



TUGAS AKHIR - TF 181801

## **ANALISA RESPON GERAK PONTON MULTI PENDULUM MODEL TRIMARAN PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GELOMBANG LAUT SISTEM BANDUL (PLTG-SB)**

QORI'ATUL KHASANAH  
NRP. 02311640000038

Dosen Pembimbing:  
Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.  
Erna Septyaningrum, S.T., M.T.

Departemen Teknik Fisika  
Fakultas Teknologi Industri Dan Rekayasa Sistem  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2020





**TUGAS AKHIR - TF 181801**

**ANALISA RESPON GERAK PONTON MULTI PENDULUM  
MODEL TRIMARAN PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA  
GELOMBANG LAUT SISTEM BANDUL (PLTG-SB)**

**QORI'ATUL KHASANAH  
NRP. 0231164000038**

Dosen Pembimbing:  
Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.  
Erna Septyaningrum, S.T., M.T.

Departemen Teknik Fisika  
Fakultas Teknologi Industri Dan Rekayasa Sistem  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2020

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



**FINAL PROJECT - TF 181801**

***ANALYSIS OF PONTOON MULTI PENDULUM MOTION  
RESPONSE TRIMARAN MODEL AT OCEAN WAVE POWER  
PLANT BASED ON PENDULUM SYSTEM***

**QORI'ATUL KHASANAH  
NRP. 02311640000038**

**Supervisors:  
Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.  
Erna Septyaningrum, S.T., M.T.**

***Department of Engineering Physics  
Faculty of Industrial Technology and System Engineering  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2020***

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini.

Nama : Qori'atul Khasanah  
NRP : 02311640000038  
Departemen / Prodi : Teknik Fisika / S1 Teknik Fisika  
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri & Rekayasa Sistem (FT-IRS)  
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul "***ANALISA RESPON GERAK PONTON MULTI PENDULUM MODEL TRIMARAN PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GELOMBANG SISTEM BANDUL (PLTG-SB)***" adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tugas Akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya-benarnya.

Surabaya, 27 Juli 2020

Yang membuat pernyataan,



Qori'atul Khasanah  
NRP. 02311640000038

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

**LEMBAR PENGESAHAN**  
**TUGAS AKHIR**

**ANALISA RESPON GERAK PONTON MULTI PENDULUM MODEL  
TRIMARAN PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GELOMBANG  
SISTEM BANDUL (PLTG-SB)**

Oleh:

**Qori'atul Khasanah**  
**NRP. 0231164000038**

**Surabaya, 27 Juli 2020**

**Menyetujui,  
Pembimbing I**



**Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.**  
**NIP. 19761223 200501 1 001**

**Menyetujui,  
Pembimbing II**



**Erna Septyaningrum, S.T., M.T.**  
**NIP. 1992201912073**

**Mengetahui,**

**Kepala Departemen  
Teknik Fisika FT-IRS ITS**



**Dr. Suvanto, S.T., M.T.**  
**NIP. 19711113 199512 1 002**

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## LEMBAR PENGESAHAN

### ANALISA RESPON GERAK PONTON MULTI PENDULUM MODEL TRIMARAN PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GELOMBANG LAUT SISTEM BANDUL (PLTG-SB)

#### TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada  
Program Studi S-1 Departemen Teknik Fisika  
Fakultas Teknologi Industri & Rekayasa Sistem (FT-IRS)  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

#### QORI'ATUL KHASANAH

**NRP. 02311640000038**

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.  ..... (Pembimbing I)
2. Erna Septyaningrum, S.T., M.T.  ..... (Pembimbing II)
3. Ir. Sarwono, M.M.  ..... (Ketua Penguji)
4. Ir. Roekmono, M.T.  ..... (Penguji I)

**SURABAYA**

**2020**

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# **ANALISA RESPON GERAK PONTON MULTI PENDULUM MODEL TRIMARAN PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GELOMBANG SISTEM BANDUL (PLTG-SB)**

**Nama** : Qori'atul Khasanah  
**NRP** : 0231164000038  
**Departemen** : Teknik Fisika FTIRS - ITS  
**Dosen Pembimbing** : Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.  
Erna Septyaningrum, S.T., M.T.

## **ABSTRAK**

Gelombang laut adalah salah satu jenis energy terbarukan yang sangat berpotensi terutama bagi negara yang memiliki luas wilayah laut lebih luas daripada luas daratan seperti Indonesia. Alat yang digunakan untuk mengkonversi energi gelombang laut menjadi energi listrik disebut *Wave Energy Converter (WECs)*. Salah satu *WECs* yang sedang dikembangkan di Indonesia menggunakan ponton sistem pendulum yang kemudian disebut sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Sistem Bandul (PLTG-SB). Bentuk ponton yang digunakan adalah model trimaran dengan silinder besar dan dua silinder kecil sebagai jukung. Pada penelitian ini dilakukan simulasi ponton dengan multi pendulum yang bertujuan untuk mengetahui respon ponton dan perubahan simpangannya. Dari hasil simulasi didapatkan nilai RAO *pitch* maksimum sebesar 1,15 %/cm pada periode 6 sekon. Sedangkan respon terhadap perubahan simpangan dengan nilai maksimum terjadi pada periode 6 sekon dengan simpangan 198,07°. Pada variasi panjang lengan pendulum nilai simpangan terbesar terjadi pada panjang lengan pendulum 106,7 cm. Sedangkan pada variasi jumlah pendulum nilai simpangan terbesar terjadi pada ponton dengan jumlah pendulum 2

**Kata Kunci:** *WECs*, Ponton, Multi Pendulum, RAO *pitch*, Simpangan

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

***ANALYSIS OF PONTOON MULTI PENDULUM MOTION  
RESPONSE TRIMARAN MODEL AT OCEAN WAVE POWER  
PLANT BASED ON PENDULUM SYSTEM***

***Name*** : Qori'atul Khasanah  
***NRP*** : 02311640000038  
***Department*** : Engineering Physics FTIRS - ITS  
***Supervisors*** : Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.  
Erna Septyaningrum, S.T., M.T.

**ABSTRACT**

*Sea waves are one of renewable energy that has potential, especially for Indonesia. The systems to convert ocean wave energy is called Wave Energy Converters (WECs) that are being developed in Indonesia use a pendulum pontoon system then referred to as the pendulum system sea wave power plant. The pontoon that used is the trimaran model with a large cylinder and two small cylinders as an outrigger. In this study, a simulation of a multi-pendulum pontoon to determine the response of the pontoon and deviation changes. The maximum RAO pitch value is 1.15 °/ cm for a period of 6 seconds. While the response of the pontoon at deviations occurred in the 6 second period with the value 198,07°. Variations in arm lengths and the number of a pendulum the maximum deviations occur at 106,7 cm and the number of pendulum 2.*

***Keywords: WECs, Pontoon, Multi Pendulum, RAO pitch, Deviation***

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **KATA PENGANTAR**

Puji syukur kami panjatkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa atas segala berkat dan karunia-Nya sehingga kami dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “ANALISA RESPON GERAK PONTON MULTI PENDULUM MODEL TRIMARAN PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GELOMBANG SISTEM BANDUL (PLTG-SB) dengan baik dan tepat waktu. Selama proses pengerjaan Tugas Akhir ini kami telah mendapatkan bantuan serta dukungan dari berbagai pihak. Sehingga kami juga menyampaikan terimakasih yang sebesar – besarnya kepada:

1. Bapak Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T. dan Ibu Erna Septyaningrum, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing yang telah membimbing dan membantu proses penyusunan Tugas Akhir ini.
2. Kedua orang tua beserta keluarga yang telah memberikan doa serta dukungannya selama menjalani kuliah di Teknik Fisika.
3. Putri, Nuril, Shafly, Rodzan, Aryesah, Nesa, Indjra dan semua teman – teman KSE yang telah memberikan dukungannya.
4. Raka yang telah memberikan bantuan serta dukungan dalam penyusunan Tugas Akhir ini.
5. Nurul Aulia Reza dan Prita Yenni selaku teman yang selalu menghibur selama penyusunan Tugas Akhir.

Serta pihak-pihak lain yang tidak dapat disebutkan satu-persatu. Semoga laporan tugas akhir ini dapat dipergunakan dengan sebaik-baiknya.

Surabaya, 5 Juni 2020

Penulis

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
COVER PAGE .....	v
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI .....	vii
LEMBAR PENGESAHAN.....	ix
LEMBAR PENGESAHAN.....	xi
ABSTRAK .....	xiii
ABSTRACT .....	xv
KATA PENGANTAR .....	xvii
DAFTAR ISI .....	xix
DAFTAR GAMBAR .....	xxi
DAFTAR TABEL .....	xxv
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan .....	4
1.4 Batasan Masalah .....	4
1.5 Sistematika Laporan .....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....	7
2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Sistem Bandul .....	7
2.2 Gelombang Laut .....	9
2.3 Gelombang <i>Reguler</i> dan <i>Irreguler</i> .....	10
2.4 Gerakan Benda Apung.....	11
2.5 Respon Amplitudo Operator .....	12
2.6 Teori Stabilitas.....	13

2.7	Gerak Harmonik Sederhana .....	15
2.8	Computational Fluid Dynamic .....	17
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....		19
3.1	Studi literatur .....	20
3.2	Desain Ponton dan Pendulum.....	20
3.3	Simulasi.....	24
3.4	Verifikasi.....	31
3.5	Pengambilan Data.....	31
3.6	Analisis Data .....	31
3.7	Kesimpulan.....	32
3.8	Penyusunan Laporan.....	32
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....		33
4.1	Verifikasi Hasil Simulasi .....	33
4.2	Pengaruh Perubahan Periode Gelombang Terhadap Gerakan Ponton....	35
4.3	Pengaruh Perubahan Variabel Ponton Terhadap Gerakan Pendulum ....	42
4.4	Gerak Pendulum Dalam Gelombang <i>Irregular</i> .....	50
4.5	Torsi dan Daya.....	52
4.5	Diskusi .....	54
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....		57
5.1	Kesimpulan.....	57
5.2	Saran .....	57
DAFTAR PUSTAKA .....		59
LAMPIRAN .....		61
BIODATA PENULIS .....		67

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b> Formasi Gelombang Laut (Rodrigues, 2010) .....	9
<b>Gambar 2.2</b> <i>Wave direction</i> (Rodrigues, 2010) .....	10
<b>Gambar 2.3</b> <i>Six Degree of Freedom</i> (SDOF) Gerakan Kapal (Derret B. d., 2001) .....	11
<b>Gambar 2.4</b> Bentuk Umum Grafik Respon Gerakan Bangunan (Djatkiko, 2012) .....	13
<b>Gambar 2.5</b> Tiga Kondisi Kestabilan (Derret B. d., 2001).....	14
<b>Gambar 2.6</b> Contoh Titik Berat Sebuah Benda Terapung.....	14
<b>Gambar 2.7</b> Letak Titik Berat di Air (Derret B. d., 2001).....	15
<b>Gambar 2.8</b> Letak Titik Metacenter (Derret B. d., 2001).....	15
<b>Gambar 3.1</b> Diagram Alir Penelitian.....	19
<b>Gambar 3.2</b> Desain 3D Ponton 1:1.....	20
<b>Gambar 3.3</b> Keadaan ponton statis yang tercelup air sebelum diberi beban pendulum.....	22
<b>Gambar 3.4</b> Keadaan ponton saat diberi beban 2 pendulum .....	22
<b>Gambar 3.5</b> Keadaan ponton saat diberi beban 3 pendulum .....	23
<b>Gambar 3.6</b> Keadaan ponton saat diberi beban 4 pendulum .....	23
<b>Gambar 3.7</b> <i>Outline</i> pada simulasi Ansys AQWA.....	25
<b>Gambar 3.8</b> <i>Set up</i> pada <i>water size</i> .....	25
<b>Gambar 3.9</b> <i>Set up</i> pada <i>point mass</i> .....	26
<b>Gambar 3.10</b> <i>Set up</i> pada <i>point bouyancy</i> .....	26
<b>Gambar 3.11</b> <i>Set up</i> pada <i>meshing properties</i> .....	27
<b>Gambar 3.12</b> <i>Set up</i> pada <i>mesh sizing</i> .....	27
<b>Gambar 3.13</b> <i>Set up</i> <i>wave direction</i> .....	28
<b>Gambar 3.14</b> <i>Set up</i> periode gelombang.....	28
<b>Gambar 3.15</b> <i>Set up</i> parameter gelombang.....	28
<b>Gambar 3.16</b> Hasil simulasi RAO ( <i>pitch</i> ).....	29
<b>Gambar 3.17</b> Hasil simulasi <i>actual respon</i> .....	29

<b>Gambar 3.18</b> <i>Outline</i> pada simulasi <i>rigid dynamics</i> .....	30
<b>Gambar 3.19</b> <i>Input data actual respon</i> pada <i>joint rotation</i> .....	31
<b>Gambar 4.1</b> <i>Analysis setting</i> pada <i>Hydrodynamics Responses</i> .....	34
<b>Gambar 4.2</b> <i>Input massa</i> pada simulasi <i>rigid dynamics</i> .....	35
<b>Gambar 4.3</b> <i>RAO pitch</i> pada panjang lengan pendulum 106,7 cm.....	36
<b>Gambar 4.4</b> <i>RAO pitch</i> pada ponton 3 pendulum 106,7 cm.....	37
<b>Gambar 4.5</b> <i>RAO pitch</i> pada panjang lengan pendulum 110 cm.....	37
<b>Gambar 4.6</b> <i>RAO pitch</i> pada panjang lengan pendulum 130 cm.....	38
<b>Gambar 4.7</b> <i>RAO pitch</i> pada panjang lengan pendulum 165 cm.....	39
<b>Gambar 4.8</b> Grafik <i>pitching</i> ponton 2 pendulum terhadap waktu.....	40
<b>Gambar 4.9</b> Grafik <i>pitching</i> ponton 3 pendulum terhadap waktu.....	41
<b>Gambar 4.10</b> Grafik <i>pitching</i> ponton 4 pendulum terhadap waktu.....	41
<b>Gambar 4.11</b> Grafik simpangan pendulum terhadap periode gelombang pada pendulum 106.7 cm.....	42
<b>Gambar 4.12</b> Grafik simpangan pendulum terhadap periode gelombang pada pendulum 110 cm.....	43
<b>Gambar 4.13</b> Grafik simpangan pendulum terhadap periode gelombang pada pendulum 130 cm.....	44
<b>Gambar 4.14</b> Grafik simpangan pendulum terhadap periode gelombang pada pendulum 165 cm.....	44
<b>Gambar 4.15</b> Grafik hubungan jumlah pendulum dengan simpangan pada periode 6 sekon .....	45
<b>Gambar 4.16</b> Grafik hubungan jumlah pendulum dengan simpangan pada periode 8 sekon .....	46
<b>Gambar 4.17</b> Grafik hubungan jumlah pendulum dengan simpangan pada periode 10 sekon.....	47
<b>Gambar 4.18</b> Grafik hubungan jumlah pendulum dengan simpangan pada periode 12 sekon.....	47
<b>Gambar 4.19</b> Grafik hubungan panjang pendulum terhadap simpangan pada ponton 2 pendulum .....	48

<b>Gambar 4.20</b> Grafik hubungan panjang pendulum terhadap simpangan pada ponton 3 pendulum .....	49
<b>Gambar 4.21</b> Grafik hubungan panjang pendulum terhadap simpangan pada ponton 4 pendulum .....	50
<b>Gambar 4.22</b> <i>Set up</i> pada <i>cross swell</i> .....	51
<b>Gambar 4.23</b> Grafik simpangan pendulum gelombang <i>irregular</i> .....	51
<b>Gambar 4.24</b> Nilai torsi dan daya pada ponton 2 pendulum .....	52
<b>Gambar 4. 25</b> Nilai torsi dan daya pada ponton 3 pendulum .....	53
<b>Gambar 4. 26</b> Nilai torsi dan daya pada ponton 4 pendulum .....	53

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 3.1</b> Dimensi ponton .....	21
---------------------------------------	----

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan negara kepulauan yang memiliki luas perairan lebih luas dibandingkan dengan luas daratan yaitu sekitar 3.544.743,9 km<sup>2</sup> (Irfan, 2017). Karena luas perairan Indonesia lebih luas dari daratan, memungkinkan adanya potensi sumber energi laut yang dapat dikonversikan menjadi energi listrik. Menurut teori sumber daya energi laut global setara dengan 17.400 Terra Watt jam/tahun (Bhuyan, 2009). Sedangkan potensi sumber energi laut Indonesia mencapai 4.680 Giga Watt(GW) namun turun menjadi 61 Giga Watt(GW) karena adanya pertimbangan kemajuan teknologi dan kendala transportasi laut serta kondisi lingkungan di dasar laut (Said, Energi Outlook Indonesia, 2014). Energi laut yang paling banyak dikembangkan ada tiga jenis yaitu energi pasang-surut, energi gelombang dan energi panas laut (Said, Energi Outlook Indonesia, 2014). Dibandingkan dengan sumber energi terbarukan lain seperti energi matahari dan angin, energi gelombang laut memberikan ketersediaan mencapai 90% dengan kawasan yang potensial tidak terbatas (M.I. Nafis, 2014). Sehingga energi gelombang laut dapat dijadikan alternative pengganti sumber energi fosil yang ketersediaannya semakin menipis sedangkan kebutuhan energi listrik semakin meningkat.

Alat yang digunakan untuk mengkonversi energi gelombang laut menjadi energi listrik disebut *Wave Energy Converter* (WECs) (S. Mehrangiz, 2013). Hingga saat ini, terdapat beberapa jenis WECs yang telah dikembangkan di dunia, antara lain yaitu *Wave Activated Bodies* (WABs), *Oscillating Water Columns* (OWCs) dan *Overtopping Device* (Goldman, 2012). *Wave Activated Bodies* (WABs) merupakan *devive* yang menggunakan gerakan osilasi dari aksi gelombang. *Oscillating Water Columns* (OWCs) menggunakan gelombang untuk memampatkan dan memperluas udara sehingga dapat memutar turbin udara yang digunakan untuk menghasilkan listrik (Waters, 2008). *Overtopping Devices* memanfaatkan tumpahan dari limpasan air gelombang laut ke waduk atau reservoir

pada tingkat yang lebih tinggi dari permukaan laut dan menggerakkan pompa air untuk menghasilkan listrik (Waters, 2008).

Di beberapa negara *Wave Energy Converter* (WECs) telah banyak dikembangkan sebagai energi alternatif pengganti energi fosil. Tahun 2015 China melalui *Guangzhou Institute of Energy Conversion* (GIEC) mengembangkan sebuah *prototype Sharp Eagle WEC* dengan ukuran 36m x 24m x 16m dengan kapasitas daya 100kW di Pulau Wanshan (An Overview of Ocean Energy Activities in 2018, 2018). Yoshio Masuda mengembangkan buoy yang selanjutnya dinamakan *floating oscillating water column* dan dikembangkan sejak tahun 1965 (Titah, 2015). Denmark juga telah mengembangkan WECs jenis *overtopping device* yang diberi nama *Wavedragon* (J.P Kofoed, 2006). Norwegia juga mengembangkan WECs dengan jenis yang sama bernama *Tapered Channel Wave Power Device* (Tapchan) (D.V. Evan, 1986).

Di Indonesia juga telah dikembangkan alat konversi energi gelombang laut menjadi energi listrik yaitu pembangkit listrik tenaga gelombang laut sistem bandul (PLTG-SB). Penelitian ini dilakukan pertama kali oleh Zamrisyaf pada tahun 2002. Prinsip kerja dari PLTG-SB ini adalah sistem yang sudah dirancang dalam bentuk ponton, ditempatkan mengapung di atas permukaan air laut. Kemudian sistem tersebut akan mengikuti gerak atau arus gelombang sesuai frekuensi gelombang laut sehingga menyebabkan bandul bergerak seperti lonceng. Gerakan tersebut kemudian ditransmisikan dalam gerakan berputar untuk menggerakkan dinamo kemudian menjadi energi listrik. Daya yang dihasilkan oleh PLTG-SB ini banyak dipengaruhi oleh dimensi ponton, panjang bandul, massa bandul dan susunan ponton (Falnes, 2007).

Tahun 2018 telah dibuat pemodelan sistem gerak pendulum pada model ponton single pendulum menggunakan *software* Matlab. Tujuannya untuk mengetahui dan memprediksi respon yang akan dihasilkan oleh pendulum. Hasilnya respon gerak pendulum yang paling baik adalah yang memiliki simpangan pendulum paling besar, sebesar  $56.37^\circ$  dengan panjang lengan cadik 515 mm dan massa pendulum 40 gram (Darmawan, 2018). Penelitian terbaru yang telah dilakukan pada tahun 2019 dengan model ponton silinder yaitu membuat simulasi respon gerak pada ponton multi pendulum dengan memvariasikan 3 pendulum

menggunakan *software Computational Fluid Dynamic* (CFD). Hasil dari penelitian ini diperoleh nilai daya terbesar yang dihasilkan yaitu 0.02697 watt pada gelombang dengan amplitudo 1.75 cm periode 0.8 detik sarat air  $1/2 D$  dan massa pendulum 40 gram (Kholiq, 2018).

