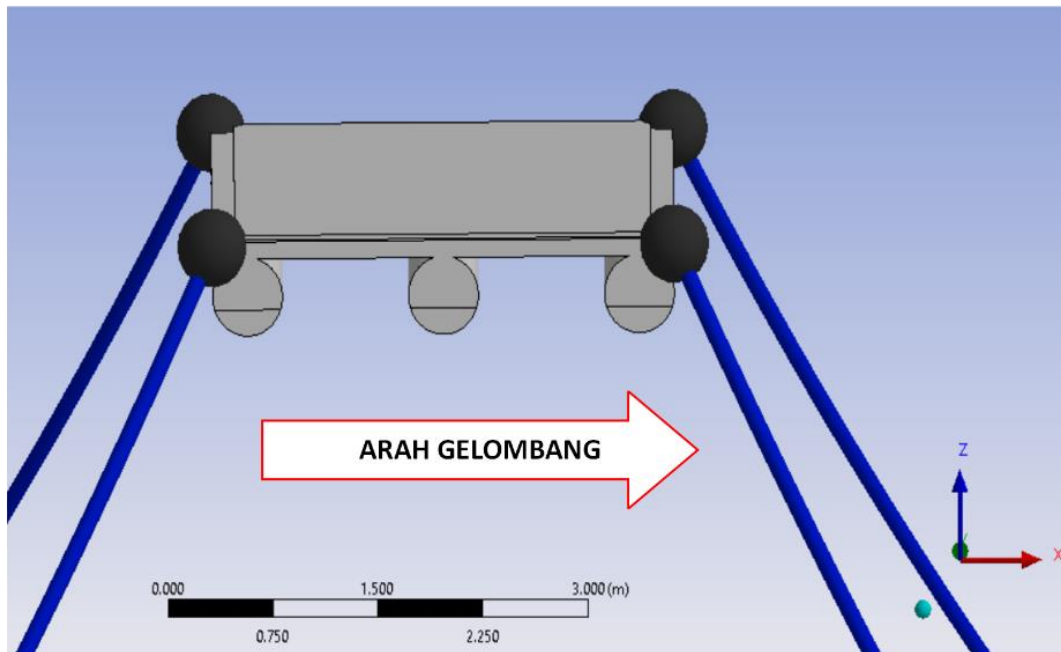
No.	<i>Properties</i>	<i>Trimaran Pontoon</i>	<i>Catamaran Pontoon</i>
1.	Massa (kg)	260.180	197.122
2.	Volume (m ³)	1.94	3.63
3.	Panjang (m)	5.1	5.1
4.	Lebar (m)	3.3	3.3
5.	Tinggi (m)	0.61	0.61
6.	I_{xx} (kg.m ²)	423.247	412.081
7.	I_{yy} (kg.m ²)	163.966	163.076
8.	I_{zz} (kg.m ²)	582.297	571.707

Parameter-parameter yang ada pada Tabel 4.6 merupakan nilai yang akan di-*input* untuk proses kalkulasi *Response Amplitude Operator* (RAO) pada *Software CFD*. Proses kalkulasi ini didasari pada perubahan posisi *Center of Gravity* (CoG) dari struktur apung (Gabriel, 2012).

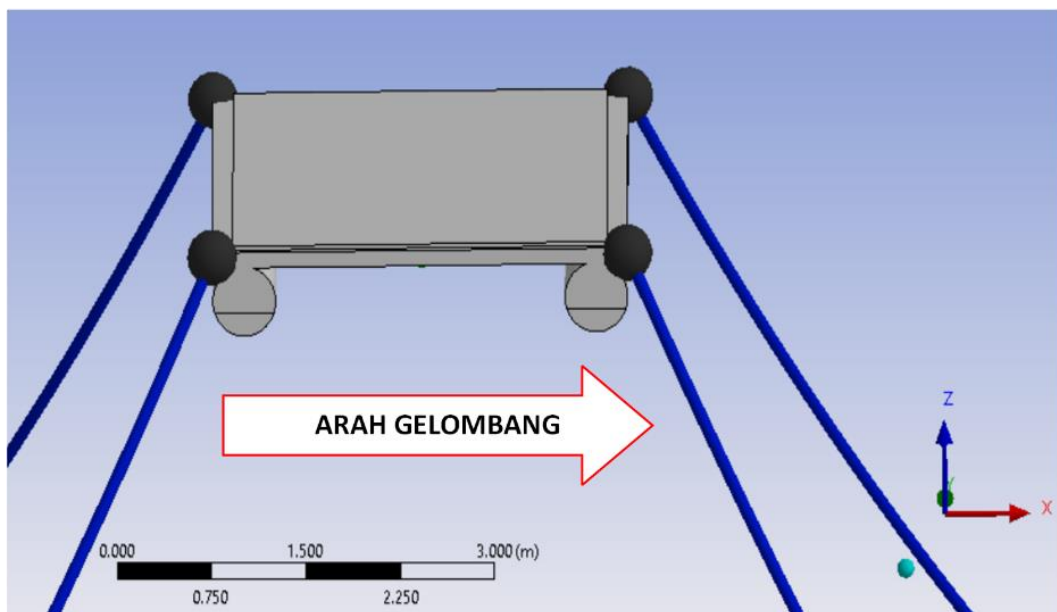
4.3.1 Respon Gerak *Single Pontoon* Berdasarkan 6 Sudut Derajat Kebebasan

Berdasarkan dasar teori terkait 6 *Degree of Freedom* atau 6 sudut derajat kebebasan, merupakan gerak suatu benda terapung yang terdiri dari gerak translasional dan rotasional. Gerakan translasional terdiri dari *Surge* (Sumbu-X), *Sway* (Sumbu-Y), *Heave* (Sumbu-Z). sedangkan, untuk gerakan rotasional terdiri dari *Roll* (Sumbu-RX), *Pitch* (Sumbu-RY), dan *Yaw* (Sumbu-RZ) (Ibinabo & Tamunodukobipi, 2019). Pada sub-bab ini akan membahas bagaimana respon gerak hidrodinamika dari *Trimaran Pontoon* dan *Catamaran Pontoon* yang ditinjau pada tiap sumbu tranlasi dan rotasi. Selain itu, adapun pengaruh nilai RAO terhadap bentuk geometri *single (non-array)* dan *array* dari *Trimaran Pontoon* dan *Catamaran Pontoon*. Berikut merupakan hasil yang telah didapatkan dengan menggunakan *CFD Aqwa* (*Hydrodynamic Diffraction* dan *Hydrodynamic Response*). Perbandingan kestabilan berdasarkan sudut derajat kebebasan ini ditinjau dengan mengambil kasus pada kedalaman 20

m untuk menampilkan hasil data maksimal respon gerak dari *Trimaran Single Pontoon* dan *Catamaran Single Pontoon*. Kemudian, untuk variasi *wind speed* yang diambil ialah saat 3 m/s, *irregular wave* 0.3 m dengan *peak period* 0.36 second, dan untuk perbandingan yang dipakai ialah 4 *mooring line* dengan kedalaman 20 meter.

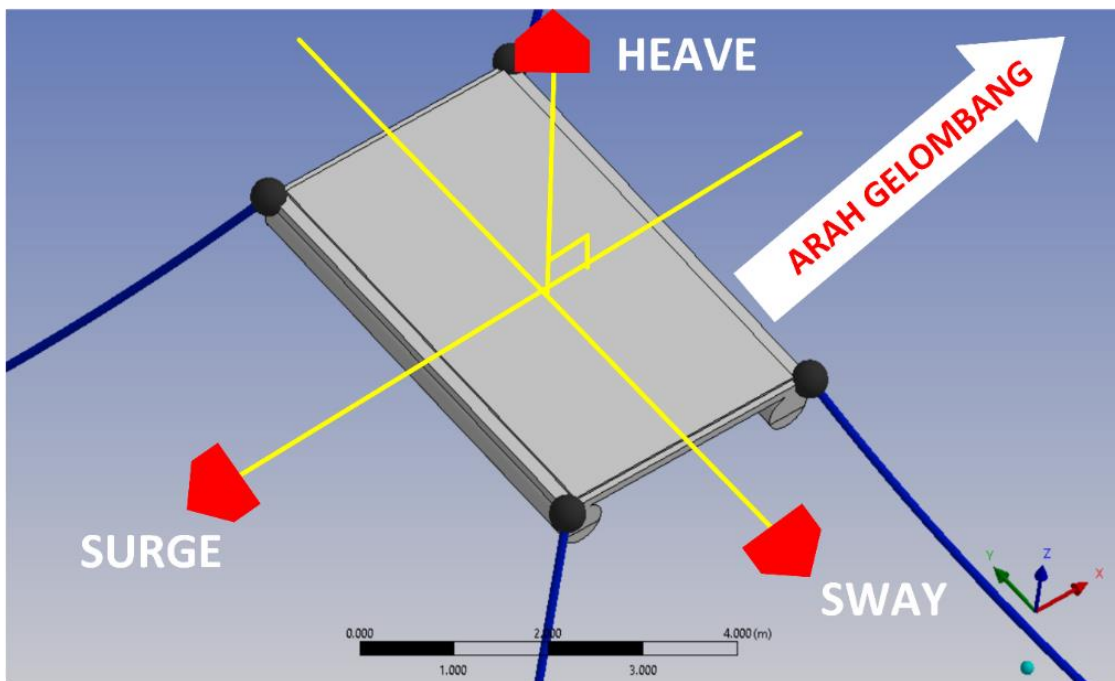


Gambar 4. 8 Simulasi 4 *Mooring Line* pada *Trimaran Pontoon (Single)*



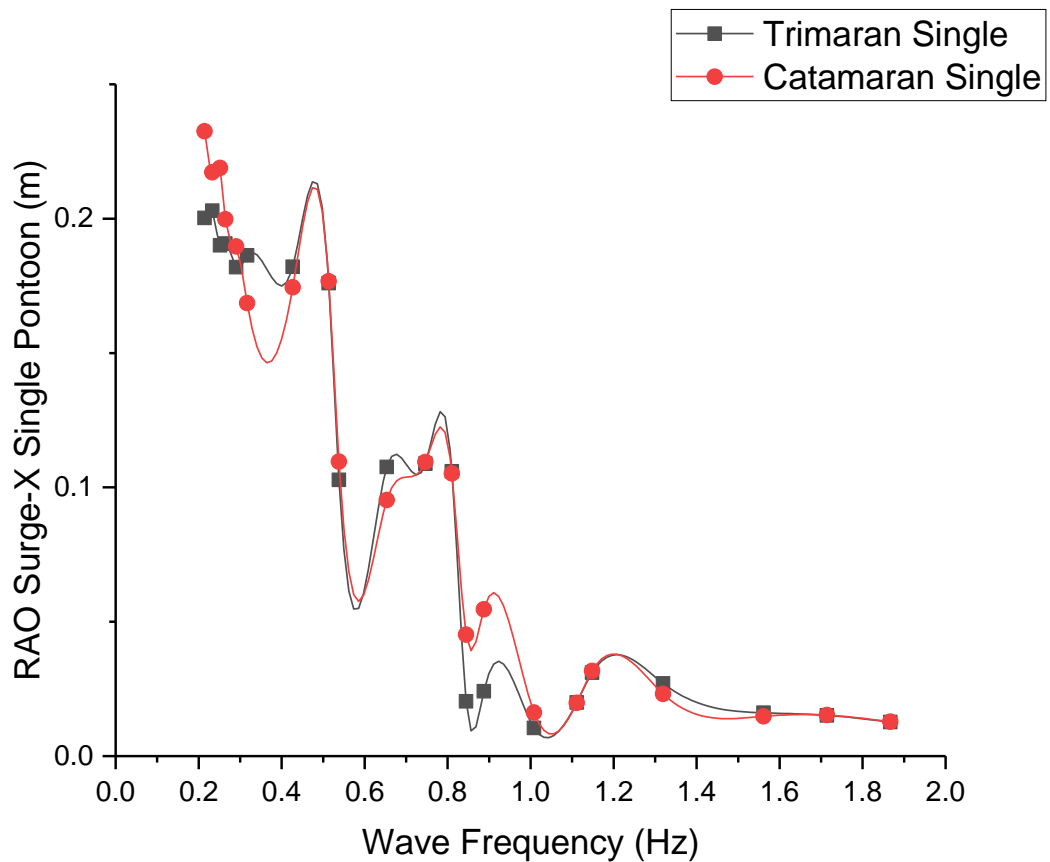
Gambar 4. 9 Simulasi 4 *Mooring Line* pada *Catamaran Pontoon (Single)*

Pada Gambar 4.8 dan Gambar 4.9 merupakan gambar ketika dilakukan pengambilan data dengan *Hydrodynamic Response* untuk memperoleh nilai dari *Response Amplitude Operator* (RAO) pada *Trimaran Pontoon (Single)* dan *Catamaran Pontoon (Single)*. Kemudian, berdasarkan data yang telah diambil maka dilakukan analisis data terkait perbandingan RAO dari tiap variasi geometri. Gambar 4.11 sampai Gambar 4.16 merupakan perbandingan RAO translasional dari variasi geometri *single*. Sedangkan, untuk Gambar 4.18 sampai Gambar 4.23 merupakan grafik perbandingan RAO rotasional dari variasi geometri *single*. Seluruh data yang dianalisis memiliki nilai frekuensi yang sama dengan rentang 0.21 Hz - 1.88 Hz. *Range* frekuensi yang diambil merupakan semua hasil pemilihan beberapa frekuensi yang sama dari hasil seluruh data RAO yang didapatkan dari simulasi.



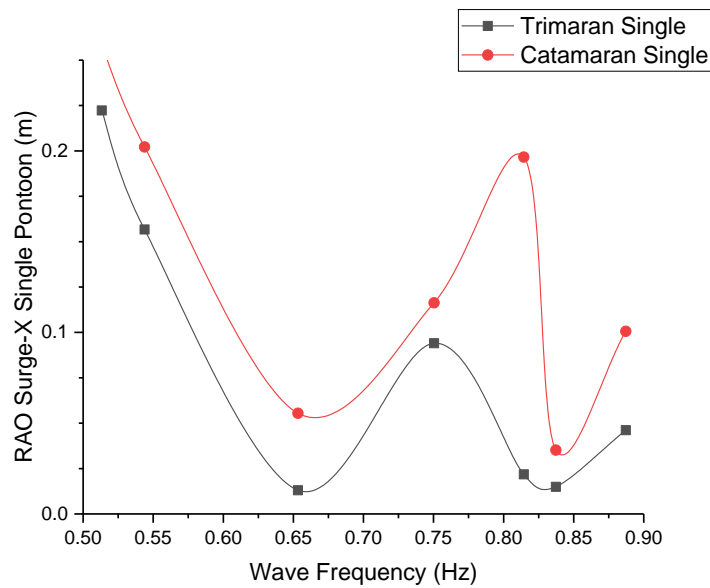
Gambar 4. 10 Gerak Tranlasional pada *Single Pontoon*

Response Amplitude Operator (RAO) pada *Surge* (sumbu-X) merupakan respon gerak *floating photovoltaic* dengan gerak translasi dengan arah kanan (sumbu-X positif) dan arah kiri (sumbu-X negatif). Berdasarkan hasil yang telah didapat pada Gambar 4.11 di bawah ini.



Gambar 4. 11 RAO *Surge* (X) pada *Single Pontoon*

Berdasarkan Gambar 4.11 dan Gambar 4.12 didapat nilai RAO *Surge* (sumbu-X) pada *Trimaran* dan *Catamaran Pontoon* yang *single (non-array)*. Gerak *Surge* yang terjadi pada sumbu-X merupakan respon gerak struktur terapung yang disebabkan oleh *impuls* atau gangguan langsung dari gelombang *irregular* pada arah 180° (sumbu-X positif). Grafik pada Gambar 4.11 menunjukkan bahwa pada frekuensi gelombang *irregular* rendah, model *Trimaran* dan *Catamaran* memiliki kecenderungan gerakan RAO yang besar. Akan tetapi, respon gerak RAO dari *Catamaran Single* cenderung lebih besar dibandingkan respon gerak *Trimaran Single*. Apabila dirata-rata nilai RAO *Surge* pada *Trimaran Pontoon* 0.16 m dan untuk *Catamaran Single* memiliki rata-rata 0.23 m. Artinya, untuk struktur *Trimaran Single* memiliki nilai respon gerak yang lebih kecil dibandingkan *Catamaran Single*.

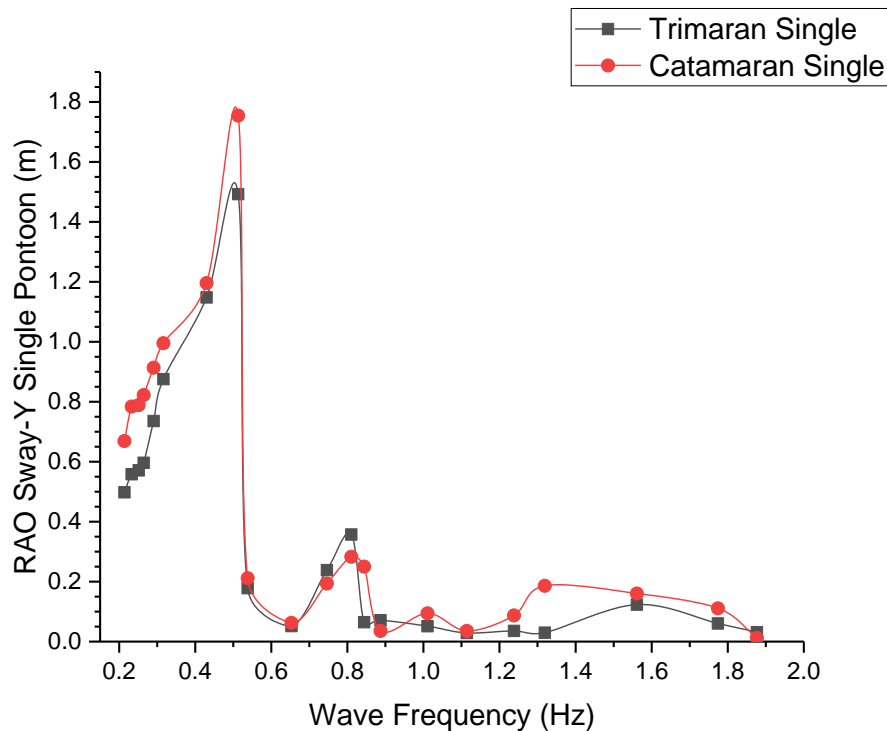


Gambar 4. 12 RAO Surge 4 Mooring Line pada Single Pontoon ($f = 0.51 - 0.89$ Hz)

Parameter dari RAO Surge pada variasi geometri berhubungan langsung dengan luasan bidang sentuh atau *cross-section area* dari *Trimaran* dan *Catamaran Pontoon*. Pada Gambar 4. 8 dan Gambar 4.9 untuk *single pontoon* menunjukkan luasan *area* sentuh gelombang pada *Trimaran* dan *Catamaran Pontoon* dimana luasan bidang sentuh *Trimaran Pontoon* lebih besar dibandingkan *Catamaran Pontoon*. Perbedaan jumlah kaki *pontoon* pun memberikan perbedaan nilai respon gerak yang terjadi dari tiap model. Artinya, nilai RAO Surge yang kecil pada model *Trimaran Pontoon* memiliki kemampuan untuk memperkecil dampak gaya eksitasi gelombang yang mengenai struktur. Hal ini pun didukung dengan bentuk *peak* grafik dari model *Trimaran Pontoon* cenderung lebih rendah jika dibandingkan dengan model *Catamaran Pontoon*. Apabila *trend* grafik diperbesar dengan frekuensi 0.51 Hz – 0.89 Hz (Gambar 4.12), dapat dilihat bahwa nilai respon gerak pertama kali dari kedua model cenderung besar selaras dengan arah datang gelombang pertama kali yang mengenai *pontoon*.

Menurut teori Persamaan Marrison yang merepresentasikan model matematis untuk gaya-gaya yang bekerja pada sebuah struktur terapung, sebagai akibat dari interaksi struktur dengan gelombang. Persamaan ini merupakan total gaya inersia dan *drag* pada sebuah struktur terapung (Techet, 2004). Persamaan Marrison dijelaskan lebih lanjut pada Persamaan 2.12 bahwa respon gerak dari suatu benda sangat berkaitan dengan adanya *cross-section area* pada sebuah struktur benda terapung. Persamaan ini kemudian dikembangkan menjadi *Hydrodynamic Load Model* untuk struktur terapung, seperti pada Persamaan 2.7. Persamaan tersebut menjelaskan bahwa pada sebuah *Floating Solar System*, akan terdapat setidaknya tiga

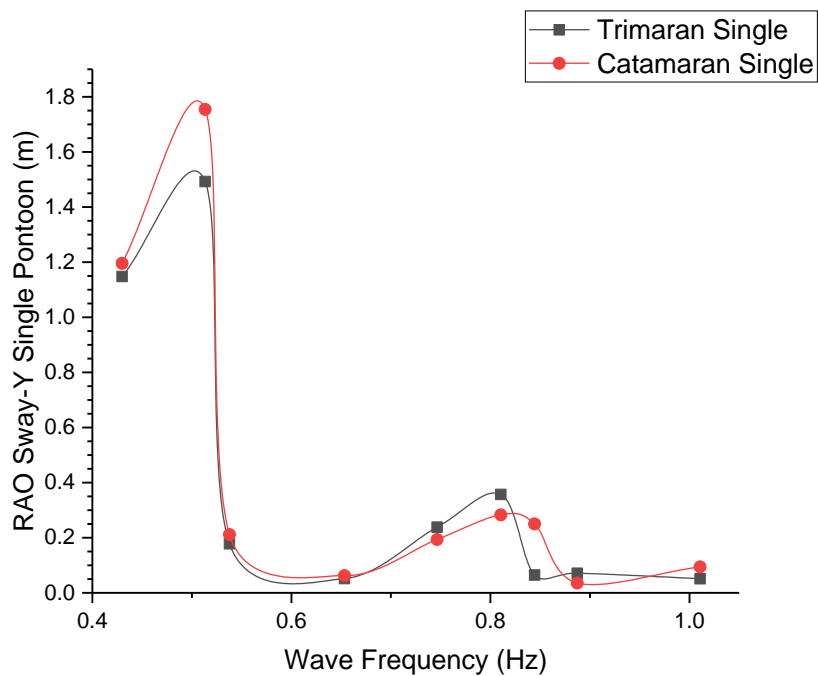
gaya yang bekerja, yaitu Inersia, Gravitasi, dan Viskositas. Salah satu parameter penting dalam penentuan Gaya Hidrodinamik adalah Gaya Froude-Krylov (F^{FK}) yang berbading lurus terhadap *cross-section area* atau luasan (A) sentuh gelombang terhadap struktur *pontoon*. Oleh karena itu, jika semakin besar luasan area maka semakin besar dampak gaya eksitasi gelombang yang terjadi pada struktur terapung.



Gambar 4.13 RAO Sway (Y) pada *Single Pontoon*

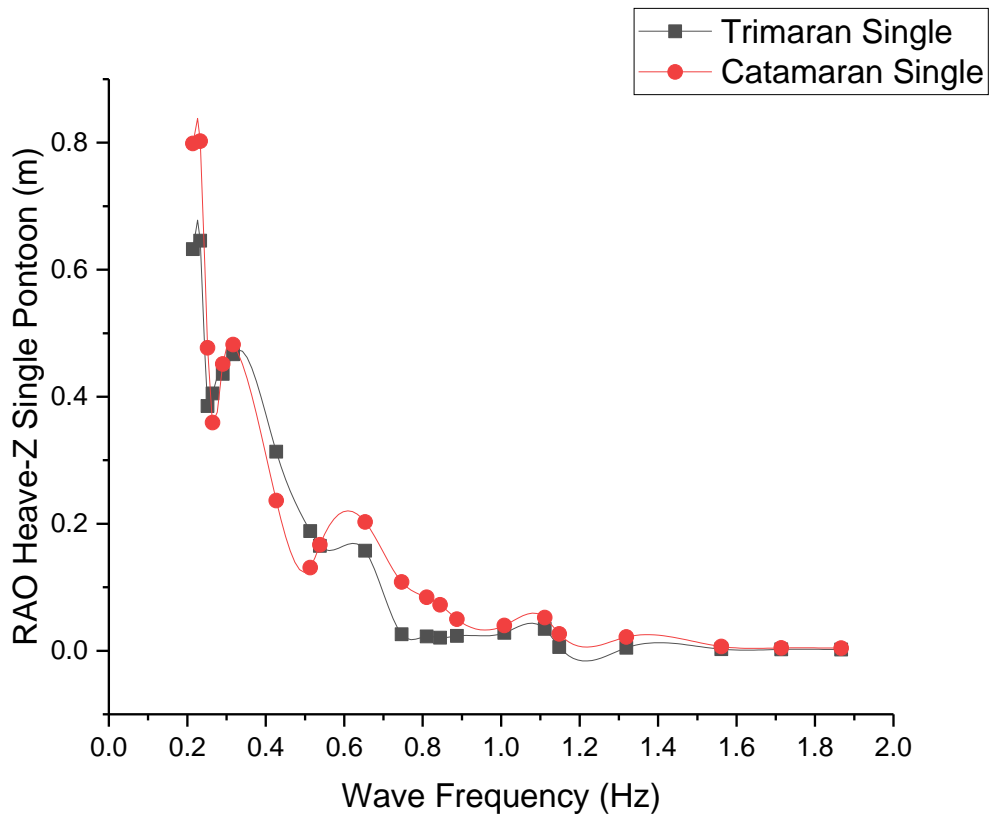
Di sisi lain, grafik RAO Sway (translasi sumbu-Y) pada *single pontoon* ditunjukkan pada Gambar 4.13. Hasil analisis data terkait respon gerak *Trimaran Pontoon single* pada sumbu-Y memiliki hasil cenderung sama dengan respon gerak pada sumbu-X. Artinya, hasil nilai RAO pada *Trimaran Pontoon single* cenderung memiliki *trend* yang lebih rendah jika dibandingkan dengan *trend Catamaran Pontoon single*. Ketika arah gelombang datang mengenai *pontoon* pertama kali, akan terjadi *turbulence* pertama pada *pontoon* searah sumbu-X. Kemudian, untuk pergerakan *pontoon* dalam menangani eksitasi gelombang akan diikuti dengan *turbulence* yang berlanjut ke arah sumbu-Y. Hal ini pun dibuktikan dengan nilai respon gerak *Trimaran Single* dan *Catamaran Single* di frekuensi awal cenderung tinggi. Akan tetapi, respon gerak yang terbentuk membuat nilai RAO Sway dari *Catamaran Single* lebih tinggi dibandingkan *Trimaran Single*.

Hal ini pun didukung pada rata-rata nilai RAO *Sway* yang didapatkan *Trimaran pontoon single* sebesar 0.41 m dan untuk *Catamaran Pontoon single* sebesar 0.5 m. Respon gerak *Sway* terbesar terjadi pada model *Trimaran Pontoon single* sebesar 1.5 meter dan untuk *Catamaran Pontoon single* sebesar 1.8 meter. Hal ini terjadi karena besarnya *cross-section area* pada *Trimaran Pontoon single* lebih besar dibandingkan *Catamaran Pontoon single*. Semakin besar *cross-section area*, semakin besar kemampuan struktur terapung untuk memperkecil dampak gaya eksitasi gelombang datang (Techet, 2004).



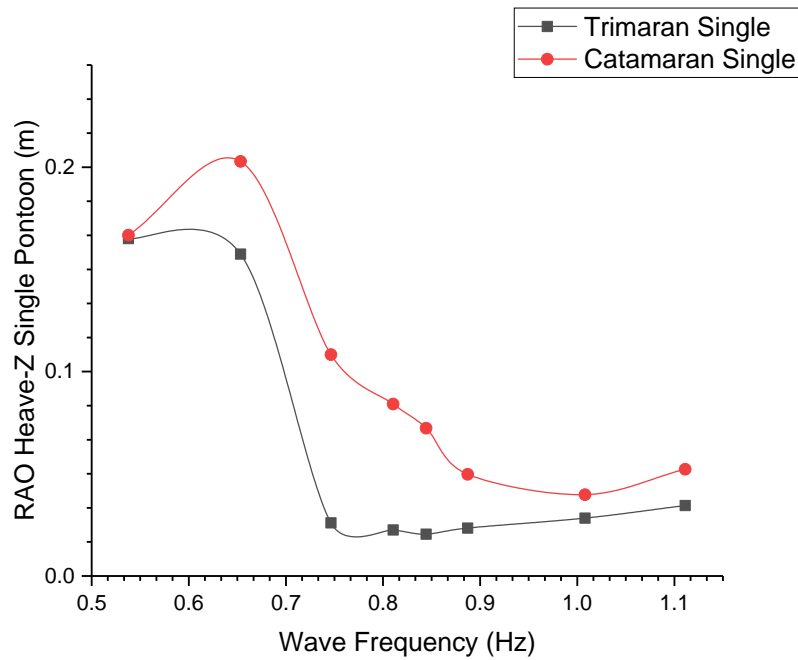
Gambar 4. 14 RAO *Sway* 4 *Mooring Line* pada *Single Pontoon* ($f = 0.43 - 1.01$ Hz)

Gambar 4.14 menunjukkan gambar perbesar pada rentang frekuensi 0.43 – 1.01 Hz. Dimana *peak trend* tertinggi dari *Catamaran Single* dan *Trimaran Single* terjadi pada frekuensi 0.51 Hz. Nilai RAO *Sway* terbesar pada *Catamaran Single* sebesar 1.5 meter dan *Trimaran Single* sebesar 1.8 meter. Maka dari itu, dapat dilihat bahwa nilai respon gerak *Catamaran Single* lebih tinggi apabila dibandingkan dengan *Trimaran Single* pada frekuensi tertinggi. Hal ini pun mendukung penjelasan bahwa *Trimaran Single* merespon datang gelombang lebih baik untuk gerak translasi sumbu-Y. Kemudian, dapat dilihat ketika rentang frekuensi 0.75 – 0.84 Hz terjadi pengurangan eksitasi gelombang yang terjadi lebih dulu oleh *Trimaran Single*.



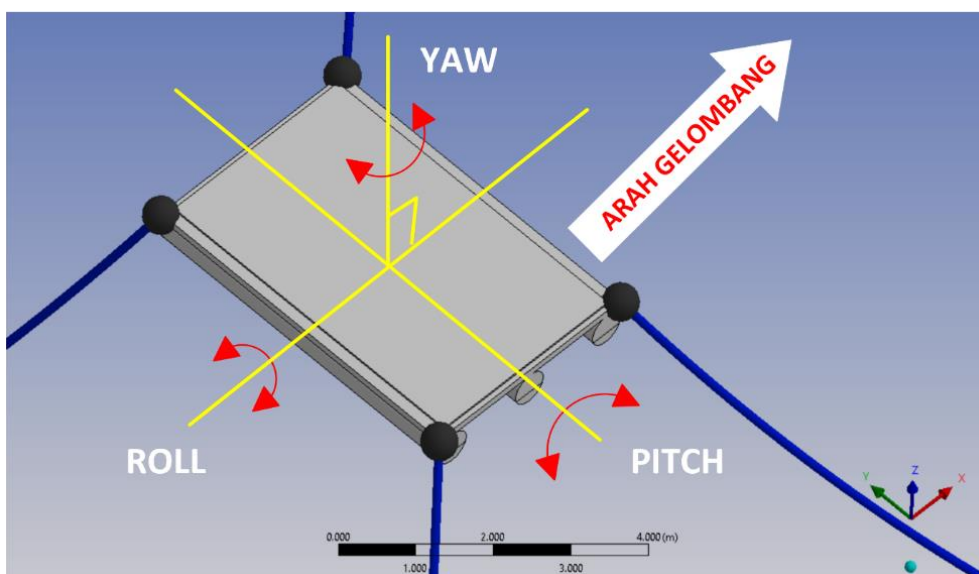
Gambar 4.15 RAO *Heave* (Z) pada *Single Pontoon*

Hasil analisis data pada *Heave* (Z) dengan variasi geometri *single pontoon* ditampilkan pada Gambar 4.15. Pada grafik RAO *Heave* merupakan respon gerak struktur benda terapung terhadap datangnya gelombang yang berpusat di sumbu-Z atau gerakan atas-bawah. Pada Gambar 4.15 menampilkan hasil perbandingan dari *single pontoon Trimaran* dan *Catamaran*. Berdasarkan grafik tersebut, nilai RAO yang terbentuk memiliki *trend* yang sama dengan *trend* RAO *Surge* dan *Sway*. Pada sumbu-Z respon gerak *Catamaran Pontoon single* memiliki *trend peak* yang cenderung lebih besar dibandingkan dengan *trend peak Trimaran Pontoon single*. Hal ini pun didukung dengan nilai rata-rata RAO *single pontoon Catamaran* sebesar 0.22 meter, sedangkan untuk *single pontoon Trimaran* sebesar 0.19 meter. Artinya, rata-rata nilai pergeseran respon gerak *Trimaran Single* lebih kecil dibandingkan *Catamaran Single*. Gambar 4.16 menunjukkan nilai RAO *Heave* lebih detail saat frekuensi gelombang di rentang 0.51 – 1.11 Hz. Gambar tersebut memperlihatkan *turbulence* akhir yang dialami kedua model geometri *single pontoon* yang mengalami pengurangan adanya eksitasi gelombang.



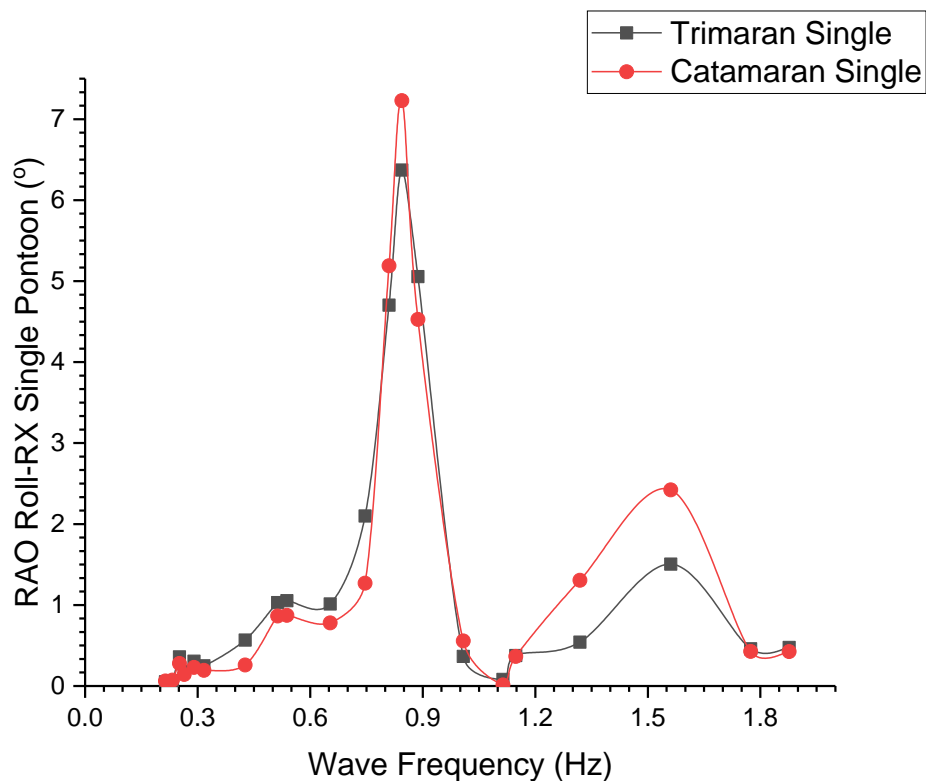
Gambar 4. 16 RAO Heave 4 Mooring Line pada Single Pontoon ($f = 0.51 - 1.11$ Hz)

Di sisi lain, untuk hasil RAO gerakan rotasional *single pontoon* ditunjukkan pada Gambar 4.18 sampai Gambar 4.23 yang meninjau sumbu-RX (*Roll*), sumbu-RY (*Pitch*), dan sumbu-RZ (*Yaw*). Dimana gerak sumbu-RX merupakan gerakan rotasi *pontoon* terhadap sumbu-X, gerak sumbu-RY merupakan gerakan rotasi *pontoon* terhadap sumbu-Y, dan untuk sumbu-RZ merupakan gerakan rotasi *pontoon* terhadap sumbu-Z (Qomarudin & Surabaya, 2017). Detail ilustrasi dari respon gerak sebuah *single pontoon* dapat dilihat dari Gambar 4.17 di bawah ini.



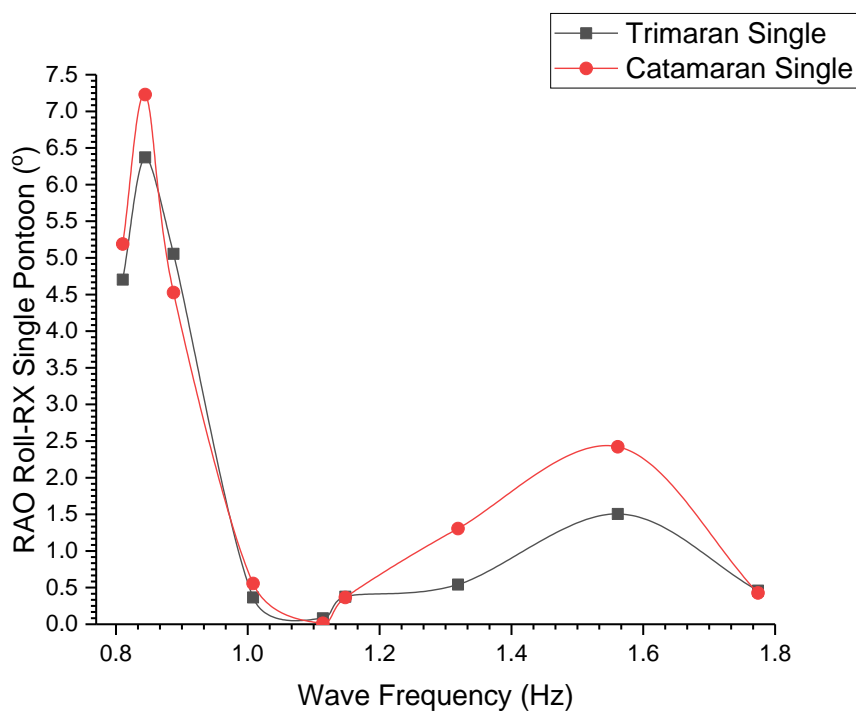
Gambar 4. 17 Gerak Rotasional pada Single Pontoon

Grafik yang ditampilkan pada Gambar 4.18 menunjukkan perbandingan nilai RAO *Roll* (rotasi sumbu-X) *single pontoon Trimaran* dan *Catamaran pontoon* yang cukup signifikan. Respon pergerakan struktur *Catamaran Single* pada rotasional sumbu-X lebih besar jika dibandingkan dengan respon gerak *Trimaran Single*. Hal ini dibuktikan dengan *trend peak* yang terbentuk dari *Catamaran Pontoon single* lebih besar dibandingkan *Trimaran Pontoon single*. Kemudian, adapun nilai rata-rata RAO *Roll* yang terbentuk dari *Catamaran Pontoon single* sebesar 1.31° , sedangkan untuk nilai rata-rata RAO *Roll Trimaran Pontoon single* sebesar 1.28° . Bentuk *trend* yang dihasilkan pada rentang 0.21 – 0.65 Hz menunjukkan kecilnya pergerakan rotasi sumbu-RX ketika gelombang datang, tetapi ketika frekuensi 0.75 Hz menunjukkan lonjakan *turbulence* maksimum yang dialami kedua *pontoon*. Dimana nilai RAO kedua model cenderung sama ketika terjadi *peak turbulence* tertinggi dan akan mengalami penurunan nilai respon gerak rotasional dengan terbentuknya *peak* tertinggi kedua di rentang frekuensi 1.15 – 1.77 Hz. Detail dari gambar *peak* kedua dapat dilihat dari Gambar 4.19.



Gambar 4. 18 RAO *Roll* (RX) pada *Single Pontoon*

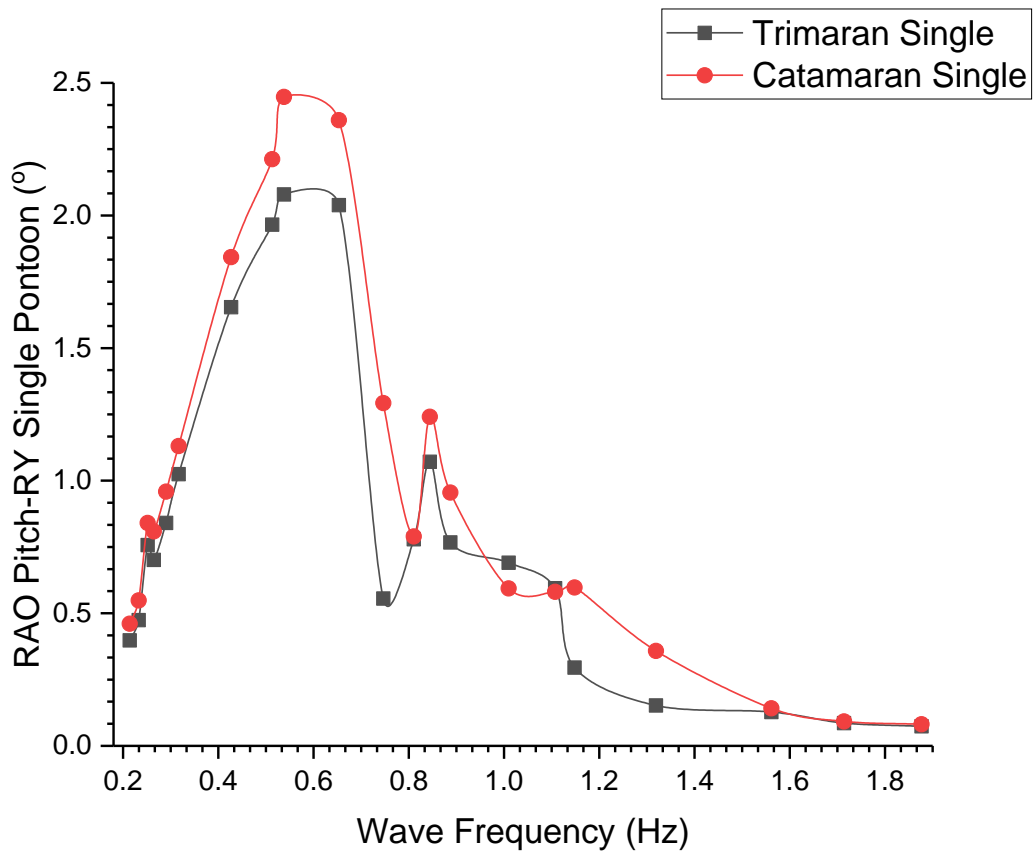
Pada rentang frekuensi 0.81 – 1.77 Hz diberikan detail dari respon gerak rotasional *Trimaran Single* dan *Catamaran Single* yang memperlihatkan bagaimana perbedaan nilai yang terjadi. Di rentang frekuensi 1.01 – 1.11 Hz terjadi penurunan drastis nilai RAO yang kemudian diikuti dengan terbentuknya *peak* kedua di rentang frekuensi 1.15 – 1.77 Hz. Rentang frekuensi di *peak* kedua memperlihatkan nilai RAO *Roll* dari *Catamaran Single* yang lebih besar dari *Trimaran Single*. *Peak* tertinggi nilai RAO *Roll* yang terjadi pada *Trimaran Single* dijelaskan pada Gambar 4.19 dengan nilai RAO *Roll* didapat sebesar 6.37° saat frekuensi gelombang 0.8 Hz. Sedangkan, di saat frekuensi gelombang yang sama *Catamaran Single* memiliki respon gerak yang lebih besar dimana nilai RAO *Roll* yang terbentuk sebesar 7.23° . Gerak rotasional memiliki satuan derajat yang artinya respon gerak dari *pontoon* dihitung dari berapa sudut kemiringan yang terjadi pada dalam menanggapi eksitasi gelombang yang mengenai permukaan *pontoon*.



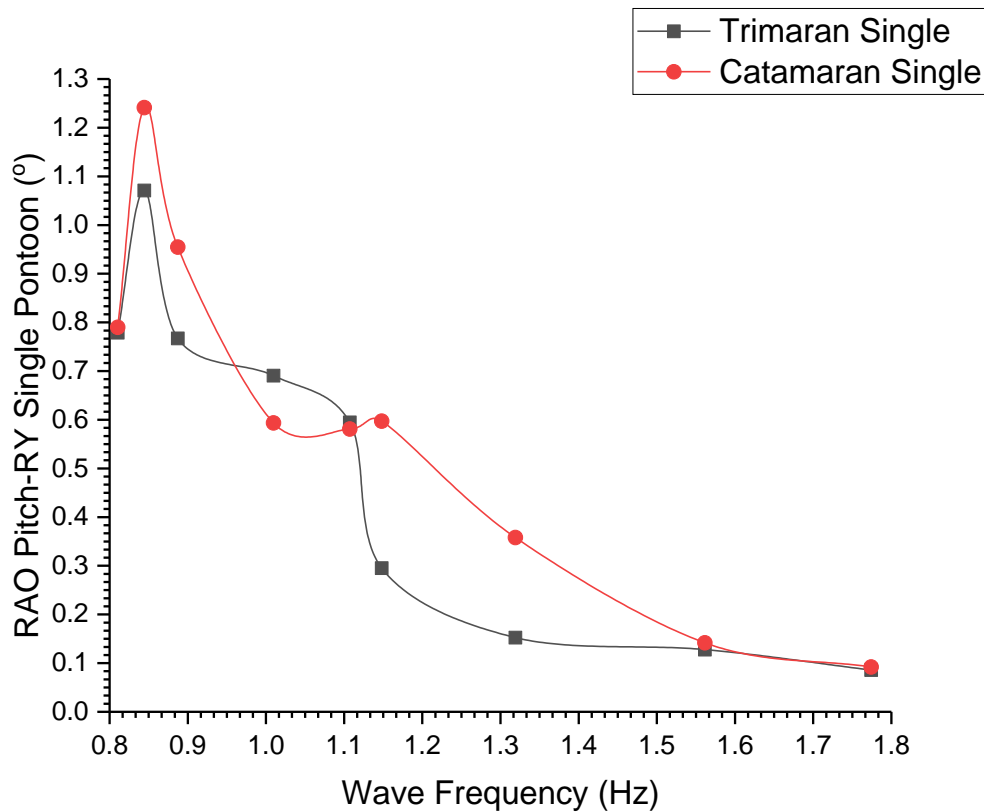
Gambar 4. 19 RAO *Roll* 4 *Mooring Line* pada *Single Pontoon* ($f = 0.81 - 1.77$ Hz)

Selanjutnya, respon gerak rotasional sumbu-RY pada *single pontoon* ditunjukkan pada Gambar 4.20 sampai Gambar 4.21. Gerakan *Pitch* (sumbu-RY) merupakan gerakan rotasional yang tegak lurus terhadap arah datang gelombang *irregular*. Gerakan rotasional ini merepresentasikan respon gerak putar dari *pontoon* FPV ketika menerima datangnya impuls

gelombang pada sumbu-Y. Grafik respon gerak sumbu-RY pada Gambar 4.20 menunjukkan bawah *trend* nilai respon gerak dari kedua model *single pontoon* cenderung semakin kecil seiring dengan penambahan nilai frekuensi. Berdasarkan Gambar 4.20 kecenderungan respon gerak dari *Catamaran Single* lebih besar jika dibandingkan *Trimaran Single*. Akan tetapi, penurunan nilai RAO dari kedua model ini menggambarkan bahwa turbulance susulan di daerah rotasi sumbu-Y diakibatkan dari tegak lurus arah gelombang datang dengan bentuk dari *pontoon*. Sehingga, ketika gelombang datang mengenai *pontoon*, respon gerak pada perputaran sumbu-Y (*Pitch*) yang terjadi akan pasti besar sudut pergerakannya untuk di frekuensi awal dan akan mengalami penurunan nilai RAO setelah melewati frekuensi 0.84 Hz.

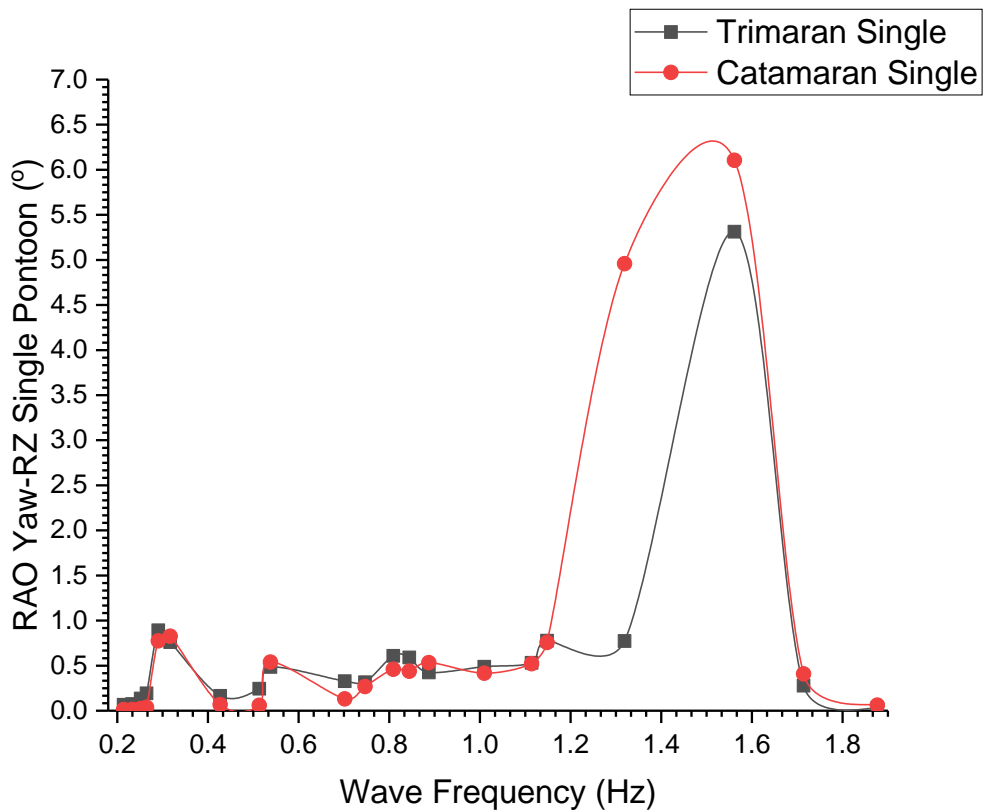


Gambar 4. 20 RAO *Pitch* (RY) pada *Single Pontoon*



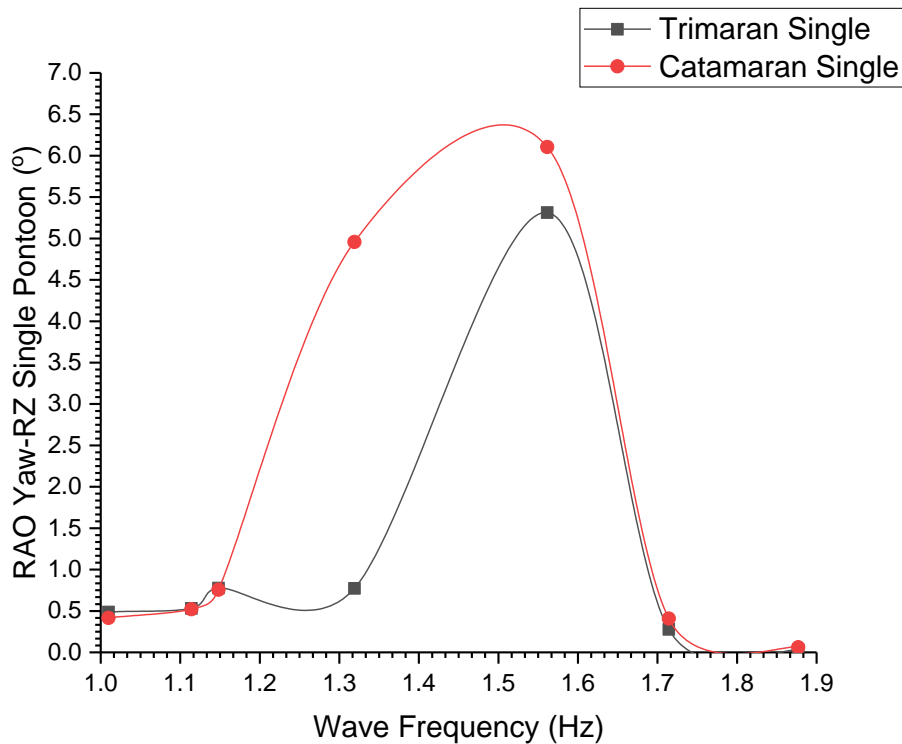
Gambar 4. 21 RAO *Pitch* 4 *Mooring Line* pada *Single Pontoon* ($f = 0.81 - 1.77$ Hz)

Pada Gambar 4.21 merupakan *trend* grafik yang diperkecil rentang frekuensi gelombangnya yaitu 0.81 – 1.77 Hz. Rentang frekuensi tersebut menggambarkan lebih jelas bagaimana perbedaan pergerakan rotasional di sumbu-Y (*Pitch*) pada *Trimaran Single* dan *Catamaran Single*. Nilai rata-rata RAO *Pitch* dari *Catamaran Single* ialah 0.97° , sedangkan untuk *Trimaran Single* ialah 0.82° . Artinya, respon gerak *Catamaran Single* mengalami sudut perputaraan di sumbu-Y yang lebih besar dibandingkan *Trimaran Single*. Hal ini pun didukung oleh Gambar 4.21 dimana *Trimaran Single* lebih dahulu mengalami penurunan nilai eksitasi gelombang dari frekuensi 0.81 – 1.77 Hz. Nilai RAO *Pitch* tertinggi terjadi saat di frekuensi 0.54 Hz dimana untuk *Catamaran Single* menunjukkan nilai RAO sebesar 2.5 Hz, sedangkan untuk *Trimaran Single* sebesar 2.1 Hz. Pada frekuensi tersebut merupakan sudut rotasi terjauh yang terjadi dari kedua model *single pontoon*.



Gambar 4. 22 RAO *Yaw* (RZ) pada *Single Pontoon*

Di sisi lain, pada Gambar 4.22 menjelaskan respon gerak *Catamaran Single* dan *Trimaran Single* yang sama dengan respon gerak rotasional sumbu lainnya. Apabila keduanya ditinjau dari rotasional sumbu-Z, *trend peak Trimaran single* yang terbentuk lebih rendah dibandingkan *Catamaran single*. Artinya, pada sudut respon gerak rotasional yang terbentuk di sumbu-Z dari *Trimaran single* lebih kecil daripada *Catamaran single*. Hal ini pun dibuktikan dari rata-rata nilai RAO *Yaw* dari *Trimaran Single* sebesar 0.64° dan untuk *Catamaran Single* sebesar 0.83° . Akan tetapi, jika dilihat lebih seksama bentuk dari *trend* yang terbentuk menggambarkan bahwa respon gerak dari *single pontoon* diawali dengan nilai RAO yang cenderung stabil walaupun pada frekuensi 0.29 Hz dan 0.54 Hz terbentuk *peak* kecil. Datangnya gelombang yang mengenai permukaan *pontoon* akan mengakibatkan respon gerak akhir pada sumbu-RZ atau putaran gerak di sumbu-Z karena arahnya yang tegak lurus terhadap arah gelombang datang.



Gambar 4. 23 RAO Yaw 4 Mooring Line pada Single Pontoon ($f = 1.15 \text{ Hz} - 1.88 \text{ Hz}$)

Pada Gambar 4.23 menggambarkan detail keadaan perbedaan nilai *peak* RAO tertinggi yang terjadi pada *single pontoon* saat rentang gelombang frekuensi 1.01 – 1.88 Hz. Dimana nilai RAO Yaw tertinggi pada *Catamaran Single* sebesar 6.1° , sedangkan untuk *Trimaran Single* sebesar 5.3° . Hal ini pun dapat disimpulkan bahwa pada respon gerak rotasional sumbu-Z pada *Triamran Single* lebih rendah dibandingkan dengan *Catamaran Single*.

Simulasi yang telah dilakukan pada *Trimaran* dan *Catamaran Single* menghasilkan beberapa nilai RAO yang cukup signifikan, baik pada gerak translasi maupun gerak rotasi yang ditunjukkan pada Tabel 4.7. Dari *single pontoon* yang telah disimulasikan, adapun diperoleh nilai RAO yang memiliki cenderung sama. Jika dibandingkan nilai RAO translasional dan rotasional dari *Catamaran Single* dan *Trimaran Single* (4 mooring line dan *irregular wave* 0.3 meter) memiliki karakteristiknya masing-masing. Pada respon gerak tranlasi dan rotasi dari kedua model *single pontoon* dapat disimpulkan bahwa *Trimaran Single* memiliki nilai respon gerak yang lebih rendah dibanding dengan *Catamaran Single*. Nilai RAO yang telah dibandingkan akan dibahas apakah sudah memenuhi acuan dari nilai PIANC pada Bab 4.6 dimana acuan ini merupakan standar nilai gerak sebuah benda terapung. Kemudian, adapun

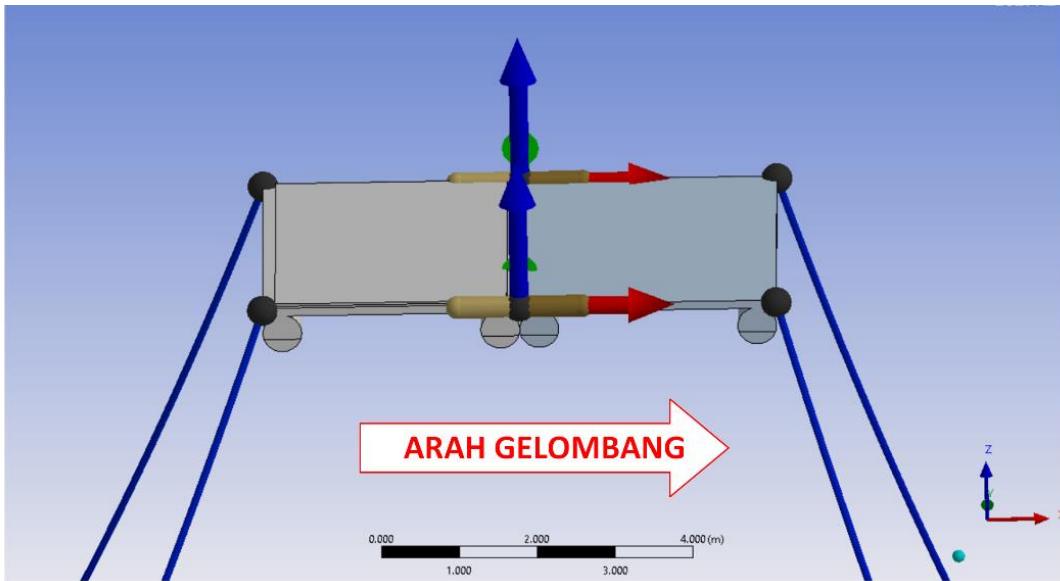
beberapa faktor yang mempengaruhi nilai respon gerak sebuah *pontoon* yang nanti akan dibahas pada Sub-bab 4.3.3, khususnya keterkaitan respon gerak dengan variasi geometri.

Tabel 4. 7 Ringkasan Perbandingan Nilai RAO *Single Pontoon*

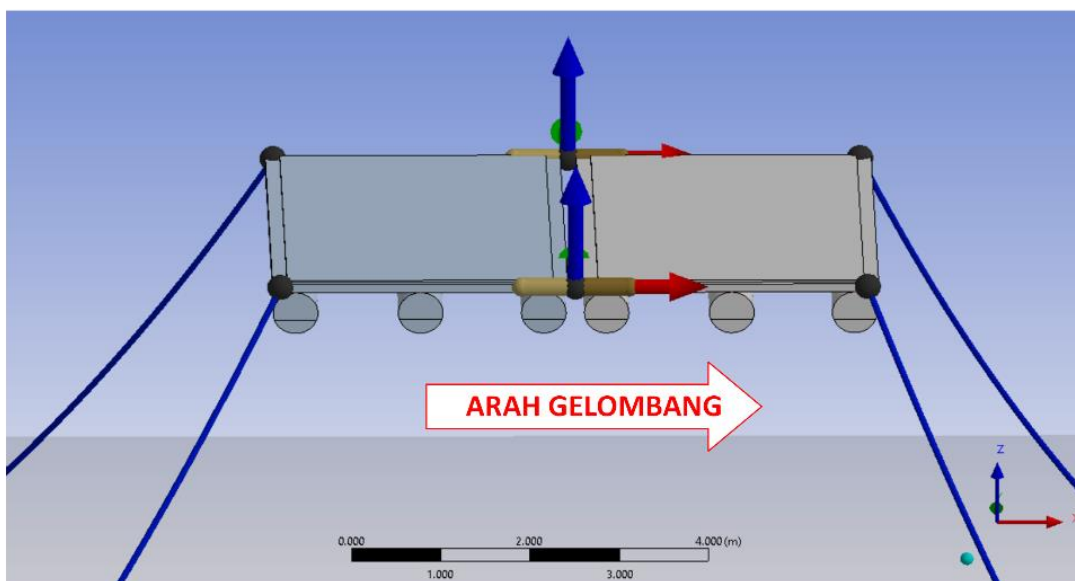
Sudut Derajat Kebebasan (6 DOF)	<i>Trimaran Pontoon (Single)</i>	<i>Catamaran Pontoon (Single)</i>
<i>Surge X (m)</i>	0.17	0.23
<i>Sway Y (m)</i>	0.41	0.50
<i>Heave Z (m)</i>	0.19	0.22
<i>Roll RX (°)</i>	1.28	1.31
<i>Pitch RY (°)</i>	0.82	0.97
<i>Yaw RZ (°)</i>	0.64	0.83

4.3.2 Respon Gerak *Array Pontoon* Berdasarkan 6 Sudut Derajat Kebebasan

Nilai RAO hasil respon gerak sebuah model *pontoon* sangat berpengaruh pada luasan daerah *pontoon* yang tercelup dan bersentuhan langsung dengan gelombang. Adapun pembaharuan dari *Trimaran Pontoon* dan *Catamaran Pontoon* yang di-*array* untuk dianalisis apakah model ini dapat mengurangi pergeseran gerak *pontoon* dalam menghadapi eksitasi gelombang yang terjadi. Pada sub-bab ini akan membahas bagaimana model *Catamaran Array* dan *Trimaran Array* dalam merespon datangnya gelombang jika dilakukan penggabungan dua *pontoon* pada tiap model. Analisis *pontoon* yang akan dibahas ialah pada keadaan 4 *mooring line* dengan kedalaman 20 m dan pada *irregular wave* 0.3 meter.

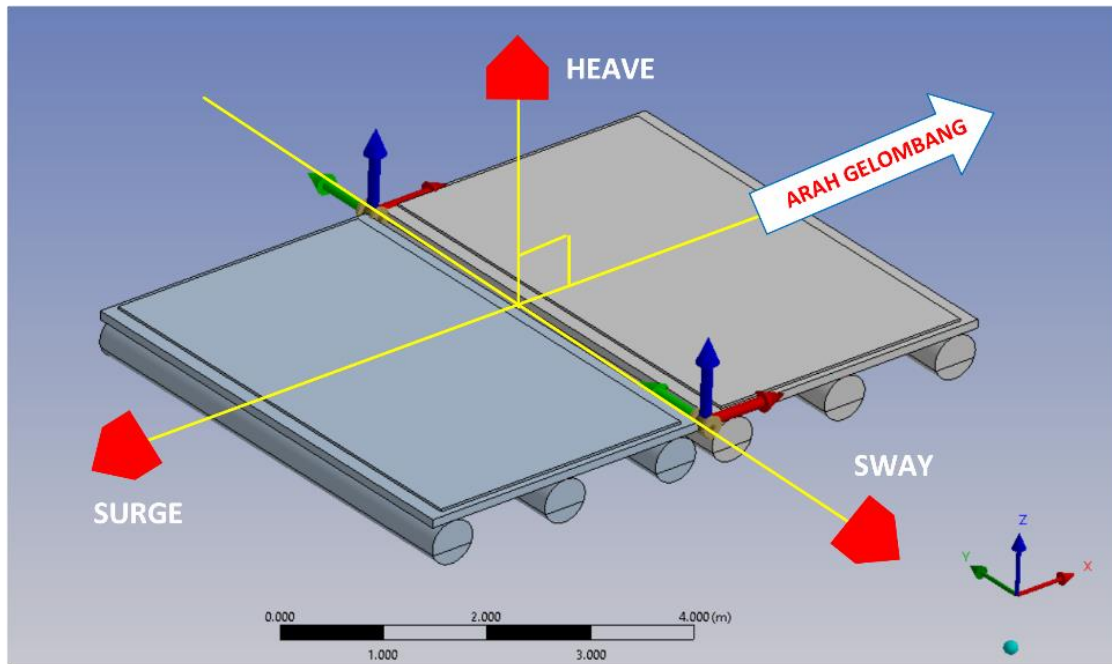


Gambar 4. 24 Simulasi 4 *Mooring Line* pada *Catamaran Array*



Gambar 4. 25 Simulasi 4 *Mooring Line* pada *Trimaran Array*

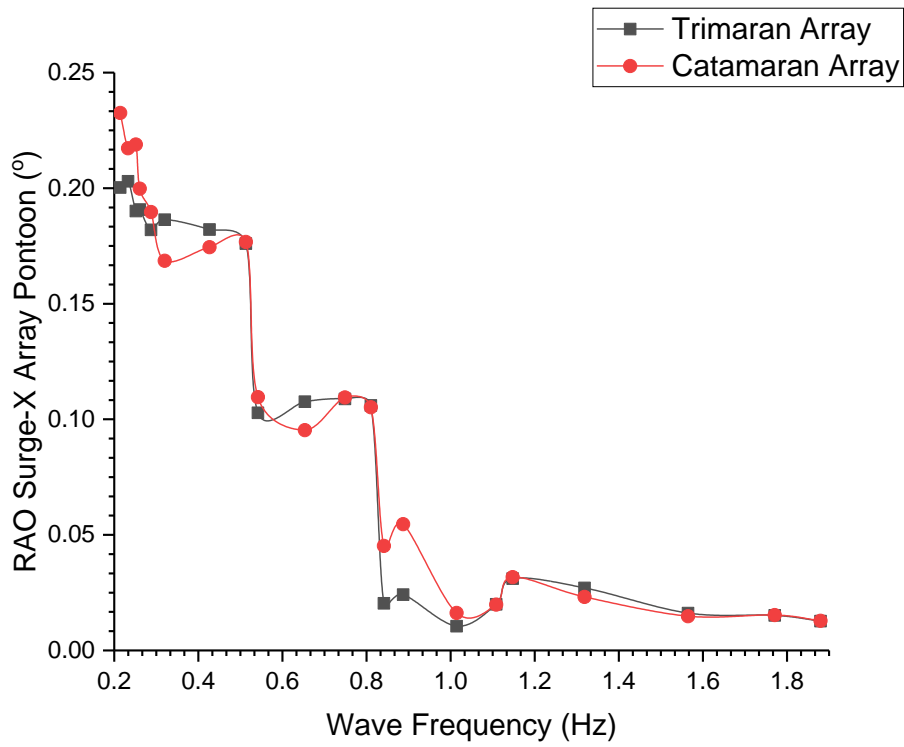
Adapun gambar simulasi yang dilakukan menggunakan *Hydrodynamic Diffraction* dan *Hydrodynamic Response* pada tiap keadaan di tiap model *pontoon*. *Array pontoon* yang dilakukan di simulasi CFD ini menggabungkan dua *units* yang di-*array* untuk dianalisis bagaimana respon gerak hidrodinamik dari tiap sudut derajat kebebasan. Adapun gambar simulasi terkait *array pontoon* dengan arah gelombang yang terbentuk yang ditunjukkan pada gambar berikut. Simulasi *array pontoon* ditunjukkan pada Gambar 4.24 dan 4.25 di atas berikut.