Penelitian terkait ponton multi pendulum sudah pernah dilakukan oleh Ibrahim Az. Penelitian ini dilakukan menggunakan ponton berbentuk segi delapan dengan 3 pendulum yang diletakkan secara horizontal untuk mengetahui besarnya energi listrik beserta karakteristik yang dihasilkan terhadap variasi massa bandul, panjang lengan pendulum, frekuensi dan amplitude gelombang. Hasil dari penelitian ini menunjukkan nilai tegangan akan meningkat seiring bertambahnya jumlah pendulum (Ibrahim, 2015). Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan tersebut, maka diperlukan penelitian lebih lanjut mengenai ponton multi pendulum terhadap perubahan simpangan masing – masing pendulum akibat gelombang laut. Sehingga pada tugas akhir ini akan dibuat simulasi dengan CFD (*Computational Fluid Dynamic*) tentang hubungan perubahan panjang pendulum, jumlah pendulum dan periode gelombang terhadap respon gerak ponton multi pendulum untuk mengetahui karakteristik ponton.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Berdasarkan latar belakang tersebut di atas, maka rumusan masalah pada tugas akhir ini antara lain sebagai berikut:

- a. Bagaimana efek perubahan jumlah lengan pendulum, panjang lengan pendulum dan periode gelombang terhadap respon gerak ponton multi pendulum?
- b. Bagaimana nilai daya yang dihasilkan dari respon gerak ponton multi pendulum terhadap efek perubahan jumlah lengan pendulum, panjang lengan pendulum dan periode gelombang?

### 1.3 Tujuan

Adapun tujuan dari tugas akhir ini antara lain sebagai berikut:

- a. Menganalisa efek perubahan jumlah lengan pendulum, panjang lengan pendulum dan periode gelombang terhadap respon gerak ponton multi pendulum.
- b. Mengetahui nilai daya yang dihasilkan dari respon gerak ponton multi pendulum terhadap efek perubahan jumlah lengan pendulum, panjang lengan pendulum dan periode gelombang.

### 1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada tugas akhir ini antara lain sebagai berikut:

- a. Gelombang yang digunakan pada penelitian ini adalah gelombang regular dan irregular.
- b. Simulasi dilakukan menggunakan CFD.
- c. Dimensi ponton yang digunakan sesuai dengan dimensi yang sebenarnya dengan perbandingan 1:1.
- d. Ponton yang digunakan merupakan ponton jenis trimaran yang terdiri dari satu silinder besar dan dua silinder kecil (jukung) sebagai penyeimbang.

### 1.5 Sistematika Laporan

Laporan penelitian ini disusun secara sistematis dengan perincian sebagai berikut:

#### **BAB I            PENDAHULUAN**

Bab ini berisi tentang penjelasan latar belakang penelitian, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah dan sistematika laporan.

#### **BAB II           TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI**

Bab ini berisi tentang *state of the art* penelitian sebelumnya, teori gelombang, teori gerak dinamik ponton dan teori gerak pendulum.

#### **BAB III          METODOLOGI PENELITIAN**

Bab ini berisi tentang penjelasan alur penelitian yang dilakukan.

#### **BAB IV          ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN**

Bab ini berisi tentang analisa hasil simulasi respon gerak ponton terhadap perubahan-perubahan yang dilakukan pada parameter gelombang dan geometri pendulum.

## **BAB V KESIMPULAN DAN SARAN**

Bab ini berisi tentang kesimpulan dari hasil penelitian dan saran penelitian.

## **DAFTAR PUSTAKA**

Berisi tentang semua referensi yang digunakan sebagai penunjang dalam penyusunan penelitian ini.

## **LAMPIRAN**

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI**

#### **2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Sistem Bandul**

Pembangkit listrik tenaga gelombang sistem bandul di Indonesia pertama kali dikembangkan oleh Zamrisyaf pada tahun 2002. Konsep PLTG-SB yang telah dikembangkan oleh Zamrisyaf, kemudian banyak dilakukan penelitian lain untuk mengembangkan PLTG-SB ini dengan bentuk dan variasi yang berbeda. Pada tahun 2014 telah dilakukan penelitian ponton model tripod berbentuk segitiga sama kaki dan siku-siku. Penelitian ini mencoba untuk membandingkan respon gerak antara ponton model tripod sama kaki dengan ponton model tripod siku-siku. Hasilnya ponton model tripod siku-siku lebih sesuai untuk diaplikasikan pada PLTG-SB daripada ponton model tripod samakaki karena gerakan dan sudut simpangan terjauh bandul untuk ponton model tripod siku-siku lebih besar yaitu sebesar  $80^\circ$  dibandingkan ponton model tripod samakaki yaitu sebesar  $60^\circ$  (M.I. Nafis, 2014).

Tahun 2016 telah dilakukan penelitian ponton model silinder dengan silinder kecil (jukung) di kedua sisinya. Penelitian ini menggunakan ponton single pendulum dengan menganalisa respon gerak ponton dan pendulum menggunakan variasi panjang lengan jukung, tinggi jukung dan tinggi sarat air. Hasilnya bentuk ponton terbaik yaitu dengan panjang lengan jukung 41.5 cm, tinggi jukung 1.5 cm dan tinggi sarat air  $\frac{2}{3}$  diameter ponton, menghasilkan simpangan maksimal  $23.5^\circ$  (Safitri, 2016). Pada tahun yang sama juga dilakukan penelitian dengan bentuk ponton yang sama dengan melakukan analisa karakteristik osilasi pendulum pada variasi percobaan massa pendulum, panjang lengan pendulum, panjang lengan cadik dan keinggian cadik. Hasilnya nilai simpangan maksimum dan simpangan rata-rata paling besar yaitu  $41.82^\circ$  pada variasi massa 20 gram, panjang lengan pendulum 106.7 mm, panjang lengan cadik 413 mm dan tinggi cadik 40 mm (Isnaini, 2016).

Melanjutkan penelitian sebelumnya, tahun 2018 telah dibuat pemodelan sistem gerak pendulum pada model ponton single pendulum menggunakan *software* Matlab. Tujuannya untuk mengetahui dan memprediksi respon yang akan

dihasilkan oleh pendulum. Hasilnya respon gerak pendulum yang paling baik adalah yang memiliki simpangan pendulum paling besar, sebesar  $56.37^\circ$  dengan panjang lengan cadik 515 mm dan massa pendulum 40 gram (Darmawan, 2018). Penelitian terbaru yang telah dilakukan pada tahun 2019 dengan model ponton silinder yaitu membuat simulasi respon gerak pada ponton multi pendulum menggunakan *software Computational Fluid Dynamic (CFD)*. Variasi pada simulasi yang dilakukan yaitu massa pendulum, panjang lengan pendulum, jumlah pendulum, sarat air, amplitudo dan periode gelombang. Hasil dari penelitian ini diperoleh nilai daya terbesar yang dihasilkan yaitu 0.02697 watt pada gelombang dengan amplitudo 1.75 cm periode 0.8 detik sarat air  $1/2 D$  dan massa pendulum 40 gram (Kholiq, 2018).

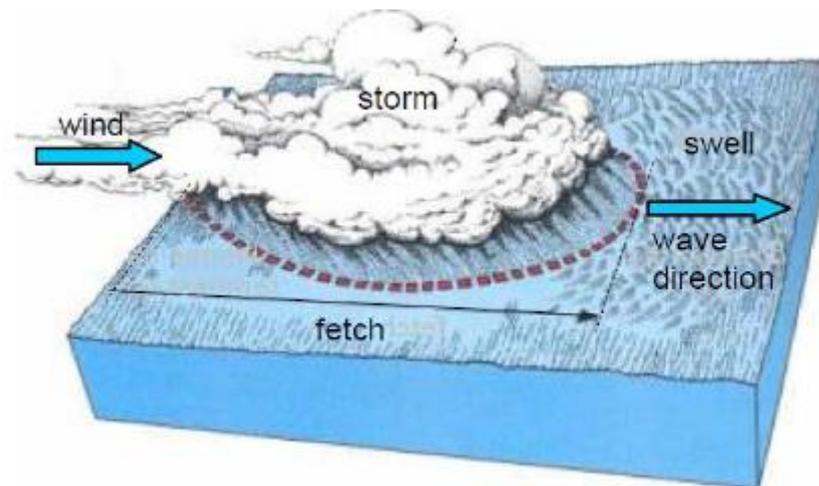
Selain beberapa penelitian yang telah dilakukan oleh tim peneliti dari ITS, sudah banyak penelitian tentang pembangkit listrik tenaga gelombang yang mulai dikembangkan. Seorang peneliti dari Jiangsu *University of Science and Technology* melakukan penelitian tentang respon hidrodinamik pada *cylindrical dual pontoon floating breakwater* menggunakan variasi *mooring* dengan membandingkan model percobaan secara langsung dan persamaan matematisnya (Ji, 2017). Penelitian lain pada tahun yang sama juga dilakukan oleh Nicolla dengan melakukan penelitian pada pembangkit listrik tenaga gelombang jenis *Pendulum Wave Energi Converter (PeWEC)* pada laut mediterania yang memiliki karakteristik gelombang rendah (Nicola, 2017). Penelitian ini dilakukan menggunakan *prototype 1:12*.

Penelitian terkait ponton multi pendulum sudah pernah dilakukan oleh Ibrahim Az. Penelitian ini dilakukan menggunakan ponton berbentuk segi delapan dengan 3 pendulum yang diletakkan secara horizontal untuk mengetahui besarnya energi listrik beserta karakteristik yang dihasilkan terhadap variasi massa bandul, panjang lengan pendulum, frekuensi dan amplitude gelombang. Metode yang digunakan pada penelitian ini merupakan metode eksperimental pada kolam buatan yang sudah dilengkapi alat pembuat ombak. Kemudian setiap gerakan yang dihasilkan oleh pendulum dihubungkan dengan *Digital Storage Oscilloscope* untuk merekam data  $V_{rms}$  terhadap waktu. Hasil dari penelitian ini menunjukkan nilai tegangan akan meningkat seiring bertambahnya jumlah pendulum dengan rata – rata penambahan sebesar 10,52%. Variasi frekuensi memiliki efek yang lebih kecil

dari variasi jumlah pendulum yang terpasang dalam peningkatan tegangan dengan penambahan tegangan rata – rata sebesar 9,645% (Ibrahim, 2015).

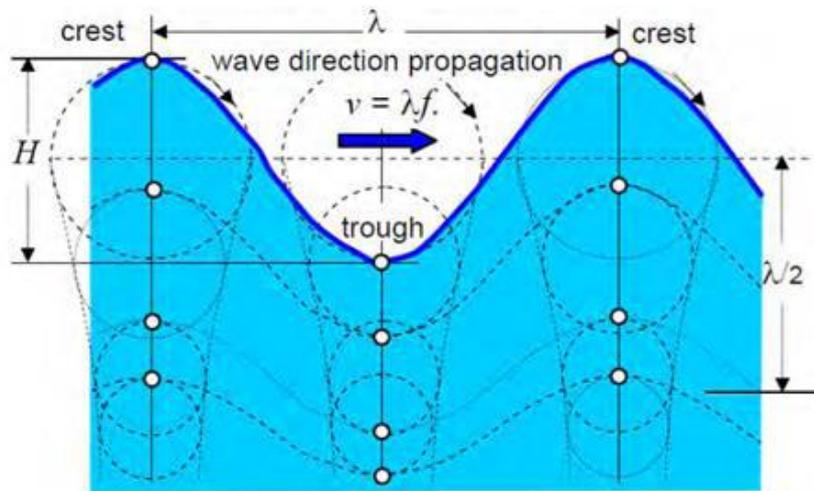
## 2.2 Gelombang Laut

Gelombang laut merupakan gerakan naik turun air laut dengan arah tegak lurus permukaan air laut dan membentuk sinusoidal. Gelombang laut terbentuk dari kombinasi antara tegangan permukaan laut, gaya gravitasi dan angin yang berhembus. Besar kecil gelombang tergantung dari intensitas, jangka waktu dan jarak angin yang berhembus (*fetch length*). Jika gelombang berada jauh dari angin yang merangsangnya maka akan terbentuk gelombang regular atau biasa disebut sebagai *swell*. Gelombang menyerap energi dari angin dan mengeluarkan energi untuk penyebaran gelombang dimana kondisi ini disebut sebagai kondisi keseimbangan atau *fully developed seas* (Rodrigues, 2010).



**Gambar 2.1** Formasi Gelombang Laut (Rodrigues, 2010)

Partikel – partikel air yang dibangkitkan oleh angin akan membentuk lintasan berbentuk lingkaran pada setiap titik yang memiliki diameter paling besar pada permukaannya. Semakin dalam letak titik maka diameternya akan semakin berkurang. Rangkaian ini akan membentuk gelombang laut dan perambatannya seperti pada Gambar 2.2.



**Gambar 2.2** Wave direction (Rodrigues, 2010)

Jarak antara puncak ke puncak (*crest to crest*) didefinisikan sebagai panjang gelombang ( $\lambda$ ). Ketinggian gelombang ( $H$ ) besarnya sebanding dengan intensitas angin dan durasinya. Periode gelombang ( $T$ ) didefinisikan sebagai waktu yang dibutuhkan untuk mencapai panjang gelombang dan sebanding dengan kedalaman laut. Frekuensi gelombang ( $f$ ) adalah banyaknya gelombang dalam satu detik. Rasio antara panjang gelombang ( $\lambda$ ) dibandingkan dengan dua kali ketinggian gelombang ( $2H$ ) disebut *declivity* dan ketika nilainya lebih dari  $1/7$ , maka gelombang akan menjadi tidak stabil dan menghilang.

### 2.3 Gelombang *Reguler* dan *Irreguler*

Gelombang *reguler* adalah jenis gelombang dengan nilai amplitude gelombang konstan, periode tunggal dan mempunyai spectrum tunggal (Fatnanta, 2009). Teori gelombang *reguler* ini merupakan sebuah pendekatan dari beberapa asumsi penyederhaan dan idealisasi. Asumsi dasar teori gelombang *reguler* diantaranya sebagai beriku;

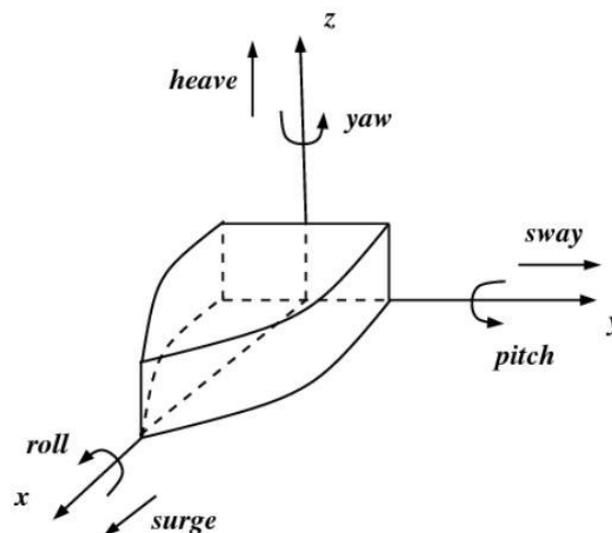
- a. Fluida dianggap homogen.
- b. Fluida dianggap ideal (*inviscid* dan *incompressible*)
- c. Tekanan di permukaan diabaikan serta dianggap konstan dan seragam.
- d. Gerakan partikel tidak saling bertubrukan selama bergerak.
- e. Dasar laut dianggap datar sehingga kecepatan vertical di dasar adalah nol.

Gelombang irregular adalah jenis gelombang superposisi dari beberapa gelombang regular yang mempunyai amplitude dan frekuensi berbeda. Akibatnya gelombang irregular memiliki bentuk dan arah gerakan yang tak beraturan.

## 2.4 Gerakan Benda Apung

Pada dasarnya benda yang mengapung mempunyai 6 mode gerakan bebas (SDOF-*six degree of freedom*) yang terbagi menjadi dua kelompok, yaitu 3 mode gerakan translasional dan 3 mode gerakan rotasional. Berikut ini adalah keenam mode gerakan tersebut:

- a. Mode Gerakan Translasional
  - Surge*, gerakan transversal arah sumbu x
  - Sway*, gerakan transversal arah sumbu y
  - Heave*, gerakan transversal arah sumbu z
- b. Mode Gerakan Rotasional
  - Roll*, gerakan rotasional arah sumbu x
  - Pitch*, gerakan rotasional arah sumbu y
  - Yaw*, gerakan rotasional arah sumbu z



**Gambar 2.3** *Six Degree of Freedom (SDOF) Gerakan Kapal* (Derret B. d., 2001)

Definisi gerakan bangunan laut dalam enam derajat kebebasan seperti pada Gambar 2.3. Dengan memakai konversi sumbu tangan kanan, tiga gerakan translasi pada arah sumbu x, y, dan z adalah masing - masing *surge*, *sway*, dan *heave* sedangkan untuk gerakan rotasi terhadap ketiga sumbu adalah *roll*, *pitch*, dan *yaw*.

Sehingga domain gerakan yang mempengaruhi kapal dan ponton adalah gerakan rotasi dan translasi.

## 2.5 Respon Amplitudo Operator

Response Amplitudo Operator (RAO) merupakan sebuah *transfer function* yang berkaitan tentang karakteristik gerakan bangunan laut atau fungsi respon struktur akibat beban gelombang yang mengenai struktur lepas pantai pada frekuensi tertentu (Chakrabarti, 1997). RAO dapat dinyatakan dengan bentuk matematis yaitu (respon struktur /  $\zeta$  gelombang). Respon amplitudo bisa berupa gerakan, tegangan, maupun getaran. Respon gerakan RAO untuk gerakan translasi merupakan perbandingan langsung antara amplitudo gerakannya dibandingkan dengan amplitudo gelombang insiden (keduanya dalam satuan panjang) dapat dinyatakan dalam persamaan di bawah ini:

$$RAO = \frac{\zeta_{k0} (m)}{\zeta_0 (m)} \dots\dots\dots(2.1)$$

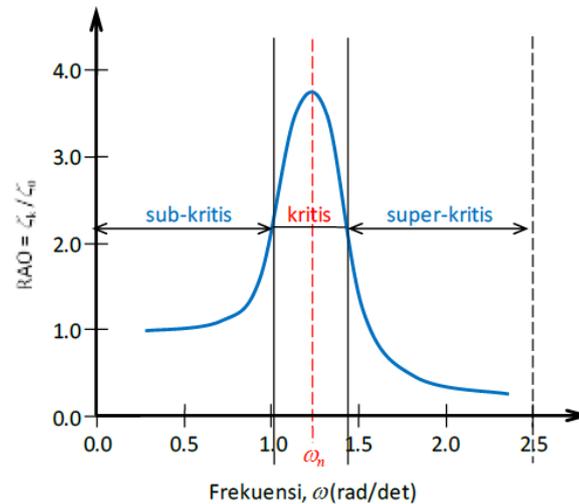
Sedangkan respon non-dimensi atau RAO untuk gerakan rotasi yaitu perbandingan antara gerakan rotasi struktur dengan kemiringan gelombang dalam (radian/ radian atau derajat/derajat) dapat dinyatakan dalam persamaan di bawah ini:

$$RAO = \frac{\zeta_{k0}(0)}{kw\zeta(0)} \dots\dots\dots(2.2)$$

Kurva respons gerakan bangunan apung pada dasarnya dapat dibagi menjadi tiga bagian (Djarmiko, 2012) yaitu:

- a. Pertama adalah bagian frekuensi rendah, atau gelombang (dengan periode) panjang, yang disebut daerah sub - kritis. Pada daerah ini bangunan laut akan mengikuti pola atau kontur elevasi gelombang yang panjang, sehingga amplitudo gerakan kurang lebih akan ekuivalen dengan amplitudo gelombang, atau disebut sebagai konturing.
- b. Kedua adalah daerah kritis, meliputi pertengahan lengan kurva di sisi frekuensi rendah sampai dengan puncak kurva dan diteruskan ke pertengahan lengan kurva di sisi frekuensi tinggi. Puncak kurva berada pada frekuensi alami, yang merupakan daerah resonansi, sehingga respon gerakan

mengalami magnifikasi, atau amplitudo gerakan akan beberapa kali lebih besar daripada amplitudo gelombang.

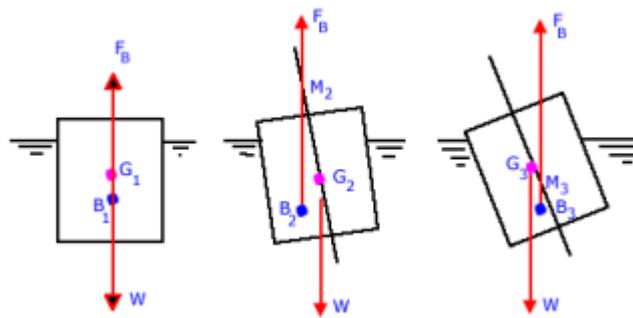


**Gambar 2.4** Bentuk Umum Grafik Respon Gerakan Bangunan (Djarmiko, 2012)

- c. Ketiga adalah gerakan super kritis, yaitu daerah frekuensi tinggi, atau gelombang- gelombang (dengan periode pendek). Pada daerah ini respon gerakan akan mengecil. Semakin tinggi frekuensi, atau semakin rapat antara puncak- puncak gelombang yang berurutan, maka akan memberikan efek seperti bangunan laut bergerak diatas air yang relatif datar. Oleh karena itu kondisi ini dapat diistilahkan sebagai platforming.