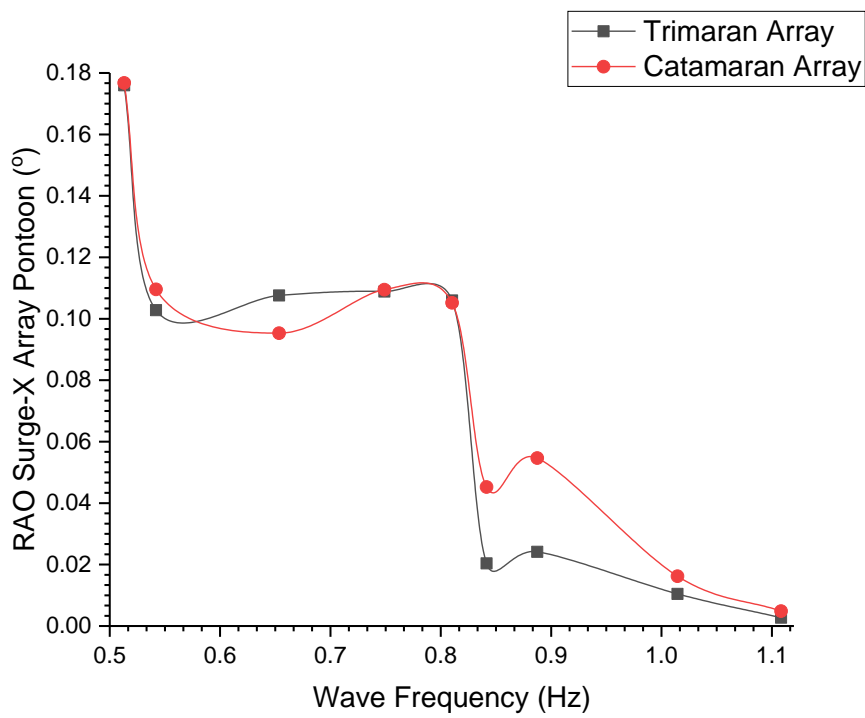
Gambar 4. 26 Gerak Translasi pada *Array Pontoon*

Gambar 4.26 di atas merupakan ilustrasi dari pergerakan translasional pada *array pontoon*. Dimana berdasarkan gambar di atas, menunjukkan bahwa gerakan *Surge* (sumbu-X) merepresentasikan gerakan *array pontoon* ke arah kanan-kiri, gerakan *Sway* (sumbu-Y) merupakan gerakan *array pontoon* ke arah depan-belakang, dan untuk gerakan *Heave* (sumbu-Z) merupakan gerakan *array pontoon* ke arah atas-bawah. Adapun arah gelombang yang terjadi sama dengan *single pontoon*, yaitu searah sumbu-X positif.

Respon gerak translasi *array pontoon* untuk gerak translasi ditunjukkan pada Gambar 4.27 – 4.31. Pada Gambar 4.27 yang menggambarkan nilai RAO *Surge* (translasi sumbu-X) dari *Trimaran Array* dan *Catamaran Array* pada frekuensi 0.21 – 1.88 Hz. Apabila melihat *trend* grafik yang terbentuk, *trend* respon gerak yang terbentuk pada kedua model *array pontoon* cenderung sama dengan respon gerak sumbu-X pada *single pontoon*. Dimana hal ini dapat dibuktikan dengan nilai respon gerak *array pontoon* di rentang frekuensi 0.21 – 0.51 Hz merupakan *peak* tertinggi yang terjadi tepat saat *pontoon* mengalami *turbulence* pertama kali. Nilai RAO rotasional *surge-X* tertinggi yang terjadi pada *Trimaran Array* ialah 0.20 m dan untuk *Catamaran Array* ialah 0.23 m. Akan tetapi, terjadi penurunan nilai RAO *Surge* yang semakin mengecil diikuti dengan penambahan frekuensi.



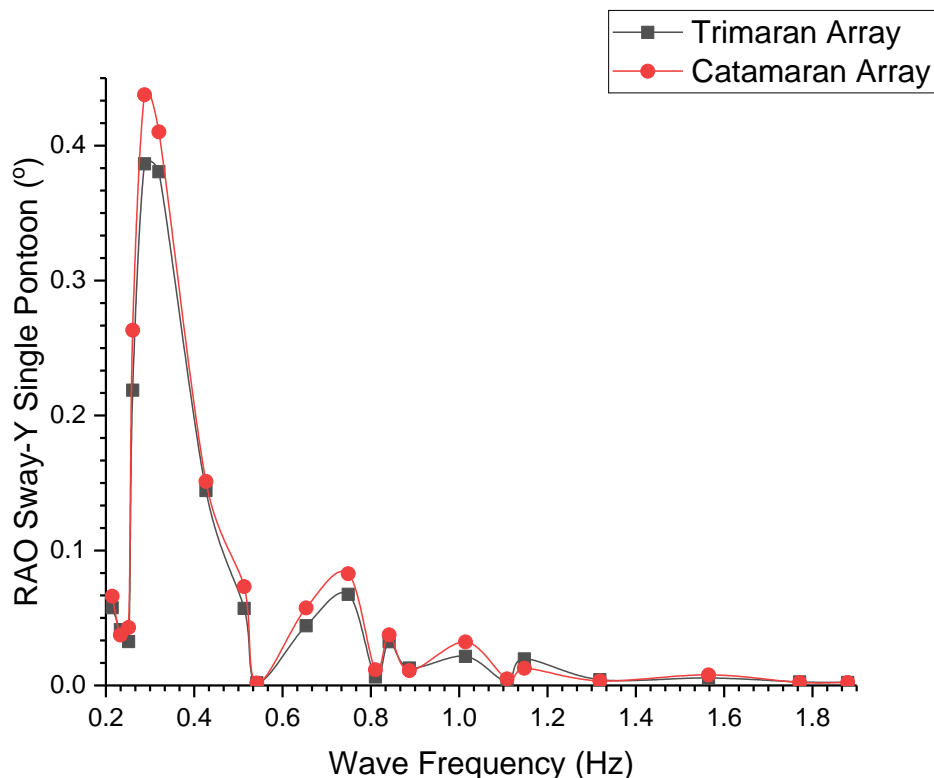
Gambar 4. 27 RAO Surge (X) pada Array Pontoon



Gambar 4. 28 RAO Surge (X) 4 mooring line pada Array Pontoon ($f = 0.51 - 1.11$ Hz)

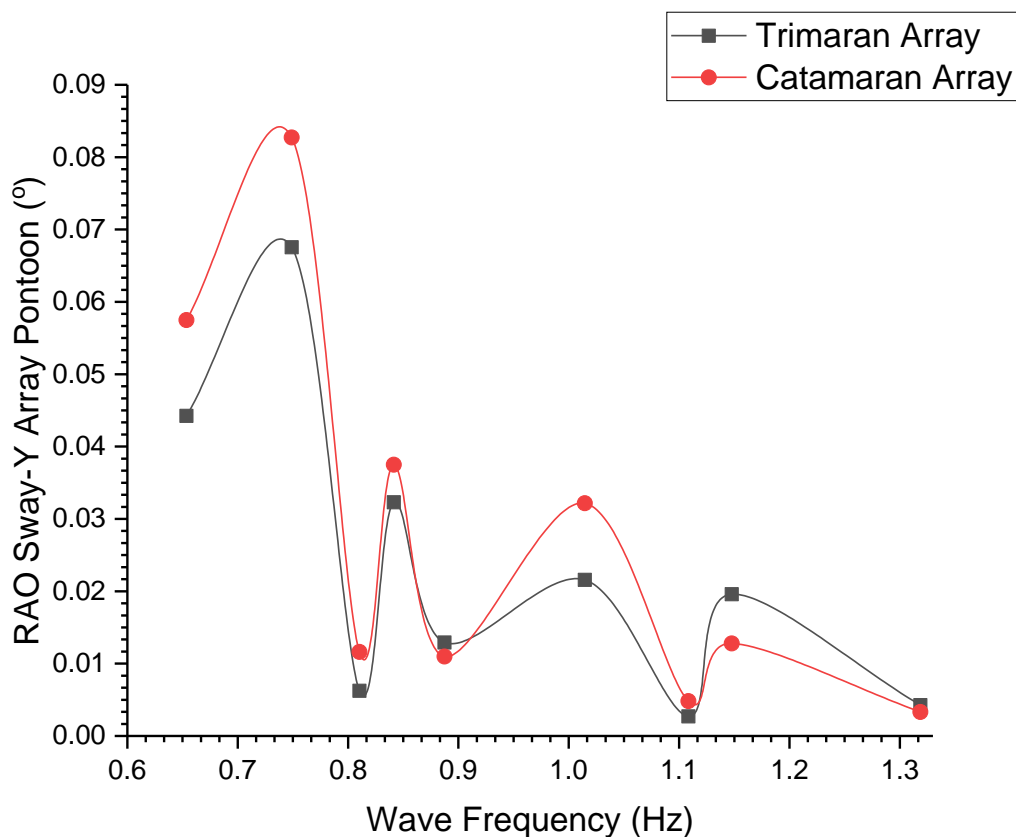
Penurunan nilai RAO *Surge* pada *array pontoon* dapat dilihat dari Gambar 4.28 dengan rentang frekuensi 0.51 – 1.11 Hz. Nilai respon gerak di sumbu-X merupakan nilai pertama dari pergeseran *pontoon* akibat datangnya gelombang pertama kali. Berdasarkan Gambar 4.28 dapat dilihat bahwa pengurangan nilai RAO lebih besar dialami *Trimaran Array* dan hal ini dapat dilihat pada frekuensi 0.84 Hz dimana *Catamaran Array* pun mengalami penurunan nilai RAO, tetapi nilainya masih lebih rendah daripada *Trimaran Array*. Rata-rata nilai RAO *Surge* pada *Trimaran Array* ialah 0.10 m dan *Catamaran Array* 0.11 m.

Kemudian, adapun hasil dari perbandingan dari nilai RAO *Sway* (tranaslional sumbu-Y) dari *Trimaran Array* dan *Catamaran Array* yang ditunjukkan pada Gambar 4.29. Berdasarkan nilai RAO yang terbentuk didapat rata-rata RAO *Sway* dari *Trimaran Array* sebesar 0.07 meter dan untuk *Catamaran Array* sebesar 0.08 meter. Artinya pada translasional sumbu-Y nilai RAO dari *Catamaran Array* lebih tinggi dibandingkan dengan *Trimaran Array*. Akan tetapi, *peak* yang terbentuk dari kedua model *array pontoon* mengalami penurunan nilai RAO *Sway* yang semakin stabil diikuti penambahan besar frekuensi.



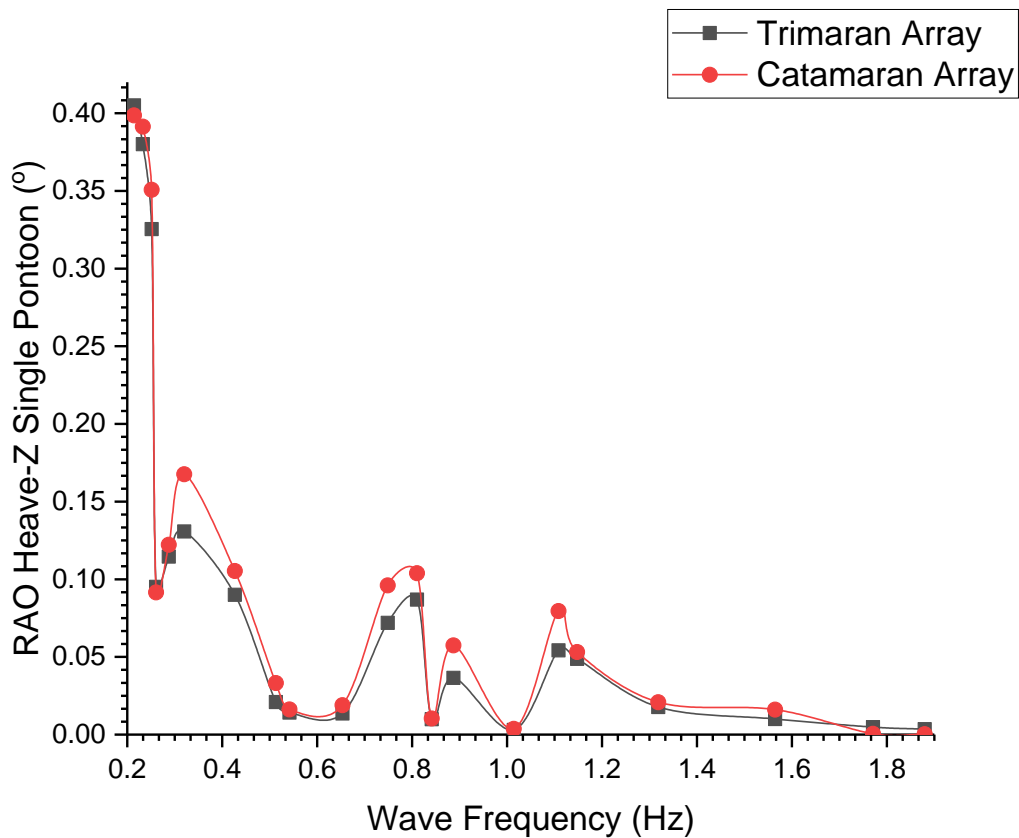
Gambar 4. 29 RAO *Sway* (Y) pada *Array Pontoon*

Nilai RAO *Sway* pada frekuensi 0.65 – 1.32 Hz (Gambar 4.30) memperlihatkan lebih detail perbedaan dari respon gerak *Catamaran Array* dan *Trimaran Array*. Pada rentang frekuensi ini, *peak* yang terbentuk mengalami pengulangan berkali-kali namun *trend*-nya semakin mengecil dan mengalami kestabilan akibat penurunan RAO setelah di melewati frekuensi 1.32 Hz.



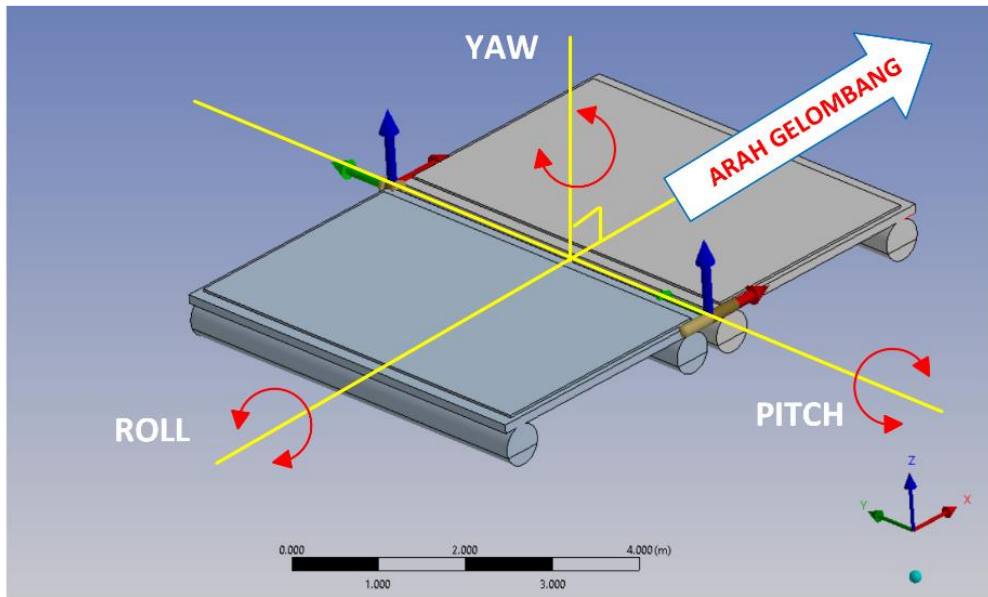
Gambar 4. 30 RAO *Sway* (Y) 4 *Mooring Line* pada *Array Pontoon* ($f = 0.65 - 1.32$ Hz)

Di sisi lain, adapun *trend* grafik nilai RAO *Heave* (tranlasional sumbu-Z) pada *Trimaran Array* dan *Catamaran Array* yang ditunjukkan pada Gambar 4.31 di bawah berikut. Berdasarkan grafik tersebut, dapat dilihat bahwa nilai respon gerak *Catamaran Array* pada sumbu-Z cenderung lebih besar dibandingkan dengan *Trimaran Array*. Rata-rata nilai RAO *Heave* dari *Catamaran Array* sebesar 0.1 meter dan *Trimaran Array* sebesar 0.09 meter. Respon gerak dari kedua model *array pontoon* pada frekuensi 0.21 – 0.26 Hz semakin mengecil dan diakhiri dengan nilai RAO *Heave* yang cenderung sama pada frekuensi 1.56 – 1.88 Hz.



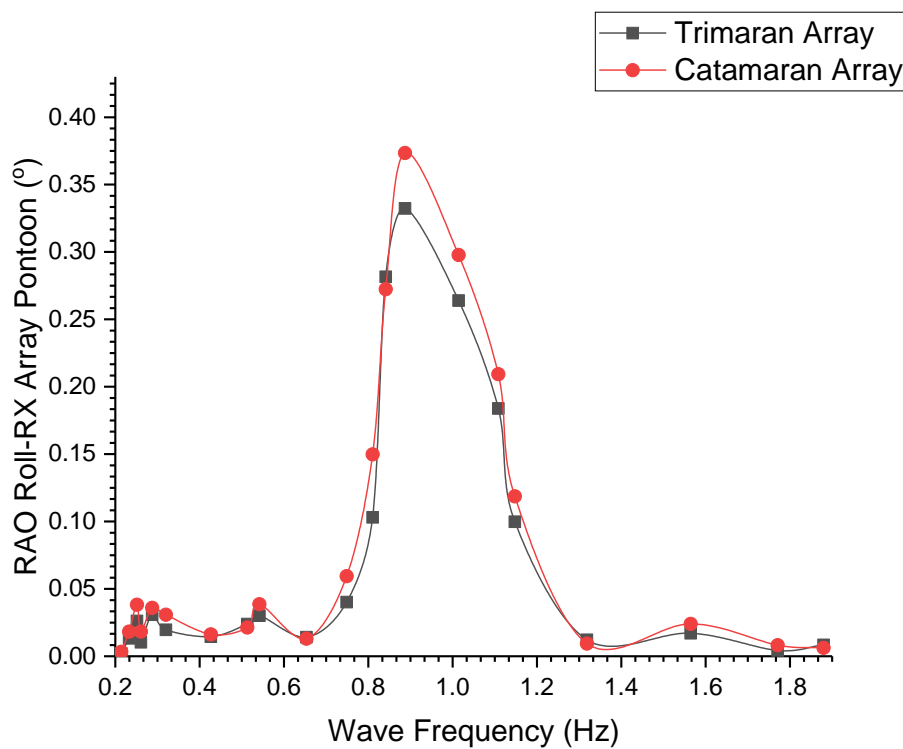
Gambar 4.31 RAO *Heave* (Z) pada *Array Pontoon*

Kemudian, Gambar 4.31 merupakan grafik nilai respon gerak *array pontoon* pada sumbu-Z yang *trend*-nya cenderung sama seperti sumbu-Y. Nilai RAO di frekuensi rendah diawali dengan *peak* tertinggi dari respon gerak kedua model. Artinya, terjadi pergerakan maksimum ke arah sumbu-Z ketika frekuensi 0.21 Hz yang kemudian dilanjutkan penurunan nilai respon gerak secara drastis pada frekuensi 0.26 Hz. Setelah itu, terbentuk beberapa *peak* berikutnya yang lebih kecil, tetapi cenderung mengecil dan menuju ke keadaan yang stabil pada *array pontoon*. Respon gerak sumbu *Heave* baik dari *Trimaran Array*, maupun *Catamaran Array* menunjukkan terbentuknya *peak* yang berulang sampai frekuensi 1.3 Hz. Akan tetapi, pergerakan yang terbentuk juga menunjukkan nilai RAO yang semakin menurun seiring bertambahnya nilai frekuensi yang terbentuk. Nilai RAO menurun dan semakin stabil ketika melewati frekuensi 1.3 Hz sampai 1.8 Hz.



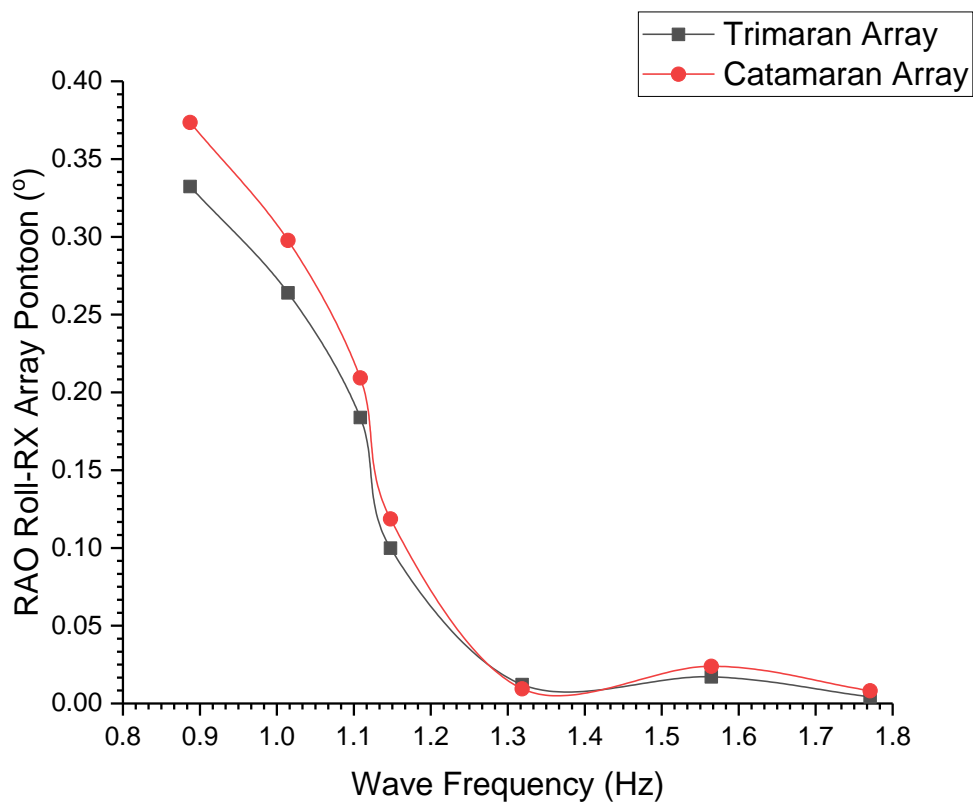
Gambar 4. 32 Gerak Rotasional pada *Array Pontoon*

Di sisi lain, didapat nilai RAO pada gerak rotasional untuk *array pontoon* yang merepresentasikan respon gerak pada sumbu-RX, sumbu-RY, dan sumbu-RZ pada *Trimaran Array* dan *Catamaran Array*. *Trend* grafik gerak rotasional yang terbentuk dari kedua model *array pontoon* ditunjukkan pada Gambar 4.33 – 4.38 di bawah ini.



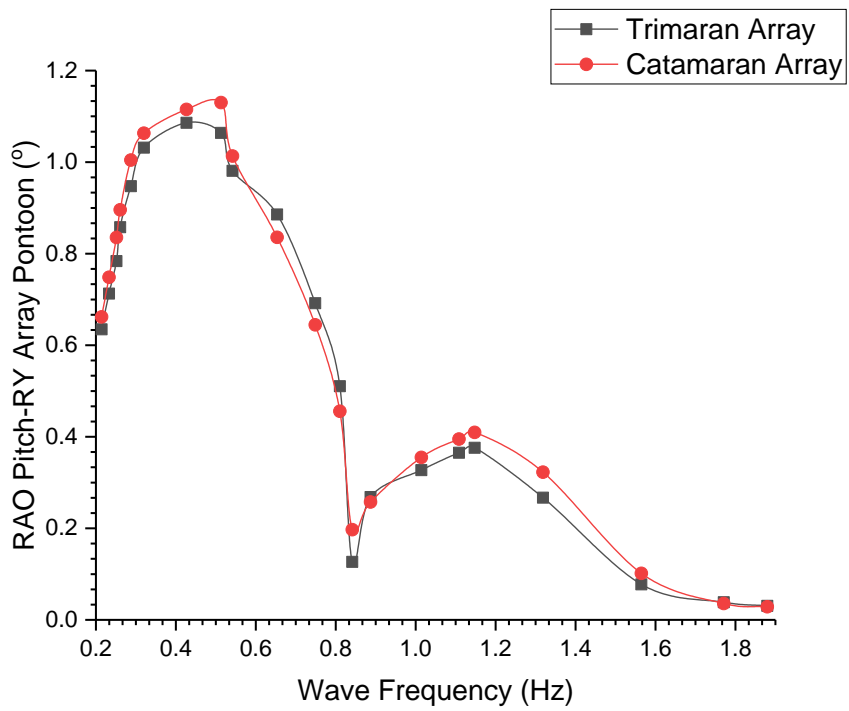
Gambar 4. 33 RAO Roll (RX) pada *Array Pontoon*

Pergerakan rotasional sumbu-X (RX), memiliki pergerakan yang justru maksimum ketika berada di rentang frekuensi 0.75 – 1.15 Hz. Apabila melihat Gambar 4.33 terbukti memang pergerakan awal kedua model *array pontoon* diawali gerakan yang cukup stabil walaupun terbentuk *peak* kecil. Setelah melewati *peak* tertinggi, terjadi respon gerak keduanya yang menurun dan cenderung stabil. Gambar 4.34 memperlihatkan detail respon gerak kedua model di frekuensi 0.89 – 1.77 Hz. Dimana nilai RAO *Trimaran Array* lebih rendah dibandingkan *Catamaran Array*.

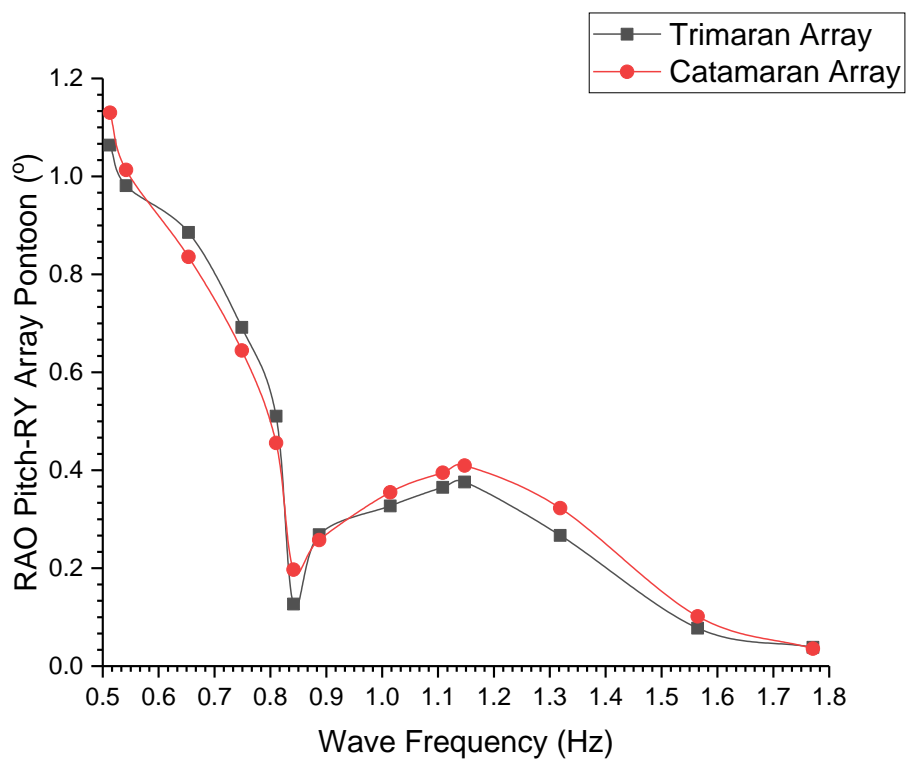


Gambar 4. 34 RAO Roll (RX) 4 Mooring Line pada Array Pontoon ($f = 0.89 - 1.77$ Hz)

Kemudian, dapat dilihat pada Gambar 4.35 dan 4.36 respon gerakan rotasional sumbu-Y (RY). Dimana respon gerak *pitch* pada *array pontoon* cenderung sama dengan respon gerak pada *single pontoon*. Pergerakan *array pontoon* diawali nilai RAO yang cenderung semakin naik dan membentuk *peak* tertinggi pada frekuensi 0.43 Hz. Kemudian, karakteristik gerak sumbu *pitch* memang memperlihatkan respon gerak kedua model yang memiliki nilai RAO yang tinggi dari sumbu lainnya.

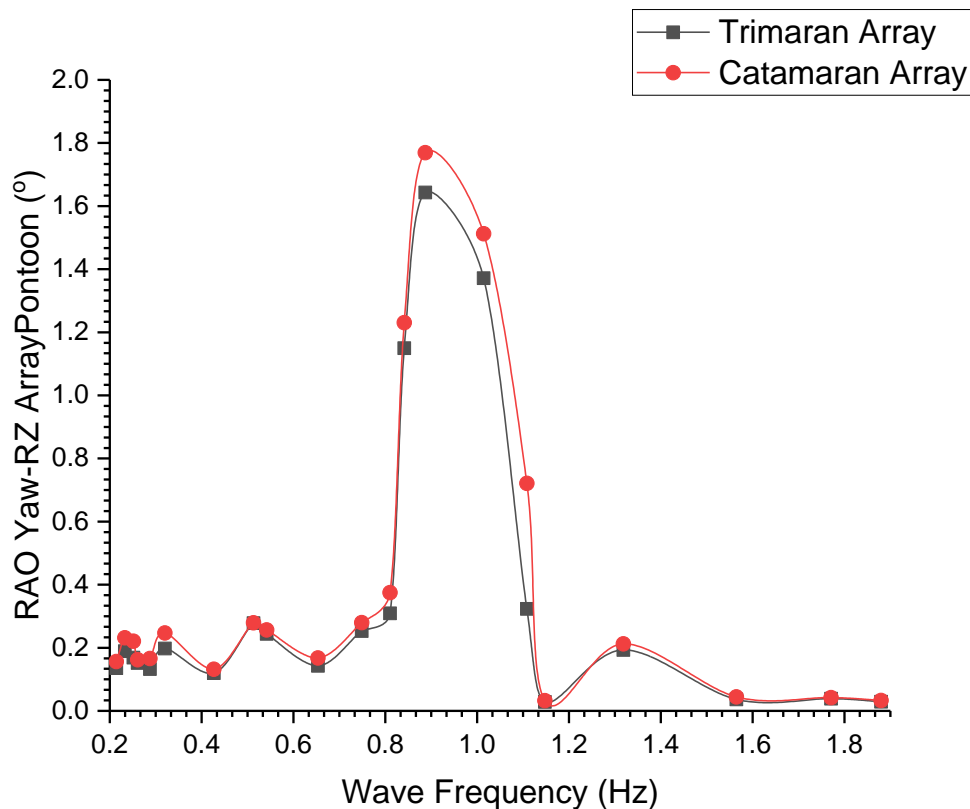


Gambar 4. 35 RAO *Pitch* (RY) pada *Array Pontoon*

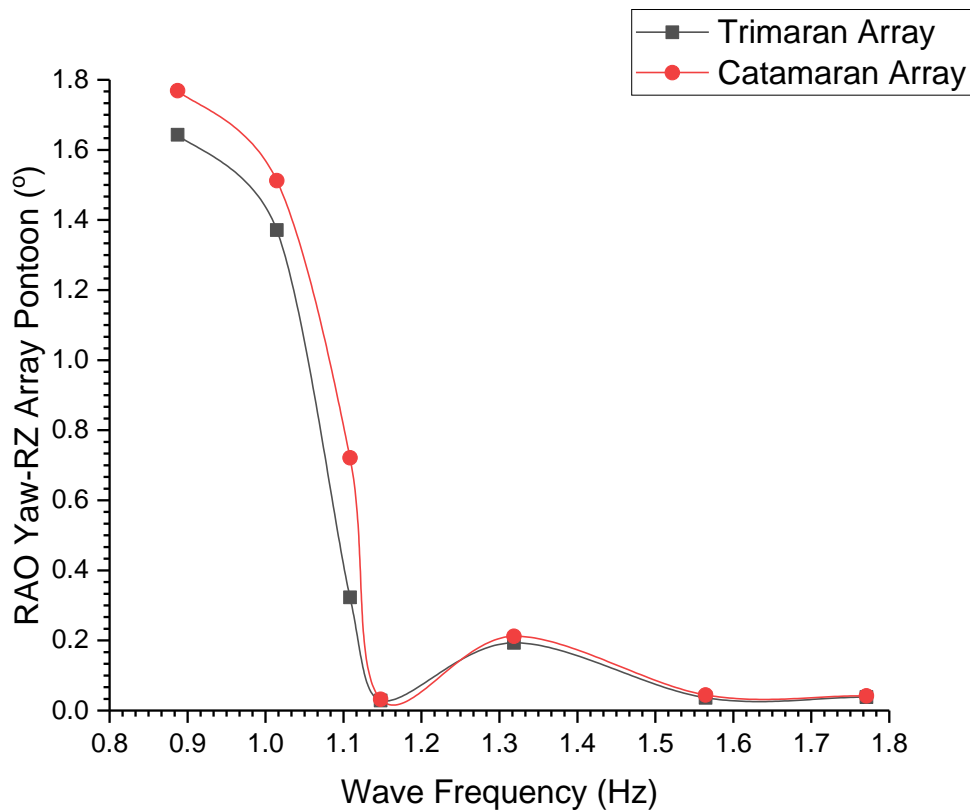


Gambar 4. 36 RAO *Pitch* (RY) 4 *Mooring Line* pada *Array Pontoon* ($f = 0.81 - 1.77$ Hz)

Kemudian, dapat dilihat pada Gambar 4.35 dan 4.36 respon gerakan rotasional sumbu-Y (RY). Dimana respon gerak *Pitch* pada *array pontoon* cenderung sama dengan respon gerak pada *single pontoon*. Pergerakan *array pontoon* diawali nilai RAO yang cenderung semakin naik dan membentuk *peak* tertinggi pada frekuensi 0.43 Hz. Kemudian, karakteristik gerak sumbu *Pitch* memang memperlihatkan respon gerak kedua model yang memiliki nilai RAO yang tinggi dari sumbu lainnya. Akan tetapi, pada *Pitch array pontoon* memiliki nilai RAO yang lebih rendah dibandingkan model *single pontoon*. *Trend* respon gerak *Pitch* pada *array pontoon* juga memperlihatkan nilai RAO yang semakin menurun setelah melewati *peak* kedua. Gambar 4.36 memperlihatkan secara jelas bagaimana penurunan dari *peak* pertama ke *peak* kedua yang kemudian diikuti nilai RAO yang stabil setelah frekuensi 1.56 Hz. *Trimaran Array* memiliki rata-rata nilai RAO yang lebih rendah yaitu 0.57° , sedangkan untuk *Catamaran Array* memiliki rata-rata 0.60° .



Gambar 4. 37 RAO Yaw (RZ) pada *Array Pontoon*



Gambar 4. 38 RAO *Yaw* (RZ) 4 *Mooring Line* pada *Array Pontoon* ($f = 0.89 - 1.77$ Hz)

Selain itu, adapun nilai respon gerak *array pontoon* pada sumbu-RZ (*Yaw*) yang ditunjukkan pada Gambar 4.37 dan 4.38 di atas. Berdasarkan hasil *trend* grafik yang terbentuk, dapat dilihat bahwa *peak* tertinggi terbentuk pada rentang frekuensi 0.81 – 1.32 Hz. Pergerakan rotasional sumbu-Z pada kedua model *array pontoon* diawali dengan terbentuknya beberapa *peak* kecil yang kemudian mengalami kenaikan nilai RAO. Berdasarkan grafik di atas nilai RAO *Trimaran Array* cenderung lebih kecil dibandingkan *Catamaran Array*. Hal ini pun didukung dengan rata-rata nilai RAO *Pitch Trimaran Array* ialah 0.34° , sedangkan untuk *Catamaran Array* rata-ratanya ialah 0.39° . Gambar 4.34 memperjelas bagaimana respon gerak akhir dari kedua model yaitu mengalami penurunan dan kestabilan yang dimulai dari frekuensi 1.15 – 1.88 Hz. Simulasi yang telah dianalisis pada *array pontoon* menggambarkan respon gerak lebih kecil dibandingkan dengan *single pontoon*. Adapun ringkasan dari secara keseluruhan nilai RAO pada *array pontoon* yang ditampilkan pada Tabel 4.8 di bawah ini.

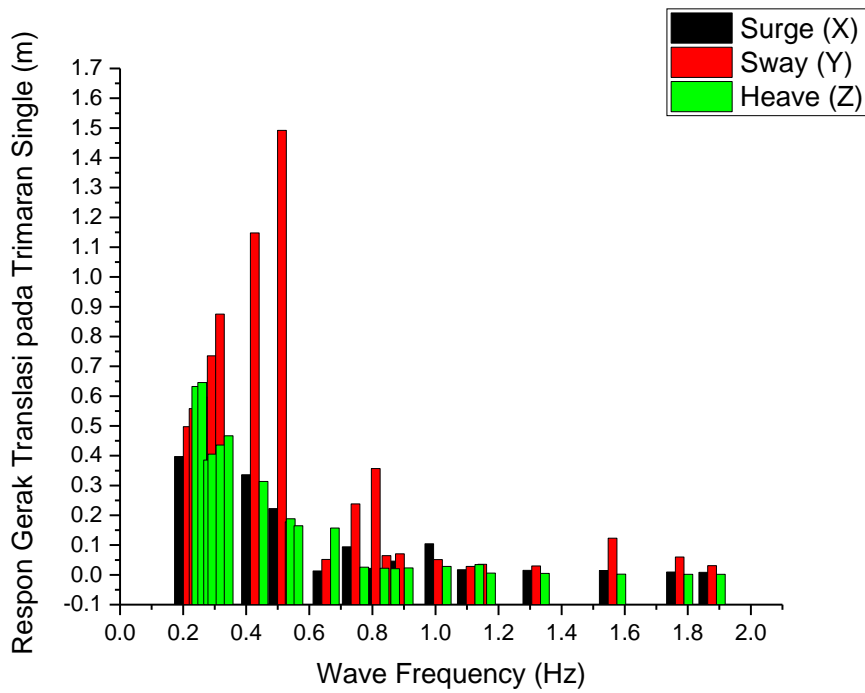
Tabel 4. 8 Ringkasan Perbandingan Nilai RAO *Array Pontoon*

Sudut Derajat Kebebasan (6 DOF)	<i>Trimaran Pontoon</i> (<i>Array</i>)	<i>Catamaran Pontoon</i> (<i>Array</i>)
<i>Surge X (m)</i>	0.10	0.11
<i>Sway Y (m)</i>	0.07	0.08
<i>Heave Z (m)</i>	0.09	0.10
<i>Roll RX (°)</i>	0.07	0.08
<i>Pitch RY (°)</i>	0.57	0.60
<i>Yaw RZ (°)</i>	0.34	0.39

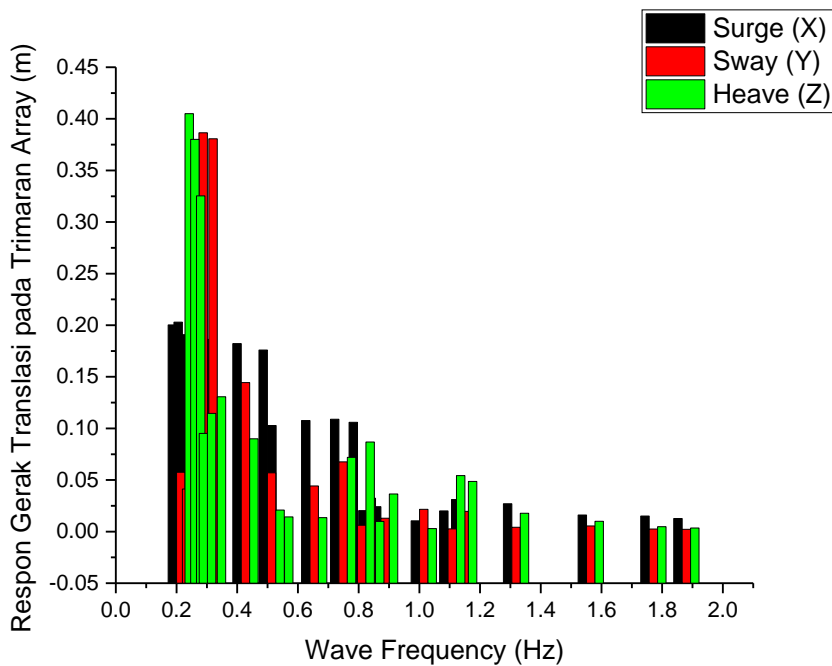
4.3.3 Perbandingan Nilai RAO pada *Single Pontoon* dan *Array Pontoon*

Hasil simulasi pada model *single pontoon* dan *array pontoon* telah dibahas pada sub-bab sebelumnya dimana telah dianalisis hasil nilai RAO per sumbu baik gerak translasional, maupun rotasional. Kedua model *single pontoon* dan *array pontoon* menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan dan karakteristik tiap sumbu. Berdasarkan nilai RAO yang telah dianalisis, diperoleh bahwa model *Catamaran Pontoon* memiliki kecenderungan nilai RAO yang lebih besar dibandingkan dengan *Trimaran Pontoon*. Gerakan yang dihasilkan menunjukkan nilai RAO yang fluktuasi dari rentang frekuensi 0.21 – 1.88 Hz. Sehingga, ada beberapa nilai respon gerak dari tiap model yang memiliki nilai *peak* tinggi atau pun rendah. Pemilihan rentang frekuensi ini didasarkan pada hasil *meshing* setiap geometri yang di-*generate* secara otomatis oleh *Software CFD*. Kemudian, ada pun rentang frekuensi bawah (*f-low*) dan atas (*f-high*) dari gelombang *irregular* yang digunakan pada Tabel 3.3 di bab sebelumnya.

Pada Gambar 4.39 dan 4.40 terdapat diagram batang yang mendistribusikan nilai RAO translasi pada *Trimaran Single* dan *Trimaran Array* untuk dapat dibandingkan bagaimana perubahan nilai respon gerak *Trimaran Pontoon* sebelum dan sesudah di-*array*.



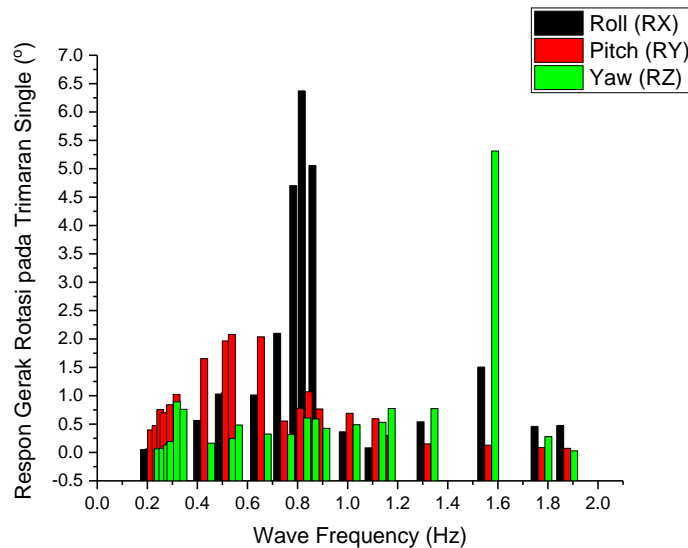
Gambar 4. 39 Nilai RAO Translasi pada *Trimaran Single Pontoon*



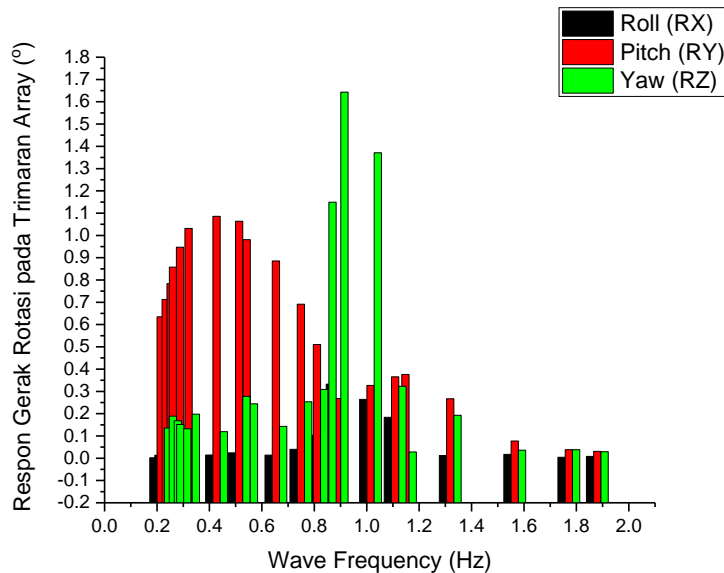
Gambar 4. 40 Nilai RAO Translasi pada *Trimaran Array Pontoon*

Trimaran Single menunjukkan terdapat beberapa *peak* tinggi seperti pada sumbu *Sway* terutama pada frekuensi rendah. *Peak* tertinggi yang menonjol pada Gambar 4.39 ialah untuk respon gerak awal *Trimaran Single* pada sumbu-Y pada frekuensi 0.51 Hz. Selain itu, adapun

respon gerak *Heave* (sumbu-Z) yang membentuk *peak* tinggi di awal frekuensi sama seperti respon gerak *Surge* (sumbu-X). Kemudian, setelah dilakukannya pembaruan model *pontoon* dengan cara meng-*array* dua *unit pontoon*, didapat penurunan nilai RAO translasi dari *Trimaran Pontoon*. Hal ini dibuktikan pada Gambar 4.40 dimana terjadi penurunan rata-rata nilai RAO translasi dari *Trimaran Pontoon*, terutama pada respon gerak *Sway* (sumbu-Y).



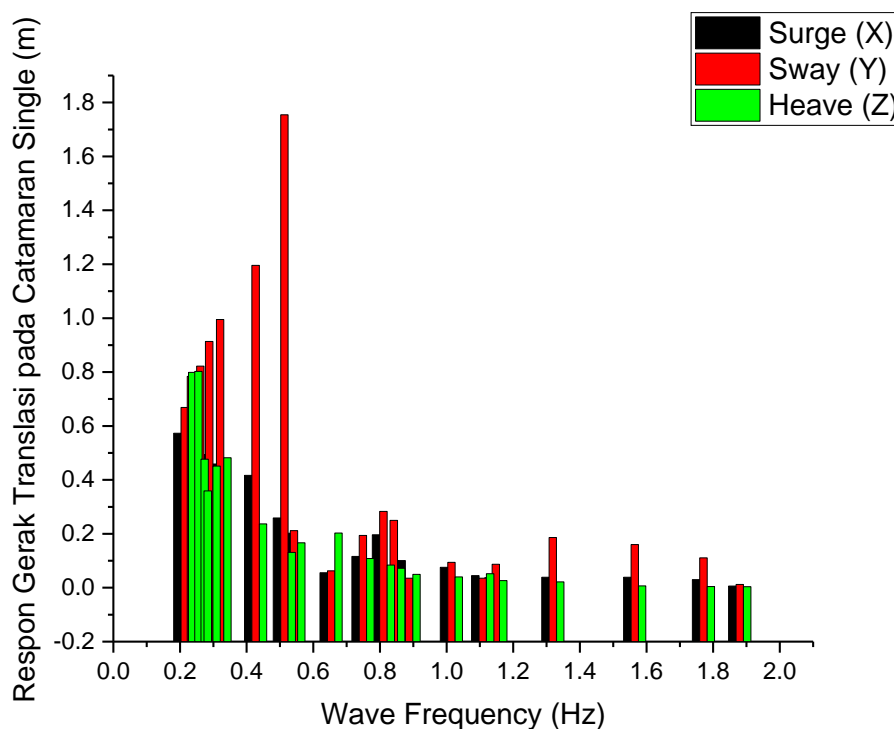
Gambar 4. 41 Nilai RAO Rotasi pada *Trimaran Single Pontoon*



Gambar 4. 42 Nilai RAO Rotasi pada *Trimaran Array Pontoon*

Kemudian, pada respon gerak rotasi dapat ditunjukkan perbandingan dari nilai RAO rotasi dari *Trimaran Single* dan *Array*. Gambar 4.41 menunjukkan bahwa terdapat *peak*

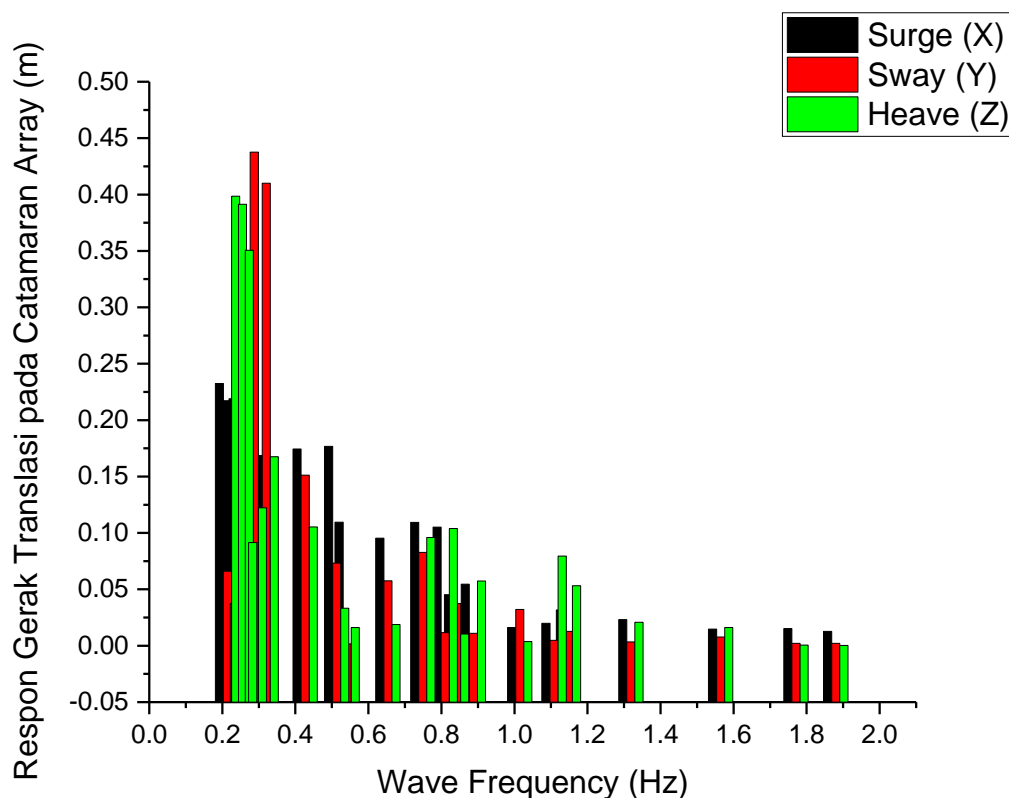
tertinggi yang terbentuk pada sumbu *Roll* (RX) dan *Yaw* (RZ). *Peak* tertinggi yang dialami *Trimaran Single* ialah terjadi pada frekuensi 0.81 Hz, sedangkan untuk sumbu *Yaw peak* tertinggi terjadi pada frekuensi 1.57 Hz. Nilai RAO gerak rotasi pun menunjukkan adanya perubahan penurunan yang terjadi ketika model *Trimaran Pontoon* dilakukan *array* dua unit. Gambar 4.42 menunjukkan secara signifikan perubahan nilai dari sumbu *Roll* yang mengalami penurunan nilai *peak*. Selain itu, terdapat pengurangan nilai *peak* yang terjadi oleh sumbu *Yaw* di frekuensi 1.57 Hz, tetapi menimbulkan beberapa *peak* baru walaupun nilai rata-rata RAO yang terbentuk lebih kecil dibandingkan rata-rata nilai RAO pada *Trimaran Single*. Di sisi lain, adapun sumbu *Pitch* yang mengalami nilai penurunan terhadap RAO yang ditunjukkan pada Gambar 4.42 di atas. Kecenderungan respon gerak *Pitch* ketika baik *single*, maupun *array* menghasilkan *peak* pada frekuensi awal yang merupakan akibat dari datangnya arah gelombang yang tegak lurus. Oleh karena itu, pada gerak rotasional sumbu yang paling berpengaruh terhadap datangnya gelombang dengan arah 180° (serah sumbu-X positif) ialah sumbu *Pitch* karena baik *single*, maupun *array* tetap memperlihatkan adanya *peak* gelombang di awal frekuensi walaupun terjadi pengurangan nilai respon perputaran di sumbu-Y.



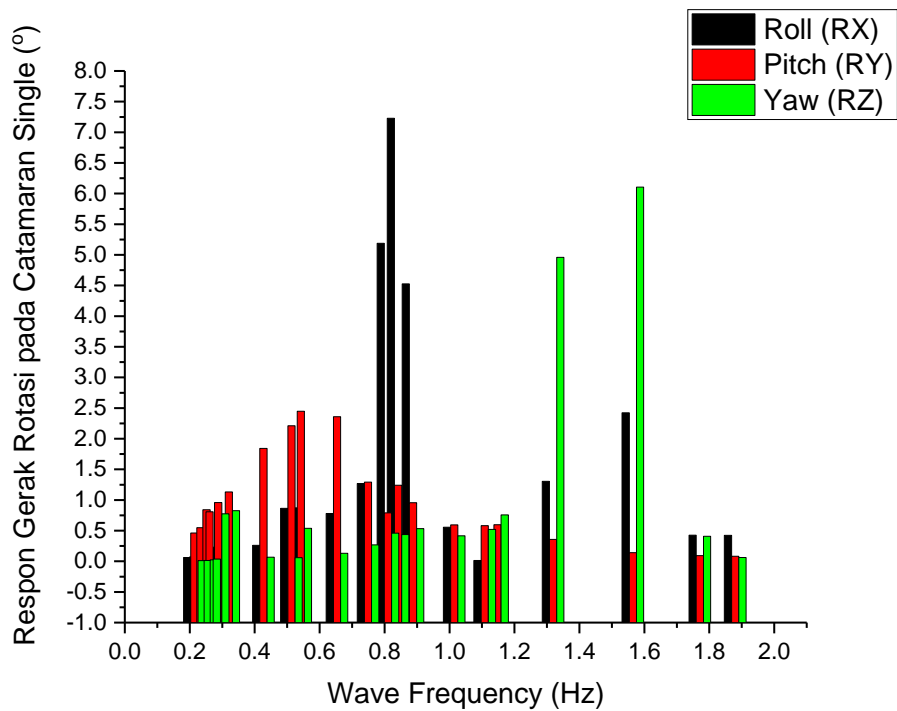
Gambar 4. 43 Nilai RAO Translasi pada *Catamaran Single Pontoon*

Di sisi lain, adapun perbandingan penurunan nilai RAO tranlasi yang ditunjukkan pada Gambar 4.43 dan 4.44 pada *Catamaran Single* dan *Catamaran Array*. Gambar 4.43

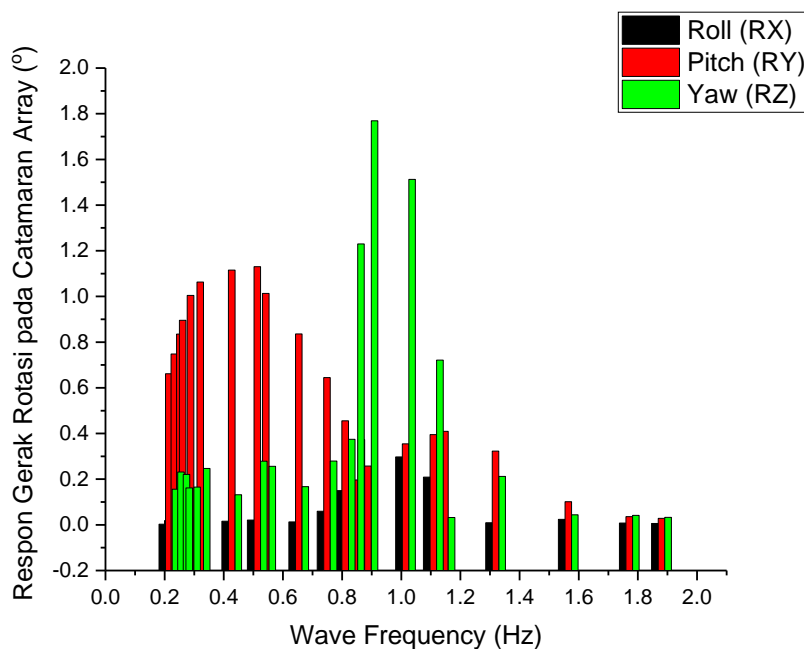
menunjukkan terdapat *peak* tertinggi yang terjadi pada *Catamaran Single* di sumbu *Sway* (Y) yang mana pada hal ini selaras dengan hasil yang ditunjukkan dengan *Trimaran Single*. Artinya, untuk *single pontoon* memiliki *massa* yang lebih ringan dibandingkan dengan *array pontoon*, sehingga ketika arah gelombang menuju sumbu-X positif mengenai *single pontoon*, akan lebih mudah bergeser atau bergerak ke arah depan-belakang baik translasi ataupun rotasi (sumbu-Y atau sumbu-RY). Gambar 4.44 memperlihatkan dengan jelas bahwa penurunan nilai *peak Sway* terjadi ketika *Catamaran Pontoon* dilakukan *array* dua unit. Sedangkan, untuk respon gerak *Surge* dan *Heave* masih menunjukkan *peak* di frekuensi awal, tetapi dengan nilai RAO yang mengalami penurunan.



Gambar 4. 44 Nilai RAO Translasi pada *Catamaran Array Pontoon*



Gambar 4. 45 Nilai RAO Rotasi pada *Catamaran Single Pontoon*



Gambar 4. 46 Nilai RAO Rotasi pada *Catamaran Array Pontoon*

Pada respon gerak rotasi untuk *Catamaran Single* dan *Catamaran Array* dapat dibandingkan dengan perbedaan dari Gambar 4.45 dan 4.46 di atas. Dimana dua diagram batang

tersebut mendefinisikan terjadinya pengurangan yang signifikan untuk respon gerak *Roll* (RX) pada *Catamaran Pontoon*. Gambar 4.45 menunjukkan respon gerak *Roll* pada *Catamaran Single* sangat besar yang artinya ketika *single pontoon* mengalami kontak langsung terhadap gelombang datang searah sumbu-X positif, akan membuat pergerakan maju-mundur yang cukup ekstrem di frekuensi tertentu. Namun, ketika *massa pontoon* ditambah dengan melakukan *array* dua unit *Catamaran Pontoon* maka terjadi pengurangan eksitasi pergerakan berlebih ketika *array pontoon* mengalami *turbulence* gelombang dan hal ini terbukti pada diagram batang Gambar 4.46 di atas. Persen pengurangan nilai RAO ditunjukkan pada Tabel 4.9 berikut ini.

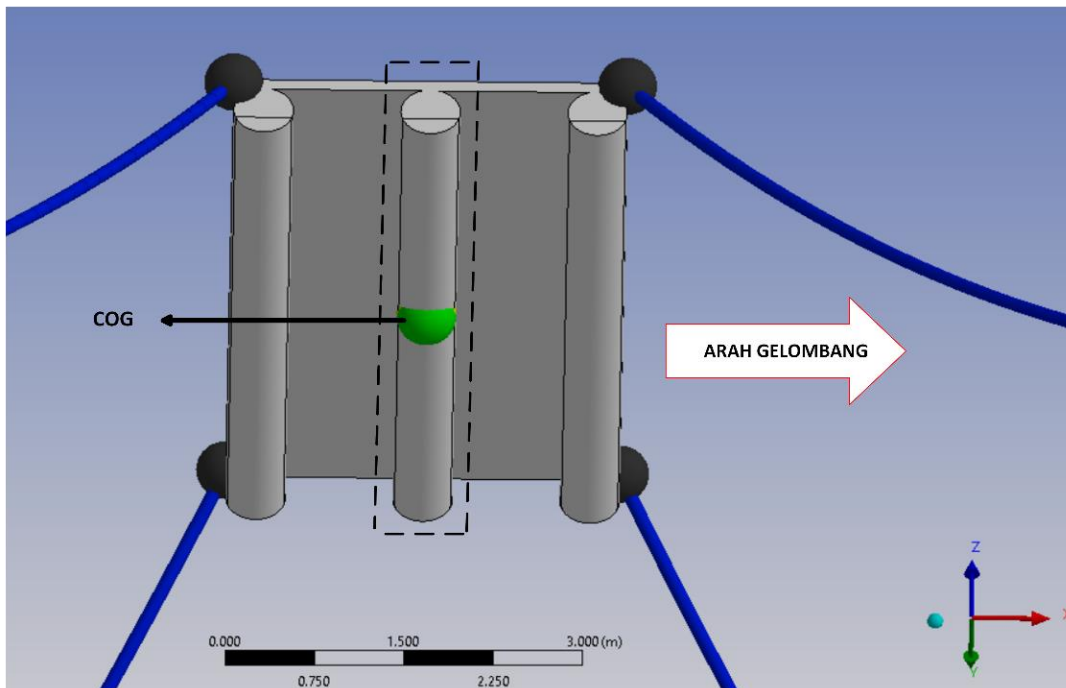
Tabel 4. 9 Persen Penurunan Nilai RAO *Single Pontoon* Terhadap *Array Pontoon*

No.	6 Degree of Freedom	Trimaran Array Pontoon	Catamaran Array Pontoon	Trimaran Single Pontoon
1	Surge (m)	41%	52%	26%
2	Sway (m)	83%	84%	18%
3	Heave (m)	53%	55%	14%
4	Roll (°)	95%	94%	2%
5	Pitch (°)	97%	38%	15%
6	Yaw (°)	47%	53%	23%
Rata-rata Translasi		59%	64%	19%
Rata-rata Rotasi		80%	62%	14%

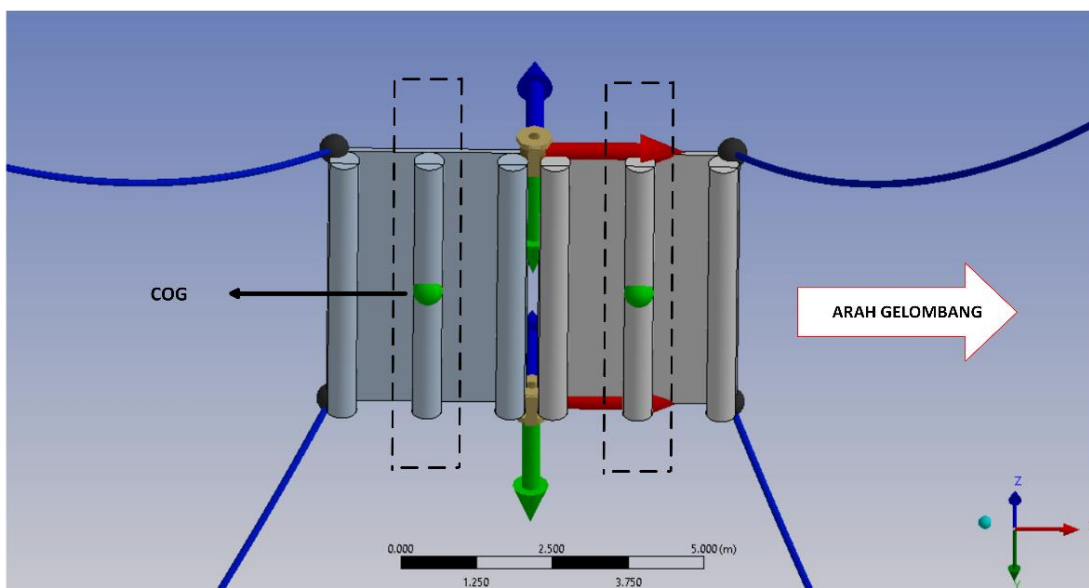
Perbandingan *single pontoon* dan *array pontoon* menunjukkan hasil pengurangan RAO yang cukup signifikan. Penurunan nilai RAO ditunjukkan dari tiap sumbu baik translasi, maupun rotasi. Di sisi lain, diperoleh bahwa gerakan translasi pengurangan RAO paling besar terjadi pada model *Catamaran Array* dengan penurunan RAO terhadap *Catamaran Single* terjadi sebesar 84%. Akan tetapi, hal yang sama juga terjadi dengan *Trimaran Array* yang penurunan RAO-nya hampir sama dengan *Catamaran Array*, yaitu 83% terhadap *Trimaran Single*.

Berdasarkan Tabel 4.9, adapun penurunan nilai RAO terhadap *Trimaran Single* dengan nilai penurunan tertinggi terjadi pada sumbu *Surge* (X). Penurunan yang terjadi pada *Trimaran Single* merupakan penurunan nilai RAO terhadap *Catamaran Single* dimana hal ini menggambarkan penambahan *hull pontoon* baru di bagian tengah untuk *single pontoon* pun

dapat mengurangi adanya eksitasi gelombang. Penurunan nilai RAO terbesar pada *Trimaran Single* terjadi pada sumbu *Surge* (X). Pada Gambar 4.47 dan Gambar 4.48 diperlihatkan bagaimana sisi *pontoon* tampak bawah untuk *Trimaran Single* dan *Trimaran Array*. Penambahan *hull* di tengah *pontoon* akan menambah besaran luas *cross-section area* atau luasan area yang berhubungan secara langsung dengan gelombang.



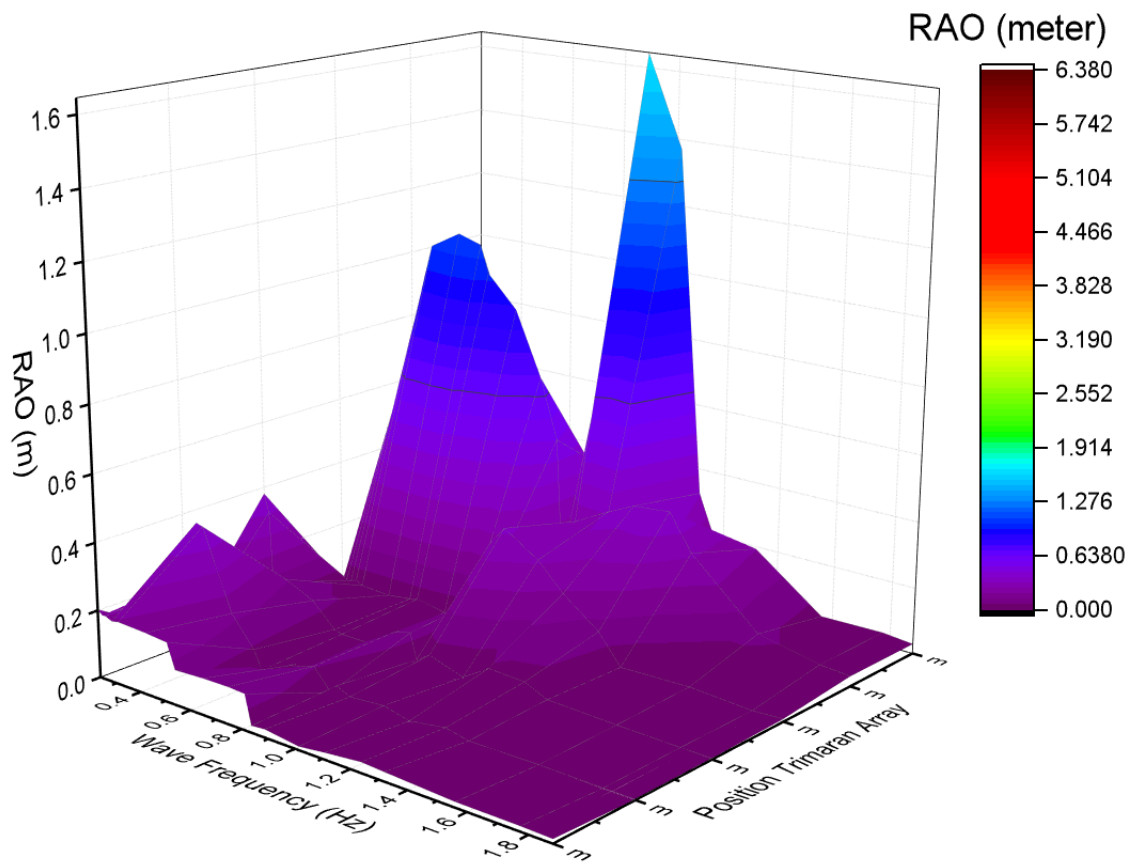
Gambar 4. 47 Penambahan *Hull Pontoon* pada *Trimaran Single*



Gambar 4. 48 Sisi *Trimaran Array Pontoon* Tampak Bawah

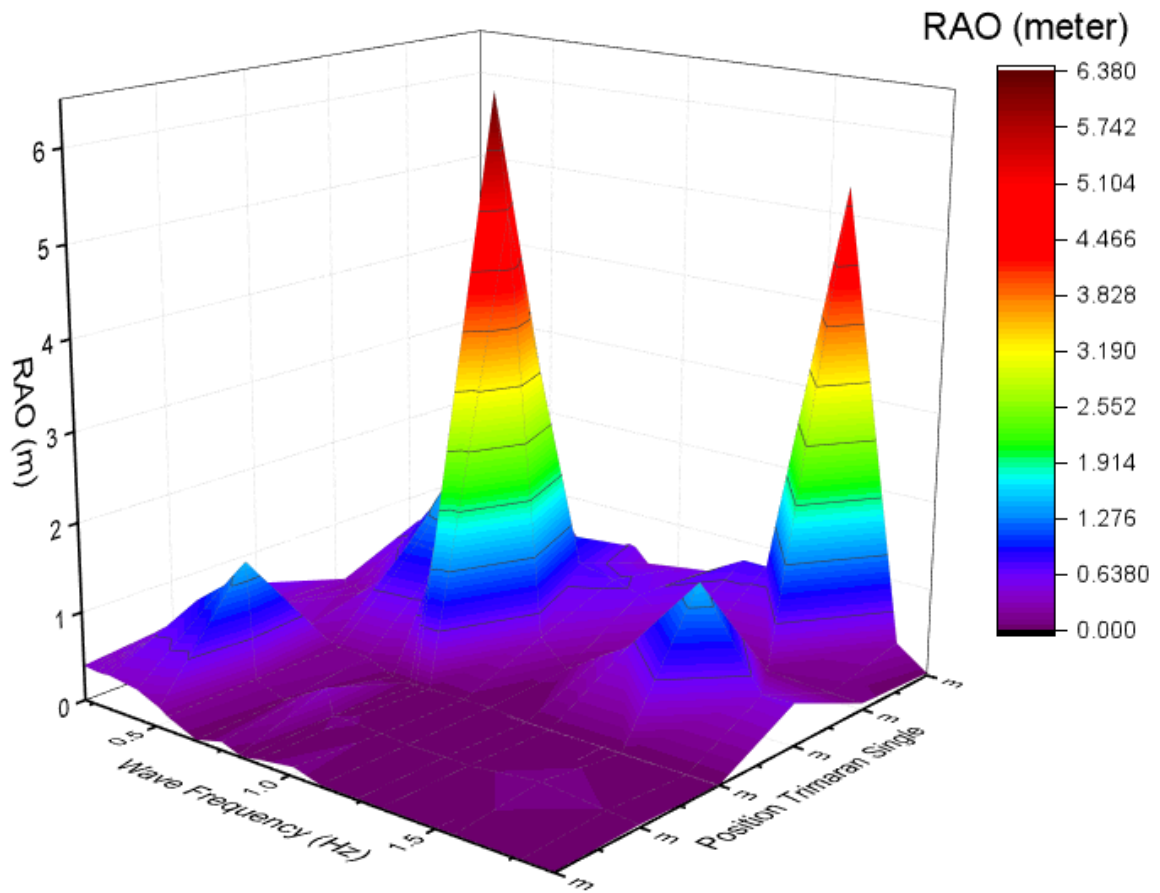
Hasil tersebut selaras dengan teori persamaan *Response Amplitude Operator* pada Bab 2. Berdasarkan persamaan tersebut, nilai RAO bergantung pada beberapa faktor, salah satunya ialah massa dan inersia struktur. Dimana nilai RAO berbanding lurus dengan massa struktur yang artinya semakin besar massa struktur, maka semakin besar kemampuan *pontoon* dalam memperkecil damping dan gaya eksitasi yang dimiliki gelombang, sehingga menghasilkan reduksi pada nilai RAO (Cheng et al., 2021). Penambahan *pontoon* dengan melakukan *array* merupakan salah satu solusi dalam mengurangi nilai RAO seperti yang dijelaskan pada Persamaan 2.7 tentang *Hydrodynamic Force*. Besar gaya hidrodinamika berkaitan erat dengan Froude-Frylov *Force*, dimana persamaan ini dipengaruhi oleh besarnya *cross-section area* (CSA) atau luasan penampang bawah *pontoon* yang bersentuhan dengan air. Besarnya CSA memiliki hubungan yang erat dengan *water-plane area* (WPA), dimana WPA merupakan luas permukaan air yang dilewati oleh bagian *pontoon* yang tercelup air (Ma et al., 2019a). CSA dan WPA berkaitan erat dengan bentuk dari permukaan *pontoon* yaitu *cylindrical surface*. Bentuk silinder dari *pontoon* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap aliran fluida dan *cross-section area*. Penambahan *hull pontoon* secara tidak langsung akan menambah nilai massa dan momen inersia yang terjadi pada *pontoon*. Hal ini pun serupa dengan dilakukannya *array pontoon* baik untuk model *Trimaran* ataupun *Catamaran Pontoon*. Semakin besar nilai momen inersia maka semakin besar kemampuan struktur dalam menahan posisi dan memperkecil pergerakan yang berlebih dalam merespon resonansi gelombang (Journée & Massie, 2001).