## 2.6 Teori Stabilitas

Sebuah benda dikatakan pada posisi keseimbangan stabil (*stable equilibrium*) apabila benda digeser ke suatu posisi baru, benda tersebut dapat kembali lagi ke posisi awal, dan kondisi ini disebut stabilitas positif terhadap acuan keseimbangan posisi awalnya. Namun apabila suatu benda setelah digerakkan ke suatu posisi baru benda tersebut terus bergerak semakin jauh dari posisi awalnya, maka kesetimbangan benda tersebut dikatakan berada pada kesetimbangan labil (*unstable equilibrium*) dan kondisi ini dikategorikan sebagai stabilitas negatif terhadap acuan posisi awalnya (Derret B. , 2001).

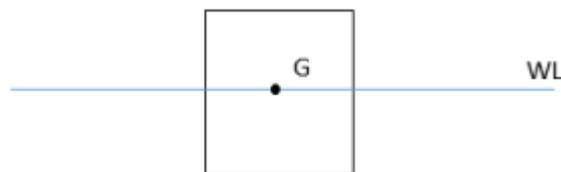


**Gambar 2.5** Tiga Kondisi Kestabilan (Derret B. d., 2001)

Pada bangunan terapung akan terdapat 2 buah gaya vertikal yang bekerja, yakni gaya apung (*buoyancy*) yang mengarah ke atas dan berat dari bangunan itu sendiri yang mengarah ke bawah (Derret B. , 2001).

- Titik Berat (*Centre of Gravity, G*)

Titik Berat ialah titik tangkap dari semua gaya-gaya yang bekerja ke bawah. Letak titik G pada benda kosong ditentukan oleh hasil percobaan stabilitas. Perlu diperhatikan bahwa letak titik G tergantung pembagian berat pada benda. Jadi, selama tidak ada berat yang digeser/ditambah/dikurangi titik G tidak akan berubah walaupun benda oleng. Berat pendulum pada penelitian ini sangat kecil jadi dianggap tidak akan mempengaruhi titik gerak ponton.



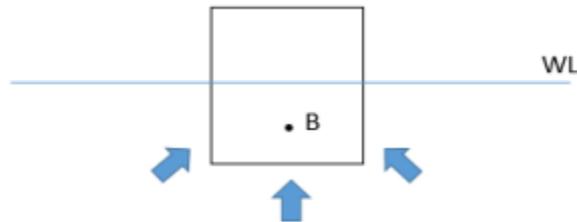
**Gambar 2.6** Contoh Titik Berat Sebuah Benda Terapung

(Derret B. d., 2001)

- Titik Apung (*Centre of Buoyancy, B*)

Titik apung dikenal dengan titik B dari sebuah benda mengapung, merupakan titik tangkap dari resultan gaya-gaya yang menekan keatas dari bagian yang terbenam dalam air. Titik B bukanlah merupakan suatu titik yang tetap, akan tetapi akan berpindah-pindah oleh adanya perubahan sarat dari benda. Dalam stabilitas benda, titik B inilah yang menyebabkan suatu benda mampu untuk tegak kembali setelah mengalami kemiringan. Letak titik B tergantung dari

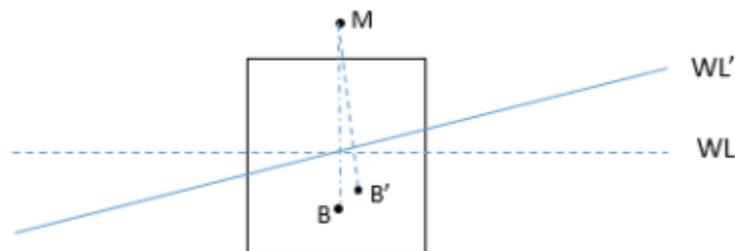
besarnya kemiringan benda (bila kemiringan berubah maka letak titik B akan berpindah).



**Gambar 2.7** Letak Titik Berat di Air (Derret B. d., 2001)

- Titik Metasentris (M)

Titik metasentris dari sebuah benda didefinisikan sebagai sebuah titik semu dari batas dimana titik G tidak boleh berada di atasnya agar benda tetap memiliki stabilitas yang positif (stabil). Meta artinya berubah-ubah, jadi titik ini dapat berubah letaknya mengikuti besarnya sudut kemiringan. Apabila benda mengalami kemiringan pada sudut kecil maka titik apung B bergerak di sepanjang busur dimana titik M merupakan titik pusatnya di bidang tengah benda (*centre of line*) dan pada sudut kemiringan yang kecil ini perpindahan letak titik M masih sangat kecil, sehingga masih dikatakan tetap.



**Gambar 2.8** Letak Titik Metacenter (Derret B. d., 2001)

## 2.7 Gerak Harmonik Sederhana

Gerak harmonik sederhana merupakan gerak bolak-balik suatu benda yang melalui titik kesetimbangan dengan banyaknya getaran benda dalam setiap sekon selalu konstan (Yaz, 2007). Salah satu contoh peristiwa gerak harmonik sederhana ini adalah gerak bolak – balik sebuah pendulum. Ketika sebuah pendulum dipindahkan dari titik kesetimbangannya maka akan ada gaya pemulih yang membuat pendulum kembali ke titik kesetimbangannya. Gaya pemulih ini besarnya sama dengan resultan dari berat pendulum dengan tegangan tali. Jika massa

pendulum adalah  $m$  dan tergantung pada tali sepanjang  $l$  dan berpindah dengan sudut  $\theta$  dan jarak  $x$  dari titik setimbangnya, maka gaya gravitasi akan bernilai seperti pada persamaan 2.3 di bawah ini (Yaz, 2007).

$$F = mg \sin \theta \dots\dots\dots(2.3)$$

Jika sudut  $\theta$  bernilai kecil, maka  $\sin \theta$  nilainya akan sama dengan  $\theta$  dan apabila  $\theta = \frac{x}{l}$ , maka akan didapatkan persamaan 2.4 (Yaz, 2007).

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \dots\dots\dots(2.4)$$

Selain itu parameter yang dianggap penting dalam gerak harmonik sederhana adalah simpangannya. Simpangan gerak harmonik dianggap sebagai partikel yang bergerak melingkar beraturan dengan kecepatan sudut  $\omega$  dan jari-jari  $A$ . Besarnya sudut yang ditempuh dapat dirumuskan pada persamaan 2.5 dan 2.6 (Yaz, 2007).

$$\theta = \omega t \dots\dots\dots(2.5)$$

$$\theta = \frac{2\pi t}{T} \dots\dots\dots(2.6)$$

Dan jika  $A$  adalah amplitudo simpangan (m),  $T$  adalah periode (s),  $\omega$  adalah kecepatan sudut (rad/s),  $t$  adalah waktu (s), maka simpangan dapat dinyatakan dalam persamaan 2.7 dan 2.8 (Yaz, 2007).

$$Y = A \sin \theta \dots\dots\dots(2.7)$$

$$Y = A \sin \frac{2\pi t}{T} \dots\dots\dots(2.8)$$

Besar sudut dalam fungsi sinus disebut sudut fase (Yaz, 2007). Jika partikel mula – mula berada pada posisi sudut  $\theta_0$ , maka persamaannya menjadi seperti di bawah ini.

$$Y = A \sin \theta \dots\dots\dots(2.9)$$

$$Y = A \sin (\omega t + \theta_0) \dots\dots\dots(2.10)$$

$$Y = A \sin \left( \frac{2\pi t}{T} + \theta_0 \right) \dots\dots\dots(2.11)$$

Maka sudut fase getaran harmonik dapat dirumuskan dalam persamaan 2.12 di bawah ini (Yaz, 2007).

$$\theta = \frac{2\pi t}{T} + \theta_0 \dots\dots\dots(2.12)$$

## 2.8 Computational Fluid Dynamic

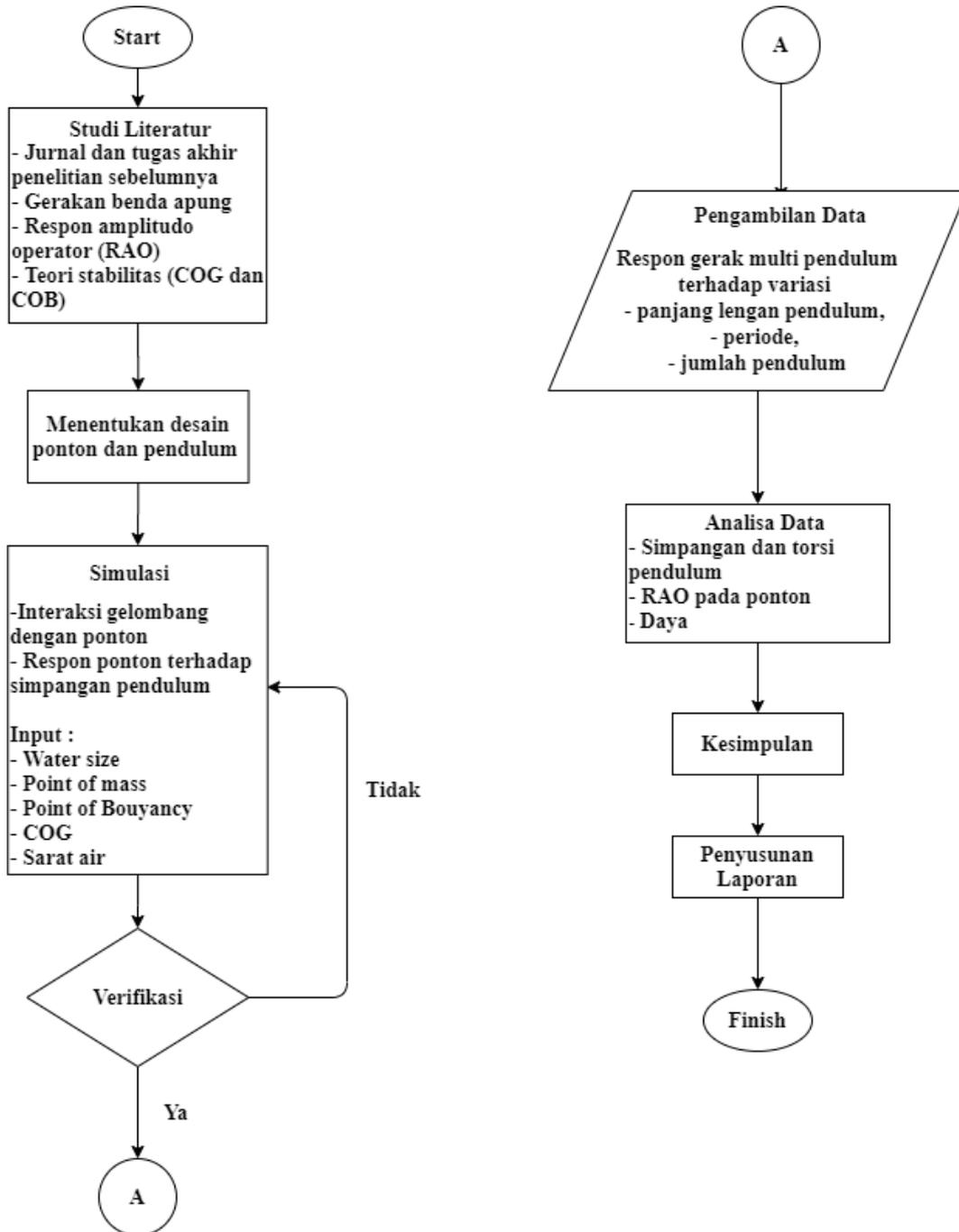
CFD adalah suatu cara untuk menganalisa aliran fluida pada suatu sistem, sistem tersebut dapat berupa sistem aliran fluida cair seperti menganalisa hidrodinamika, tekanan dari fluida, atau aliran darah pada pembuluh. Selain itu CFD juga dapat digunakan untuk mensimulasikan aliran panas seperti pada mesin pembakar dan pada sistem HVAC pada suatu bangunan, dan masih banyak tools lain dari CFD. Kode CFD adalah suatu algoritma numerikal yang terstruktur untuk menyelesaikan fenomena aliran fluida. Proses dari kerja CFD secara umum dapat dibagi menjadi 3 bagian (Nakasone, 2018).

Bagian pertama adalah *pre processor*. Pada bagian ini pengguna memberikan input pada CFD untuk diproses dan diselesaikan kemudian. Input yang harus dimasukkan adalah geometri dari fenomena fluida yang akan diselesaikan, geometri ini juga dapat didefinisikan sebagai domain komputasi yang selanjutnya akan dibagi menjadi bagian yang lebih kecil dalam bentuk elemen-elemen *control volume* atau *cell*. Hal lain yang perlu didefinisikan antara lain adalah properti fluida dan *boundary condition*. Setelah itu domain tadi melalui tahap *meshing*. Salah satu parameter yang dapat menentukan akurasi CFD adalah jumlah *cell* pada *grid*, tetapi perlu dicatat juga bahwa semakin banyak jumlah *cell*, maka beban komputasi juga akan semakin berat. Setelah melalui tahapan *pre processor*, lalu masuk pada bagian *solver*. Pada tahap ini fenomena aliran fluida akan diselesaikan dengan teknik solusi numerikal yang dipilih. Tahapan terakhir adalah *post processing* yang lebih terfokus pada visualisasi dari data yang akan dianalisa.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

### BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian respon gerak ponton multi pendulum ini memiliki langkah – langkah sebagai berikut:



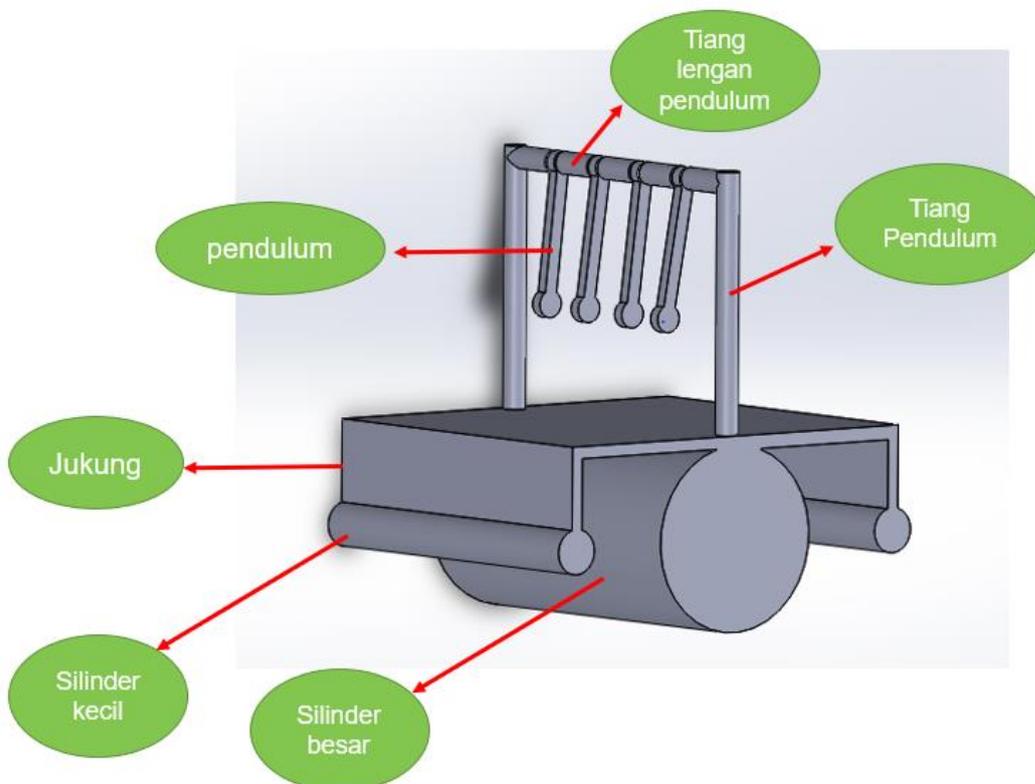
**Gambar 3.1** Diagram Alir Penelitian

### 3.1 Studi literatur

Studi literatur ini dilakukan sebagai pemahaman awal tentang PLTG-SB, gerakan bangunan apung, teori stabilitas dan pemahaman tentang *respon amplitude operator* (RAO), teori stabilitas dan gerakan benda apung melalui jurnal, tugas akhir yang telah dilakukan sebelumnya serta buku – buku pendukung. Selain itu dilakukan pula review jurnal tentang penelitian – penelitian terkait untuk menambah pemahaman.

### 3.2 Desain Ponton dan Pendulum

Desain ponton dan pendulum seperti pada penelitian yang telah dilakukan sebelumnya seperti terlihat pada Gambar 3.2. Divariasikan jumlah pendulum, panjang lengan pendulum dan juga periode gelombang yang mengenai ponton. Ponton yang digunakan menggunakan ponton dengan perbandingan 1:1 dengan dimensi seperti pada Tabel 3.1.

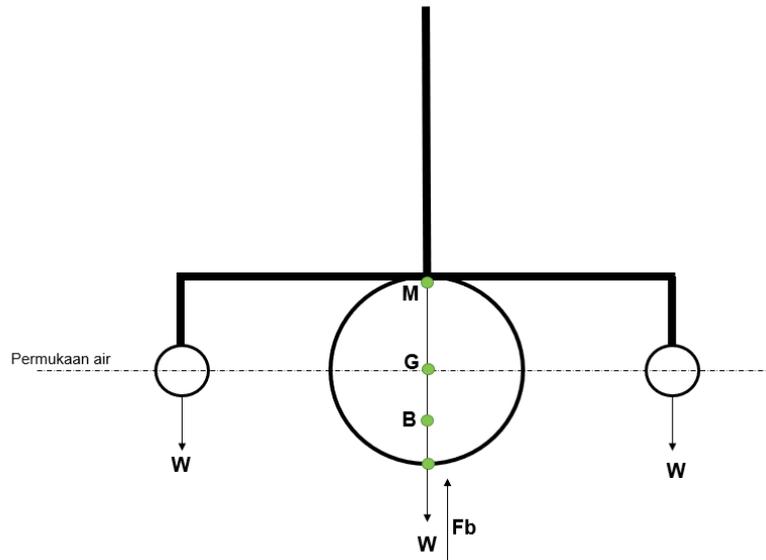


**Gambar 3.2** Desain 3D Ponton 1:1

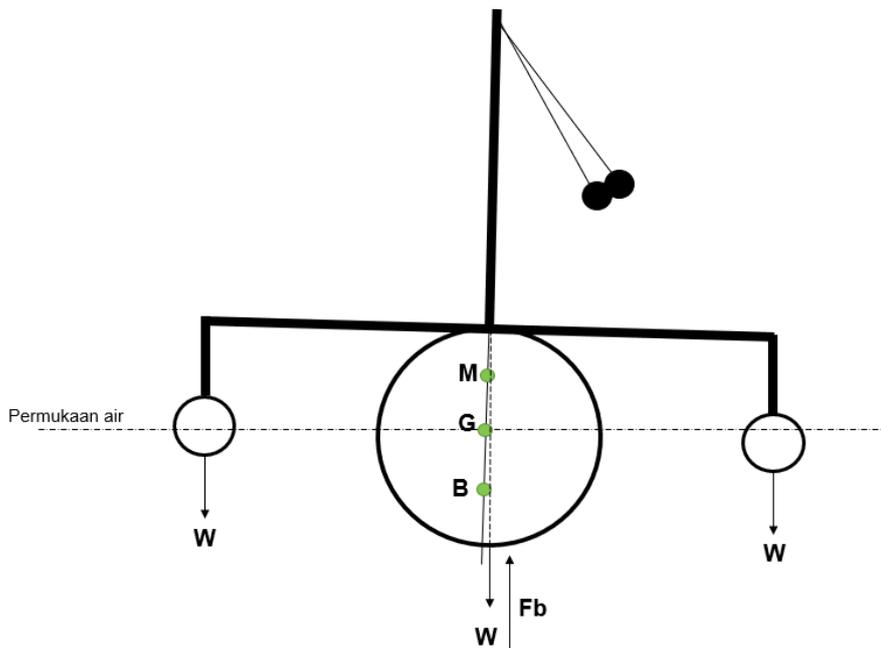
**Tabel 3.1** Dimensi ponton

Diameter Silinder Besar	165 cm
Diameter Silinder Kecil	40 cm
Panjang Silinder Besar	320 cm
Panjang Silinder Kecil	320 cm
Tinggi Jukung	83 cm
Panjang Plat	320 cm
Lebar Plat	170 cm
Tinggi Tiang Pendulum	250 cm (dari plat)
Tiang Lengan Pendulum	168 cm