Penambahan *hull pontoon* dengan penggabungan dua *pontoon* (*array*) paling baik ditunjukkan pada geometri *Trimaran Pontoon*. Oleh karena itu, penurunan nilai RAO gerak translasional dan rotasional dapat dilihat bagaimana karakteristik dari penurunan nilai RAO dari *Trimaran Single* dengan *Trimaran Array* pada gambar di bawah berikut ini. Penggabungan ini mengoptimalkan stabilitas dan kinerja *pontoon*, mengurangi efek gelombang yang terkena *pontoon*. Selain itu, *Trimaran Array* menunjukkan peningkatan efisiensi dalam menghadapi adanya eksitasi gelombang. Efek dari penambahan *hull pontoon* dan *array pontoon* akan menambah beban struktur dimana akan membuat pergerakan *pontoon* semakin stabil dalam mengatasi eksitasi gelombang.



Gambar 4. 49 Nilai RAO 6 DOF pada *Trimaran Array* (meter)

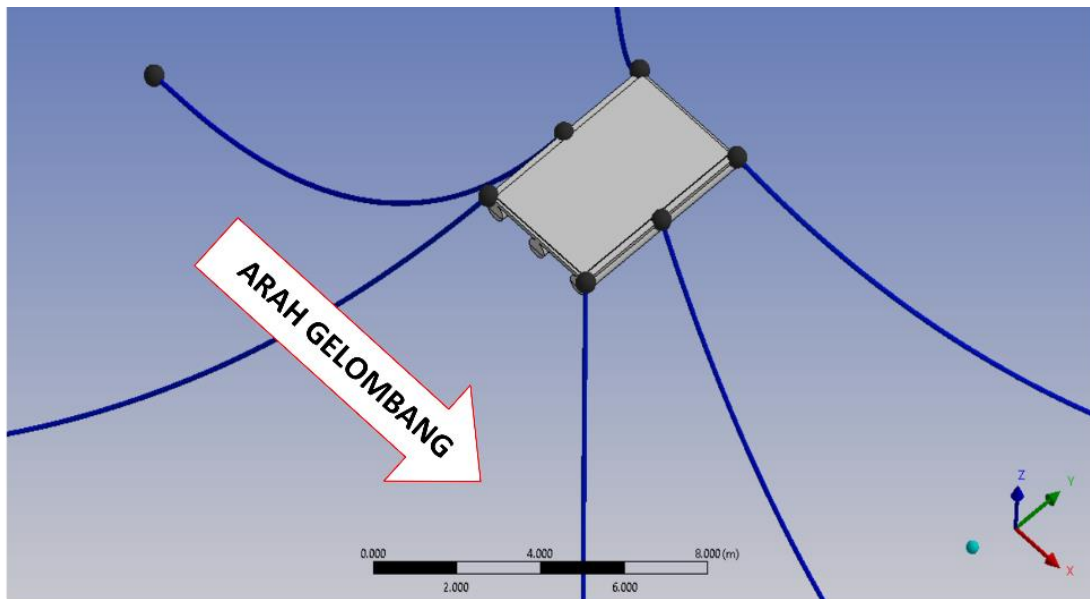
Pada Gambar 4.49 dan Gambar 4.50 adapun 3D *colormap surface* yang menjelaskan respon pergerakan dari *Trimaran Array* dan *Trimaran Single* pada tiap sumbu translasional dan rotasional secara keseluruhan dari 6 *Degree of Freedom*. Kontur yang terbentuk memiliki arti pada setiap warnanya. Warna kontur merah menunjukkan semakin besar pergeseran *pontoon* ketika menerima adanya gelombang datang. Kedua gambar ini pun merepresentasikan respon dari *Trimaran Array* dan *Trimaran Single* pada satu kejadian dengan hasil frekuensi yang terbentuk sama, yaitu dengan *range* 0.21 – 1.88 Hz. Gambar 4.49 memperlihatkan bahwa pergerakan maksimum dari *Trimaran Array* secara keseluruhan ialah sebesar 1.645 meter. Sedangkan, pada Gambar 4.50 menunjukkan bahwa pergerakan maksimum dari *Trimaran Single* terjadi sebesar 6.38 meter. Nilai RAO rotasional yang ada di *colormap surface* merupakan nilai RAO yang telah di-*convert* dengan satuan meter agar dapat dibandingkan.



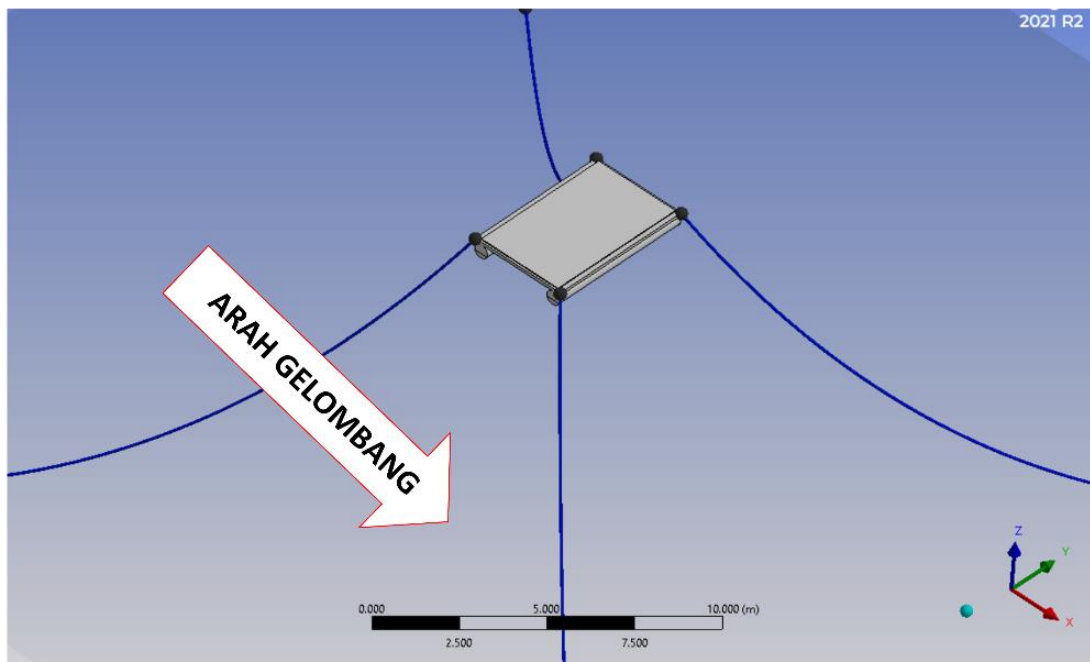
Gambar 4. 50 Nilai RAO 6 DOF pada *Trimaran Single* (meter)

4.4 Pengaruh Variasi *Mooring Line* Terhadap *Response Amplitude Operator (RAO)*

Tali tambat atau *mooring line* merupakan salah satu komponen penting untuk tsruktur terapung untuk membatasi gerakan sebuah struktur terapung. Pada model *Marine FPV*, digunakan dua variasi jumlah *mooring line*, yakni 4 buah dan 6 buah berjenis *Non-Linier Catenary*. Pemilihan jenis *mooring line* ini disesuaikan dengan kondisi lingkungan sistem yang akan diletakkan pada perairan laut, dengan kemungkinan perubahan ketinggian posisi muka air laut sehingga dibutuhkan jenis *mooring line* yang dapat menahan gaya *drag* dari gelombang dan dapat menyesuaikan dengan kondisi perairan saat terjadi perubahan tingkat kedalaman (Reindl, 2019). Adapun *properties* dari *mooring line* yang menjadi nilai input pada CFD Aqwa yang tertera pada Tabel 3.4 pada bab sebelumnya.



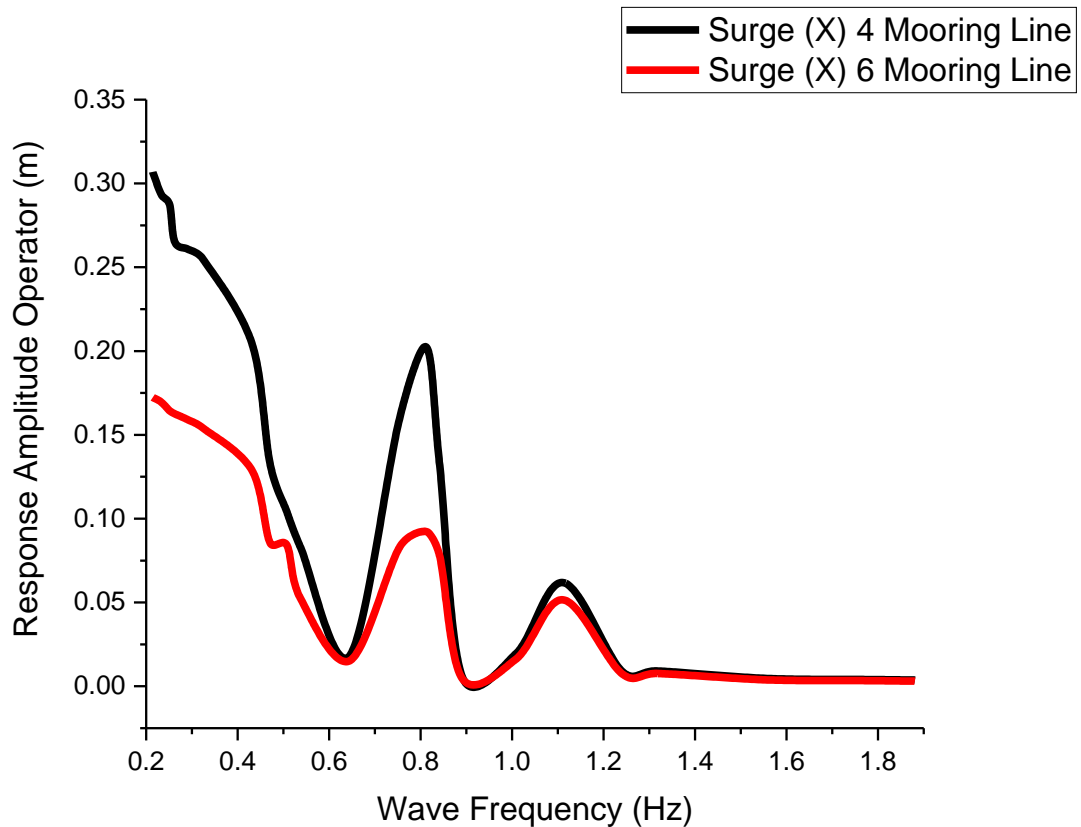
Gambar 4. 51 Model *Single Pontoon* dengan 6 *Mooring Line*



Gambar 4. 52 Model *Single Pontoon* dengan 4 *Mooring Line*

Pada Gambar 4.51 dan Gambar 4.52 merupakan contoh dari penerapan 4 *mooring line* dan 6 *mooring line* saat simulasi dilakukan. Variasi jumlah *mooring line* pada *single pontoon* dan *array pontoon* akan dibandingkan pada sub-bab ini. Gambar 4.52 menunjukkan perbandingan nilai RAO *Surge* (sumbu-X) dari *Trimaran Single* dengan 6 *mooring line* dan 4 *mooring line* dengan kedalaman 10 meter dan *irregular wave* sebesar 0.4 meter. Berdasarkan *trend* grafik nilai RAO yang terbentuk, *Trimaran Single* dengan 6 *mooring line* memiliki nilai

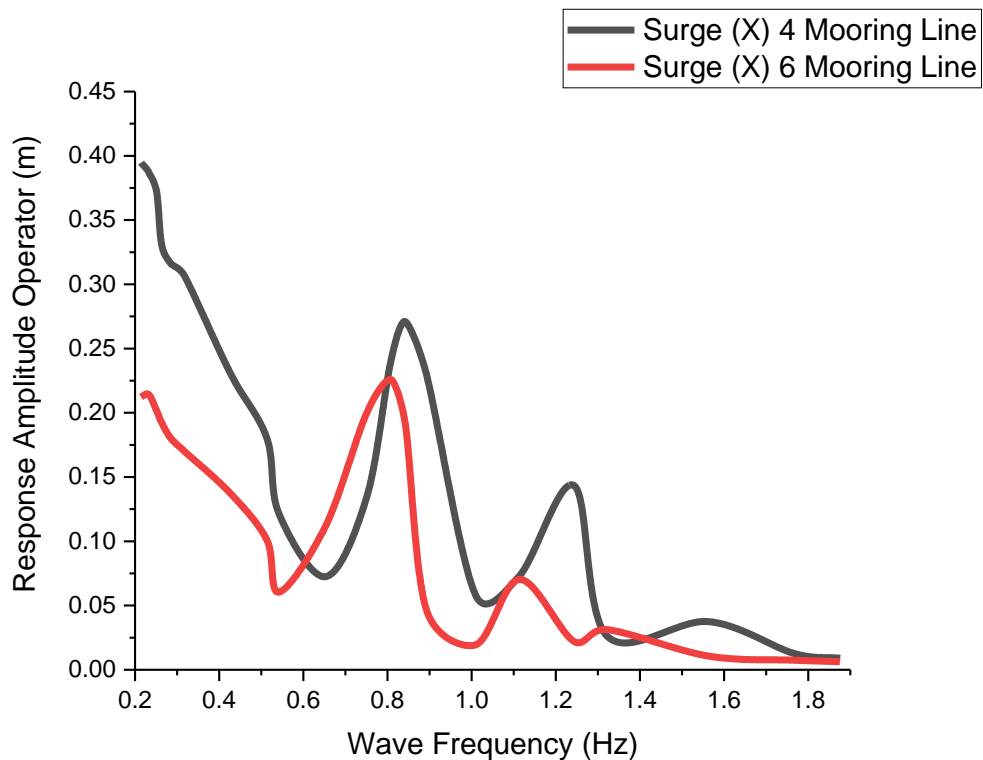
rata-rata RAO lebih rendah jika dibandingkan dengan 4 *mooring line*. Berdasarkan gambar tersebut, dapat terlihat jelas bahwa pengurangan nilai RAO terjadi ketika dilakukan penambahan jumlah *mooring line*. Pada frekuensi awal, dapat dilihat bahwa terjadi penurunan nilai RAO *Surge* secara drastis saat 6 *mooring line*



Gambar 4. 53 *Trimaran Single* – Perbandingan 4 dan 6 *Mooring Line*

Gambar 4.53 menunjukkan perbedaan nilai RAO yang terjadi pada *Trimaran Single* ketika dilakukan penambahan jumlah *mooring line*. Apabila mengacu pada *trend* yang terbentuk, dapat dilihat penurunan signifikan yang terjadi ketika rentang frekuensi 0.21 – 0.62 Hz. Pengurangan nilai respon gerak ini membuktikan adanya penambahan massa pada *mooring line* yang menahan *pontoon* akan mengurangi adanya eksitasi gelombang (Kanotra & Shankar, 2022). Rata-rata nilai RAO *Trimaran Single* untuk 6 *mooring line* ialah 0.07 meter, sedangkan untuk 4 *mooring line* ialah 0.13 meter.

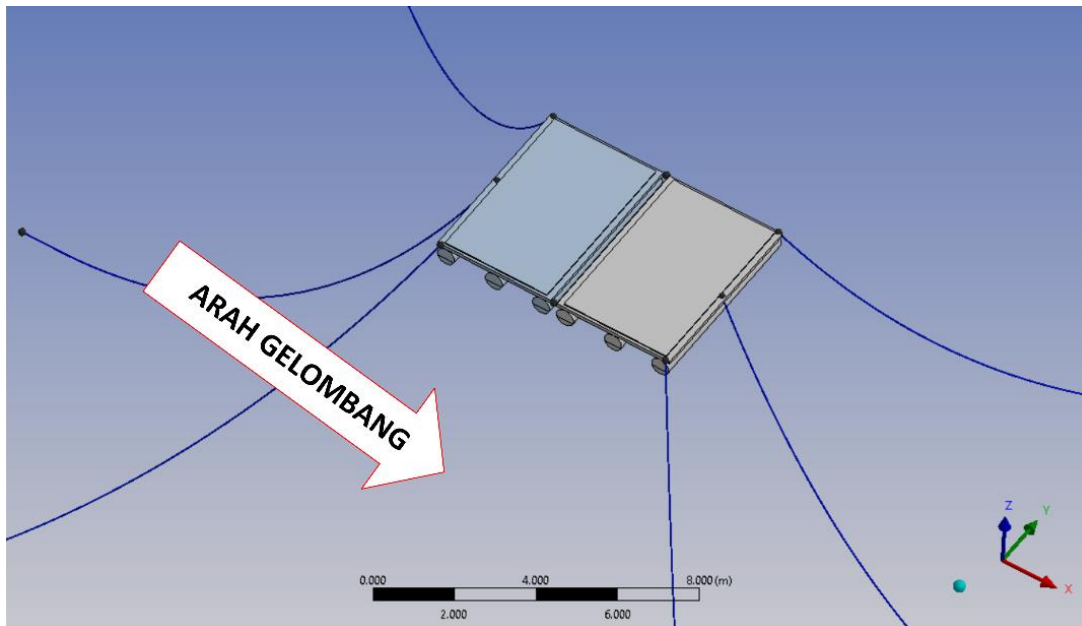
Di sisi lain, adapun perolehan hasil perbandingan nilai RAO *Surge* (sumbu-X) pada *Catamaran Single* dengan 6 *mooring line* dan 4 *mooring line* ditunjukkan di Gambar 4.54 di bawah berikut.



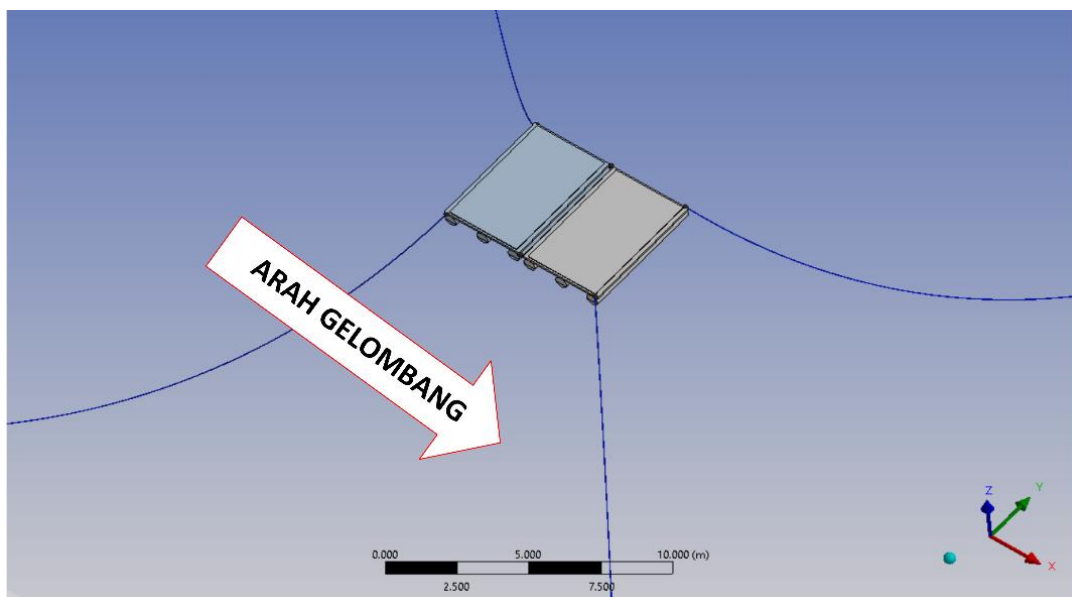
Gambar 4. 54 *Catamaran Single* – Perbandingan 4 dan 6 *Mooring Line*

Berdasarkan *trend* perbesaran nilai RAO *Surge* pada *Catamaran Single* yang terbentuk, nilai rata-rata RAO *Surge* pada 6 *mooring line* lebih rendah dibandingkan 4 *mooring line*. Kemudian, adapun *peak* yang terbentuk dari *Catamaran Single* 6 *mooring line* lebih rendah dan mengalami lebih dahulu nilai RAO yang stabil setelah frekuensi 1.2 Hz. Selain itu, adapun rata-rata RAO yang diperoleh dari *Catamaran Single* dengan 6 *mooring line* sebesar 0.11 meter dan untuk yang 4 *mooring line* memiliki rata-rata sebesar 0.18 meter. Penurunan nilai RAO yang terjadi diikuti dengan seiring bertambahnya nilai frekuensi gelombang yang terjadi.

Kemudian, adapun analisis variasi jumlah *mooring line* pada *array pontoon* seperti Gambar 4.55 dan 4.56 di bawah ini. Analisis yang dilakukan pada *array pontoon* pun memiliki nilai yang sama untuk parameter lingkungannya, yaitu dengan kedalaman 10 meter dan *irregular wave* 0.4 meter. Penambahan jumlah *moring line* yang dilakukan pada simulasi ialah dengan menambahkan *cable* ke-5 dan *cable* ke-6 pada bagian tengah kedua *pontoon*. Dengan demikian, penambahan *cable* ini akan menjadi perbandingan penurunan nilai RAO yang terjadi, khususnya dengan menurunnya nilai *tension* pada *cable* ke-1, *cable* ke-2, *cable* ke-3, dan *cable* ke-4 pada tiap model *pontoon* baik *Trimaran Array* dan *Catamaran Array*.



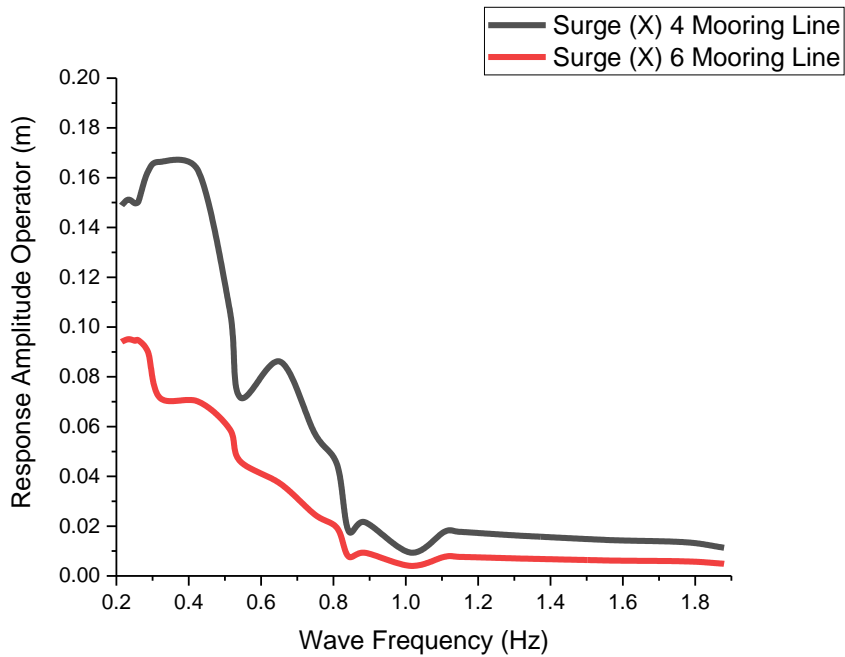
Gambar 4. 55 Model Array Pontoon dengan 6 Mooring Line



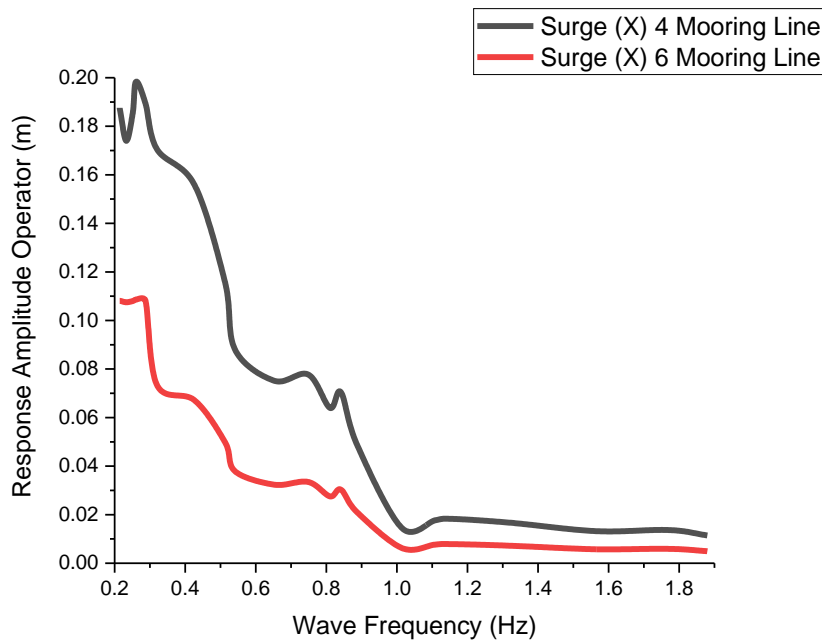
Gambar 4. 56 Model Array Pontoon dengan 4 Mooring Line

Di sisi lain, terjadi pengurangan nilai RAO pada model *array pontoon* yang ditunjukkan pada grafik di Gambar 4.57 dan 4.58 di bawah ini. Penggabungan dua *pontoon* atau *array pontoon* akan menambah massa beban yang dialami suatu *pontoon* ketika berhadapan langsung dengan gelombang, sehingga respon pergerakan yang dilakukan *array pontoon* akan cenderung lebih kecil dan stabil apabila dibandingkan dengan *single pontoon*. Hal ini pun turut didukung dengan penambahan *massa mooring* yang menahan *body pontoon* dalam menghadapi eksitasi gelombang. Penurunan nilai RAO pada *array pontoon* yang terjadi cukup signifikan baik pada

Trimaran Array, maupun pada *Catamaran Array*. Gambar 4.57 menunjukkan terjadi penurunan nilai respon gerak pertama dari *Trimaran Array* saat jumlah *mooring* ditambah. Tidak hanya itu, pada *Catamaran Array* pun didapat nilai respon gerak pertama *pontoon* yang mengalami penurunan.



Gambar 4. 57 *Trimaran Array* – Perbandingan 4 dan 6 *Mooring Line*



Gambar 4. 58 *Catamaran Array* – Perbandingan 4 dan 6 *Mooring Line*

Penambahan tegangan jumlah *mooring line* pada *pontoon* akan menambahkan jumlah nilai tegangan tali secara tidak langsung. Akibatnya, pergerakan *pontoon* akan semakin mudah untuk mengurangi gaya eksitasi yang diberikan oleh gelombang. Secara matematis, *Response Amplitude Operator* (RAO) untuk frekuensi ω dan sudut θ dimodelkan pada Persamaan (2.27) (Baghfalaki et al., 2012). Persamaan (2.27) menjelaskan bahwa nilai RAO berbanding lurus terhadap nilai dari gaya yang bekerja pada struktur terapung. Dalam konsep hidrodinamik, gaya-gaya yang bekerja pada sebuah struktur terapung dapat diformulasikan dalam Persamaan Morrison yang merupakan jumlahan dari Gaya Froude-Krylov, Gaya *Hydrodynamic*, dan Gaya *Drag* (Dallán Friel, 2020).

Tabel 4. 10 Pengurangan *Mooring Line Tension*

Model Geometri	Cable ke-	Pengurangan <i>Tension</i>	Rata-rata
<i>Trimaran Single</i>	1	14%	15%
	2	13%	
	3	16%	
	4	16%	
<i>Catamaran Single</i>	1	18%	18%
	2	18%	
	3	18%	
	4	18%	
<i>Trimaran Array</i>	1	34%	35%
	2	33%	
	3	36%	
	4	36%	
<i>Catamaran Array</i>	1	25%	24%
	2	25%	
	3	24%	
	4	24%	

Kemudian, untuk detail pengurangan *tension cable* atau tegangan kabel pada model *single pontoon* dan *array pontoon* dapat dilihat dari Tabel 4.10 di atas. Tabel tersebut menunjukkan pengurangan nilai tegangan atau *tension* yang terjadi pada *cable-1*, *cable-2*, *cable-3*, dan *cable-4* setelah dilakukan penambahan jumlah *mooring line* menjadi enam *cable*.

Tabel 4. 11 Pengurangan Nilai RAO Setelah Penambahan Jumlah *Mooring Line*

No	RAO	<i>Trimaran Single</i>	<i>Catamaran Single</i>	<i>Trimaran Array</i>	<i>Catamaran Array</i>
1	<i>Surge</i> (m)	38%	33%	50%	44%
2	<i>Sway</i> (m)	58%	52%	20%	17%
3	<i>Heave</i> (m)	17%	15%	43%	38%
4	<i>Roll</i> (°)	26%	21%	33%	15%
5	<i>Pitch</i> (°)	14%	8%	7%	9%
6	<i>Yaw</i> (°)	37%	35%	23%	25%
Rata-rata Translational (m)		37%	31%	38%	33%
Rata-rata Rotasional (°)		26%	21%	21%	16%

Penambahan jumlah *mooring line* dapat menghambat pergerakan sistem dan membatasi nilai amplitudo gerakan *Marine Floating Photovoltaic* yang dihasilkan oleh gaya eksitasi gelombang. Berdasarkan Tabel 4.11, hasil menunjukkan bahwa rata-rata pengurangan nilai RAO translasional terbesar terjadi pada model *Trimaran Array*. Sedangkan, untuk rata-rata nilai RAO rotasional terbesar terjadi pada model *Trimaran Single*. Pengurangan nilai RAO memiliki beberapa faktor yang mempengaruhi nilai respon gerak yang terjadi baik dari translasional, maupun rotasional. Berdasarkan Persamaan 2.15, nilai gaya berat merupakan salah satu gaya yang diterima oleh *mooring line* dimana hal ini pun mempengaruhi nilai respon gerak *pontoon* terhadap datangnya gelombang. Gaya berat merupakan penggabungan dari massa tali *mooring* dengan luas penampang tali *mooring* dimana hal ini berkaitan dengan penambahan jumlah *mooring line* yang akan semakin bertambah. Penambahan jumlah *mooring line* dapat memperkecil beban tegangan tali (*mooring line tension*) dengan membagi tegangan pada lebih banyak *mooring line* sehingga dapat memperpanjang *lifetime* penggunaan *mooring line* dan beban pada masing-masing *mooring line*. Secara matematis, *Response Amplitude Operator* untuk frekuensi (ω) dan sudut (θ) dimodelkan pada Persamaan 2.27 (Baghfalaki et al., 2012). Dimana dalam konsep hidrodinamik, gaya-gaya yang bekerja pada sebuah struktur terapung dapat diformulasikan dalam Persamaan Marrison yang merupakan jumlah total gaya dari

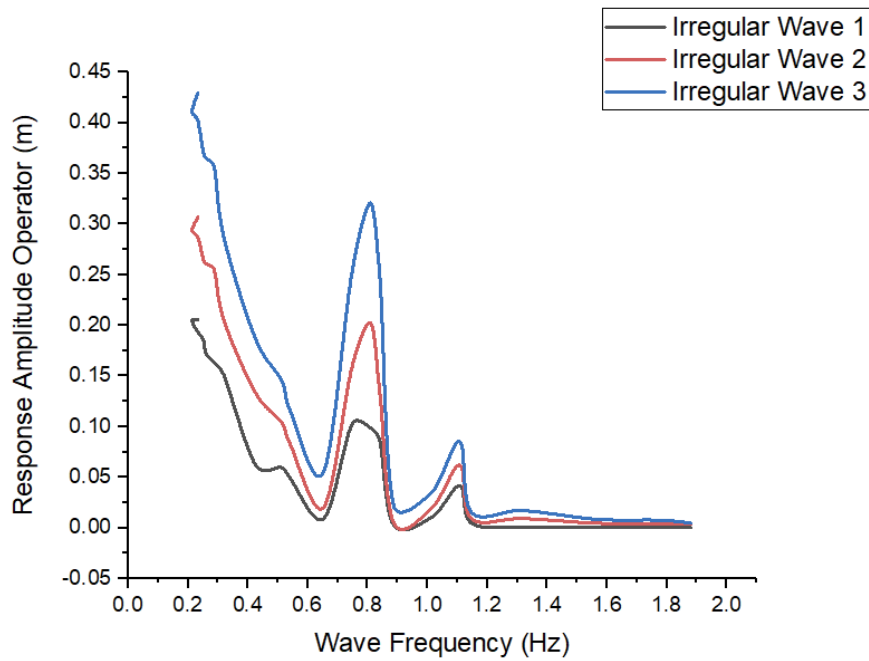
Froude-Krylov Force, Hydrodynamic Force, dan Drag Force (Friel, 2020). Sementara itu, persamaan matematis yang menjelaskan parameter *mooring line* dijabarkan pada Persamaan 2.22 di bab sebelumnya. Dimana total gaya yang diterima *mooring line* ialah gaya berat (W_i), tegangan tali mooring (T_i), gaya *damping mooring* (D_i), Gaya Morrison (F_i^M), gaya reaksi *seabed* (F_i^r), gaya *damping seabed* (F_i^v), dan gaya gesek yang dipengaruhi *seabed* (F_i^f).