Berdasarkan pada desain ponton dan pendulum yang telah dibuat kemudian dilakukan perhitungan dan analisa kestabilan ponton dan pendulum. Perhitungan dan analisa kestabilan ini bertujuan untuk mempertahankan ponton agar tidak terbalik ketika dikenai gelombang. Gambar 3.3 merupakan keadaan ponton statis sebelum diberikan beban massa pendulum. Pada gambar tersebut terdapat tiga titik pada satu garis lurus dan dua gaya. Titik – titik tersebut adalah titik M, G dan B. Titik M merupakan titik metasentris, titik G adalah titik *center of gravity* dan titik B adalah titik *buoyancy*. Sedangkan gaya – gaya yang bekerja pada ponton terdapat gaya berat yang mengarah ke bawah dan gaya *buoyancy* atau gaya keatas yang mengakibatkan ponton mengapung. Pada kondisi ini gaya berat pada titik *center of gravity* sama dengan gaya di titik *buoyancy*. Stabilitas awal ponton dikatakan stabil ketika memiliki sudut – sudut oleng (*pitching*) sebesar  $0^{\circ}$  sampai  $7^{\circ}$ - $10^{\circ}$  (Derret B. , 2001)



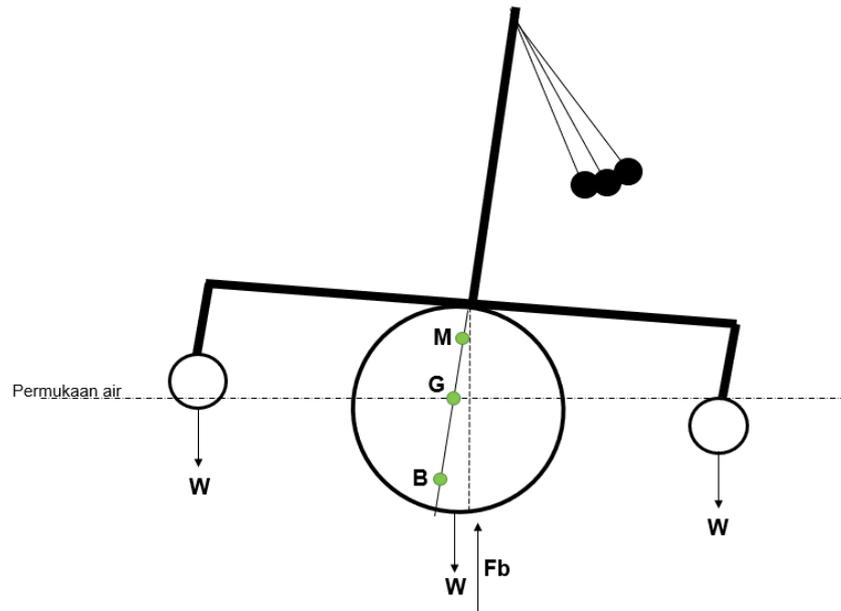
**Gambar 3.3** Keadaan ponton statis yang tercelup air sebelum diberi beban pendulum



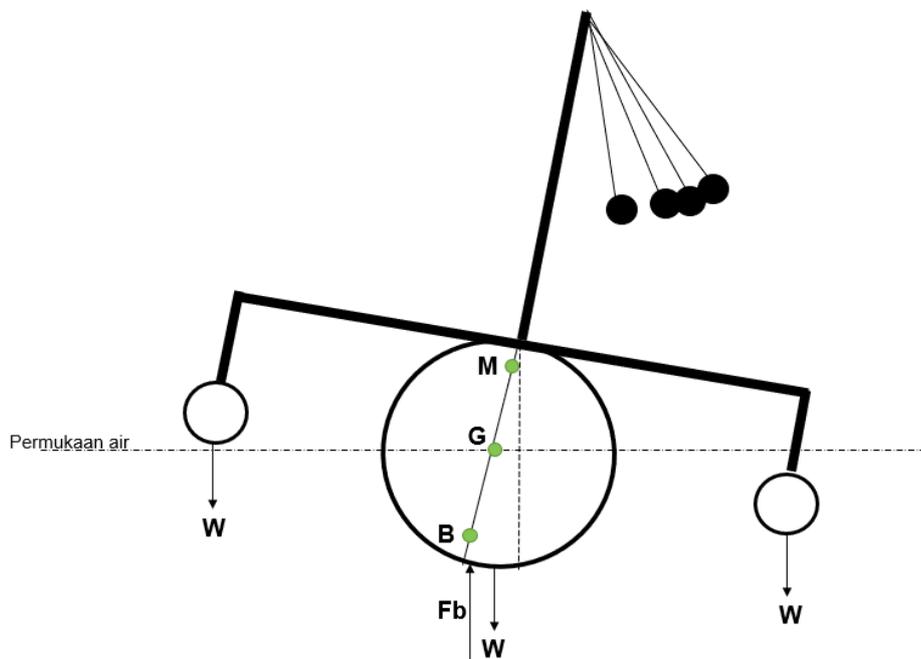
**Gambar 3.4** Keadaan ponton saat diberi beban 2 pendulum

Gambar 3.4 merupakan keadaan dimana ponton diberi beban 2 pendulum. Berdasarkan gambar tersebut dapat dilihat bahwa titik metasentris (M) dan *point of buoyancy* bergeser dari keadaan awalnya. Jarak titik B dengan G sebesar 56,7 cm. Jarak titik B dan M sebesar 85 cm dan jarak antara titik G dan M sebesar 28,7 cm.

Jika dilihat nilai GM memiliki nilai positif dengan titik M masih berada di atas titik G sehingga dapat dikatakan ponton masih stabil. Kemiringan sudut atau *pitching* yang dibentuk akibat adanya beban 2 pendulum nilainya cukup kecil sebesar  $0,5^\circ$ .



**Gambar 3.5** Keadaan ponton saat diberi beban 3 pendulum

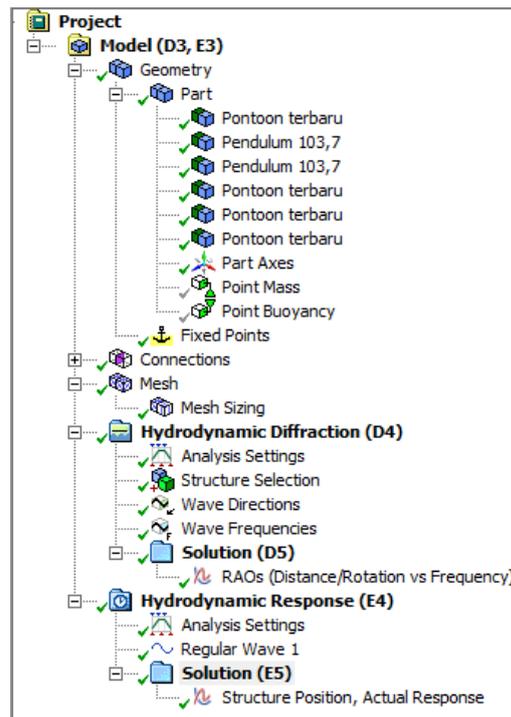


**Gambar 3.6** Keadaan ponton saat diberi beban 4 pendulum

Gambar 3.5 menunjukkan bahwa ketika ponton diberikan beban 3 pendulum, titik metasentris dan *point of buoyancy* bergeser dari keadaan dimana ponton diberikan beban 2 pendulum. Jarak titik B dan M (BM) bergeser lebih jauh dengan nilai sebesar 142 cm. Sedangkan jarak G dan M (GM) menjadi 57 cm dan dikatakan bahwa ponton masih dalam kondisi stabil. Kemiringan sudut atau *pitching* ponton juga menjadi lebih besar dari keadaan ketika ponton diberikan beban 2 pendulum yaitu sebesar  $1,6^\circ$ . Pada saat ponton diberikan beban 4 pendulum (Gambar 3.6) keadaan titik metasentris dan *point of buoyancy* juga bergeser. Jarak antara titik B dan M (BM) sebesar 158 cm dan jarak titik G dan M (GM) sebesar 74 cm. Sudut *pitching* ponton juga menjadi lebih besar dengan nilai  $3,2^\circ$ . Berdasarkan pada Gambar 3.4 hingga 3.6 dengan keadaan ponton diberikan beban 2, 3 dan 4 pendulum dalam dikatakan bahwa ponton masih dalam keadaan stabil karena posisi titik metasentris masih berada di atas posisi titik G dan nilai GM bernilai positif. Dari perhitungan dan analisa kestabilan tersebut didapatkan pula *range pitching* ponton multi pendulum sebesar  $0^\circ$  hingga  $3,5^\circ$ . Hal ini sesuai dengan ketentuan bahwa ponton dikatakan stabil ketika memiliki *range pitching* sebesar  $0^\circ$  sampai  $7^\circ$ - $10^\circ$  (Derret B. , 2001).

### 3.3 Simulasi

Simulasi dilakukan 2 kali yang pertama untuk mengetahui interaksi gelombang dengan ponton menggunakan AQWA *Hydrodynamics Diffractions* dan *Hydrodynamic Responses* dengan tampilan *outline* seperti pada Gambar 3.7 dan yang kedua untuk mengetahui respon ponton terhadap pendulum menggunakan *Rigid Dynamics*.



**Gambar 3.7** Outline pada simulasi Ansys AQWA

Pada tahap simulasi ini dilakukan dengan *computational fluid dynamics* (CFD) melalui tahap *pre-processing*, *processing*, dan *post processing*. Pada tahap *pre-processing* dilakukan *set up* dengan menginputkan data – data berupa *water size*, *sarat air*, *point of mass*, *point of buoyancy* dan *COG* dengan *set up* seperti pada Gambar 3.8 sampai 3.10 di bawah ini.

Environment Constants	
<input type="checkbox"/> Water Depth	100000 cm
<input type="checkbox"/> Water Density	0.001025 kg/cm <sup>3</sup>
<input type="checkbox"/> Gravity	980.665 cm/s <sup>2</sup>
Water Size X	15000 cm
Water Size Y	5000 cm

**Gambar 3.8** Set up pada *water size*

<b>Mass Properties</b>	
Mass Definition	Manual Definition
<input type="checkbox"/> X Position	0.0 cm
<input type="checkbox"/> Y Position	0.0 cm
<input type="checkbox"/> Z Position	57 cm
<input type="checkbox"/> Mass	9650.24042 kg
<b>Inertia Properties</b>	
Define Inertia Values ...	Direct Input of Inertia
Kxx	651.453553351634 cm
Kyy	977.451505792519 cm
Kzz	871.577334410121 cm
<input type="checkbox"/> Ixx	4095482247.74389 kg.cm <sup>2</sup>
<input type="checkbox"/> Ixy	0.0 kg.cm <sup>2</sup>
<input type="checkbox"/> Ixz	0.0 kg.cm <sup>2</sup>
<input type="checkbox"/> Iyy	9219950155.61889 kg.cm <sup>2</sup>
<input type="checkbox"/> Iyz	0.0 kg.cm <sup>2</sup>
<input type="checkbox"/> Izz	7330776665.46814 kg.cm <sup>2</sup>

**Gambar 3.9** *Set up pada point mass*

<b>Details of Point Buoyancy</b>	
Name	Point Buoyancy
Visibility	Not Visible
Activity	Not Suppressed
<b>Buoyancy Properties</b>	
<input type="checkbox"/> X	0.0 cm
<input type="checkbox"/> Y	0.0 cm
<input type="checkbox"/> Z	-57 cm
<input type="checkbox"/> Volume	3821380 cm <sup>3</sup>

**Gambar 3.10** *Set up pada point bouyancy*

Kemudian dilakukan *meshing* dengan menginputkan *defeaturing tolerance* dan *maximum element size*. Pada bagian pendulum yang dimensinya lebih kecil maka ditambahkan *mesh sizing*. *Set up* pada *meshing* dapat dilihat seperti pada Gambar 3.11 dan 3.12 di bawah ini.

<b>Details of Mesh</b>	
<b>Defaults</b>	
Control Type	Basic Controls
<b>Mesh Parameters</b>	
Defeaturing Tolerance	4 cm
Maximum Element Size	10 cm
Maximum Allowed Fre...	1.897 Hz
Meshing Type	Surface Meshing Only
<b>Generated Mesh Information</b>	
Total Nodes	29915
Total Elements	29934
Diffraction Nodes	5135
Diffraction Elements	4928
Line Body Nodes	0
Line Body Elements	0
Field Points	0

**Gambar 3.11** *Set up pada meshing properties*

<b>Details of Mesh Sizing</b>	
Name	Mesh Sizing
Activity	Not Suppressed
Select Geometry	2 Bodies
Local Element Size	2 cm

**Gambar 3.12** *Set up pada mesh sizing*

Tahap *processing* dilakukan simulasi gelombang dengan menginputkan periode gelombang dan arah gelombang yang digunakan. Tahap ini dilakukan saat simulasi pada AQWA *Hydrodynamics Diffractions* seperti pada Gambar 3.13 dan 3.14. Sedangkan pada simulasi AQWA *Hydrodynamics Respons* dimasukkan data berupa amplitudo gelombang dan periode gelombang dengan jenis gelombang *regular wave* seperti pada Gambar 3.15

<b>Details of Wave Directions</b>	
Name	Wave Directions
Visibility	Visible
Type	Range of Directions, No Forward Speed
<b>Required Wave Input</b>	
Wave Range	-180° to 180°
Interval	180°
Number of Intermedia...	1
<b>Optional Wave Directions A</b>	
Additional Range	Single
Start Angle	-30°
<b>Optional Wave Directions B</b>	
Additional Range	Single
Start Angle	30°
<b>Optional Wave Directions C</b>	
Additional Range	None
<b>Optional Wave Directions D</b>	
Additional Range	None

**Gambar 3.13** *Set up wave direction*

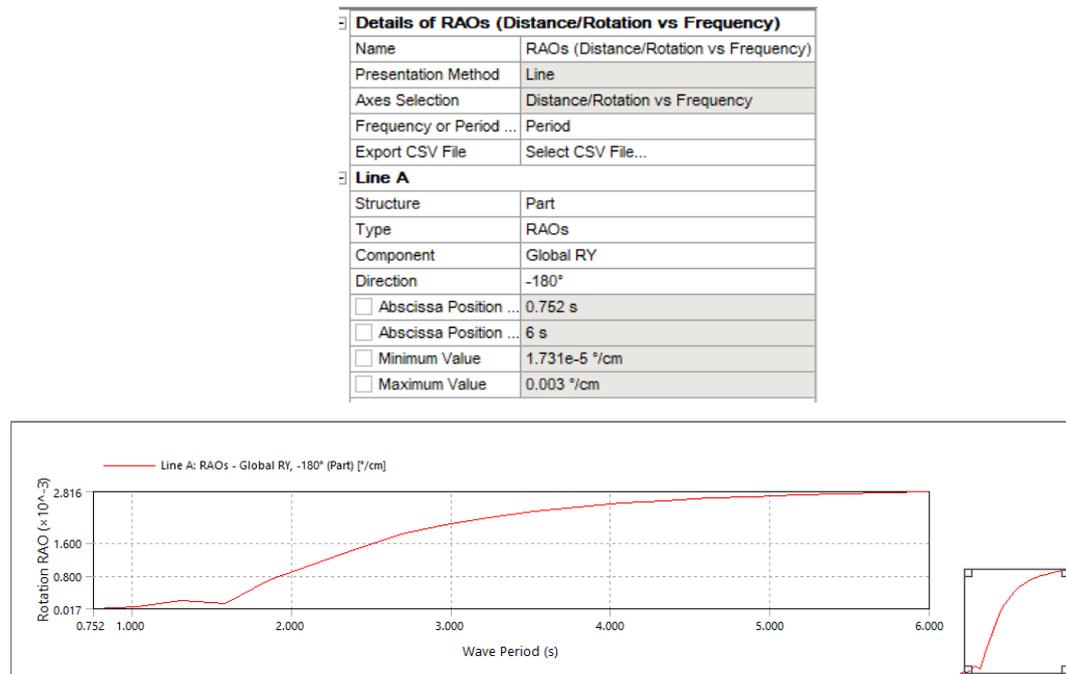
<b>Incident Wave Frequency/Period Definition</b>	
Range	Manual Definition
Definition Type	Range
Lowest Frequency D...	Manual Definition
Lowest Frequency	0.16667 Hz
Longest Period	6 s
Highest Frequency D...	Program Controlled
Highest Frequency	1.32929 Hz
Shortest Period	0.75228 s
Number of Intermedia...	18
Interval Period	0.2762 s

**Gambar 3.14** *Set up periode gelombang*

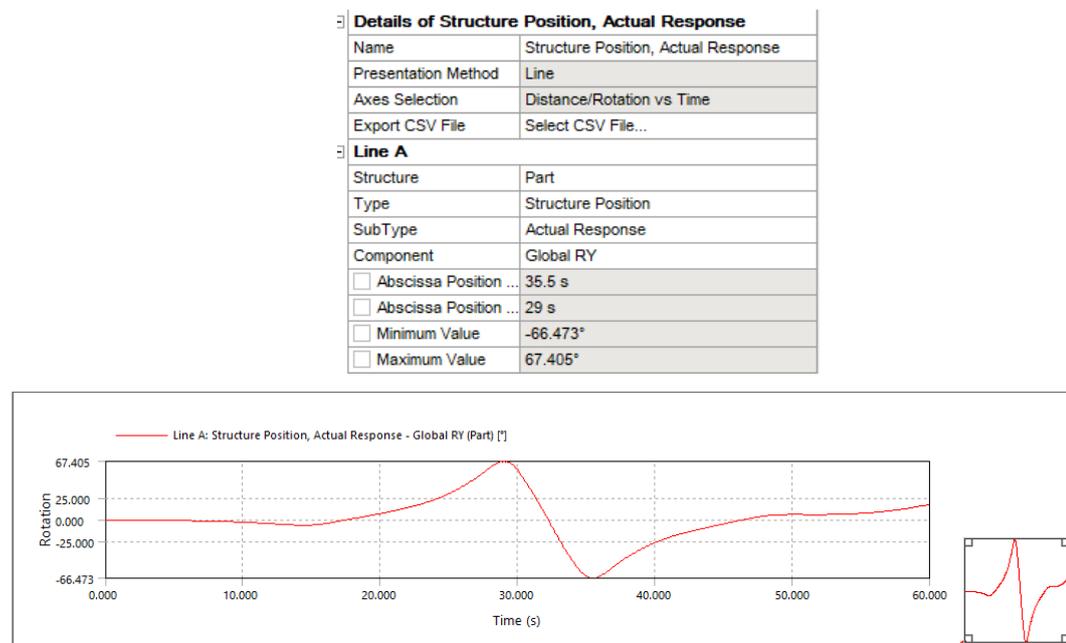
<b>Details of Regular Wave 1</b>	
Name	Regular Wave 1
Visibility	Visible
Activity	Not Suppressed
<b>Wave Definition</b>	
Wave Type	Stokes 2nd Order Wave Theory
<input type="checkbox"/> Direction	0.0°
<input type="checkbox"/> Amplitude	20 cm
<input type="checkbox"/> Period	6 s
<input type="checkbox"/> Frequency	0.1666666666666667 Hz
Ramping Method	Program Controlled

**Gambar 3.15** *Set up parameter gelombang*

Tahap akhir simulasi (*post processing*) adalah *solution* atau hasil berupa respon ponton akibat gelombang laut maka grafik *RAO* (*Response Amplitude Operator*) ditampilkan seperti pada Gambar 3.16 dan nilai *actual respon* seperti pada Gambar 3.17.