Di sisi lain, nilai *stiffness* atau kekakuan dari *cable mooring line* merupakan salah satu faktor dalam penentuan respon gerak *pontoon* ketika menghadapi datangnya gelombang. Nilai kekakuan yang digunakan pada simulasi ini dapat dilihat pada Tabel 3.4 di sub-bab sebelumnya. Dimana nilai *stiffness* yang digunakan merupakan representatif bahan *mooring line* yang terbuat dari *polyestere* (Pham, 2023). Berdasarkan Persamaan 2.16, tegangan *mooring line* berkaitan erat dengan besar nilai *stiffness cable mooring*. Tegangan *cable* berbanding terbalik dengan *stiffness mooring line* dimana artinya jika semakin besar nilai *stiffness mooring*, maka semakin kecil nilai tegangan yang dialami *cable*. Hal ini terjadi karena apabila semakin besar nilai *stiffness* atau kekakuan sebuah *mooring*, maka akan semakin besar kemampuan dalam menahan beban *pontoon* serta mengurangi respon gerak berlebih akibat adanya gelombang (Ma et al., 2019b). Akan tetapi, adapun nilai kekakuan dan tegangan yang harus diperhatikan agar sistem *mooring* yang terbentuk tetap mempertahankan identitas dari *catenary mooring*. Pada sub-bab sebelumnya, terdapat penurunan persamaan hubungan tegangan tali *mooring* dengan *damping* tali *mooring*, gaya berat, gaya *damping* dari *seabed*, gaya gesek yang dipengaruhi *seabed*, dan Gaya Morrison.

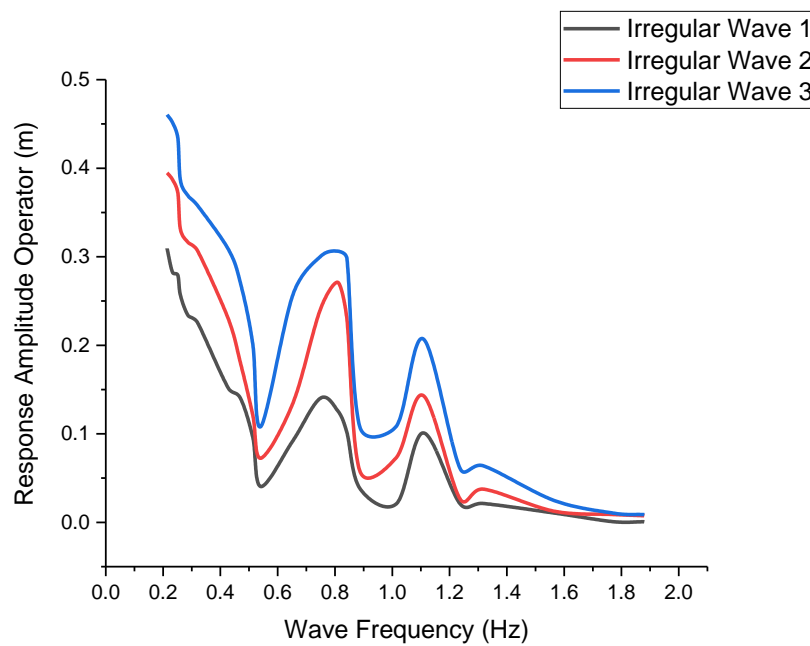
4.5 Pengaruh Variasi Kedalaman Perairan dan Gelombang Terhadap RAO

Pada penelitian yang dilakukan, diberikan beberapa variasi kedalaman perairan dan gelombang. Variasi gelombang yang digunakan pada penelitian ini ialah *Irregular Wave* (gelombang acak) dengan rincian terlampir pada Tabel 3.3 di bab sebelumnya. Karakteristik dari gelombang *irregular* berbeda dengan karakteristik gelombang *regular*, dimana frekuensi gelombang disimbolkan F_p . Nilai ini merupakan *peak* frekuensi dari *irregular wave* yang menunjukkan frekuensi dimana gelombang menghasilkan energi paling besar. Semakin besar energi yang dihasilkan oleh gelombang, maka akan semakin besar juga gaya yang dapat diberikan terhadap struktur terapung. Gaya-gaya yang terjadi pada sebuah struktur terapung dijelaskan pada Persamaan 2.12 mengenai Morrison Equation. Berdasarkan persamaan tersebut, dijabarkan bahwa salah satu variabel yang menentukan besar Gaya Morrison pada

sebuah struktur terapung dan fluida yang bergerak adalah kecepatan aliran (u). Pada Persamaan 2.13, variabel yang mempengaruhi kecepatan aliran adalah ketinggian gelombang (h) dan kedalaman perairan (H). Simulasi yang telah dilakukan memiliki variasi kedalaman dan gelombang yang diberikan terhadap masing-masing model baik *single pontoon*, maupun *array pontoon* untuk mendapatkan nilai *Response Amplitude Operator* (RAO).

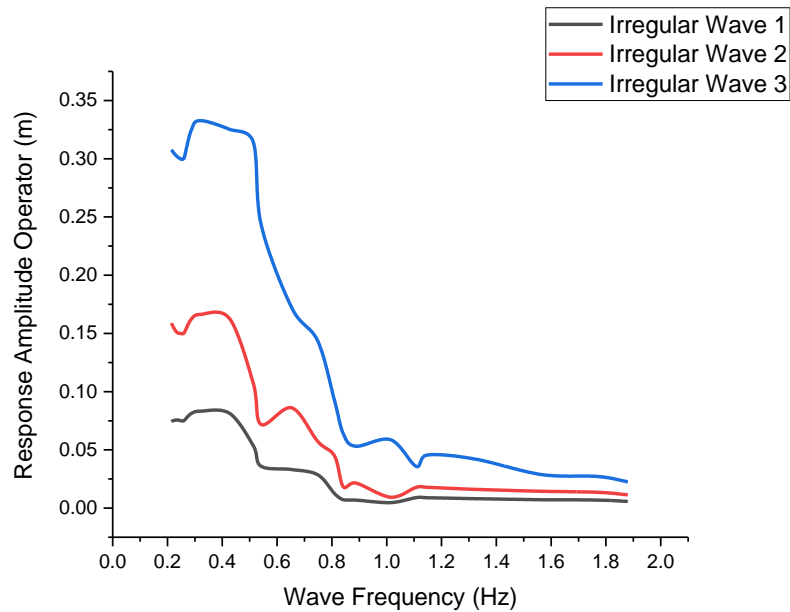


Gambar 4. 59 RAO Surge (X) pada *Trimaran Single*

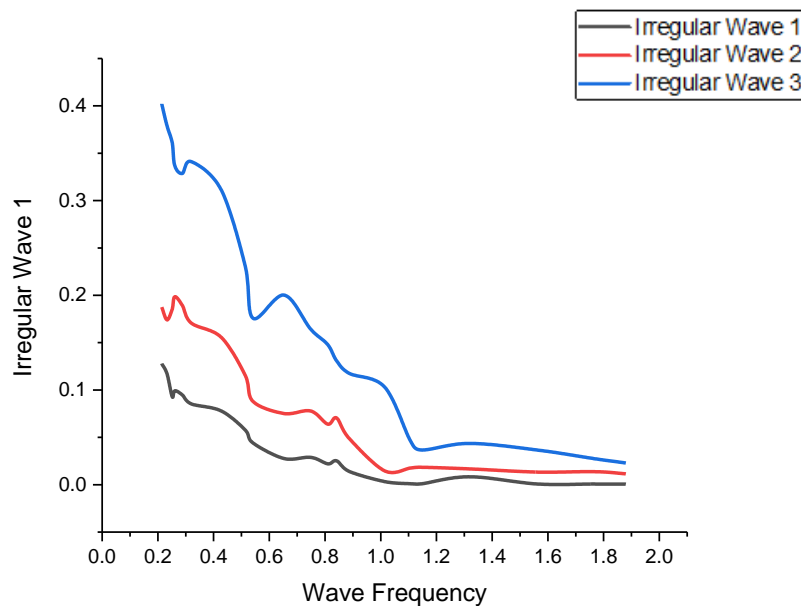


Gambar 4. 60 RAO Surge (X) pada *Catamaran Single*

Pada Gambar 4.59 dan 4.60 di atas merupakan grafik yang menunjukkan perbedaan nilai RAO *Surge* (translasi sumbu-X) pada model *single pontoon* di kedalaman 10 meter dengan 4 *mooring line*. Berdasarkan kedua grafik tersebut dapat dilihat bahwa adanya variasi gelombang mempengaruhi besar nilai RAO yang terbentuk, seperti pada nilai respon gerak *Surge* di atas. Di sisi lain, adapun pembuktian yang sama yang dialami model *array pontoon* yang dapat dilihat pada Gambar 4.61 dan 4.62 di bawah ini.



Gambar 4. 61 RAO *Surge* (X) pada *Trimaran Array*



Gambar 4. 62 RAO *Surge* (X) pada *Catamaran Array*

Peningkatan nilai RAO diikuti dengan peningkatan nilai *irregular wave*, seperti yang ditampilkan pada grafik nilai RAO *Surge* baik untuk model *single pontoon*, maupun *array pontoon*. Hal ini pun dapat dilihat persen kenaikan yang diperoleh dari tiap-tiap model ketika terjadi variasi gelombang *irregular*. Adapun ringkasan persen peningkatan nilai RAO yang dapat dilihat pada tabel di bawah berikut.

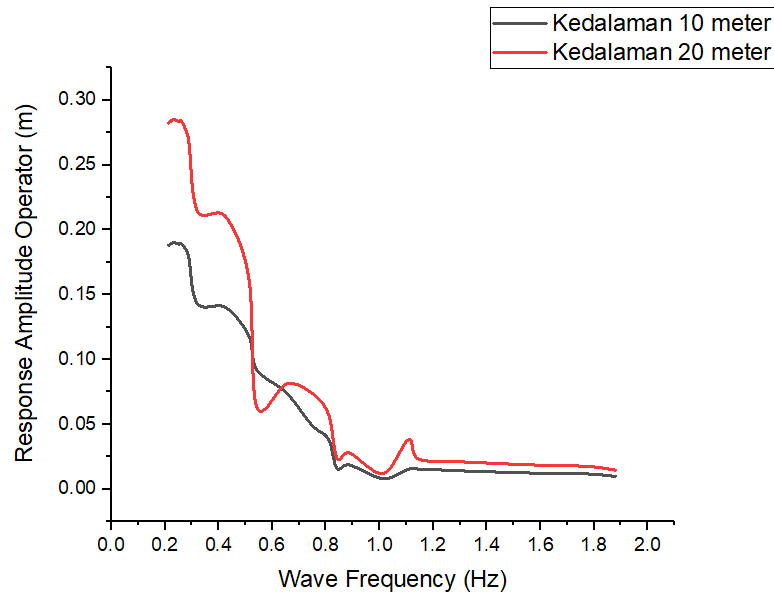
Tabel 4. 12 Peningkatan RAO pada Variasi Gelombang *Irregular*

No.	RAO	<i>Trimaran Single</i>		<i>Catamaran Single</i>		<i>Trimaran Array</i>		<i>Catamaran Array</i>	
		<i>Irr. Wave 2</i>	<i>Irr. Wave 3</i>	<i>Irr. Wave 2</i>	<i>Irr. Wave 3</i>	<i>Irr. Wave 2</i>	<i>Irr. Wave 3</i>	<i>Irr. Wave 2</i>	<i>Irr. Wave 3</i>
1	<i>Surge</i> (m)	17%	27%	19%	29%	18%	22%	20%	25%
2	<i>Sway</i> (m)	34%	40%	37%	44%	29%	33%	30%	33%
3	<i>Heave</i> (m)	23%	15%	24%	16%	14%	16%	17%	19%
4	<i>Roll</i> (°)	30%	52%	32%	57%	29%	44%	31%	48%
5	<i>Pitch</i> (°)	40%	42%	41%	45%	17%	25%	20%	27%
6	<i>Yaw</i> (°)	82%	88%	90%	85%	35%	40%	36%	43%
Rata-rata Translasi		25%	27%	27%	30%	20%	24%	22%	26%
Rata-rata Rotasi		51%	61%	54%	62%	27%	36%	29%	39%

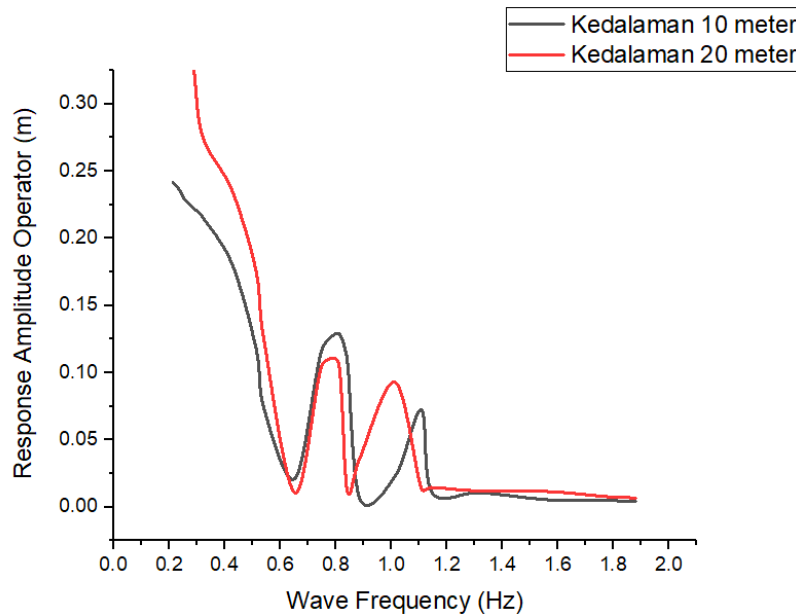
Nilai RAO pada Tabel 4.12 diperoleh dengan membandingkan nilai RAO pada masing-masing variasi gelombang *irregular 2* dan *irregular 3* terhadap RAO pada variasi gelombang *irregular 1*. Hasil komputasi menunjukkan bahwa untuk variasi *irregular wave 2* peningkatan yang paling besar terjadi ialah pada model *Catamaran Single* sebesar 27% untuk translasional dan 54% untuk rotasional. Kemudian, untuk variasi *irregular wave 3* juga dialami *Catamaran Single* yang memiliki peningkatan paling besar terjadi dengan 30% untuk translasional dan 63% untuk rotasional. Oleh karena itu, berdasarkan peningkatan nilai RAO yang terjadi didapat bahwa *Catamaran Single* memiliki performa paling buruk dalam menghadapi gangguan yang diberikan (gelombang). Hal ini juga dijelaskan pada hasil analisis di sub-bab sebelumnya (Sub-bab 4.3) dimana model *Catamaran Single* memiliki nilai pengurangan RAO yang paling rendah dibandingkan model lainnya.

Variasi kedalaman merupakan salah satu pengaruh atau faktor dari besar atau kecilnya nilai RAO dari suatu *pontoon*. Dimana pada simulasi penelitian ini digunakan variasi nilai kedalaman perairan, yaitu 10 meter dan 20 meter. Variasi yang digunakan ini merupakan acuan

dari kedalaman kategori *nearshore* di perairan Pulau Matak, Kepulauan Riau dengan bantuan informasi dari *website Global Wind Atlas*. Pada Gambar 4.63 dan 4.64 di bawah ini merupakan hasil perbandingan dari variasi kedalaman yang terjadi baik dari *single pontoon*, maupun *array pontoon* dengan variasi kedalaman. Perbandingan yang dilakukan ini diambil dari keadaan 6 *mooring line* dengan *irregular wave* 0.4 meter.



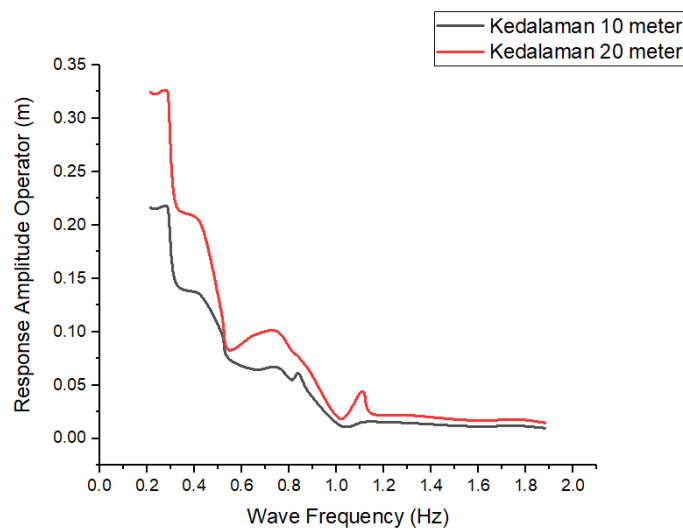
Gambar 4. 63 RAO Surge Variasi Kedalaman pada *Trimaran Array*



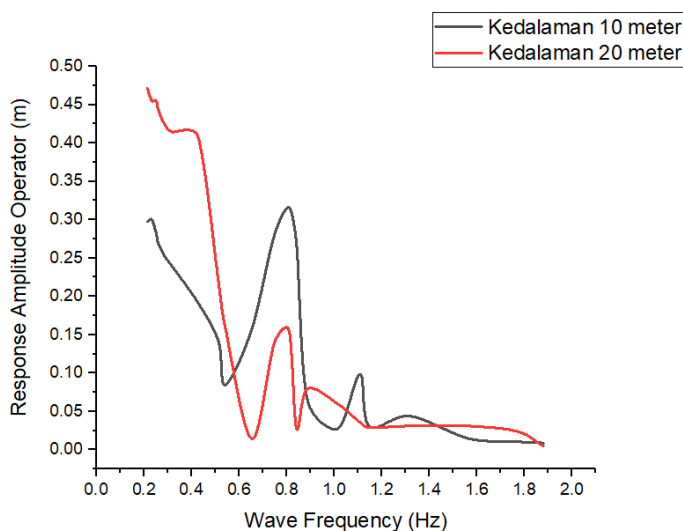
Gambar 4. 64 RAO Surge Variasi Kedalaman pada *Trimaran Single*

Berdasarkan hasil perbandingan model *Trimaran Array* dan *Trimaran Single* di atas, dapat ddilihat perbedaan nilai RAO secara signifikan ketika berada di dua kedalaman perairan yang

berbeda. *Trimaran Array* pada kedalaman 20 meter jauh lebih cepat dalam mengurangi adanya eksitasi gelombang jika dibandingkan dengan *Trimaran Single*. Hal serupa pun juga terjadi pada kedalaman 10 meter, dimana penurunan nilai RAO *Surge* pada *Trimaran Array* lebih cepat dibandingkan *Trimaran Single*. Nilai rata-rata RAO *Surge* untuk *Trimaran Array* saat kedalaman 10 meter ialah 0.08 m, sedangkan saat kedalaman 20 meter rata-ratanya ialah 20 m. Di sisi lain, nilai rata-rata RAO *Surge Trimaran Single Single* saat kedalaman 10 meter ialah. Kemudian, adapun hasil perbandingan yang dilakukan pada model *Catamaran Array* dan *Catamaran Single* seperti Gambar 4.65 dan 4.66 di bawah berikut.



Gambar 4. 65 RAO *Surge* Variasi Kedalaman pada *Catamaran Array*



Gambar 4. 66 RAO *Surge* Variasi Kedalaman pada *Catamaran Single*

Berdasarkan kedua gambar di atas, dapat dilihat perbedaan yang signifikan pada *Catamaran Single* dan *Array* saat merespon datangnya gelombang pada kedalaman yang berbeda. Rata-rata

nilai RAO *Surge Catamaran Array* saat kedalaman 10 meter ialah 0.09 meter dan untuk kedalaman 20 meter ialah 0.13 meter. Sedangkan, untuk *Catamaran Single* diperoleh rata-rata nilai RAO *Surge* untuk kedalaman 10 meter ialah 0.16 meter dan untuk kedalaman 20 meter ialah 0.19 meter. Artinya, pada kedalaman 10 meter respon gerak baik dari *Catamaran Single*, maupun *Array* memiliki nilai RAO yang cenderung lebih rendah. Pada kedalaman 20 meter, dapat dilihat ada beberapa *peak* yang terbentuk di frekuensi awal lebih besar dimana menandakan respon gerak pertama kali pada *Catamaran Pontoon* lebih besar.

Tabel 4. 13 Peningkatan Nilai RAO pada Variasi Kedalaman

No.	RAO	<i>Trimaran Single</i>	<i>Catamaran Single</i>	<i>Trimaran Array</i>	<i>Catamaran Array</i>
		20 meter			
1	<i>Surge</i> (m)	11%	14%	9%	10%
2	<i>Sway</i> (m)	46%	51%	30%	32%
3	<i>Heave</i> (m)	18%	20%	7%	8%
4	<i>Roll</i> (°)	48%	49%	25%	27%
5	<i>Pitch</i> (°)	31%	33%	29%	31%
6	<i>Yaw</i> (°)	30%	32%	25%	27%
Rata-rata Translasi		25%	28%	21%	23%
Rata-rata Rotasi		36%	38%	26%	28%

Berdasarkan Tabel 4.13 pun diperoleh nilai peningkatan RAO tiap sumbu baik pada *single pontoon*, maupun *array pontoon*. Berdasarkan tabel tersebut, peningkatan nilai RAO translasi dan rotasi paling besar diperoleh pada *Catamaran Single*. Artinya, dengan adanya peningkatan besar *environment challenge* kedalaman perairan ini membuat pergerakan model *Catamaran Single* paling besar apabila dibandingkan dengan model *pontoon* lainnya. Tabel tersebut merupakan peningkatan nilai RAO yang dibandingkan dengan nilai RAO yang terjadi pada kedalaman 10 meter.

4.6 Perbandingan Nilai RAO Terhadap *Standard* PIANC

Hasil *Response Amplitude Operator* (RAO) yang diperoleh dari simulasi CFD perlu dianalisis kembali untuk mengetahui apakah model yang telah dibuat sudah memenuhi *standard* RAO yang sesuai. Akan tetapi, demikian *standard* untuk RAO pada *Floating Photovoltaic*, terutama untuk *Marine Floating Photovoltaic*, belum ditetapkan secara detail dan masih berupa *Best Practice* untuk *Floating Photovoltaic* yang adalah *standard* PIANC (*Permanent International Association of Navigation Congresses*), seperti yang digunakan oleh Tajali & Shafieefar (2011). *Standard* PIANC biasa digunakan secara umum untuk struktur terapung baik *fixed structure* atau *move structure*, terutama pada lingkungan laut. *Standard* PIANC juga merupakan salah satu rujukan yang digunakan pada *Best Practice for Floating Photovoltaic* milik DNV (Jasper, 2021). *Standard* ini menentukan nilai maksimal untuk gerakan RAO pada masing-masing derajat kebebasan (*translational* dan *rotasional*) pada *Floating Photovoltaic* atau struktur terapung tertentu. Berdasarkan *standard* PIANC, nilai RAO maksimum untuk masing-masing derajat kebebasan (*degree of freedom*) ditunjukkan pada Tabel 4.14.

Tabel 4. 14 *Standard* RAO untuk *Floating Photovoltaic* (Tajali & Shafieefar, 2011)

No	Gerakan	Nilai	Satuan
1	<i>Surge</i>	0,5	m
2	<i>Sway</i>	0,6	m
3	<i>Heave</i>	0,4	m
4	<i>Roll</i>	1,5	<i>degree</i>
5	<i>Pitch</i>	0,5	<i>degree</i>
6	<i>Yaw</i>	1	<i>degree</i>

Nilai-nilai tersebut dapat dijadikan parameter terkait apakah desain *Marine FPV* yang dibuat telah sesuai dan memenuhi *standard* atau masih harus diperbaiki pada beberapa aspeknya. Perbandingan nilai RAO pada *single pontoon* dan *array pontoon* dengan *Standard* PIANC ditunjukkan pada Tabel 4.15 sampai Tabel 4.20 (*4 mooring line* dengan kedalaman 10 meter).

Tabel 4. 15 RAO *Surge* Terhadap *Standard* PIANC

Gerakan	Model Geometri	Jumlah Mooring Line (buah)	RAO (m)	Standard (m)	Keterangan
<i>Surge (m)</i>	<i>Trimaran Single</i>	4	0.13	0.5	Memenuhi
		6	0.08		
	<i>Catamaran Single</i>	4	0.18		
		6	0.12		
	<i>Trimaran Array</i>	4	0.08		
		6	0.04		
	<i>Catamaran Array</i>	4	0.09		
		6	0.05		

Tabel 4. 16 RAO *Sway* Terhadap *Standard* PIANC

Gerakan	Model Geometri	Jumlah Mooring Line (buah)	RAO (m)	Standard (m)	Keterangan
<i>Sway (m)</i>	<i>Trimaran Single</i>	4	0.26	0.6	Memenuhi
		6	0.11		
	<i>Catamaran Single</i>	4	0.31		
		6	0.15		
	<i>Trimaran Array</i>	4	0.05		
		6	0.04		
	<i>Catamaran Array</i>	4	0.06		
		6	0.05		

Tabel 4. 17 RAO *Heave* Terhadap *Standard* PIANC

Gerakan	Model Geometri	Jumlah Mooring Line (buah)	RAO (m)	Standard (m)	Keterangan
<i>Heave</i> (m)	<i>Trimaran Single</i>	4	0.12	0.4	Memenuhi
		6	0.10		
	<i>Catamaran Single</i>	4	0.13		
		6	0.11		
	<i>Trimaran Array</i>	4	0.07		
		6	0.04		
	<i>Catamaran Array</i>	4	0.08		
		6	0.05		

Tabel 4. 18 RAO *Roll* Terhadap *Standard* PIANC

Gerakan	Model Geometri	Jumlah Mooring Line (buah)	RAO (m)	Standard (°)	Keterangan
<i>Roll</i> (°)	<i>Trimaran Single</i>	4	1.02	1.5	Memenuhi
		6	0.75		
	<i>Catamaran Single</i>	4	1.05		
		6	0.83		
	<i>Trimaran Array</i>	4	0.06		
		6	0.04		
	<i>Catamaran Array</i>	4	0.07		
		6	0.05		

Tabel 4. 19 RAO *Pitch* Terhadap *Standard* PIANC

Gerakan	Model Geometri	Jumlah Mooring Line (buah)	RAO (m)	Standard (°)	Keterangan
<i>Pitch</i> (°)	<i>Trimaran Single</i>	4	0.64	0.5	Tidak Memenuhi
		6	0.55		
	<i>Catamaran Single</i>	4	0.72		
		6	0.66		
	<i>Trimaran Array</i>	4	0.56		
		6	0.52		
	<i>Catamaran Array</i>	4	0.58		
		6	0.53		

Tabel 4. 20 RAO *Yaw* Terhadap *Standard* PIANC

Gerakan	Model Geometri	Jumlah Mooring Line (buah)	RAO (m)	Standard (°)	Keterangan
<i>Yaw</i> (°)	<i>Trimaran Single</i>	4	0.52	1	Memenuhi
		6	0.38		
	<i>Catamaran Single</i>	4	0.69		
		6	0.45		
	<i>Trimaran Array</i>	4	0.31		
		6	0.24		
	<i>Catamaran Array</i>	4	0.36		
		6	0.27		

Berdasarkan tabel-tabel di atas, dapat dilihat bahwa nilai respon gerak rotasional sumbu-Y baik dari *single pontoon*, maupun *array pontoon* memiliki rata-rata nilai RAO *Pitch* yang melebihi nilai acuan PIANC. Sementara itu, untuk nilai gerak *Surge*, *Sway*, *Heave*, *Pitch*, dan *Yaw* sudah memenuhi *standard* PIANC pada semua variasi baik pada variasi 4 *mooring line*, maupun pada 6 *mooring line*. Nilai RAO *Pitch* melewati nilai batas *standard* disebabkan

beberapa hal, seperti pemilihan lingkungan perairan laut dengan parameter gelombang yang ekstrim dengan rentang 0.2 – 0.4 meter, sehingga menghasilkan nilai RAO yang tinggi. Gerakan *Pitch* merupakan gerakan *resonant vertical* (gerakan vertikal akibat resonansi) yang berhubungan dengan ketinggian posisi struktur *pontoon* dan tegak lurus dengan arah gelombang (Xu et al., 2018). Artinya, saat diberikan impuls berupa gelombang dengan amplitudo tinggi dengan variasi frekuensi yang signifikan, sistem *Marine FPV* akan bergerak dengan *Response Amplitude* yang besar. Nilai RAO *Pitch* yang belum memenuhi *standard* ini dapat diantisipasi dengan penambahan jumlah *array pontoon* atau penambahan jumlah *mooring line* pada sisi 90° dari arah datang gelombang (tegak lurus arah gelombang), sehingga pengaruh dari gelombang pada nilai RAO dapat diminimalisir.

4.7 Diskusi dan Rekomendasi

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui efek pengaruh variasi geometri dari *Catamaran Pontoon* dan *Trimaran pontoon*, dimana ada dua jenis model yang dilakukan ialah *single pontoon* dan *array pontoon*. Analisis yang dilakukan ini bertujuan untuk mengetahui nilai respon gerak dari tiap-tiap model (*Response Amplitude Operator*) dari tiap enam sudut derajat kebebasan (*6 Degree of Freedom*) pada sistem *Marine FPV*. Nilai RAO sendiri merupakan nilai respon gerak dari *pontoon* yang beroperasi pada *water body* tertentu yang mana RAO sendiri merupakan fungsi transfer yang hanya dapat didefinisikan saat gerakan sebuah *floating body* diasumsikan bersifat linier. RAO pada perairan laut (*marine environment*) dengan frekuensi gelombang tertentu, ditentukan dengan menggunakan pendekatan simulasi numerik untuk memprediksi respon pergerakan *pontoon*, seperti gerakan *Surge* (sumbu-X), *Sway* (sumbu-Y), *Heave* (sumbu-Z), *Roll* (sumbu-RX), *Pitch* (sumbu-RY), dan *Yaw* (sumbu-RZ) (Ibinabo & Tamunodukobipi, 2019).

Pendekatan analisis pada penelitian Tugas Akhir ini menggunakan simulasi CFD (*Computational Fluid Dynamics*) Aqwa sebagai metode utama dalam mendapatkan nilai RAO dari *Catamaran Pontoon* dan *Trimaran Pontoon*. Adapun tahapan yang dilakukan yang telah dijelaskan pada Bab 3 secara detail bagaimana pengambilan nilai RAO baik dari gerak translasi, maupun gerak rotasional. Penelitian yang dilakukan menggunakan variasi utama, pengaruh jenis geometri *single pontoon* dan *array pontoon* dan variasi jumlah *mooring line*. Selain itu, adapun variasi *environment challenge* di beberapa keadaan yang digunakan, seperti variasi *irregular wave*, dan variasi kedalaman perairan. Pada Sub-bab 4.3 – 4.5 telah dijelaskan

perbedaan nilai RAO dari tiap-tiap variasi yang telah didapatkan dan bagaimana perbedaan karakteristik yang terjadi baik respon gerak secara translasi, maupun rotasi.

Sistem *Floating photovoltaic* (FPV) merupakan salah satu pengembangan dari penggunaan sumber energi terbarukan yang memanfaatkan daerah perairan sebagai tempat meng-*install photovoltaic* di atas *pontoon* atau struktur terapung (Seth Block et al., 2019). Maka dari itu, pemilihan jenis bentuk *pontoon* penting untuk dianalisis untuk dapat disesuaikan dengan keadaan perairan yang menjadi tempat instalasi sistem FPV. Salah satu variasi utama yang ada pada penelitian Tugas Akhir ini ialah menganalisis struktur *Trimaran Pontoon* dan *Catamaran Pontoon* dengan membandingkan nilai respon gerak translasi dan rotasi ketika adanya gelombang datang. Pemilihan dari jenis geometri ini pun diambil dari penelitian sebelumnya yang membahas bagaimana perbandingan *hull* kapal *Catamaran* dan *Trimaran* di perairan *nearshore*. *Catamaran Pontoon* sendiri merupakan *pontoon* yang memiliki dua *hull* simetris kanan-kiri. Sedangkan, untuk *Trimaran Pontoon* merupakan pembaharuan dari *Catamaran Pontoon* dengan menambahkan satu *hull* di tengah yang membagi secara simetris (Siagian et al., 2022). Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan, adapun hasil nilai RAO yang menunjukkan karakteristik respon gerak dari *Trimaran* dan *Catamaran Pontoon* baik pada keadaan *single pontoon*, maupun *array pontoon*.