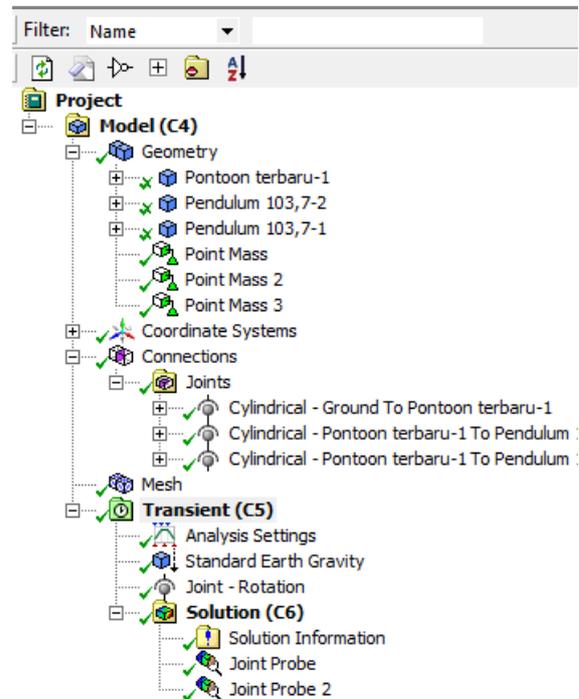


**Gambar 3.16** Hasil simulasi RAO (*pitch*)



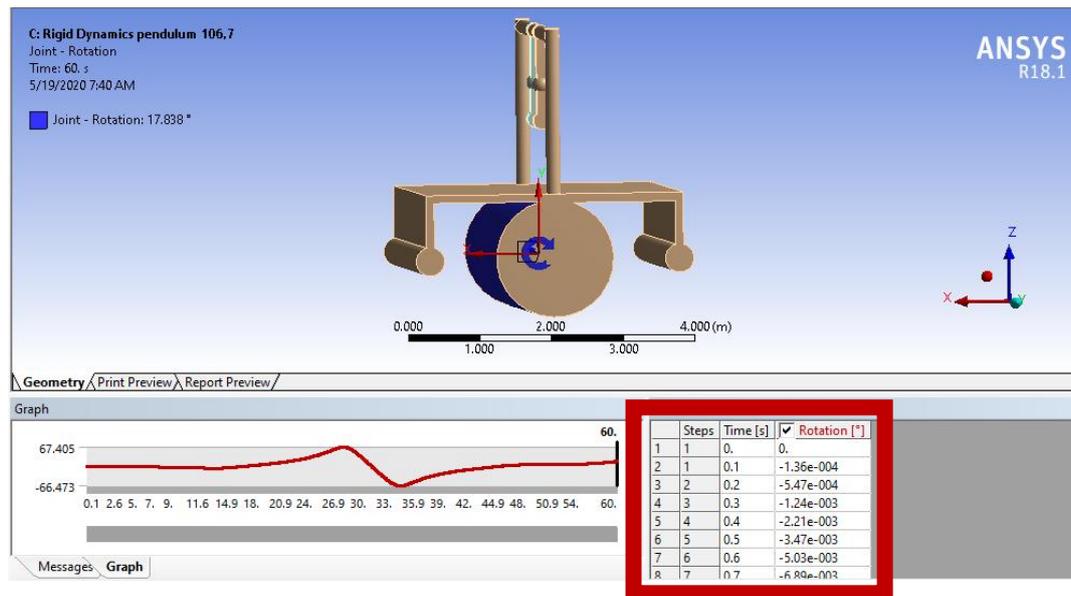
**Gambar 3.17** Hasil simulasi *actual respon*

Pada simulasi menggunakan *Rigid Dynamics* data yang dimasukkan berupa nilai *actual respons* dari AQWA untuk mengetahui nilai simpangan pendulum akibat gerak ponton dengan *outline* lengkap seperti pada Gambar berikut ini.



**Gambar 3.18** *Outline* pada simulasi *rigid dynamics*

Pada tahap *pre-processing* data yang dimasukkan berupa *point mass* pada masing-masing komponen. Kemudian diberikan *connections* berupa *joint cylindrical* untuk mendefinisikan hubungan antara ponton dengan *ground* dan ponton dengan pendulum. Selanjutnya pada tahap *processing* diberikan *input* berupa data *actual respons* pada bagian *joint – Rotation* seperti pada Gambar 3.19.



**Gambar 3.19** *Input data actual respon pada joint rotation*

Pada tahap *post-processing* atau hasil dari simulasi ditampilkan hasil perubahan nilai simpangan akibat gerak ponton pada masing – masing pendulum pada bagian *joint probe*.

### 3.4 Verifikasi

Verifikasi dilakukan dengan memastikan simulasi sudah sesuai dengan hasil yang akurat melalui perbandingan *set up* simulasi dengan ketentuan atau aturan yang sudah ada pada *AQWA user manual*. Ketika *set up* sudah sesuai maka dilanjutkan untuk simulasi variasi pada pengambilan data.

### 3.5 Pengambilan Data

Pada pengambilan data dilakukan dengan variasi periode gelombang, panjang lengan pendulum dan jumlah pendulum berupa nilai *RAO pitch* dan simpangan pendulum. Kemudian dari pengambilan data respon pendulum terhadap variasi periode gelombang, panjang lengan dan jumlah pendulum ini diambil nilai yang paling maksimal dan terbaik.

### 3.6 Analisis Data

Data yang telah diperoleh dari hasil simulasi kemudian di analisa nilai *RAO pitch* dan simpangan pendulum terhadap variasi yang digunakan. Dari hasil analisa

akan didapatkan ponton dengan susunan panjang lengan dan jumlah pendulum yang sesuai untuk diaplikasikan serta daya maksimal yang dapat dibangkitkan.

### **3.7 Kesimpulan**

Berdasarkan pada analisa data, kemudian dapat disimpulkan sesuai dengan tujuan penelitian yang telah dilakukan.

### **3.8 Penyusuna Laporan**

Setelah melalui proses pengambilan data, analisis data dan kesimpulan, selanjutnya dilakukan penyusunan laporan untuk penelitian yang dilakukan.

## **BAB IV**

### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

#### **4.1 Verifikasi Hasil Simulasi**

Verifikasi merupakan suatu proses untuk menentukan sebuah simulasi CFD sudah merepresentasikan suatu model secara akurat. Simulasi yang digunakan pada penelitian ini dilakukan 2 kali yaitu menggunakan *Hydrodynamics Diffractions* dan *Hydrodynamics responses* untuk mendapatkan hasil respon ponton terhadap gelombang. Yang kedua menggunakan *Rigid dynamics* untuk mengetahui respon ponton terhadap perubahan simpangan pendulum.

##### **4.1.1 *Hydrodynamics Diffraction dan Responses***

Pada simulasi benda terapung, parameter penting yang harus ada diantaranya adalah *point of mass* dan *point of buoyancy*. Kedua parameter ini termasuk dalam tahap *pre-processing*. Pada *set up point of mass* yang diperlukan adalah massa ponton yang digunakan, nilai COG (*center of gravity*) dan *inertia value* seperti yang terlihat pada Gambar 3.9. Nilai – nilai ini diperoleh melalui data *mass properties* pada *software Solidwork*. Setelah memberikan *input* berupa data tersebut, dilanjutkan dengan *meshing* seperti pada Gambar 3.11. Pada *Hydrodynamics Diffractions* total elemen yang digunakan tidak boleh melebihi 40.000 elemen untuk versi 64 bit dan tidak boleh lebih 18.000 untuk versi 32 bit (Ansys, 2012). Sedangkan untuk nilai *defeaturing tolerant* tidak boleh lebih besar atau sama dengan  $0,6 \times \text{maximum element size}$  (Ansys, 2012). Nilai *maximum element size* yang digunakan pada penelitian ini sebesar 10 sehingga nilai *defeaturing tolerant* tidak boleh lebih dari atau sama dengan 6. Simulasi ini juga ditambahkan *mesh sizing* untuk bagian pendulum yang memiliki geometri lebih kecil dengan ketentuan *mesh sizing* tidak boleh lebih dari nilai *defeaturing tolerant* (Ansys, 2012).

Pada simulasi dengan *Hydrodynamics Responses* agar hasil simulasi dan juga posisi ponton sama dengan pada *Hydrodynamics Diffraction* maka diperlukan perubahan pada *set up “Use Linier Starting Conditions”* dengan memberikan *input “Yes”*. Hal ini dikarenakan simulasi pada *Hydrodynamics Diffractions* dan

*Hydrodynamics Responses* saling berhubungan (Ansys, 2012). Perubahan *set up* pada *Hydrodynamics Responses* dapat dilihat pada Gambar 4.1 di bawah ini.

Details of Analysis Settings	
Name	Analysis Settings
Computation Type	Time Response Analysis
Parallel Processing	Program Controlled
Use Cable Dynamics	Yes
Time Response Specific Options	
Analysis Type	Regular Wave Response
<input type="checkbox"/> Start Time	0.0 s
<input type="checkbox"/> Time Step	0.1 s
<input type="checkbox"/> Duration	60 s
Number of Steps	601
Finish Time	60 s
Starting Position	Based on Geometry
X-Position for Wave Surface Elevation Output	0.0 cm
Y-Position for Wave Surface Elevation Output	0.0 cm
Common Analysis Options	
Convolution	No
Call Routine "user_force"	No
Use Linear Starting Conditions	Yes
Use Linear Stiffness Matrix to Calculate Hydros...	No
Account for Current Phase Shift	Yes
Use Wheeler Stretching	Yes

**Gambar 4.1** Analysis setting pada *Hydrodynamics Responses*

Selain itu *set up* pada *analysis setting hydrodynamics responses* ketika bagian *computation type* dipilih menjadi *time response analysis* untuk mengatur *time step* dan *duration*, maka *starting position* akan otomatis berubah menjadi *based on geometry*. Untuk mengatur jenis gelombang yang digunakan maka *set up* pada *analysis type* dipilih *regular wave response* karena jenis gelombang yang akan digunakan pada simulasi ini adalah gelombang *regular*.

#### 4.1.2 Rigid Dynamics

Simulasi *rigid dynamics* digunakan untuk mengetahui respon gerak ponton terhadap simpangan pendulum dengan memasukkan data *actual response* yang diperoleh dari hasil simulasi *hydrodynamics responses*. Sebelum memasukkan data *actual respon* diberikan *input* massa dari geometri yang digunakan seperti pada Gambar 4.2. Massa yang dimasukkan terdiri dari massa ponton dan massa pendulum. Data *actual response* dimasukkan pada bagian *joint rotation* seperti yang terlihat pada Gambar 3.19.

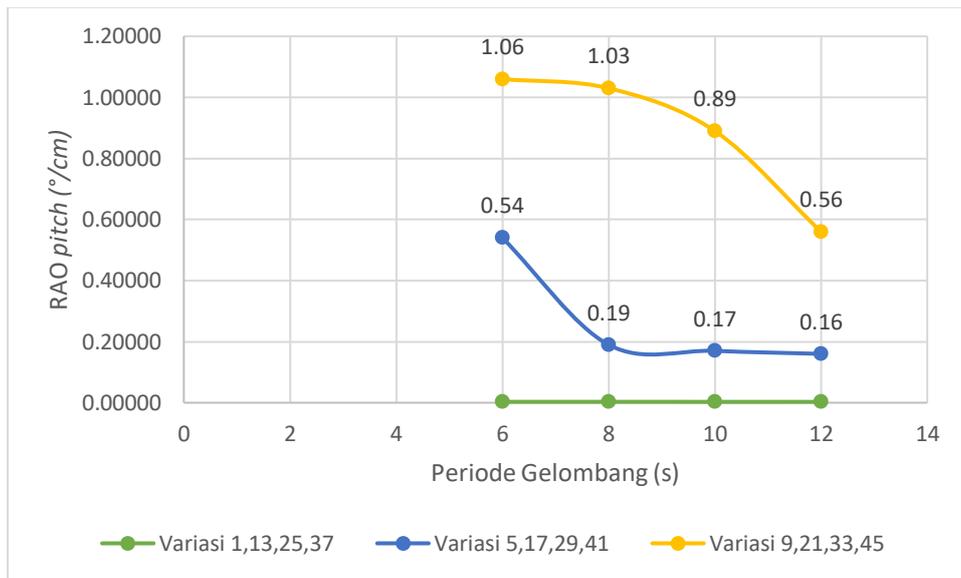
Scoping Method	Geometry Selection
Applied By	Remote Attachment
Geometry	25 Faces
Coordinate System	Global Coordinate System
<input type="checkbox"/> X Coordinate	8.0036 m
<input type="checkbox"/> Y Coordinate	-3.3351 m
<input type="checkbox"/> Z Coordinate	-5.3502 m
Location	Click to Change
<b>Definition</b>	
<input type="checkbox"/> Mass	9709.2 kg
<input type="checkbox"/> Mass Moment of Inertia X	0.000000 kg·m <sup>2</sup>

**Gambar 4.2** Input massa pada simulasi *rigid dynamics*

#### 4.2 Pengaruh Perubahan Periode Gelombang Terhadap Gerakan Ponton

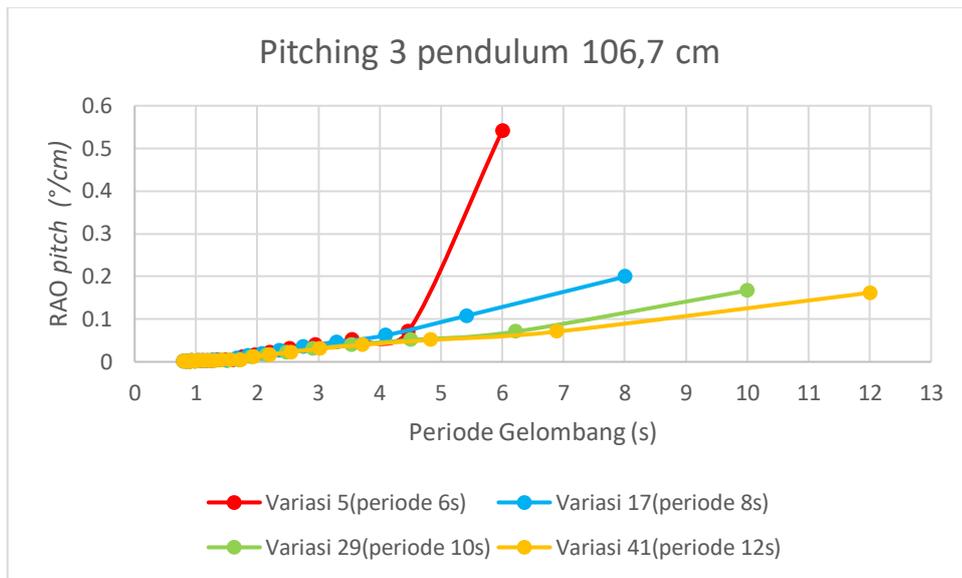
Respon gerak ponton didapatkan dari hasil simulasi gelombang yang mengenai ponton dengan mengubah beberapa parameter salah satunya periode gelombang. Keluaran dari simulasi ini berupa nilai RAO (*Respon Amplitude Operator*) dan *pitching* ponton. Analisa respon gerak ponton dilakukan dengan menggunakan variasi periode gelombang 6, 8, 10 dan 12 sekon. Amplitudo gelombang yang digunakan sebesar 20 cm dan sarat air  $1/2 D$ .

Hasil simulasi berupa gerakan *pitch* yang menggambarkan hubungan antara variasi periode gelombang dan gerakan *pitch* dapat dilihat pada grafik Gambar 4.3 hingga 4.6. Pada Gambar 4.3. merupakan grafik hubungan antara variasi periode gelombang dengan RAO *pitch* pada ponton panjang lengan 106,7 cm dan jumlah pendulum 2,3 dan 4. Variasi 1, 13, 25 dan 37 merupakan variasi ponton 2 pendulum 106,7 cm. Variasi 5, 17, 29 dan 41 merupakan variasi ponton 3 pendulum 106,7 cm. Variasi 9, 21, 33 dan 45 merupakan variasi ponton 4 pendulum 106,7 cm. Berdasarkan pada grafik tersebut dapat diketahui bahwa *trendline* nilai *pitch* cenderung turun selama periode diperbesar. Nilai *pitch* saat periode 6 sekon pada variasi jumlah pendulum 2, 3 dan 4 memiliki nilai paling tinggi. Pada ponton 2 pendulum RAO *pitch* memiliki nilai yang lebih kecil dibandingkan pada ponton variasi 3 dan 4. *Pitching* paling besar terjadi pada variasi ponton 4 pendulum dengan nilai sebesar  $1.06 \text{ }^\circ/\text{cm}$ .

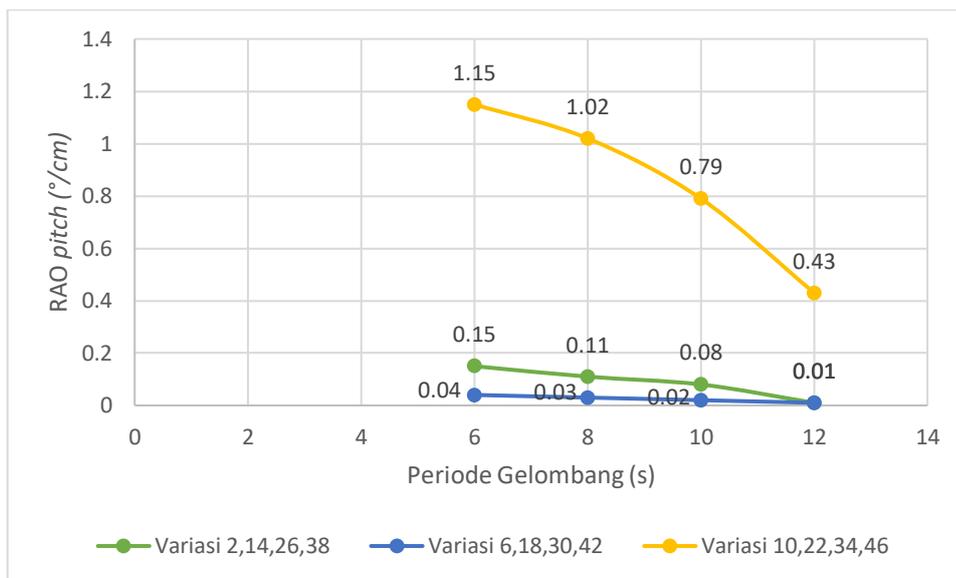


**Gambar 4.3** RAO *pitch* pada panjang lengan pendulum 106,7 cm

Pada variasi 5, 17, 29 dan 41 yang merupakan ponton dengan variasi 3 pendulum (Gambar 4.3) memiliki penurunan yang sangat tajam dari periode gelombang 6 sekon ke periode gelombang 8 sekon. Penurunan nilai yang sangat tajam ini dapat digambarkan secara rinci melalui grafik pada Gambar 4.4 yang menjelaskan perubahan nilai RAO *pitch* pada saat ponton mulai bergerak dari periode gelombang puncak yaitu periode 6, 8, 10 dan 12 sekon hingga ponton berhenti pada periode 0,79 sekon. Berdasarkan pada Gambar 4.4 tersebut dapat diketahui bahwa nilai RAO pada variasi 5 mengalami penurunan yang sangat tajam dari periode gelombang puncak yaitu 6 sekon hingga periode 4,5 sekon kemudian bergerak landai. Sedangkan pada variasi 17, 29 dan 41 tidak mengalami penurunan yang cukup tajam. Hal ini disebabkan oleh pergerakan ponton pada variasi 5 memiliki respon gerak yang sangat cepat jika dibandingkan dengan variasi 17, 29 dan 41. Sehingga mengakibatkan *pitch* awal yang dibentuk menjadi sangat besar.



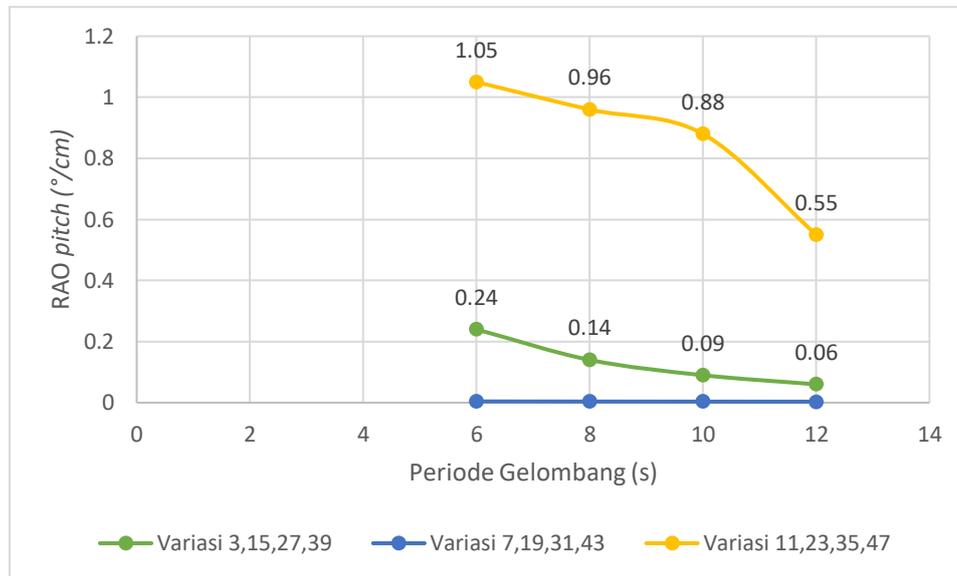
**Gambar 4.4** RAO *pitch* pada ponton 3 pendulum 106,7 cm



**Gambar 4.5** RAO *pitch* pada panjang lengan pendulum 110 cm

Gambar 4.5 merupakan grafik hubungan variasi periode gelombang dengan RAO *pitch* pada panjang lengan pendulum 110 cm dan jumlah ponton 2, 3, 4. Variasi 2, 14, 26 dan 38 merupakan variasi dengan jumlah pendulum 2. Variasi 6, 18, 30 dan 42 merupakan variasi pada ponton dengan jumlah pendulum 3 sedangkan variasi 10, 22, 34 dan 46 merupakan variasi dengan jumlah pendulum 4. Pada grafik tersebut dapat diketahui bahwa nilai *pitch* memiliki *trendline* yang hampir sama dengan grafik variasi pada Gambar 4.3. Nilai *pitch* memiliki karakteristik yang menurun dengan nilai puncak pada periode 6 sekon kemudian

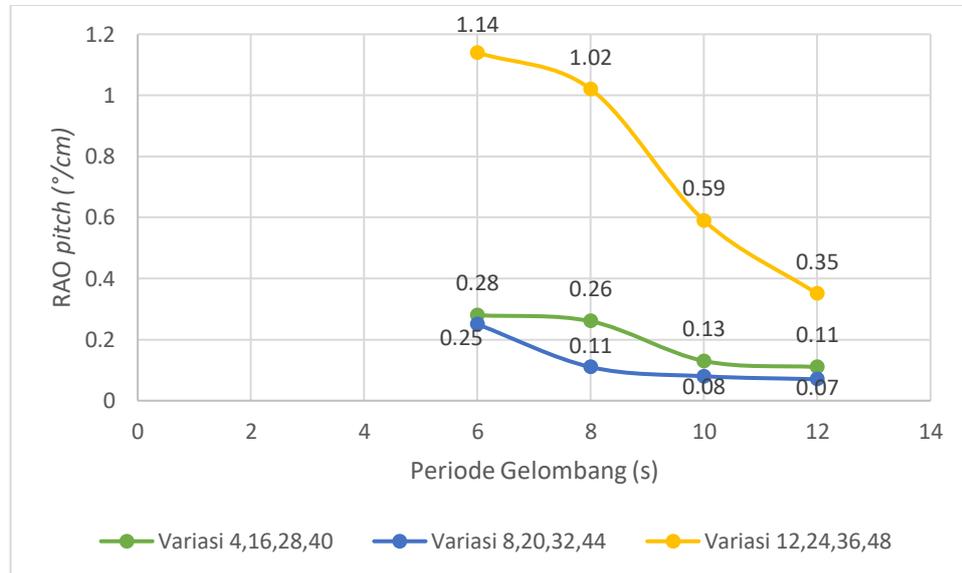
mengalami penurunan hingga periode 12 sekon. *Pitch* paling tinggi terjadi pada variasi dengan jumlah pendulum 4 sebesar  $1,15^{\circ}/\text{cm}$ . Kemudian diikuti oleh ponton 2 dan 3 pendulum dengan nilai masing – masing sebesar  $0,15^{\circ}/\text{cm}$  dan  $0,04^{\circ}/\text{cm}$ .



**Gambar 4.6** RAO *pitch* pada panjang lengan pendulum 130 cm

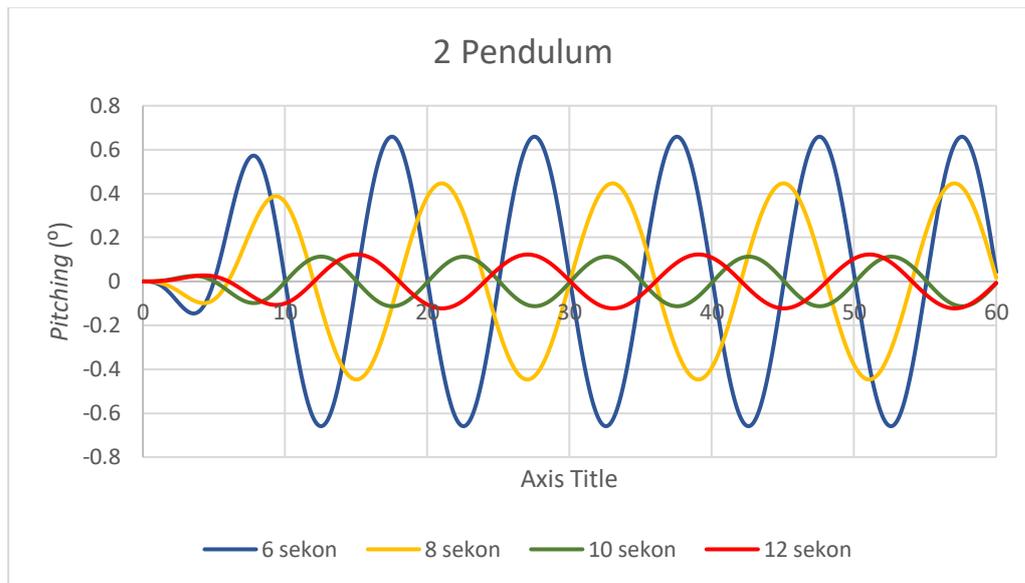
Gambar 4.6 merupakan hubungan antara variasi periode gelombang dengan nilai *pitch* pada ponton dengan panjang lengan pendulum 130 cm dan jumlah pendulum 2,3,4. Variasi 3, 15, 27 dan 39 merupakan variasi ponton 2 pendulum. Variasi 7, 19, 31 dan 43 adalah variasi ponton 3 pendulum sedangkan variasi 11, 23, 35 dan 47 merupakan variasi ponton 4 pendulum. Grafik tersebut memiliki karakteristik yang sama seperti pada grafik sebelumnya pada Gambar 4.3 dan 4.5 dimana nilai *pitch* memiliki *trendline* yang semakin menurun ketika periode gelombang semakin besar. *Pitch* paling tinggi terjadi pada saat periode 6 sekon pada masing – masing variasi jumlah pendulum. Berdasarkan grafik tersebut nilai *pitch* tertinggi terjadi pada variasi ponton 4 pendulum sebesar  $1,05^{\circ}/\text{cm}$ . Sama halnya dengan grafik pada Gambar 4.3, 4.5 dan 4.6 pada Gambar 4.7 juga memiliki *trendline* yang sama dimana nilai *pitch* semakin turun saat periode gelombang diperbesar. Dimana variasi 4, 16, 28 dan 40 merupakan variasi ponton 2 pendulum. Variasi 8, 20, 32 dan 44 merupakan ponton 3 pendulum dan variasi 12, 24, 36 dan 48 merupakan variasi ponton 4 pendulum. Nilai *pitch* maksimum dari variasi panjang lengan 165 cm terjadi pada periode 6 sekon dengan jumlah pendulum 4

sebesar  $1,14^{\circ}/\text{cm}$ . Kemudian diikuti oleh ponton 2 dan 3 pendulum dengan nilai masing – masing sebesar  $0,28^{\circ}/\text{cm}$  dan  $0,25^{\circ}/\text{cm}$ .



**Gambar 4.7** RAO *pitch* pada panjang lengan pendulum 165 cm

Berdasarkan pada grafik variasi periode gelombang terhadap RAO *pitch* dapat diketahui bahwa nilai RAO *pitch* cenderung memiliki karakteristik yang sama antara variasi ponton dengan panjang lengan 106,7;110; 130 dan 165 cm dimana nilai *pitch* semakin menurun ketika periode gelombang diperbesar. Hal ini dikarenakan semakin besar nilai periode gelombang mengakibatkan sudut *pitching* semakin mengecil namun kecepatan *pitching* akan semakin besar (Karsten, 2012). sehingga frekuensi ponton untuk bergetar akan semakin cepat dan membuat bandul mudal berosilasi (Djarmiko, 2012). Puncak RAO *pitch* sama – sama terjadi pada variasi periode 6 sekon pada masing – masing variasi jumlah pendulum. Selain itu nilai RAO *pitch* paling tinggi juga sama – sama terjadi pada periode 6 sekon dengan jumlah pendulum 4 pada masing – masing variasi panjang lengan pendulum. Nilai *pitch* maksimum pada panjang lengan pendulum 106,7;110;130 dan 165 cm masing – masing sebesar  $1,06^{\circ}/\text{cm}$ ,  $1,15^{\circ}/\text{cm}$ ,  $1,05^{\circ}/\text{cm}$  dan  $1,14^{\circ}/\text{cm}$ .

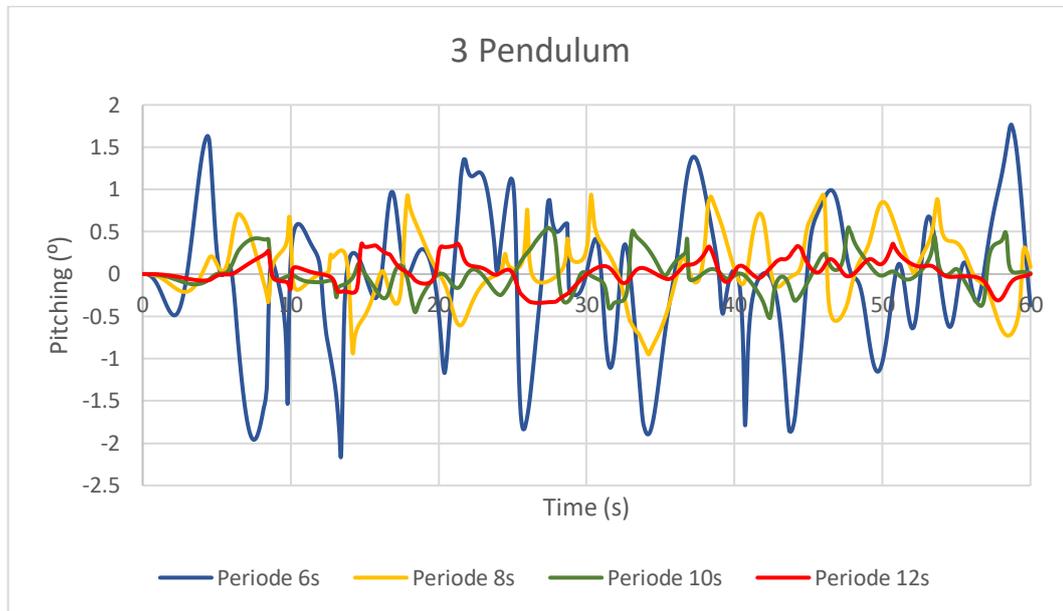


**Gambar 4.8** Grafik *pitching* ponton 2 pendulum terhadap waktu

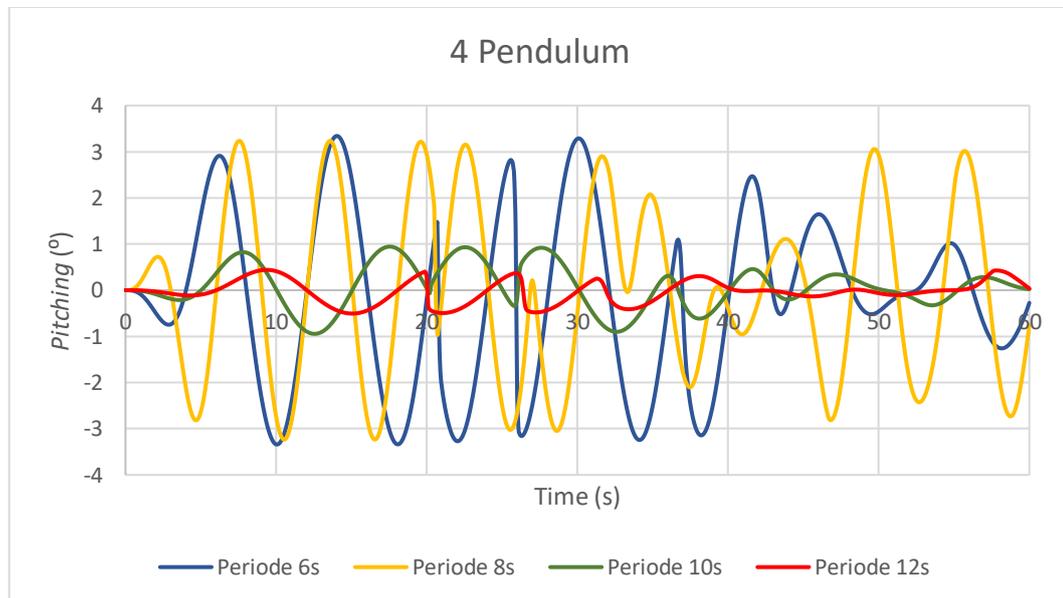
Gambar 4.8 merupakan grafik hubungan antara *pitching* ponton 2 pendulum terhadap waktu pada periode gelombang 6, 8, 10 dan 12 sekon. Berdasarkan pada gambar tersebut dapat diketahui bahwa periode 12 sekon memiliki pergerakan yang lebih cepat namun memiliki sudut *pitching* yang lebih kecil dibandingkan dengan variasi periode 6, 8 dan 10 sekon. Meskipun memiliki sudut *pitching* yang lebih kecil namun perbedaan nilai sudut *pitching* antara ponton yang dikenai periode gelombang 12 sekon dengan 10 sekon sangatlah kecil. Nilai sudut *pitching* terbesar terjadi pada saat ponton yang dikenai periode gelombang 6 sekon dengan nilai sebesar  $0,65^{\circ}$ .

Gambar 4.9 merupakan grafik hubungan antara *pitching* ponton 3 pendulum terhadap waktu pada periode 6, 8, 10 dan 12 sekon. Pada grafik tersebut dapat diketahui bahwa saat periode gelombang sebesar 12 sekon, ponton memiliki pergerakan yang lebih cepat namun sudut *pitching* yang lebih kecil jika dibandingkan pada variasi periode gelombang 6, 8 dan 10 sekon. Hal ini dikarenakan semakin besar nilai periode gelombang mengakibatkan sudut *pitching* semakin mengecil namun kecepatan *pitching* akan semakin besar (Karsten, 2012). Sudut *pitching* maksimum terjadi pada saat ponton dikenai gelombang dengan periode 6 sekon dengan nilai sebesar  $1,75^{\circ}$ . Jika dilihat pada grafik tersebut nilai sudut *pitching* cenderung menurun ketika periode gelombang yang mengenai

ponton diperbesar. Hal ini disebabkan pada persamaan gelombang 2.6 nilai periode gelombang berbanding terbalik dengan nilai sudutnya sehingga ketika periode semakin diperbesar maka nilai sudut akan semakin kecil.



**Gambar 4.9** Grafik *pitching* ponton 3 pendulum terhadap waktu



**Gambar 4.10** Grafik *pitching* ponton 4 pendulum terhadap waktu

Gambar 4.10 merupakan grafik hubungan *pitching* ponton 4 pendulum terhadap waktu dan periode gelombang 6, 8, 10 dan 12 sekon. Sama seperti pada Gambar 4.8 dan 4.9 saat ponton dikenai gelombang dengan periode 12 sekon

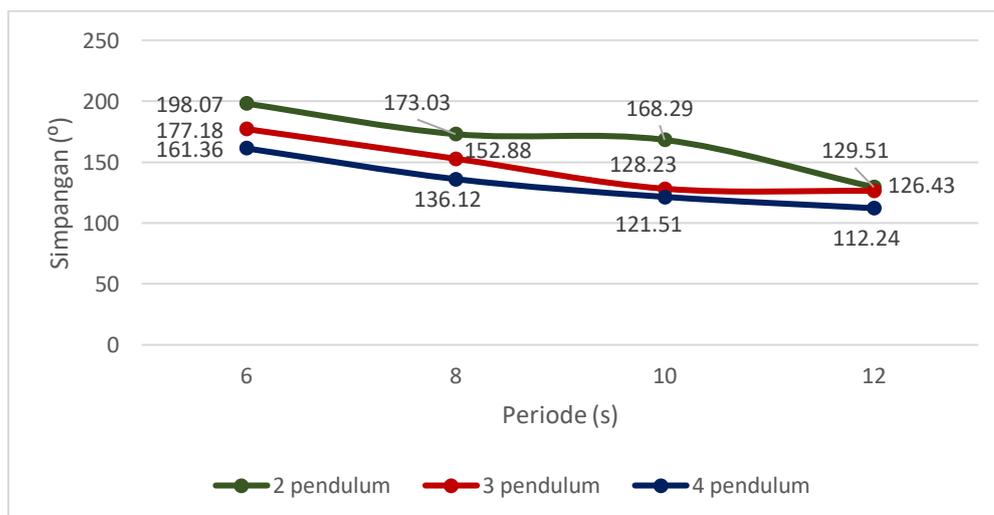
cenderung memiliki respon gerak yang lebih cepat namun memiliki sudut *pitching* yang lebih kecil dari variasi periode gelombang lain. Nilai sudut *pitching* tertinggi terjadi pada periode gelombang 6 sekon dengan nilai sebesar  $3,3^\circ$ . Dari keempat variasi periode gelombang yang mengenai ponton dapat dilihat bahwa nilai sudut *pitching* akan semakin kecil ketika periode gelombang diperbesar. Sama halnya dengan grafik perubahan sudut *pitching* pada ponton 2 dan 3 pendulum, perubahan periode gelombang berbanding terbalik dengan nilai sudutnya. Perubahan nilai periode gelombang terhadap sudut dijelaskan pada persamaan 2.6.

### 4.3 Pengaruh Perubahan Variabel Ponton Terhadap Gerakan Pendulum

Respon gerak ponton yang diakibatkan oleh perubahan variabel ponton dihasilkan dari nilai *actual respon* pada hasil simulasi. Nilai *actual respon* ini kemudian dimasukkan pada simulasi struktural, sehingga didapatkan perubahan gerakan pendulum dan nilai simpangannya. Analisa terhadap gerakan pendulum ini dilakukan dengan menggunakan variasi periode gelombang, panjang pendulum dan jumlah pendulum yang digunakan dalam satu ponton.

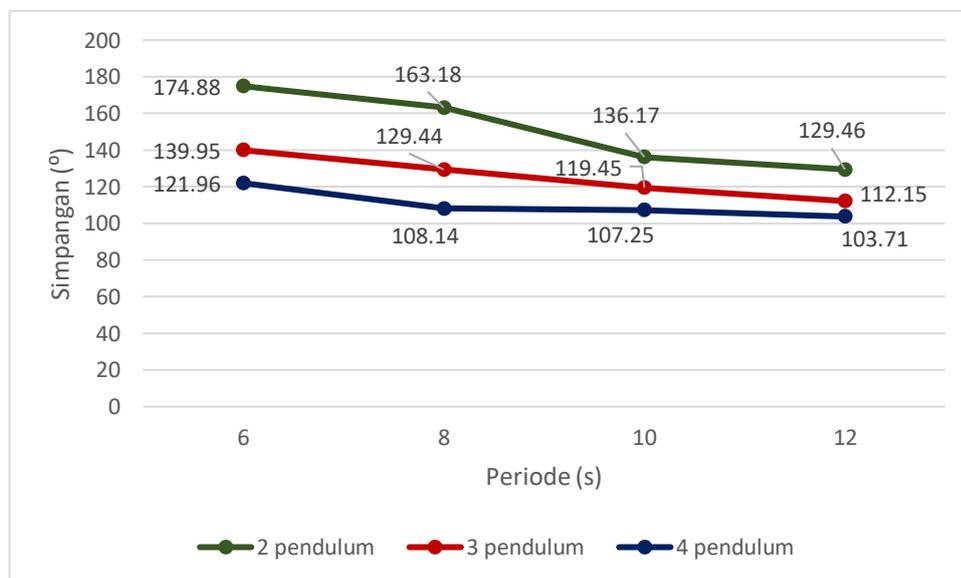
#### 4.3.1 Gerak Pendulum Terhadap Variasi Periode Gelombang

Analisa gerakan pendulum akibat variasi periode gelombang dilakukan dengan menggunakan periode 6, 8, 10 dan 12 sekon pada amplitudo 20 cm dan sarat air 1/2D. Pengaruh perubahan periode terhadap simpangan pendulum dapat dilihat pada Gambar 4.11 hingga 4.14

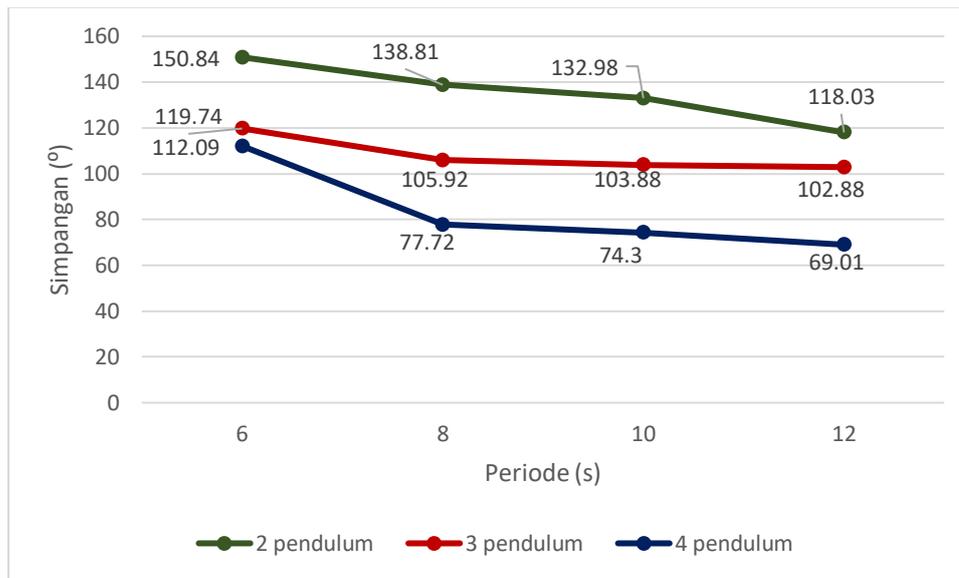


**Gambar 4.11** Grafik simpangan pendulum terhadap periode gelombang pada pendulum 106.7 cm

Gambar 4.11 merupakan grafik rata – rata simpangan dengan periode gelombang pada variasi panjang pendulum 106.7 cm, jumlah pendulum 2, 3 dan 4. Berdasarkan grafik tersebut dapat diketahui bahwa semakin besar periode maka perubahan rata – rata simpangan pendulum akan semakin kecil. Hal ini dipengaruhi oleh nilai *pitching* yang juga semakin kecil ketika periode bertambah. Selain itu semakin menurunnya simpangan juga dipengaruhi oleh nilai periode yang berbanding terbalik dengan nilai simpangannya seperti pada persamaan (2.6) dan (2.8). Simpangan terbesar terjadi pada periode 6 sekon dari masing – masing variasi jumlah pendulum dengan nilai maksimum terjadi pada variasi jumlah pendulum 2 sebesar  $198,07^\circ$ . Sama seperti pada Gambar 4.11 grafik dengan variasi panjang pendulum 110 dan jumlah pendulum 2, 3 dan 4 (Gambar 4.12) memiliki *trendline* nilai simpangan yang semakin menurun seiring dengan bertambahnya periode gelombang. Nilai simpangan terbesar terjadi pada periode 6 sekon dari masing – masing variasi jumlah pendulum dengan nilai paling besar terjadi pada ponton 2 pendulum sebesar  $174,88^\circ$ .