Hasil analisis variasi geometri yang telah dilakukan pada sub-bab sebelumnya menjelaskan bahwa penambahan *hull pontoon* di bagian tengah (*Trimaran Pontoon*) menunjukkan nilai respon gerak *pontoon* yang lebih kecil dibandingkan *Catamaran Pontoon*. Selain itu, pemodelan *array pontoon* pun memberikan gambaran yang sama bahwa terjadi penurunan nilai RAO jika dibandingkan dengan *single pontoon*. Pada Tabel 4.9 menunjukkan bahwa penurunan nilai RAO *Trimaran Single* terbesar terjadi pada gerak translasi sumbu-X (*Surge*) sebesar 26% jika dibandingkan dari model *Catamaran Single*. Di sisi lain, penurunan nilai RAO pada *array pontoon* terjadi paling besar pada model *Trimaran Array* sebesar 97% untuk gerakan *Pitch* dan untuk *Catamaran Pontoon* penurunan terbesar terjadi pada gerakan *Roll* sebesar 94%. Konsep dari nilai RAO dapat dilihat dari Persamaan Morrison dimana respon gerak sebuah *pontoon* dalam menanggapi datangnya gelombang berkaitan erat dengan besarnya luasan permukaan *pontoon* yang terkena gelombang air atau *cross-section area*. Persamaan ini juga menjelaskan bahwa semakin besar nilai *cross-section area* maka akan meningkatkan stabilitas dan ketahanan *pontoon* terhadap gelombang (Orca, 2022). *Cross-section area* berhubungan erat dengan nilai *water plane area* dimana dengan penambahan *hull pontoon* di tengah menambah nilai *water plane area* atau volume permukaan yang tercelup. Kemudian,

ketika *pontoon* dilakukan *array* atau penggabungan dua *pontoon*, akan didapat nilai RAO yang lebih rendah karena semakin besar massa dan area *pontoon* yang dapat menahan adanya eksitasi gelombang. Hal ini pun dibuktikan pada Tabel 4.9 pengurangan nilai RAO terbesar terjadi pada *Trimaran Array Pontoon* dengan pada sumbu *Pitch* (RY). Akan tetapi, pengurangan nilai RAO pada *Catamaran Array* pun cukup besar pada sumbu *Roll* (RX), sehingga dapat disimpulkan bahwa kedua model *array* ini mampu memberikana solusi dalam pengurangan respon gerak berlebih pada *pontoon*. Dengan karakteristik yang berbeda dari *Trimaran Array* dan *Catamaran Array* membuat kedua pilihan ini dapat dijadikan pertimbangan untuk solusi dalam memiliki model *pontoon* untuk sistem *Marine FPV* sesuai dengan kebutuhan dan urgensinya.

Di sisi lain, adapun analisis yang telah dilakukan pada variasi jumlah *mooring line* di sub-bab sebelumnya. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penambahan jumlah *mooring line* mampu membagi nilai tegangan *mooring* lebih banyak, sehingga kemampuan dalam menahan struktur *pontoon* akan semakin kuat dalam menghadapi eksitensi gelombang. Penurunan nilai RAO diperoleh baik model *single pontoon* ataupun *array pontoon* ketika dilakukan penambahan jumlah *mooring line*. Penurunan terbesar nilai RAO gerak translasi ialah pada *Trimaran Array* sebesar 38% dan untuk penurunan nilai RAO rotasi terbesar terjadi pada *Trimaran Single* sebesar 26%. Pembuktian ini dilandaskan dengan Persamaan 2.22 dimana total gaya yang diterima pada *mooring line* berkaitan erat dengan tegangan tali *mooring*, gaya berat, Gaya Morrison, gaya reaksi dari *seabed*, gaya damping dari *seabed*, dan gaya gesek yang dipengaruhi oleh *seabed*. Penambahan jumlah *mooring line* akan menambahkan nilai massa jenis tali *mooring* dan menyebabkan semakin besar *stiffness* yang didapat. Semakin besar nilai *stiffness*, maka semakin kecil tegangan yang dialami sehingga semakin kecil respon pergerakan *pontoon* ketika mengalami eksitasi gelombang. adapun faktor dari pemilihan bahan *mooring line* dalam menentukan nilai *stiffness*, tetapi pada penelitian ini bahan yang digunakan ialah *polyester* berdasarkan jurnal acuan.

Persamaan total dari *Hydrodynamic Force* merupakan persamaan utama dari pergerakan sebuah benda terapung yang terdiri dari Froude-Krylov *Force*, *Radiation Force*, *Diffraction Force*, dan *Viscous Force* (Dallán Friel, 2020). Dimana jika disimpulkan persamaan *Hidrodynamic Load Model* pada Persamaan 2.12 menjelaskan adanya faktor kedalaman air dan ketinggian gelombang yang menentukan nilai pergerakan benda terapung. Maka dari itu, adapun hasil analisis yang telah dilakukan pada sub-bab sebelumnya dimana terlihat adanya peningkatan nilai RAO seiring bertambahnya kedalaman perairan. Peningkatan nilai RAO ini terjadi baik dari model *single pontoon*, maupun *array pontoon*.

Penting untuk diperhatikan bahwasannya meskipun diperoleh presentasi reduksi dan peningkatan RAO yang signifikan pada variasi geometri dan *mooring line*, tetapi terdapat gerakan pada RAO yang belum memenuhi *standard* PIANC untuk gerakan pada struktur terapung. Gerakan tersebut ialah gerakan rotasional *Pitch*. Gerakan sumbu *Pitch* merupakan gerakan yang sensitif terhadap perubahan frekuensi gelombang yang signifikan, sehingga akan memiliki nilai amplitudo yang lebih besar dibandingkan gerakan-gerakan lainnya. Pada penelitian berikutnya, direkomendasikan untuk lebih memperhatikan desain yang berkaitan dengan gerakan *Pitch*, seperti jumlah *mooring line*, penempatan posisi *mooring line* dan dimensi struktur pontoon. Parameter desain untuk FPV dijelaskan lebih rinci dalam *Best Practice for FPV* milik DNV (Jasper, 2021), yang telah digunakan oleh lebih dari 20 pengembangan (*Developer*) *floating photovoltaic* berskala internasional. *Best practice* ini menjelaskan mengenai beberapa aspek yang perlu diperhatikan dalam mendesain *floating photovoltaic*, seperti survey keadaan kondisi lingkungan, *anchoring*, *mooring*, desain sistem, dan struktur terapung yang digunakan pada FPV.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi geometri, jumlah *mooring line*, kedalaman, dan *irregular* gelombang memberikan dampak yang signifikan terhadap respon hidrodinamik pada *Marine* FPV. Penggunaan *load* gelombang yang besar pada perairan laut yang dalam dapat menghasilkan nilai RAO yang besar pada tiap model *pontoon*. Variasi dalam penelitian ini dapat dijabarkan secara terpisah, tetapi pergerakan sistem *Marine* FPV dengan penyesuaian terhadap kapasitas sistem, *layout*-ing panel, dan orientasi sistem terapung terhadap arah datang gelombang. penyesuaian yang dilakukan tentunya dengan memperhatikan hubungan variasi-variasi yang digunakan dalam penelitian. Hubungan tersebut dijelaskan melalui Persamaan 2.12, Persamaan 2.13, Persamaan 2.14 dimana variabel-variabel yang divariasikan saling berkaitan dan mempengaruhi satu sama lain. Dengan menggunakan persamaan matematis tersebut, dapat dijabarkan parameter desain *Marine* FPV secara lebih komprehensif untuk kondisi perairan laut tertentu.

Tugas Akhir ini diharapkan dapat memberikan pemahaman dan gambaran mengenai parameter-parameter desain dan lingkungan pada *Marine* FPV. Masih ada banyak aspek yang harus diperdalam pada penelitian ini. Beberapa hal yang perlu diperhatikan untuk penelitian berikutnya antara lain variasi penempatan *mooring line*, bahan *mooring line*, diameter *cylindrical hull pontoon*, dan frekuensi natural struktur. Sementara itu untuk parameter lingkungan, beberapa aspek yang bisa dipertimbangkan ialah variasi *seabed*, jenis tambatan, arah datang gelombang, dan simulasi *Cross-Swell* (gelombang silang).

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan simulasi dan analisis dari beberapa variasi yang telah dilakukan, diperoleh kesimpulan sementara sebagai berikut:

- a. Efek variasi geometri *pontoon* memberikan dampak yang besar terhadap *Response Amplitude Operator* (RAO). Perbedaan geometri dari *single pontoon* dan *array pontoon* memberikan perbedaan nilai *Hydrodynamic Load* dan besar pengaruh eksitasi gelombang *Irregular* terhadap *Marine FPV*. Dari perbandingan gerak *single pontoon*, diperoleh penurunan *Trimaran Single* pada sumbu *Surge* sebesar 26%. Sedangkan, untuk *array pontoon* didapat hasil simulasi bahwa adanya penurunan RAO baik pada *Trimaran Array*, maupun *Catamaran Array*. Penurunan *Trimaran Array* paling besar terjadi ialah sumbu *Pitch* dengan penurunan 97% dan untuk *Catamaran Array* penurunan terbesar terjadi pada sumbu *Roll* sebesar 94%. Penambahan *hull pontoon* dan penggabungan dua *pontoon* membuktikan adanya reduksi nilai gelombang yang terjadi karena adanya bertambahnya nilai *cross-section area* membantu respon pergerakan *pontoon* lebih stabil.
- b. Penambahan jumlah *mooring line* memberikan dampak terhadap besar nilai RAO yang terbentuk dari sebuah struktur *pontoon*. Berdasarkan analisis data yang telah dilakukan, jumlah 6 *mooring line* pada *single pontoon* dan *array pontoon* memberikan pengurangan nilai RAO apabila dibandingkan dengan jumlah 4 *mooring line*. Penambahan *mooring line* rata-rata dapat mengurangi nilai *Response Amplitude Operator* pada keenam derajat kebebasan dan nilai *tension* pada tali tamabat (*mooring line*). Model geometri yang memiliki pengurangan RAO paling besar setelah penambahan jumlah *mooring line* berurutan adalah *Trimaran Array* (translasional 38%; rotasional 21%), *Catamaran Array* (translasional 33%; rotasional 16%), *Trimaran Single* (translasional 37%; rotasional 26%), dan *Catamaran Single* (translasional 31%; rotasional 21%). Rata-rata penurunan RAO yang terjadi ialah 28% dan *tension mooring* sebesar 23%.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Perlu diperhatikan *properties* detail dari *material design* pada *3D modelling* dimana terdapat banyak bahan material lainnya dengan *density* yang berbeda-beda.
- b. Selain itu, perlu diperhatikan penempatan letak CoG dan CoB pada simulasi *array pontoon* agar *calculation* dapat berjalan dengan baik dan tidak ada hambatan. Parameter pendukungnya ialah penyesuaian letak CoG dan CoB pada masing-masing *pontoon*.
- c. Terdapat beberapa hal yang dapat dilakukan pada penelitian selanjutnya, yaitu pemilihan material yang digunakan untuk model geometri *pontoon* pada *modelling 3D*, penambahan jumlah *array pontoon*, penempatan posisi *mooring line*, jumlah *mooring line*, dan parameter kondisi perairan yang bisa divariasikan.

DAFTAR PUSTAKA

- Adam, L., Penelitian Ekonomi, P., & Ilmu Pengetahuan Indonesia, L. (n.d.). *DINAMIKA SEKTOR KELISTRIKAN DI INDONESIA: KEBUTUHAN DAN PERFORMA PENYEDIAAN DYNAMICS OF ELECTRICITY SECTOR IN INDONESIA: THE NEEDS AND PERFORMANCE OF SUPPLY*.
- ANSYS Inc. (2015). *Introduction to ANSYS Meshing*.
- Aries Widodo, W., Yuwono, T., Indiyono, P., & Aryawan, D. (n.d.). *Pengendalian Aliran Pasif pada Silinder Sirkular dengan Inlet Disturbance Body Berbentuk Silinder Elip (AR = 1/4)*.
- Arif Arfanda Rudini. (2022). *G20 Bali Leaders' Declaration sebagai Kulminasi Penyelenggaraan Presidensi G20 Tahun 2022*. Kerja Sama Pemerintah Dengan Badan Usaha Kementerian Keuangan Republik Indonesia.
- As, D. G. (2021). *RECOMMENDED PRACTICE Design, development and operation of floating solar photovoltaic systems*.
- Babatunde, A. A., Abbasoglu, S., & Senol, M. (2018). Analysis of the impact of dust, tilt angle and orientation on performance of PV Plants. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 90, pp. 1017–1026). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.102>
- Baghfalaki, M., Kumar, S., & Das, S. (2012). *Analytical model to determine response amplitude operator of a floating body for coupled roll and yaw motions and frequency-based analysis*.
- Bayu, H., & Windarta, J. (2021). Tinjauan Kebijakan dan Regulasi Pengembangan PLTS di Indonesia. *Jurnal Energi Baru Dan Terbarukan*, 2(3), 123–132. <https://doi.org/10.14710/jebt.2021.10043>
- Blengini, G. (2020). *POLITECNICO DI TORINO Floating photovoltaic systems: state of art, feasibility study in Florida and computational fluid dynamic analysis on hurricane resistance*.
- Cheng, X., Liu, C., Zhang, Q., He, M., & Gao, X. (2021). Numerical study on the hydrodynamic characteristics of a double-row floating breakwater composed of a pontoon and an airbag. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(9). <https://doi.org/10.3390/jmse9090983>

- Dallán Friel, M. K. T. W. W. J. D. (2020). Hydrodynamic investigation of design parameters for a cylindrical type floating solar system. *Queen's University Belfast, 4th International Conference on Renewable Energies Offshore, RENEW 2020*, 763–770.
- Elektro, J. E., Nurjaman, H. B., & Purnama, T. (n.d.). *Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Sebagai Solusi Energi Terbarukan Rumah Tangga*. <https://journal.uny.ac.id/index.php/jee>
- Essak, L., & Ghosh, A. (2022). Floating Photovoltaics: A Review. In *Clean Technologies* (Vol. 4, Issue 3, pp. 752–769). MDPI. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol4030046>
- Fenerci, A., Kvåle, K. A., Xiang, X., & Øiseth, O. (2022). Hydrodynamic interaction of floating bridge pontoons and its effect on the bridge dynamic responses. *Marine Structures*, 83. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2022.103174>
- Friel, D. , K. M. , W. T. , & D. W. J. (2020). Developments in Renewable Energies Offshore. In *Developments in Renewable Energies Offshore*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003134572>
- Gabriel. (2012). *wb_aqwa_manual book*.
- Ghigo, A., & Faraggiana, E. (2022). Design and Analysis of a Floating Photovoltaic System for Offshore Installation: The Case Study of Lampedusa. *Semantic Scholar*.
- Gibson, A. , U. I. K. (2016). Analisis_CFD_Hambatan_Lambung_Kapal_Trim. *Teknik Kelautan*, 5, 2337–3539.
- Gorjian, S., Sharon, H., Ebadi, H., Kant, K., Scavo, F. B., & Tina, G. M. (2021). Recent technical advancements, economics and environmental impacts of floating photovoltaic solar energy conversion systems. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 278). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124285>
- Guo, B. , and G. A. (2005). Natural Gas Engineering Handbook (Second Edition). In *Dr. Guo, B., and Dr. Ghalambor, A.* (2nd ed., pp. 219–262).
- Hasil, J., Ilmiah, K., Pengaruh, A., Kapal, M., Kapal, M. M., Terhadap, T., Stabilitas, P., Olah, D., Kapal, G., Kasus, S., Dongkrok, K., Mutmainah, J., Amiruddin, W., Good, R., Perencanaan, L., & Dibantu Komputer, K. (2020). JURNAL TEKNIK PERKAPALAN. *Jurnal Teknik Perkapalan*, 8(1). <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/naval>
- Hidayat, O. A., Ramdani, A., Romadhoni, S. L., Islam, U., Sunan, N., & Djati Bandung, G. (2022). *PEMBANGUNAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA DI WADUK CIRATA, KABUPATEN PURWAKARTA*. 3(6).

- Ibinabo, I., & Tamunodukobipi, D. T. (2019). Determination of the Response Amplitude Operator(s) of an FPSO. *Engineering*, 11(09), 541–556. <https://doi.org/10.4236/eng.2019.119038>
- Idrus, D. M., Psi, S., & Pd, M. (2012). QUALITY OF EDUCATION AND REGIONAL EDUCATIONAL EQUITY. *PSIKOPEDAGOGIA*, 1(2).
- IESR. (2022). *POTENSI TEKNIS PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA (PLTS) TERAPUNG DI JAWA TENGAH*. <https://www.iea.org/reports/solar-pv>
- Jasper. (2021). *RECOMMENDED PRACTICE Design, development and operation of floating solar photovoltaic systems*.
- Journée, J. M. J., & Massie, W. W. (2001). *OFFSHORE HYDROMECHANICS First Edition*.
- Kanotra, R., & Shankar, R. (2022). Floating Solar Photovoltaic Mooring System Design and Analysis. *Oceans Conference Record (IEEE)*. <https://doi.org/10.1109/OCEANSSChennai45887.2022.9775352>
- Kim, S. M., Oh, M., & Park, H. D. (2019). Analysis and prioritization of the floating photovoltaic system potential for reservoirs in Korea. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(3). <https://doi.org/10.3390/app9030395>
- Kuswanto, Z. A. D. (2013). *PENGARUH BENTUK BENDA DAN KEDALAMAN TERHADAP GAYA ANGKAT KE ATAS (F A) PADA FLUIDA STATIS*.
- Lukiantchuki, M. A., Shimomura, A. P., da Silva, F. M., & Caram, R. M. (2018). Evaluation of CFD simulations with wind tunnel experiments: Pressure coefficients at openings in sawtooth building. *Acta Scientiarum - Technology*, 40. <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v40i1.37537>
- Ma, K.-T., Luo, Y., Kwan, T., & Wu, Y. (2019a). Mooring analysis. In *Mooring System Engineering for Offshore Structures* (pp. 85–114). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-818551-3.00005-3>
- Ma, K.-T., Luo, Y., Kwan, T., & Wu, Y. (2019b). Mooring design. In *Mooring System Engineering for Offshore Structures* (pp. 63–83). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-818551-3.00004-1>
- Malayjerdi, E., & Tabeshpour, M. R. (2015). *Response Amplitude Operator of Displacement, Velocity and Acceleration of TLP*. 22–25. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3013.0325>
- Moriasi, D. , J. G. A. M. W. V. L. R. L. B. R. D. H. T. L. V. (2007). *Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations*.

- Mulyabakti, C., Ihsan Jasin, M., & Mamoto, J. D. (2016). ANALISIS KARAKTERISTIK GELOMBANG DAN PASANG SURUT PADA DAERAH PANTAI PAAL KECAMATAN LIKUPANG TIMUR KABUPATEN MINAHASA UTARA. *Jurnal Sipil Statik*, 4(9), 585–594. <http://eprints.undip.ac.id/>
- Novia, P., Asngali, B., Susanto, A., Adzandy, R., & Purnomo, H. (2023). COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC (CFD) SIMULATION ON REDESIGN BAFFLES OF YOGYAKARTA INTERNATIONAL AIRPORT TRAIN FUEL TANK. *Jurnal Media Mesin*, 24(1).
- Orca. (2022). *Vessel theory: RAOs and phases*.
- Pham, H. H. (2023). Numerical modeling of a mooring line system for an offshore floating wind turbine in Vietnamese sea conditions using nonlinear materials. *Water Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2023.10.004>
- Prayuda, R., Bedasari, H., & Saputra, A. D. (n.d.). *NILAI STRATEGIS KABUPATEN KEPULAUAN ANAMBAS DALAM PENGEMBANGAN KAWASAN PARIWISATA INTERNASIONAL DI KAWASAN PERBATASAN*.
- PresMedia. (2023, March). *Peringatan BMKG, Waspada Gelombang Tinggi 4-6 M Di Natuna Dan Anambas*.
- Qomarudin, M. N., & Surabaya, M. (2017). *Kinematika dan Dinamika Gerak 6 Derajat Kebebasan*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29002.67523>
- Rebelo, R., Fialho, L., & Novais, M. H. (n.d.). *Floating photovoltaic systems: photovoltaic cable submersion and impacts analysis*.
- Reindl, T. (2019). *Where Sun Meets Water: Floating Solar Market Report*.
- Seth Block, D., Kumar Senior Director, A., Kumar, A., & Director, S. (2019). *Floating Solar Photovoltaic (FSPV): A Third Pillar to Solar PV Sector? 2 Floating Solar Photovoltaic (FSPV): A Third Pillar to Solar PV Sector?* www.teriin.org
- Shewchuk, J. R. (1996). *Triangle: Engineering a 2D Quality Mesh Generator and Delaunay Triangulator*. <http://www.cs.cmu.edu/~quake/triangle.html>
- Siagian, J., Apriyanto, I. N. P., & Djenod, K. (2022). STUDI LITERATUR: PERFORMA MODEL KAPAL BENTUK MONOHULL, KATAMARAN DAN TRIMARAN. *Citizen : Jurnal Ilmiah Multidisiplin Indonesia*, 2(3), 411–418. <https://doi.org/10.53866/jimi.v2i3.102>

- Song, J., Imani, H., Yue, J., & Yang, S. (2023). Hydrodynamic Characteristics of Floating Photovoltaic Systems under Ocean Loads. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(9). <https://doi.org/10.3390/jmse11091813>
- Song, J., Kim, J., Chung, W. C., Jung, D., Kang, Y. J., & Kim, S. (2023). Wave-induced structural response analysis of the supporting frames for multiconnected offshore floating photovoltaic units installed in the inner harbor. *Ocean Engineering*, 271. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.113812>
- Sudirman. (2015). *TESIS (TM 142501)*.
- Tajali, Z., & Shafieefar, M. (2011). Hydrodynamic analysis of multi-body floating piers under wave action. *Ocean Engineering*, 38(17–18), 1925–1933. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2011.09.025>
- Techet. (2004). *a959b94966e7bb83c36ae24f730048ca_r13_morrison*.
- Uruba, V. (2019). Reynolds number in laminar flows and in turbulence. *AIP Conference Proceedings*, 2118. <https://doi.org/10.1063/1.5114728>
- Xu, K., Gao, Z., & Moan, T. (2018). Effect of hydrodynamic load modelling on the response of floating wind turbines and its mooring system in small water depths. *Journal of Physics: Conference Series*, 1104(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1104/1/012006>
- Zulfa Faridatus. (n.d.). 2114030045-Non_Degree. 2017.

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN

Tabel A. 1 RAO *Single Pontoon*

RAO Mooring Line 4			
Sudut Derajat Kebebasan	Kedalaman (m)	Trimaran Pontoon (Single)	Catamaran Pontoon (Single)
Surge X (m)	10	0.0878	0.1752
	20	0.0853	0.147
Sway Y (m)	10	0.00001116	0.000016029
	20	0.0000137	0.000017
Heave Z (m)	10	0.5139	0.4784
	20	0.5342	0.4296
Roll RX (°)	10	0.00489	0.00238
	20	0.00362	0.0013
Pitch RY (°)	10	20.87	20.55
	20	19.09	17.85
Yaw RZ (°)	10	0.01387	0.02172
	20	0.00802	0.00817
RAO Mooring Line 6			
Sudut Derajat Kebebasan	Kedalaman (m)	Trimaran Pontoon (Single)	Catamaran Pontoon (Single)
Surge X (m)	10	0.0872	0.1711
	20	0.0888	0.1585
Sway Y (m)	10	0.00001726	0.00001603
	20	0.0000115	0.0000166
Heave Z (m)	10	0.5308	0.4693
	20	0.529	0.4689
Roll RX (°)	10	0.00638	0.00267
	20	0.00316	0.00143
Pitch RY (°)	10	18.154	20.035
	20	17.206	17.255
Yaw RZ (°)	10	0.0181	0.0196
	20	0.00815	0.00746

Tabel A. 2 Nilai RAO *Surge Single Pontoon* (10 meter)

Perbandingan Surge (X) Kedalaman 10 m			
Frekuensi	Trimaran Single_10_6_3	Frekuensi	Catamaran Single_10_6_3
0.21	0.205716595	0.21	0.360140055
0.23	0.20268026	0.23	0.36282146
0.25	0.19835104	0.25	0.346204609
0.26	0.19621098	0.26	0.335761517
0.29	0.1938124	0.29	0.323190689
0.32	0.190010205	0.32	0.313437462
0.43	0.156527698	0.43	0.234660402
0.47	0.156527698	0.47	0.234660402
0.51	0.114982456	0.51	0.148547992
0.54	0.114982456	0.54	0.117162175
0.65	1.05E-02	0.65	0.106205702
0.75	6.08E-02	0.75	0.239962608
0.81	4.48E-02	0.81	0.22846278
0.84	6.12E-03	0.84	0.173007563
0.89	6.12E-03	0.89	1.05E-02
1.01	2.11E-02	1.01	3.59E-02
1.11	4.74E-03	1.11	3.55E-03
1.24	8.28E-03	1.24	2.60E-02
1.32	8.25E-03	1.32	3.52E-02
1.56	1.04E-02	1.56	2.22E-02
1.77	4.30E-03	1.77	3.49E-03
1.88	3.79E-03	1.88	2.70E-03

Tabel A. 3 Nilai RAO *Surge Single Pontoon* (20 meter)

Perbandingan Surge (X) Kedalaman 20 m			
Frekuensi	Trimaran_20_6_3	Frekuensi	Catamaran_20_6_3
0.21	0.195923164	0.21	0.327330053
0.23	0.190876484	0.23	0.314637601
0.25	0.188205197	0.25	0.303938985
0.26	0.187182829	0.26	0.296591967
0.29	0.198814675	0.29	0.320886731
0.32	0.207682341	0.32	0.353265285
0.43	0.197413594	0.43	0.325669169
0.47	0.173482358	0.47	0.279404283
0.51	0.136651054	0.51	0.20723559
0.54	9.69E-02	0.54	0.120846957
0.65	1.94E-02	0.65	2.18E-02
0.75	2.99E-02	0.75	8.34E-02
0.81	2.80E-02	0.81	0.284932762
0.84	7.63E-03	0.84	6.10E-02
0.89	5.21E-03	0.89	1.77E-02
1.01	1.56E-02	1.01	3.54E-02

1.11	4.09E-02	1.11	3.46E-02
1.24	1.07E-02	1.24	2.30E-02
1.32	8.80E-03	1.32	3.57E-02
1.56	6.19E-03	1.56	1.74E-02
1.77	4.84E-03	1.77	1.92E-02
1.88	4.17E-03	1.88	0.003134188

Tabel A. 4 Nilai RAO Sway *Single Pontoon* (10 meter)

Perbandingan Sway (Y) Kedalaman 10 m			
Frekuensi	Trimaran_10_6_3	Frekuensi	Catamaran_10_6_3
0.21	1.68E-06	0.21	2.25E-06
0.23	1.99E-06	0.23	2.84E-06
0.25	2.06E-06	0.25	2.87E-06
0.26	2.19E-06	0.26	3.04E-06
0.29	2.39E-06	0.29	3.51E-06
0.32	3.31E-06	0.32	3.92E-06
0.43	5.48E-06	0.43	6.74E-06
0.47	7.65E-06	0.47	7.30E-06
0.51	9.12E-06	0.51	5.72E-06
0.54	8.99E-06	0.54	2.17E-06
0.65	7.22E-06	0.65	6.35E-06
0.75	8.05E-06	0.75	1.27E-05
0.81	3.30E-05	0.81	9.23E-06
0.84	3.63E-05	0.84	1.10E-05
0.89	2.62E-05	0.89	4.31E-05
1.01	1.46E-05	1.01	1.31E-05
1.11	1.82E-05	1.11	1.60E-05
1.24	1.52E-05	1.24	4.47E-05
1.32	1.33E-05	1.32	8.67E-05
1.56	1.33E-04	1.56	4.70E-05
1.77	1.59E-05	1.77	1.08E-05
1.88	1.37E-05	1.88	1.16E-05

Tabel A. 5 Nilai RAO Sway *Single Pontoon* (20 meter)

Perbandingan Sway (Y) Kedalaman 20 m			
Frekuensi	Trimaran_20_6_3	Frekuensi	Catamaran_20_6_3
0.21	0.000001363	0.21	3.01E-06
0.23	0.000001489	0.23	3.01E-06
0.25	0.000001144	0.25	3.18E-06
0.26	0.000001866	0.26	3.44E-06
0.29	0.000002765	0.29	4.73E-06
0.32	0.000002636	0.32	5.10E-06
0.43	0.000006443	0.43	8.04E-06

0.47	0.000008803	0.47	8.54E-06
0.51	0.000008474	0.51	6.27E-06
0.54	0.000006974	0.54	3.48E-06
0.65	0.000003023	0.65	9.61E-06
0.75	0.000006852	0.75	5.95E-06
0.81	0.000033961	0.81	1.03E-05
0.84	0.000014762	0.84	8.54E-06
0.89	0.000004065	0.89	1.43E-05
1.01	0.000007130	1.01	1.32E-05
1.11	0.000009153	1.11	1.54E-05
1.24	0.000016115	1.24	2.85E-05
1.32	0.000025441	1.32	4.08E-05
1.56	0.000052014	1.56	1.59E-04
1.77	0.000021155	1.77	6.52E-06
1.87	0.000017614	1.87	4.26E-06

Tabel A. 6 Nilai RAO *Heave Single Pontoon* (10 meter)

Perbandingan Heave (Z) Kedalaman 10 m			
Frekuensi	Trimaran_10_6_3	Frekuensi	Catamaran_10_6_3
0.21	1.205004334	0.21	1.067608714
0.23	1.26091063	0.23	1.082336426
0.25	1.327309608	0.25	1.101014376
0.26	1.370558262	0.26	1.109595895
0.29	1.451105595	0.29	1.121043205
0.32	1.587528586	0.32	1.131269097
0.43	1.148450971	0.43	0.877757013
0.51	0.689978421	0.51	0.320699751
0.54	0.600221694	0.54	0.32464081
0.70	8.47E-02	0.70	0.424991816
0.75	8.05E-02	0.75	0.335057855
0.81	7.37E-02	0.81	0.269739449
0.84	6.27E-02	0.84	0.228959531
0.89	5.41E-02	0.89	0.107400276
1.01	5.06E-02	1.01	0.123615183
1.11	3.65E-02	1.11	9.72E-02
1.15	2.65E-02	1.15	5.86E-02
1.32	1.61E-02	1.32	3.71E-02
1.56	7.89E-03	1.56	1.42E-02
1.71	7.01E-03	1.71	1.14E-02
1.88	5.94E-03	1.88	1.25E-02

Tabel A. 7 Nilai RAO *Heave Single Pontoon* (20 meter)

Perbandingan Heave (Z) Kedalaman 20 m

Frekuensi	Trimaran_20_6_3	Frekuensi	Catamaran_20_6_3
0.21	1.235450268	0.21	1.106211662
0.23	1.304586411	0.23	1.131012678
0.25	1.382587314	0.25	1.162203908
0.26	1.444285274	0.26	1.182066083
0.29	1.547843218	0.29	1.194560289
0.32	1.585344911	0.32	1.169967294
0.43	0.990239859	0.43	0.846151948
0.51	0.600824058	0.51	0.143254384
0.54	0.563371539	0.54	0.368218482
0.70	6.69E-02	0.70	0.360812455
0.75	7.30E-02	0.75	0.267787069
0.81	7.09E-02	0.81	0.267787069
0.84	6.14E-02	0.84	0.20694834
0.89	5.19E-02	0.89	0.145525336
1.01	4.39E-02	1.01	0.103267156
1.11	3.12E-02	1.11	6.87E-02
1.15	2.21E-02	1.15	5.04E-02
1.32	1.43E-02	1.32	3.24E-02
1.56	7.13E-03	1.56	1.89E-02
1.71	6.79E-03	1.71	0.010008548
1.88	5.70E-03	1.88	1.10E-02

Tabel A. 8 Nilai RAO *Roll Single Pontoon* (10 meter)

Perbandingan Roll (RX) Kedalaman 10 m			
Frekuensi	Trimaran_10_6_3	Frekuensi	Catamaran_10_6_3
0.21	1.44E-04	0.21	1.93E-04
0.23	1.78E-04	0.23	2.25E-04
0.25	2.20E-04	0.25	2.68E-04
0.26	2.50E-04	0.26	2.97E-04
0.29	3.11E-04	0.29	3.54E-04
0.32	4.80E-04	0.32	4.58E-04
0.43	1.48E-03	0.43	7.33E-04
0.51	2.70E-03	0.51	1.09E-03
0.54	2.91E-03	0.54	1.05E-03
0.70	2.77E-03	0.70	1.28E-03
0.75	6.82E-03	0.75	2.38E-03
0.81	2.58E-02	0.81	1.22E-03
0.84	2.51E-02	0.84	1.59E-03
0.89	1.92E-02	0.89	1.13E-02
1.01	9.51E-04	1.01	1.80E-03
1.11	3.28E-04	1.11	1.61E-03
1.15	2.05E-03	1.15	5.40E-04
1.32	1.58E-02	1.32	4.16E-03

1.56	1.57E-02	1.56	1.74E-02
1.71	5.86E-03	1.71	5.63E-03
1.88	4.87E-03	1.88	2.48E-03

Tabel A. 9 Nilai RAO *Roll Single Pontoon* (20 meter)

Perbandingan Roll (RX) Kedalaman 20 m			
Frekuensi	Trimaran_20_6_3	Frekuensi	Catamaran_20_6_3
0.21	1.41E-04	0.21	2.13E-04
0.23	0.000178139	0.23	2.66E-04
0.25	2.18E-04	0.25	3.34E-04
0.26	2.56E-04	0.26	3.86E-04
0.29	3.62E-04	0.29	5.05E-04
0.32	5.35E-04	0.32	5.67E-04
0.43	1.82E-03	0.43	9.52E-04
0.51	1.89E-03	0.51	8.01E-04
0.54	1.39E-03	0.54	1.00E-03
0.70	2.65E-03	0.70	4.37E-04
0.75	1.12E-02	0.75	1.16E-03
0.81	1.18E-02	0.81	1.16E-03
0.84	6.30E-03	0.84	8.54E-04
0.89	4.41E-03	0.89	1.98E-03
1.01	1.15E-03	1.01	8.40E-04
1.11	1.25E-03	1.11	7.04E-04
1.15	1.75E-03	1.15	8.59E-04
1.32	8.22E-03	1.32	1.51E-03
1.56	2.74E-03	1.56	0.011836926
1.71	4.43E-03	1.71	2.60E-03
1.88	3.67E-03	1.88	1.13E-03

Tabel A. 10 Nilai RAO *Pitch Single Pontoon* (10 meter)

Perbandingan Pitch (RY) Kedalaman 10 m			
Frekuensi	Trimaran_10_6_3	Frekuensi	Catamaran_10_6_3
0.21	10.77333641	0.21	10.85755634
0.23	12.49167633	0.23	12.57174969
0.25	14.39719868	0.25	14.39339066
0.26	15.62102699	0.26	15.62018013
0.29	17.97003746	0.29	18.1107769
0.32	23.59851837	0.32	22.34607315
0.43	41.66057205	0.43	40.95305634
0.51	45.73069763	0.51	46.56532669
0.54	43.34360123	0.54	48.06066132
0.70	17.81477165	0.70	22.00380516
0.75	7.968091011	0.75	17.53089714

0.81	47.21205139	0.81	48.18662262
0.84	28.95274925	0.84	44.92324066
0.89	18.30575562	0.89	21.77902031
1.01	13.86854076	1.01	13.20829678
1.11	8.336204529	1.11	8.936378479
1.15	5.688492775	1.15	4.002019405
1.32	2.771687269	1.32	5.237464428
1.56	2.068917274	1.56	2.401472569
1.71	1.461865544	1.71	1.569030285
1.88	1.203672409	1.88	1.478297234

Tabel A. 11 Nilai RAO *Pitch Single Pontoon* (20 meter)

Perbandingan Pitch (RY) Kedalaman 20 m			
Frekuensi	Trimaran_20_6_3	Frekuensi	Catamaran_20_6_3
0.21	10.9738369	0.21	10.95041275
0.23	12.97323036	0.23	13.03321934
0.25	15.29084682	0.25	15.3735981
0.26	17.08204651	0.26	17.12581062
0.29	20.84151268	0.29	20.71961403
0.32	24.02889252	0.32	24.19459152
0.43	44.45512772	0.43	44.06048965
0.51	52.32250214	0.51	53.02659225
0.54	48.28106689	0.54	51.92897797
0.70	10.99793816	0.70	19.38926315
0.75	23.03945923	0.75	19.38926315
0.81	26.09683228	0.81	15.41179943
0.84	18.89051437	0.84	19.37077332
0.89	13.7523098	0.89	14.15857124
1.01	8.363847733	1.01	8.117559433
1.11	4.487990856	1.11	5.140691757
1.15	4.344995022	1.15	4.627013683
1.32	1.934194803	1.32	1.790612698
1.56	1.20923388	1.56	1.163974047
1.71	1.076959848	1.71	1.949410915
1.88	0.886111379	1.88	1.430642486

Tabel A. 12 Nilai RAO *Yaw Single Pontoon* (10 meter)

Perbandingan Yaw (RZ) Kedalaman 10 m			
Frekuensi	Trimaran_10_6_3	Frekuensi	Catamaran_10_6_3
0.21	9.28E-04	0.21	2.25E-04
0.23	1.02E-03	0.23	2.56E-04
0.25	1.83E-03	0.25	4.36E-04
0.26	2.71E-03	0.26	6.27E-04

0.29	5.48E-03	0.29	1.21E-03
0.32	1.08E-02	0.32	5.38E-03
0.43	3.10E-03	0.43	1.90E-03
0.51	3.84E-03	0.51	1.43E-03
0.54	4.54E-03	0.54	1.41E-03
0.70	3.17E-03	0.70	3.56E-03
0.75	1.02E-02	0.75	5.69E-03
0.81	9.43E-03	0.81	6.95E-03
0.84	3.48E-03	0.84	7.15E-03
0.89	5.13E-03	0.89	4.10E-03
1.01	4.34E-03	1.01	3.89E-03
1.11	9.67E-03	1.11	6.59E-03
1.15	2.34E-02	1.15	8.12E-03
1.32	1.06E-02	1.32	0.105531313
1.56	4.66E-02	1.56	0.163620546
1.71	0.177963063	1.71	4.17E-02
1.88	4.19E-02	1.88	4.18E-02

Tabel A. 13 Nilai RAO Yaw Single Pontoon (20 meter)

Perbandingan Yaw (RZ) Kedalaman 20 m			
Frekuensi	Trimaran_20_6_3	Frekuensi	Catamaran_20_6_3
0.21	2.57E-03	0.21	5.67E-04
0.23	5.88E-03	0.23	1.12E-03
0.25	1.07E-02	0.25	2.52E-03
0.26	6.32E-03	0.26	1.89E-03
0.29	2.58E-03	0.29	8.12E-04
0.32	1.09E-03	0.32	4.18E-04
0.43	9.20E-04	0.43	5.47E-04
0.51	1.93E-03	0.51	3.79E-04
0.54	2.50E-03	0.54	5.39E-04
0.70	5.80E-04	0.70	2.34E-03
0.75	2.18E-03	0.75	2.27E-03
0.81	3.08E-03	0.81	2.27E-03
0.84	1.42E-03	0.84	2.53E-03
0.89	1.27E-03	0.89	2.04E-03
1.01	4.60E-03	1.01	0.002306311
1.11	0.008623575	1.11	2.29E-03
1.15	4.04E-03	1.15	1.57E-03
1.32	5.38E-03	1.32	3.84E-02
1.56	4.11E-02	1.56	4.55E-02
1.71	3.48E-02	1.71	2.05E-02
1.88	2.96E-02	1.88	2.58E-02

Tabel B. 1 RAO Perbandingan 4 dan 6 *Mooring Line Single Pontoon*

RAO Mooring Line 4				
Sudut Derajat Kebebasan	Kedalaman (m)	Trimaran Pontoon (Single)	Catamaran Pontoon (Single)	PIANC
Surge X (m)	10	0.13	0.18	0.5
	20	0.17	0.23	
Sway Y (m)	10	0.26	0.31	0.6
	20	0.41	0.50	
Heave Z (m)	10	0.12	0.13	0.4
	20	0.19	0.22	
Roll RX (°)	10	1.02	1.05	1.5
	20	1.28	1.31	
Pitch RY (°)	10	0.64	0.72	0.5
	20	0.82	0.97	
Yaw RZ (°)	10	0.52	0.69	1.0
	20	0.64	0.83	
RAO Mooring Line 6				
Sudut Derajat Kebebasan	Kedalaman (m)	Trimaran Pontoon (Single)	Catamaran Pontoon (Single)	PIANC
Surge X (m)	10	0.08	0.12	0.5
	20	0.08	0.13	
Sway Y (m)	10	0.11	0.15	0.6
	20	0.23	0.28	
Heave Z (m)	10	0.10	0.11	0.4
	20	0.17	0.20	
Roll RX (°)	10	0.75	0.83	1.5
	20	0.91	1.02	
Pitch RY (°)	10	0.55	0.66	0.5
	20	0.62	0.71	
Yaw RZ (°)	10	0.38	0.45	1
	20	0.44	0.47	

Tabel B. 2 RAO Perbandingan 4 dan 6 *Mooring Line Array Pontoon*

RAO Mooring Line 4	PIANC
---------------------------	--------------

Sudut Derajat Kebebasan	Kedalaman (m)	Trimaran Pontoon (Array)	Catamaran Pontoon (Array)	
Surge X (m)	10	0.08	0.09	0.5
	20	0.10	0.11	
Sway Y (m)	10	0.05	0.06	0.6
	20	0.07	0.08	
Heave Z (m)	10	0.07	0.08	0.4
	20	0.09	0.10	
Roll RX (°)	10	0.06	0.07	1.5
	20	0.07	0.08	
Pitch RY (°)	10	0.56	0.58	0.5
	20	0.57	0.60	
Yaw RZ (°)	10	0.31	0.36	1.0
	20	0.34	0.39	
RAO Mooring Line 6				PIANC
Sudut Derajat Kebebasan	Kedalaman (m)	Trimaran Pontoon (Array)	Catamaran Pontoon (Array)	
Surge X (m)	10	0.04	0.05	
	20	0.08	0.09	
Sway Y (m)	10	0.04	0.05	
	20	0.05	0.06	
Heave Z (m)	10	0.04	0.05	
	20	0.05	0.06	
Roll RX (°)	10	0.04	0.05	
	20	0.06	0.07	
Pitch RY (°)	10	0.52	0.53	
	20	0.53	0.56	
Yaw RZ (°)	10	0.24	0.27	
	20	0.25	0.29	

Tabel C. 1 Raw Data Translational Array Pontoon (10 meter)

Frequency (Hz)	Surge_Trimaran_4_array			Sway_4_Trimaran_Array			Heave_4_Trimaran_Array		
	ir wave 1	ir wave 2	ir wave 3	ir wave 1	ir wave 2	ir wave 3	ir wave 1	ir wave 2	ir wave 3
0.21	0.058412	0.067653	0.082489	0.006818534	0.007897	0.009629	1.073649	1.2435	1.516199
0.23	0.059333	0.068719	0.083789	0.004889619	0.005663	0.006905	1.037312	1.201415	1.464885
0.25	0.058754	0.068049	0.082972	0.003853314	0.004463	0.005442	0.979237	1.134152	1.382871
0.26	0.058993	0.068325	0.083309	0.003813344	0.004417	0.005385	0.935727	1.083759	1.321428
0.28	0.063766	0.073854	0.09005	0.004616581	0.005347	0.00652	0.836106	0.968378	1.180743
0.30	0.06528	0.075608	0.092189	0.005352853	0.0062	0.007559	0.71168	0.824268	1.00503
0.31	0.063812	0.073907	0.090115	0.005266064	0.006099	0.007437	0.625665	0.724645	0.88356
0.32	0.053821	0.062335	0.076006	0.004389511	0.005084	0.006199	0.450842	0.522166	0.636677
0.34	0.042062	0.048716	0.0594	0.000351515	0.000407	0.000496	9.736323	11.27661	13.74957
0.35	0.033771	0.039113	0.047691	0.000406039	0.00047	0.000573	0.178976	0.207291	0.252749
0.37	0.022438	0.025988	0.031687	0.000290991	0.000337	0.000411	0.088724	0.10276	0.125295
0.39	0.017504	0.020274	0.02472	0.000739896	0.000857	0.001045	0.610233	0.706772	0.861767
0.41	0.007139	0.008268	0.010082	0.001457391	0.001688	0.002058	1.283172	1.48617	1.812087
0.45	0.008463	0.009801	0.011951	0.002361023	0.002735	0.003334	2.007962	2.325621	2.83563
0.49	0.003659	0.004238	0.005167	0.002580178	0.002988	0.003644	3.061707	3.546069	4.323721
0.52	0.006995	0.008102	0.009879	0.002127306	0.002464	0.003004	2.438323	2.824066	3.443384
0.58	0.009159	0.010608	0.012934	0.000706538	0.000818	0.000998	1.540239	1.783904	2.175115
0.64	0.010644	0.012328	0.015031	5.03447E-05	5.83E-05	7.11E-05	1.021773	1.183418	1.442941
0.67	0.011684	0.013533	0.0165	4.07061E-05	4.71E-05	5.75E-05	0.760872	0.881242	1.074498
0.72	0.012393	0.014354	0.017502	2.98826E-05	3.46E-05	4.22E-05	0.41089	0.475893	0.580256
0.78	0.011514	0.013336	0.016261	2.63455E-05	3.05E-05	3.72E-05	0.208133	0.241059	0.293923
0.81	0.011897	0.01378	0.016801	2.61439E-05	3.03E-05	3.69E-05	0.117831	0.136471	0.1664
0.87	0.014313	0.016577	0.020213	2.84936E-05	3.3E-05	4.02E-05	0.021345	0.024721	0.030143
0.93	0.014622	0.016935	0.020649	2.64048E-05	3.06E-05	3.73E-05	0.029301	0.033936	0.041378

0.97	0.014233	0.016485	0.0201	2.22736E-05	2.58E-05	3.15E-05	0.045322	0.052492	0.064004
1.06	0.011101	0.012857	0.015677	5.81918E-05	6.74E-05	8.22E-05	0.055083	0.063798	0.077789
1.14	0.004695	0.005438	0.006631	2.54504E-05	2.95E-05	3.59E-05	0.042055	0.048708	0.05939
1.21	0.002281	0.002641	0.003221	2.85191E-05	3.3E-05	4.03E-05	0.019937	0.023091	0.028154
1.36	0.005497	0.006367	0.007763	5.00402E-05	5.8E-05	7.07E-05	0.043556	0.050447	0.06151
1.51	0.002469	0.00286	0.003487	3.01814E-06	3.5E-06	4.26E-06	0.09981	0.1156	0.140951
1.59	0.006293	0.007289	0.008888	2.29667E-05	2.66E-05	3.24E-05	0.020332	0.023548	0.028712
1.73	0.004381	0.005075	0.006187	0.000142444	0.000165	0.000201	0.008298	0.00961	0.011718
1.87	0.003356	0.003887	0.004739	4.78322E-05	5.54E-05	6.75E-05	0.011713	0.013565	0.01654

Tabel C. 2 Raw Data Rotasional Array Pontoon (10 meter)

Frequency (Hz)	Roll_4 Trimaran_Array			Pitch_4 Trimaran_Array			Yaw_4 Trimaran Array		
	ir wave 1	ir wave 2	ir wave 3	ir wave 1	ir wave 2	ir wave 3	ir wave 1	ir wave 2	ir wave 3
0.21	4.13706E-05	4.79155E-05	5.84233E-05	8.568019	9.923479	12.0997	0.002719	0.003149	0.003839
0.23	4.77626E-05	5.53186E-05	5.92833E-05	9.622349	11.1446	13.58862	0.002698	0.003125	0.00381
0.25	5.37007E-05	6.21962E-05	6.66538E-05	10.57624	12.24941	14.9357	0.002404	0.002785	0.003395
0.26	5.70335E-05	6.60562E-05	7.07905E-05	11.30624	13.09489	15.96659	0.002163	0.002505	0.003055
0.28	7.18987E-05	8.32731E-05	8.92412E-05	12.78654	14.80937	18.05707	0.004478	0.005187	0.006324
0.30	8.9318E-05	0.000103448	0.000110862	13.92597	16.12906	19.66616	0.006275	0.007268	0.008861
0.31	0.000132762	0.000153765	0.000180162	14.65774	16.9766	20.69957	0.003273	0.00379	0.004621
0.32	0.000231314	0.000267907	0.000287108	14.36159	16.6336	20.28134	0.003965	0.004593	0.0056
0.34	0.000358601	0.000415332	0.000445098	12.83527	14.86581	18.12588	0.006075	0.007036	0.008579
0.35	0.000441189	0.000510985	0.000547608	11.41146	13.21676	16.11519	0.007063	0.00818	0.009974
0.37	0.000791876	0.000917151	0.000982883	8.897185	10.30472	12.56454	0.01022	0.011837	0.014433
0.39	0.001913379	0.002216076	0.002374902	6.854985	7.939443	9.680563	0.009116	0.010559	0.012874
0.41	0.003731527	0.004321855	0.006122772	5.391974	6.244984	7.614509	0.016401	0.018996	0.023162
0.45	0.005450136	0.006312348	0.007648483	4.397635	5.093341	6.210311	0.040716	0.047158	0.0575
0.49	0.008534506	0.009884665	0.011878106	4.413302	5.111486	6.232435	0.019566	0.022661	0.027631

0.52	0.006887321	0.007976895	0.011702105	4.928027	5.707641	6.959326	0.009318	0.010792	0.013159
0.58	0.003658838	0.004237666	0.004661433	5.074724	5.877545	7.166491	0.007262	0.00841	0.010255
0.64	0.002494409	0.002889025	0.003167816	5.07362	5.876267	7.164932	0.005892	0.006824	0.00832
0.67	0.002110594	0.002444449	0.002883643	5.043102	5.840921	7.121835	0.005174	0.005993	0.007307
0.72	0.001813442	0.002100328	0.003707079	4.608743	5.337846	6.508435	0.003907	0.004526	0.005518
0.78	0.001718012	0.001989801	0.002818951	3.684641	4.267552	5.203426	0.002584	0.002993	0.00365
0.81	0.001614366	0.001869759	0.00205019	3.166748	3.667728	4.472061	0.002769	0.003207	0.003911
0.87	0.001294158	0.001498894	0.001643538	2.417662	2.800136	3.414206	0.000705	0.000817	0.000996
0.93	0.001210865	0.001402424	0.001537758	1.607977	1.862359	2.270774	0.001085	0.001257	0.001532
0.97	0.002142946	0.00248196	0.002721469	1.023554	1.18548	1.445456	0.000202	0.000234	0.000286
1.06	0.000953334	0.001104152	0.001210702	0.24047	0.278513	0.339591	0.000318	0.000368	0.000449
1.14	0.002409226	0.002790366	0.003059636	0.643264	0.745028	0.908413	0.000349	0.000404	0.000493
1.21	0.001381728	0.001600317	0.001754748	0.678426	0.785753	0.958069	0.00029	0.000336	0.000409
1.36	0.000987566	0.001143799	0.00162042	0.553591	0.641169	0.781778	0.000119	0.000138	0.000169
1.51	0.001688092	0.001955148	0.00214382	0.926801	1.073421	1.308822	0.000426	0.000493	0.000602
1.59	0.001153726	0.001336245	0.001465193	0.123954	0.143563	0.175046	0.000303	0.000351	0.000428
1.73	0.002855111	0.003306789	0.003625894	0.162468	0.188171	0.229437	0.000379	0.000439	0.000535
1.87	0.001167434	0.001352122	0.001482602	0.179115	0.207451	0.252945	0.00031	0.000359	0.000437

Tabel C. 3 Raw Data Translational Array Pontoon (20 meter)

Frequency (Hz)	Surge_6 Trimaran_array			Sway_6 Trimaran_Array			Heave_6 Trimaran_Array		
	ir wave 1	ir wave 2	ir wave 3	ir wave 1	ir wave 2	ir wave 3	ir wave 1	ir wave 2	ir wave 3
0.21	0.033677	0.039004	0.047558	0.003275936	0.003794	0.004626	0.618996	0.716921	0.874142
0.23	0.034207	0.039619	0.048308	0.002349197	0.002721	0.003318	0.598047	0.692658	0.844557
0.25	0.033874	0.039232	0.047836	0.001851309	0.002144	0.002614	0.564564	0.653878	0.797274
0.26	0.034011	0.039392	0.048031	0.001832105	0.002122	0.002587	0.53948	0.624825	0.761849
0.28	0.036763	0.042579	0.051917	0.002218017	0.002569	0.003132	0.482044	0.558304	0.68074
0.30	0.037636	0.043591	0.05315	0.002571756	0.002979	0.003632	0.410309	0.47522	0.579435

0.31	0.03679	0.04261	0.051954	0.002530059	0.00293	0.003573	0.360718	0.417783	0.509403
0.32	0.03103	0.035939	0.04382	0.002108922	0.002443	0.002978	0.259926	0.301047	0.367066
0.34	0.02425	0.028087	0.034246	0.000168884	0.000196	0.000238	5.613331	6.50136	7.927109
0.35	0.01947	0.02255	0.027495	0.00019508	0.000226	0.000275	0.103186	0.11951	0.145719
0.37	0.012936	0.014983	0.018269	0.000139805	0.000162	0.000197	0.051152	0.059245	0.072237
0.39	0.010092	0.011688	0.014252	0.00035548	0.000412	0.000502	0.351821	0.407479	0.496839
0.41	0.004116	0.004767	0.005812	0.000700197	0.000811	0.000989	0.739794	0.856829	1.044731
0.45	0.004879	0.005651	0.00689	0.001134344	0.001314	0.001602	1.15766	1.340802	1.63484
0.49	0.002109	0.002443	0.002979	0.001239636	0.001436	0.001751	1.765181	2.044433	2.492777
0.52	0.004033	0.004671	0.005695	0.001022056	0.001184	0.001443	1.405779	1.628173	1.985231
0.58	0.005281	0.006116	0.007457	0.000339453	0.000393	0.000479	0.888002	1.028483	1.25403
0.64	0.006137	0.007107	0.008666	2.41879E-05	2.8E-05	3.42E-05	0.589088	0.682282	0.831906
0.67	0.006736	0.007802	0.009513	1.95571E-05	2.27E-05	2.76E-05	0.438669	0.508067	0.619486
0.72	0.007145	0.008275	0.01009	1.4357E-05	1.66E-05	2.03E-05	0.236893	0.274369	0.334538
0.78	0.006638	0.007689	0.009375	1.26576E-05	1.47E-05	1.79E-05	0.119996	0.138979	0.169457
0.81	0.006859	0.007944	0.009687	1.25607E-05	1.45E-05	1.77E-05	0.067933	0.078681	0.095935
0.87	0.008252	0.009557	0.011653	1.36896E-05	1.59E-05	1.93E-05	0.012306	0.014253	0.017378
0.93	0.00843	0.009764	0.011905	1.26861E-05	1.47E-05	1.79E-05	0.016893	0.019565	0.023856
0.97	0.008206	0.009504	0.011589	1.07013E-05	1.24E-05	1.51E-05	0.02613	0.030264	0.0369
1.06	0.0064	0.007413	0.009038	2.7958E-05	3.24E-05	3.95E-05	0.031758	0.036782	0.044848
1.14	0.002707	0.003135	0.003823	1.22275E-05	1.42E-05	1.73E-05	0.024246	0.028082	0.03424
1.21	0.001315	0.001523	0.001857	1.37019E-05	1.59E-05	1.93E-05	0.011494	0.013313	0.016232
1.36	0.003169	0.003671	0.004476	2.40416E-05	2.78E-05	3.4E-05	0.025112	0.029085	0.035463
1.51	0.001423	0.001649	0.00201	1.45005E-06	1.68E-06	2.05E-06	0.057544	0.066648	0.081263
1.59	0.003628	0.004202	0.005124	1.10343E-05	1.28E-05	1.56E-05	0.011722	0.013576	0.016554
1.73	0.002526	0.002926	0.003567	6.84366E-05	7.93E-05	9.66E-05	0.004784	0.005541	0.006756
1.87	0.001935	0.002241	0.002732	2.29808E-05	2.66E-05	3.25E-05	0.006753	0.007821	0.009536

Tabel C. 4 Raw Data Rotasional Array Pontoon (20 meter)

Frequency (Hz)	Roll_6 Trimaran_Array			Pitch_6 Trimaran_Array			Yaw_6 Trimaran Array		
	ir wave 1	ir wave 2	ir wave 3	ir wave 1	ir wave 2	ir wave 3	ir wave 1	ir wave 2	ir wave 3
0.21	1.98764E-05	2.30208E-05	2.80692E-05	4.116469	3.554195	2.914947	0.001306169	0.001513	0.001845
0.23	2.29473E-05	2.65776E-05	3.2406E-05	4.623018	3.991554	3.273644	0.00129627	0.001501	0.001831
0.25	2.58003E-05	2.98819E-05	3.6435E-05	5.081313	4.38725	3.598171	0.00115511	0.001338	0.001631
0.26	2.74015E-05	3.17364E-05	3.86962E-05	5.432035	4.690067	3.846524	0.001039193	0.001204	0.001468
0.28	3.45434E-05	4.00082E-05	4.8782E-05	6.143241	5.304128	4.350142	0.002151599	0.002492	0.003038
0.30	4.29125E-05	4.97012E-05	6.06007E-05	6.690675	5.776787	4.73779	0.003014735	0.003492	0.004257
0.31	6.3785E-05	7.38757E-05	9.00767E-05	7.042252	6.080342	4.986748	0.001572267	0.001821	0.00222
0.32	0.000111134	0.000128715	0.000156942	6.899968	5.957492	4.885994	0.001905161	0.002207	0.00269
0.34	0.000172288	0.000199544	0.000243304	6.166652	5.324341	4.366719	0.00291873	0.00338	0.004122
0.35	0.000211967	0.000245501	0.000299339	5.48259	4.733716	3.882323	0.003393219	0.00393	0.004792
0.37	0.000380454	0.000440641	0.000537274	4.274615	3.69074	3.026934	0.004910299	0.005687	0.006934
0.39	0.000919275	0.001064705	0.001298194	3.293449	2.843593	2.332152	0.004379905	0.005073	0.006185
0.41	0.001792797	0.002076417	0.002531776	2.590551	2.236705	1.834417	0.007880005	0.009127	0.011128
0.45	0.002618495	0.003032741	0.003697822	2.112826	1.824232	1.496131	0.019562063	0.022657	0.027625
0.49	0.004100368	0.004749046	0.005790512	2.120352	1.830731	1.501461	0.009400349	0.010887	0.013275
0.52	0.003308985	0.003832466	0.004672926	2.36765	2.04425	1.676576	0.004476746	0.005185	0.006322
0.58	0.001757874	0.002035969	0.002482457	2.43813	2.105103	1.726485	0.003488812	0.004041	0.004927
0.64	0.001198429	0.00138802	0.001692413	2.4376	2.104645	1.726109	0.002830591	0.003278	0.003997
0.67	0.001014026	0.001174445	0.001432001	2.422938	2.091985	1.715727	0.00248602	0.002879	0.003511
0.72	0.00087126	0.001009094	0.001230388	2.214251	1.911804	1.567952	0.001877298	0.002174	0.002651
0.78	0.000825412	0.000955992	0.001165641	1.770271	1.528467	1.253561	0.001241697	0.001438	0.001754
0.81	0.000775615	0.000898318	0.001095319	1.521451	1.313634	1.077368	0.001330439	0.001541	0.001879
0.87	0.000621773	0.000720138	0.000878064	1.161556	1.002897	0.822519	0.000338851	0.000392	0.000479
0.93	0.000581755	0.000673789	0.000821551	0.772546	0.667023	0.547054	0.000521233	0.000604	0.000736
0.97	0.001029569	0.001192447	0.001453951	0.491762	0.424592	0.348226	9.72149E-05	0.000113	0.000137
1.06	0.000458025	0.000530485	0.000646821	0.115533	0.099752	0.081811	0.000152651	0.000177	0.000216

1.14	0.001157503	0.00134062	0.001634617	0.309053	0.266839	0.218846	0.000167602	0.000194	0.000237
1.21	0.000663845	0.000768866	0.000937478	0.325947	0.281426	0.230809	0.000139188	0.000161	0.000197
1.36	0.000474472	0.000549533	0.000670046	0.265971	0.229641	0.188339	5.74077E-05	6.65E-05	8.11E-05
1.51	0.000811037	0.000939343	0.00114534	0.445278	0.384457	0.315309	0.00020468	0.000237	0.000289
1.59	0.000554303	0.000641994	0.000782783	0.059553	0.051419	0.042171	0.000145513	0.000169	0.000205
1.73	0.001371726	0.001588733	0.001937142	0.078057	0.067395	0.055274	0.000182031	0.000211	0.000257
1.87	0.000560889	0.000649621	0.000792083	0.086055	0.074301	0.060937	0.000148811	0.000172	0.00021

Tabel D. 1 Nilai 6 Mooring Tension (10 meter)

Catamaran Single 10_6_4	
Cable	Average (N/m)
1	9165.042
2	9176.718
3	13868.23
4	13868.07
5	10906.52
6	7212.558
Average Total (N/m)	10699.523

Trimaran Single 10_6_4	
Cable	Average (N/m)
1	9840.29
2	9842.97
3	8531.93
4	8555.32
5	6715.57
6	7741.97
Average Total (N/m)	8538.008333

Catamaran Array 10_6_4	
Cable	Average (N/m)
1	5875.026923
2	5882.511538
3	8889.891026
4	8889.788462
5	6991.358974
6	4623.434615
Average Total (N/m)	6858.66859

Trimaran Array 10_6_4	
Cable	Average (N/m)
1	5256.565171
2	5257.996795
3	4557.654915
4	4570.149573
5	3587.377137
6	4135.667735
Average Total (N/m)	4560.901887

Tabel D. 2 Nilai 4 *Mooring Tension* (10 meter)

Catamaran Single 10_4_4	
Cable	Average (N/m)
1	11232.06
2	11235.19
3	16848.13
4	16845.59
Average Total (N/m)	14040.2425

Trimaran Single 10_4_4	
Cable	Average (N/m)
1	11410.08
2	11376.22
3	10205.63
4	10234.50
Average Total (N/m)	10806.60669

Catamaran Array 10_4_4	
Cable	Average (N/m)
1	7800.041667
2	7802.215278
3	11700.09028
4	11698.32639
Average Total (N/m)	9750.168403

Trimaran Array 10_4_4	
Cable	Average (N/m)
1	7923.666667
2	7900.152778
3	7087.243056
4	7107.29
Average Total (N/m)	7504.587979

Tabel D. 3 Nilai 4 *Mooring Tension* (20 meter)

Catamaran Single 20_4_4	
Cable	Average (N/m)
1	12583.3973
2	12586.90917
3	18875.14215
4	18872.30196
Average Total (N/m)	15729.43765

Trimaran Single 20_4_4	
Cable	Average (N/m)
1	12782.83813
2	12744.9044
3	11433.47955
4	11465.82
Average Total (N/m)	12106.76035

Catamaran Array 20_4_4	
Cable	Average (N/m)
1	10486.16442
2	10489.09098
3	15729.28513
4	15726.9183
Average Total (N/m)	13107.8647

Trimaran Array 20_4_4	
Cable	Average (N/m)
1	10652.36511
2	10620.75367
3	11433.47955
4	9554.85
Average Total (N/m)	10565.36194

Tabel D. 4 Nilai 6 *Mooring Tension* (20 meter)

Catamaran Single 20_6_4		Trimaran Single 20_6_4		Catamaran Array 20_6_4		Trimaran Array 20_6_4	
Cable	Average (N/m)	Cable	Average (N/m)	Cable	Average (N/m)	Cable	Average (N/m)
1	10267.69737	1	11024.18513	1	8556.414473	1	9186.820942
2	10280.77812	2	11027.18756	2	8567.315099	2	9189.32297
3	15536.73062	3	9558.41503	3	12947.27552	3	7965.345859
4	15536.55137	4	9584.619105	4	12947.12614	4	7987.182587
5	12218.69433	5	7523.526942	5	10182.24527	5	6269.605785
6	8080.308066	6	8673.414153	6	6733.590055	6	7227.845127
Average Total (N/m)	11986.79331	Average Total (N/m)	9565.224654	Average Total (N/m)	9988.994426	Average Total (N/m)	7971.020545

Tabel D. 5 Penurunan Nilai RAO Setelah Penambahan Jumlah *Mooring Line*

No	RAO	Trimaran Single	Catamaran Single	Trimaran Array	Catamaran Array
1	Surge (m)	38%	33%	50%	44%
2	Sway (m)	58%	52%	20%	17%
3	Heave (m)	17%	15%	43%	38%
4	Roll (°)	26%	21%	33%	27%
5	Pitch (°)	14%	8%	7%	9%
6	Yaw (°)	27%	35%	23%	25%
Rata-rata Translasiional (m)		38%	33%	38%	33%
Rata-rata Rotasiional (°)		22%	21%	21%	20%

Tabel E. 1 Perbandingan Nilai RAO Terhadap Kedalaman 10 Meter (*Single*)

Presentase Perbedaan Nilai RAO Kedalaman 10 m							
	Sumbu	Surge (X)	Sway (Y)	Heave (Z)	Roll (RX)	Pitch (RY)	Yaw (RZ)
Trimaran single	Presentase (%)	38.46	57.69	16.67	26.47	14.06	26.92
Catamaran single		33.33	51.61	15.38	20.95	8.33	34.78

Tabel E. 2 Perbandingan Nilai RAO Terhadap Kedalaman 20 Meter (*Single*)

Presentase Perbedaan Nilai RAO Kedalaman 20 m							
	Sumbu	Surge (X)	Sway (Y)	Heave (Z)	Roll (RX)	Pitch (RY)	Yaw (RZ)
Trimaran single	Presentase (%)	52.35	43.90	10.53	28.91	24.39	31.25
Catamaran single		43.48	44.00	9.09	22.1374	26.80	43.37

Tabel E. 3 Perbandingan Nilai RAO Kedalaman 10 Meter (*Array*)

Presentase Perbedaan Nilai RAO Kedalaman 10 m							
	Sumbu	Surge (X)	Sway (Y)	Heave (Z)	Roll (RX)	Pitch (RY)	Yaw (RZ)
Trimaran single	Presentase (%)	50.00	20.00	42.86	33.33	7.14	22.58
Catamaran single		44.44	16.67	37.50	27.14	8.62	25.00

Tabel E. 4 Perbandingan Nilai RAO Kedalaman 20 Meter (*Array*)

Presentase Perbedaan Nilai RAO Kedalaman 20 m							
	Sumbu	Surge (X)	Sway (Y)	Heave (Z)	Roll (RX)	Pitch (RY)	Yaw (RZ)
Trimaran single	Presentase (%)	20.00	28.57	44.44	11.43	7.02	26.47
Catamaran single		18.18	25.00	40.00	6.666667	6.67	25.64

Tabel F. 1 Perhitungan *Irregular Wave*

Wind Speed 1			Wind Speed 2			Wind Speed 3		
Properties	Value	Parameter	Properties	Value	Parameter	Properties	Value	Parameter
F'	245000		F'	108888.9		F'	61250	
t'	105840		t'	70560		t'	52920	
t'min	269380.3		t'min	156883.6		t'min	106903.6	
F'eff	60338.16		F'eff	32843.94		F'eff	21332.76	
H's	0.393021		H's	0.289966		H's	0.233692	
Hs	0.160417	m	Hs	0.266296	m	Hs	0.381538	m
Tp	11.21752		Tp	9.159064		Tp	7.931982	
TP	2.289289	s	TP	2.803795	s	TP	3.237544	s

Tabel F. 2 *Irregular Wave Calculation (JONSWAP)*

Properties		Value
F	Fetch	100 km
		100000 m
t	Duration (time)	6 hours
		21600 secon
g	Gravitational Acceleration	9.8 m/s ²

BIODATA PENULIS



Relita Shinta Maritho Hutagaol merupakan penulis dari penelitian Tugas Akhir ini. Penulis lahir di Cibubur, Kota Bekasi pada tanggal 21 Maret 2001. Penulis menempuh pendidikan di SD - SMP Katolik Strada Nawar (2007-2016) dan melanjutkan sekolah di SMA Negeri 11 Kota Bekasi (2016-2019). Penulis melanjutkan pendidikan studi sarjananya di Departemen Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya (2020-2024). Penulis juga bergabung menjadi *assisstant laboratory* di bidang minat Energi dan Pengondisian Lingkungan. Selama menjadi mahasiswa, penulis mengikuti beberapa organisasi, seperti Indonesian Corrosion Association (INDOCOR) ITS sebagai Public Relation Officer, Society of Renewable Energy (SRE) ITS sebagai Manager of Social Media, dan Podcast Campus ITS sebagai President. Adapun pengalaman *volunteer* yang diikuti penulis, yaitu International Youth Summit for Renewable Energy 2022 by SRE Nasional (Marketing Relations Officer), Indonesian Corrosion Week 2021 (Deputy Head of Branding). Selain itu, penulis juga peraih Djarum Foundation Scholarship'38 dan RevoU Tech Academy by MBKM 2022. Adapun pengalaman *internship* yang dilakukan penulis di PT Freeport Indonesia sebagai Process Control Engineer (2023) di Tembagapura, Papua. Apabila ada pertanyaan terkait penelitian yang ditulis, dapat menghubungi penulis melalui email (relitasshinta@gmail.com) atau LinkedIn (<https://www.linkedin.com/in/relita-shinta/>)