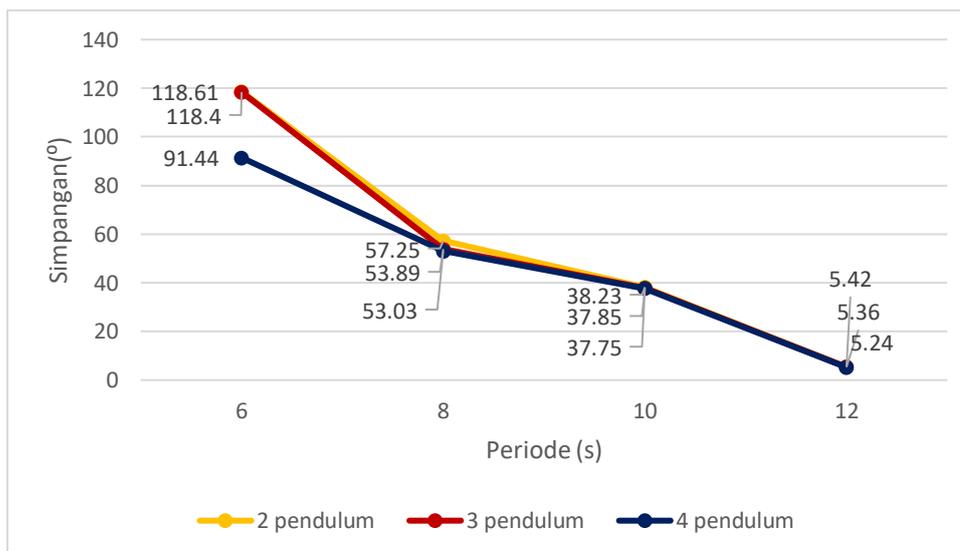


**Gambar 4.12** Grafik simpangan pendulum terhadap periode gelombang pada pendulum 110 cm



**Gambar 4.13** Grafik simpangan pendulum terhadap periode gelombang pada pendulum 130 cm

Gambar 4.13 merupakan grafik variasi periode pada 2, 3 dan 4 pendulum dengan panjang pendulum 130 cm. Dari grafik tersebut menunjukkan karakteristik perubahan simpangan yang sama dimana perubahan simpangan akan semakin kecil ketika periode diperbesar. Dari ponton dengan 2, 3 dan 4 pendulum pada grafik tersebut memiliki *trendline* yang sama. Berdasarkan masing – masing jumlah pendulum tersebut pada panjang lengan 130 cm nilai maksimum terjadi saat periode 6 sekon dengan jumlah pendulum 2 sebesar  $150,84^\circ$ .



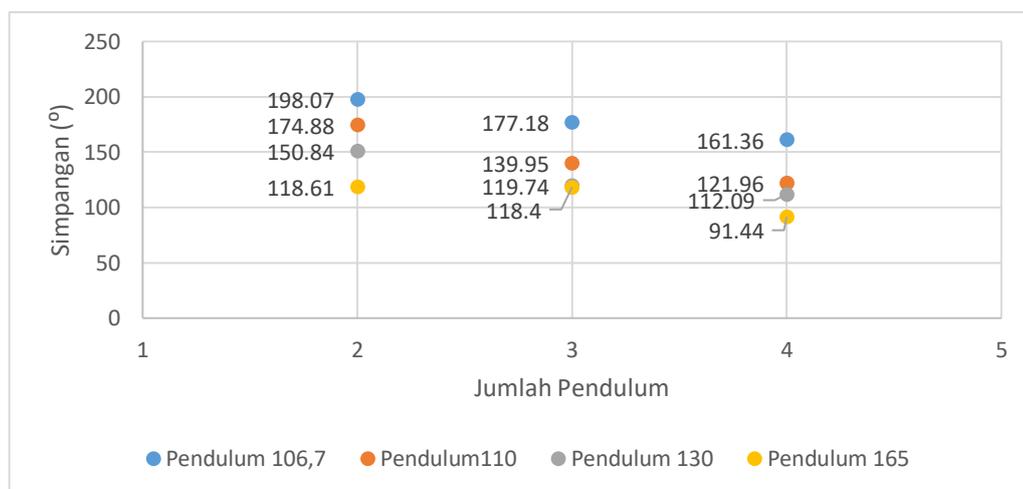
**Gambar 4.14** Grafik simpangan pendulum terhadap periode gelombang pada pendulum 165 cm

Gambar 4.14 menunjukkan perubahan simpangan akibat periode gelombang pada ponton 2, 3 dan 4 pendulum 165 cm. Berdasarkan pada grafik tersebut menunjukkan *trendline* yang sama seperti pada Gambar 4.11 hingga 4.13 dimana nilai simpangan semakin menurun ketika periode gelombang diperbesar. Hal ini dipengaruhi akibat nilai *pitch* yang semakin kecil saat periode gelombang bertambah. Simpangan maksimum juga terjadi saat periode 6 sekon pada ponton 2 pendulum dengan nilai sebesar  $118,61^\circ$ .

Berdasarkan grafik pada Gambar 4.11 hingga 4.14 untuk variasi ponton dengan 2, 3 dan 4 pendulum dan panjang 106,7;110;130;165 cm dapat diketahui bahwa perubahan simpangan akan semakin kecil ketika periode gelombang diperbesar. Hal ini dikarenakan besarnya periode gelombang berbanding terbalik dengan nilai simpangannya seperti dijelaskan pada persamaan 2.6 dan 2.8. Selain itu nilai *pitch* yang semakin kecil seiring bertambahnya periode juga mempengaruhi besarnya perubahan simpangan pada pendulum. Jika dilihat dari Gambar 4.11 hingga 4.14 memiliki karakteristik perubahan simpangan yang sama dimana simpangan paling besar terjadi pada ponton 2 pendulum saat periode 6 sekon.

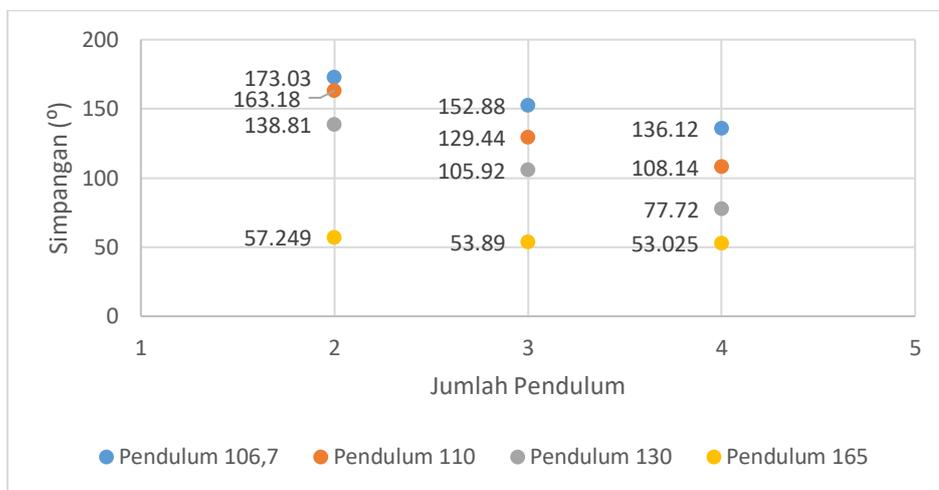
### 4.3.2 Gerak Pendulum Terhadap Variasi Jumlah Pendulum

Analisa gerakan pendulum juga dilihat dari variasi jumlah pendulum yang digunakan yaitu 2, 3 dan 4 pendulum dalam satu ponton. Berdasarkan pada hasil simulasi ini diharapkan dapat diketahui pengaruh perubahan simpangan pendulum terhadap jumlah pendulum seperti terlihat pada grafik Gambar 4.15 sampai 4.18.



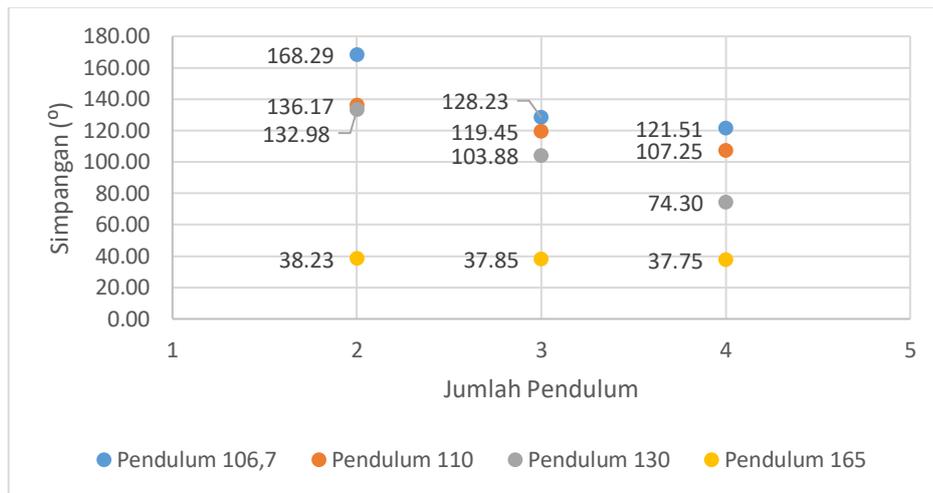
**Gambar 4.15** Grafik hubungan jumlah pendulum dengan simpangan pada periode 6 sekon

Gambar 4.15 merupakan grafik hubungan antara jumlah pendulum dengan rata – rata simpangan pendulum pada saat periode 6 sekon. Pada grafik tersebut di atas dapat diketahui bahwa nilai simpangan pendulum cenderung mengalami penurunan ketika jumlah pendulum bertambah. Dari masing – masing variasi panjang lengan pendulum *trendline* penurunan memiliki bentuk yang sama. Perubahan simpangan terbesar terjadi pada pendulum 106,7 cm dengan jumlah pendulum 2 sebesar  $198,07^\circ$ . Kemudian diikuti oleh pendulum 110, 130 dan 165 dengan nilai masing – masing sebesar  $174,88^\circ$ ,  $150,84^\circ$  dan  $118,61^\circ$ .

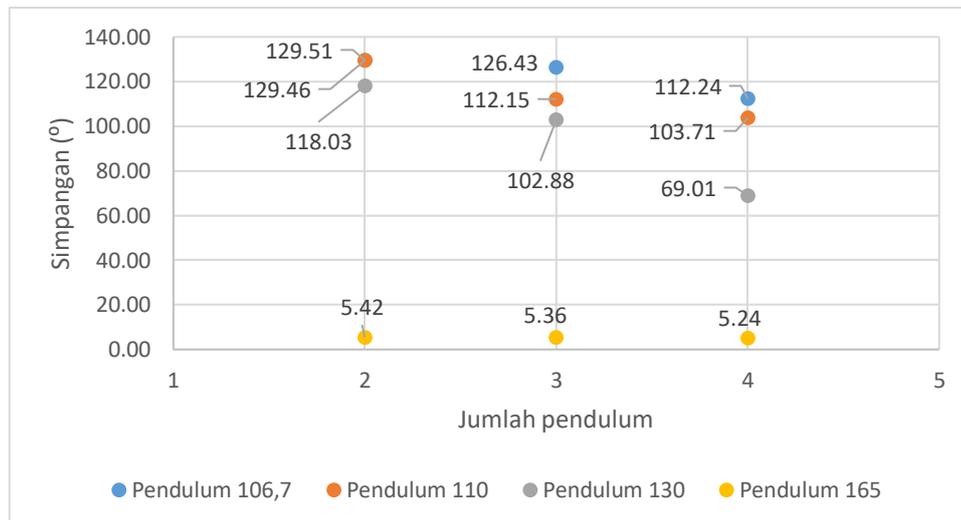


**Gambar 4.16** Grafik hubungan jumlah pendulum dengan simpangan pada periode 8 sekon

Gambar 4.16 merupakan grafik hubungan antara jumlah pendulum dengan rata – rata simpangan pendulum pada saat periode 8 sekon. Berdasarkan grafik tersebut memiliki kasus yang sama seperti pada Gambar 4.15 dimana nilai rata-rata pendulum paling besar terjadi pada ponton dengan jumlah pendulum 2 pada variasi ponton dengan panjang pendulum 106,7 sebesar  $173,03^\circ$ . Kasus yang sama juga terjadi pada grafik saat periode 10 sekon dalam Gambar 4.17 di bawah ini. Rata – rata nilai simpangan pendulum memiliki nilai maksimal pada ponton 2 pendulum dan panjang lengan pendulum 106,7 cm dengan nilai sebesar  $168,29^\circ$



**Gambar 4.17** Grafik hubungan jumlah pendulum dengan simpangan pada periode 10 detik



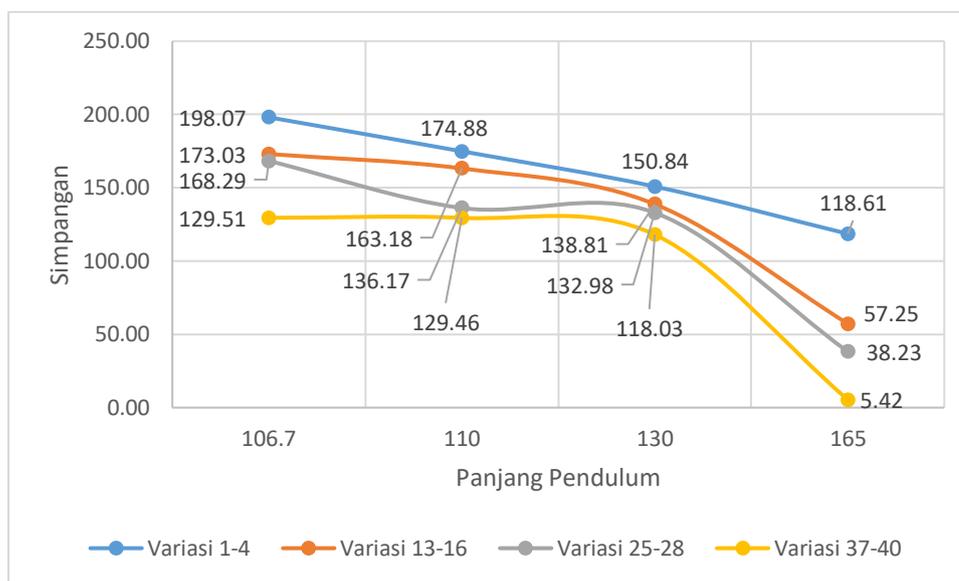
**Gambar 4.18** Grafik hubungan jumlah pendulum dengan simpangan pada periode 12 detik

Gambar 4.18 hubungan antara jumlah pendulum dan nilai rata-rata simpangan saat periode 12 detik yang terjadi sama seperti pada Gambar 4.15 hingga 4.17 dimana nilai simpangan cenderung mengalami penurunan. Simpangan maksimum saat periode 12 detik terjadi pada ponton dengan 2 pendulum 106,7 cm dengan nilai sebesar 129,51°. Berdasarkan pada Gambar 4.15 hingga 4.18 dapat diketahui bahwa nilai perubahan simpangan maksimum terjadi pada ponton dengan jumlah pendulum 2 dan panjang lengan 106,7 cm. Namun dari keempat grafik tersebut nilai perubahan simpangan maksimum pada jumlah pendulum 2 dan panjang lengan 106,7 terjadi pada saat periode 6 detik dengan nilai 198,07°.

Perubahan naik dan turun simpangan pendulum terhadap jumlah pendulum ini dipengaruhi oleh massa ponton. Semakin banyak jumlah pendulum dalam 1 ponton mengakibatkan massa ponton semakin besar.

#### 4.3.3 Gerak Pendulum Terhadap Variasi Panjang Pendulum

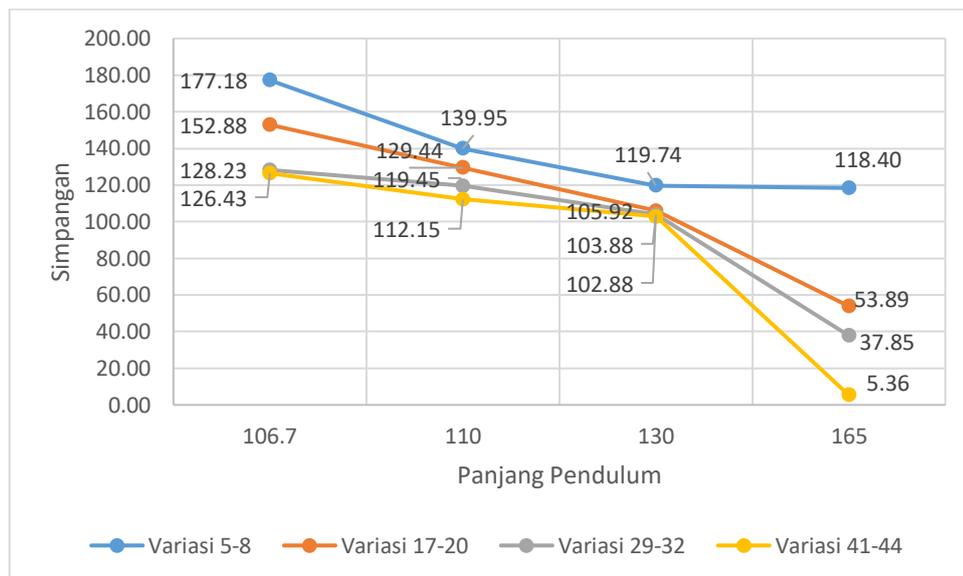
Analisa gerak perubahan simpangan pendulum juga ditinjau terhadap variasi panjang pendulum yaitu 106.7, 110, 130 dan 165 cm. Berdasarkan pada hasil simulasi didapatkan nilai perubahan simpangan pendulum terhadap variasi panjang pendulum seperti pada grafik Gambar 19, 20 dan 21.



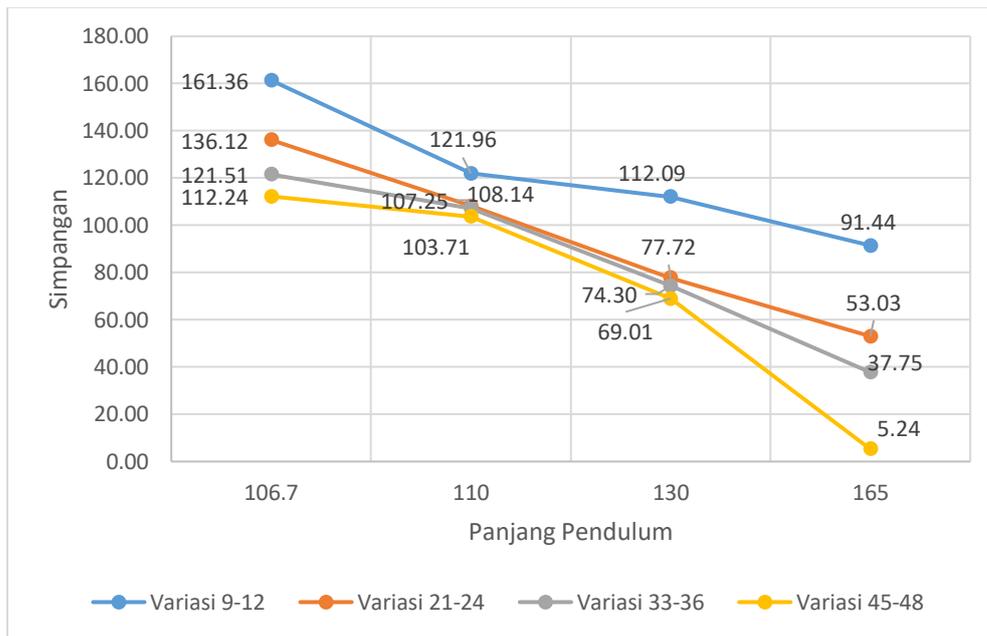
**Gambar 4.19** Grafik hubungan panjang pendulum terhadap simpangan pada ponton 2 pendulum

Gambar 4.19 merupakan grafik hubungan antara panjang pendulum dengan rata - rata simpangan pendulum pada periode 6 sekon (variasi 1-4), 8 sekon (variasi 13-16), 10 sekon (variasi 25-28) dan 12 sekon (variasi 37-40) dan jumlah pendulum 2. Pada grafik tersebut dapat dilihat bahwa nilai simpangan pendulum mengalami penurunan saat panjang pendulum semakin besar. Nilai simpangan terbesar pada panjang pendulum 106,7 cm untuk hampir semua variasi. Hal ini disebabkan karena nilai panjang lengan pendulum berbanding lurus dengan periode gelombang dan berbanding terbalik dengan simpangannya seperti dijelaskan pada persamaan 2.4 dan 2.8. Nilai simpangan maksimum terjadi pada panjang pendulum 106,7 cm saat periode 6 sekon.

Gambar 4.20 merupakan grafik hubungan antara panjang pendulum dengan perubahan simpangan pada periode 6 sekon (variasi 5-8), 8 sekon (variasi 17-20), 10 sekon (variasi 29-32) dan 12 sekon (variasi 41-44) dan jumlah pendulum 3. Sedangkan pada Gambar 4.21 grafik perubahan simpangan terhadap panjang pendulum pada jumlah pendulum 4 serta periode 6 sekon (variasi 9-12), 8 sekon (variasi 21-24), 10 sekon (variasi 33-36) dan 12 sekon (variasi 45-48). Grafik tersebut dapat menunjukkan bahwa nilai simpangan terbesar cenderung mencapai maksimum pada panjang pendulum 106,7 cm kemudian mengalami penurunan seiring bertambahnya panjang lengan pendulum. Pada grafik ponton 3 dan 4 pendulum nilai simpangan maksimum terjadi pada panjang lengan pendulum 106,7 cm saat periode 6 sekon dengan nilai masing – masing sebesar  $177,18^\circ$  dan  $161,36^\circ$ .



**Gambar 4.20** Grafik hubungan panjang pendulum terhadap simpangan pada ponton 3 pendulum



**Gambar 4.21** Grafik hubungan panjang pendulum terhadap simpangan pada ponton 4 pendulum

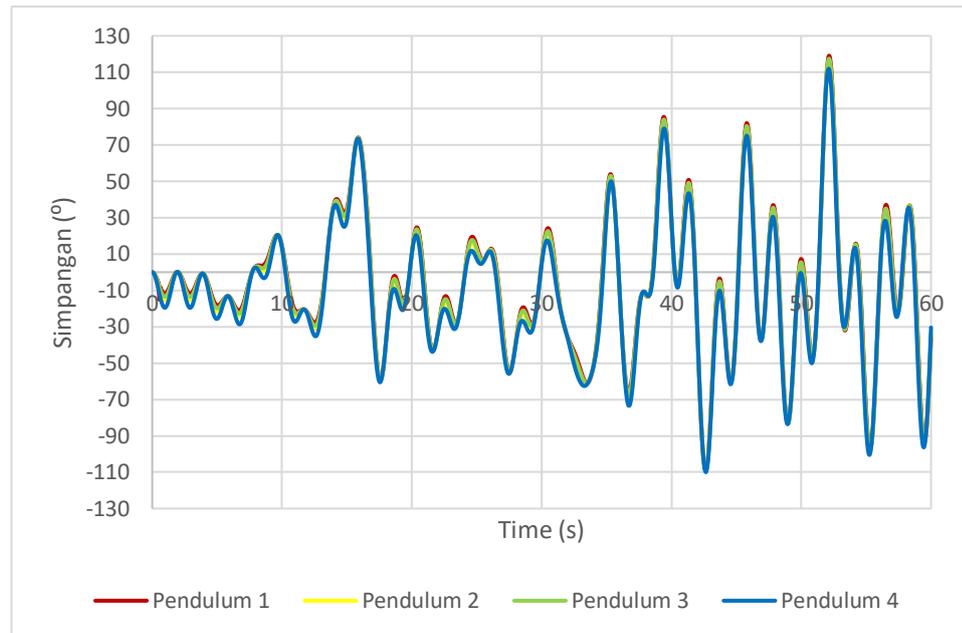
Berdasarkan pada ketiga grafik hubungan panjang pendulum terhadap perubahan simpangannya dapat diketahui bahwa ketiga grafik pada Gambar 4.19 hingga 4.21 tersebut memiliki karakteristik perubahan yang sama. Semakin panjang lengan pendulum memiliki perubahan simpangan yang semakin kecil. Hal ini sesuai dengan persamaan 2.4 dan 2.8 dimana nilai panjang lengan pendulum berbanding lurus dengan periode gelombang dan berbanding terbalik dengan simpangannya sehingga dapat mengakibatkan simpangan semakin kecil saat panjang lengan semakin besar. Dari ketiga grafik di atas nilai simpangan maksimum terjadi pada panjang lengan 106,7 cm.

#### 4.4 Gerak Pendulum Dalam Gelombang *Irregular*

Simulasi dalam gelombang *irregular* dilakukan menggunakan gelombang *irregular* jenis *Jonswap Hs* dengan frekuensi puncak 0.17 Hz, gamma 2 (Setiawan, 2013) dan tinggi gelombang 40 cm. *Cross swell* diatur dengan parameter arah gelombang 45°, frekuensi puncak 0.17 Hz, gamma 2 dan tinggi gelombang 40 cm seperti pada Gambar 22.

Cross Swell Details	
Wave Type	JONSWAP (Hs)
<input type="checkbox"/> Direction of Spect...	45°
<input type="checkbox"/> Significant Wave ...	40 cm
<input type="checkbox"/> Gamma	2
<input type="checkbox"/> Peak Frequency	0.17 Hz

**Gambar 4.22** Set up pada cross swell

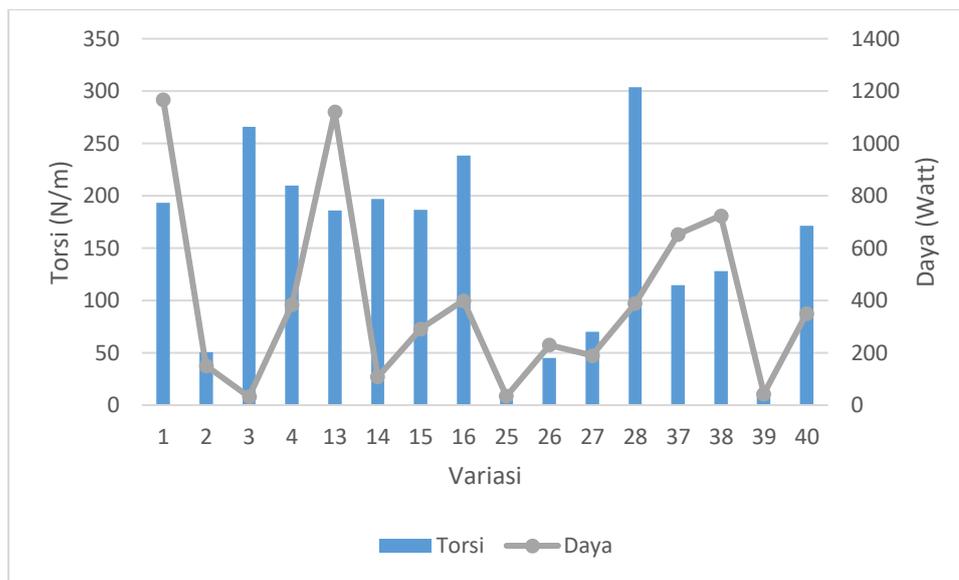


**Gambar 4.23** Grafik simpangan pendulum gelombang *irregular*

Gambar 4.23 menunjukkan hasil simulasi gelombang *irregular* dimana tidak terjadi beda fase antara pendulum 1 hingga pendulum 4. Kecepatan gerak pendulum 1 hingga pendulum 4 hampir sama meskipun sudut simpangan yang dibentuk berbeda. Namun selisih dari perbedaan ini sangat kecil. Pada pendulum 1 sudut simpangan maksimum yang dibentuk sebesar  $119^\circ$ . Sudut simpangan ini merupakan sudut simpangan yang paling besar jika dibandingkan dengan sudut simpangan yang dibentuk oleh pendulum 2, 3 dan 4. Masing – masing sudut simpangan yang dibentuk oleh pendulum 2, 3 dan 4 sebesar  $116^\circ$ ,  $117^\circ$  dan  $112^\circ$ . Perbedaan simpangan yang terjadi akibat ponton mengalami gerak arah *pitch* yang cukup besar.

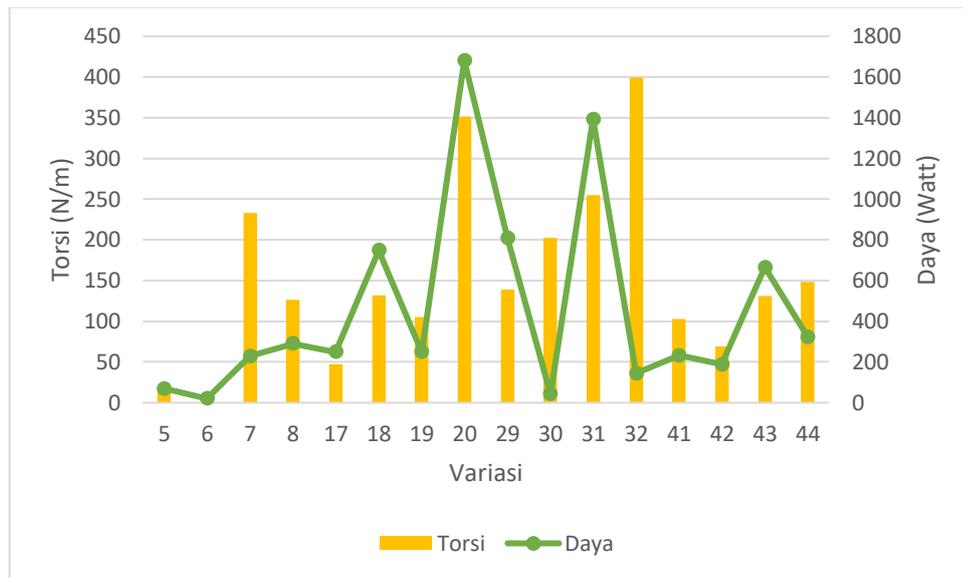
#### 4.5 Torsi dan Daya

Gerak ponton yang mengakibatkan pendulum bergerak dari keadaan setimbangnya dapat diperoleh nilai torsi dan daya. Torsi diperoleh dari massa, panjang lengan pendulum dan sudut kemiringan pendulum dari keadaan setimbangnya. Sedangkan nilai daya didapatkan dari perkalian torsi dan kecepatan sudut. Torsi dan daya pada tiap – tiap variasi jumlah pendulum dapat dilihat pada Gambar 4.24 hingga 4.26.



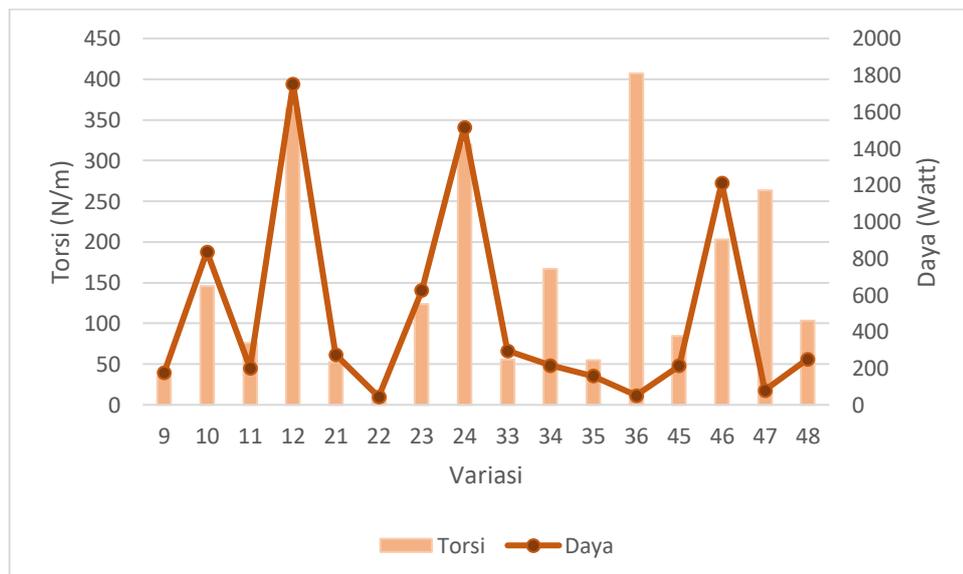
**Gambar 4.24** Nilai torsi dan daya pada ponton 2 pendulum

Torsi dan daya yang dihasilkan oleh ponton dengan 2 pendulum pada Gambar 4.24 di atas dapat diketahui bahwa nilai torsi maksimum terjadi pada variasi 28. Variasi 28 merupakan ponton 2 pendulum dengan panjang lengan pendulum 130 cm pada periode 12 sekon. Torsi maksimum sebesar 303,39 N/m. Sedangkan nilai daya maksimum terjadi pada variasi 1 yaitu pada variasi panjang lengan 106,7 cm saat periode 6 sekon dengan nilai daya maksimum sebesar 1167 Watt. Sedangkan torsi dan daya yang dihasilkan oleh ponton dengan 3 pendulum terlihat pada Gambar 4.25. Nilai torsi maksimum terjadi pada variasi 32. Variasi 32 merupakan variasi dengan panjang lengan 165 cm pada periode 10 sekon. Nilai torsi maksimum sebesar 399,11 N/m. Sedangkan daya maksimum terjadi pada variasi 20 yang merupakan variasi dengan panjang lengan 165 cm saat periode 8 sekon. Daya maksimum yang dihasilkan sebesar 1680,93 Watt.



**Gambar 4.25** Nilai torsi dan daya pada ponton 3 pendulum

Pada ponton dengan 4 pendulum nilai daya dan torsi yang dihasilkan dapat dilihat pada Gambar 4.26. Nilai torsi maksimum terjadi pada variasi 36 yang merupakan variasi panjang lengan 165 cm saat periode 10 sekon dengan nilai sebesar 406,91 N/m. Sedangkan nilai daya maksimum terjadi pada variasi 12 yang merupakan variasi panjang lengan 165 cm saat periode 6 sekon dengan nilai sebesar 1750,37 Watt.



**Gambar 4.26** Nilai torsi dan daya pada ponton 4 pendulum

Berdasarkan dari ketiga grafik pada tiga variasi jumlah pendulum tersebut dapat diketahui bahwa terjadi perbedaan antara nilai torsi dan daya maksimum.

Pada ponton 2 pendulum nilai daya maksimum yang terjadi pada variasi 1 memiliki nilai torsi yang cukup kecil berbeda dengan variasi 28 yang memiliki nilai torsi maksimum namun nilai daya kecil. Simpangan yang terjadi pada variasi 1 merupakan simpangan maksimum pada variasi ponton 2 pendulum sebesar  $198,07^\circ$  sedangkan pada variasi 28 sudut simpangan yang dihasilkan memiliki nilai yang kecil yaitu  $38,23^\circ$ . Pada ponton 3 pendulum juga memiliki kejadian yang sama dimana pada variasi 20 daya yang dihasilkan maksimum sebesar 1680,93 Watt namun nilai torsi hanya sebesar 351 N/m. Nilai ini cukup kecil jika dibandingkan dengan nilai torsi maksimum pada variasi 32 yang nilainya sebesar 399 N/m namun daya dihasilkan kecil dengan nilai sebesar 143,7 Watt. Sudut simpangan pada variasi 20 dan 32 secara berturut – turut sebesar  $53,03^\circ$  dan  $37,83^\circ$ . Nilai ini sangat kecil jika dibandingkan nilai simpangan pada variasi 1. Pada ponton 4 pendulum meskipun terjadi perbedaan antara nilai torsi dan daya maksimumnya namun perbedaannya tidak terlalu besar. Variasi 12 memiliki nilai daya maksimum namun juga memiliki nilai torsi yang cukup besar sebesar 364 N/m dibandingkan pada variasi 36 yang memiliki nilai torsi maksimum sebesar 406 N/m. sedangkan daya yang dihasilkan pada variasi 36 sangat kecil yaitu sebesar 50 Watt. Perbedaan yang cukup besar antara torsi dan daya yang dihasilkan ini tidak hanya disebabkan oleh besar kecilnya sudut simpangan pendulum yang dihasilkan melainkan juga ada faktor besaran massa dan panjang lengan pendulum.

#### 4.5 Diskusi

Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut Sistem Bandul (PLTG-SB) merupakan salah satu pembangkit listrik yang memanfaatkan energi terbarukan dari gelombang laut sebagai gaya eksitasi yang dapat menggerakkan pendulum dan dikonversikan menjadi energi listrik. Pada tugas akhir ini ponton yang digunakan adalah jenis ponton multi pendulum model trimaran dengan 1 silinder besar dan 2 cadik silinder kecil pada samping kanan dan kirinya. Simulasi yang dilakukan menggunakan metode *Computational Fluid Dynamic (CFD)* untuk mendapatkan nilai RAO *pitch* dan *actual response* serta simpangan pendulum akibat respon gerak ponton. Variasi yang digunakan pada simulasi yaitu periode gelombang, panjang lengan pendulum dan jumlah pendulum dalam satu ponton.

Hasil simulasi untuk perubahan periode gelombang terhadap respon gerak ponton didapatkan nilai RAO *pitch* pada ponton. Nilai RAO *pitch* memiliki *trendline* yang menurun ketika periode gelombang semakin besar. Hal ini dikarenakan semakin besar nilai periode gelombang mengakibatkan sudut *pitching* semakin mengecil namun kecepatan *pitching* akan semakin besar (Karsten, 2012). sehingga frekuensi ponton untuk bergetar akan semakin cepat dan membuat bandul mudal berosilasi (Djarmiko, 2012). Dari semua variasi nilai *pitch* maksimum terjadi pada periode 6 sekon. Sedangkan nilai simpangan paling besar terjadi pada ponton 2 pendulum dengan panjang pendulum 106,7 cm.

Hasil simulasi simpangan pendulum akibat perubahan periode gelombang cenderung mengalami perubahan yang hampir sama untuk tiap variasi yang disimulasikan. Perubahan simpangan pendulum maksimum cenderung terjadi saat periode gelombang 6 sekon. Hal ini juga dipengaruhi oleh sudut kemiringan ponton dimana *pitching* mengalami penurunan pada periode saat periode gelombang diperbesar. Selain dipengaruhi oleh *pitching* ponton, hal tersebut juga disebabkan oleh nilai periode gelombang yang berbanding terbalik dengan simpangan yang dialami. Seperti yang dijelaskan pada persamaan 2.6 dan 2.8. Nilai simpangan terbesar akibat variasi periode gelombang terjadi pada variasi ponton 2 pendulum dengan panjang lengan 106,7 cm saat periode 6 sekon.

Pada variasi panjang lengan pendulum *trendline* perubahan yang terjadi hampir sama untuk semua variasi yang disimulasikan. Perubahan yang terjadi cenderung mengalami penurunan ketika panjang lengan pendulum diperbesar. Hal ini terjadi karena nilai panjang pendulum berbanding lurus dengan periode gelombang dan berbanding terbalik dengan simpangannya. Sehingga apabila periode gelombang dan panjang lengan pendulum semakin besar maka nilai simpangannya akan semakin kecil. Demikian ini sudah dijelaskan pada persamaan 2.4 dan 2.8. Rata – rata simpangan maksimum terjadi pada pendulum dengan panjang lengan 106,7 cm, ponton 2 pendulum saat periode 6 sekon. Kemudian untuk variasi jumlah pendulum 2, 3 dan 4 nilai simpangan pendulum memiliki *trendline* yang sama seperti pada kasus variasi panjang lengan pendulum dimana nilai simpangan cenderung semakin kecil saat jumlah pendulum diperbesar. Hal yang demikian terjadi karena sudut *pitching* yang dibentuk oleh ponton pada variasi

jumlah pendulum yang semakin banyak nilainya semakin kecil jika dibandingkan dengan variasi ponton 2 pendulum. Berdasarkan pada variasi yang telah dilakukan tersebut diperoleh konfigurasi ponton multi pendulum dengan simpangan terbaik yaitu pada ponton 2 pendulum panjang lengan pendulum 106,7 cm saat periode 6 sekon.

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan pada tujuan penelitian serta penelitian yang telah dilakukan tentang pembangkit listrik tenaga gelombang laut sistem bandul ini dapat disimpulkan sebagai berikut:

- Respon gerak ponton pada Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut Sistem Bandul (PLTG-SB) dipengaruhi oleh perubahan periode gelombang. Pada kenaikan periode gelombang dengan nilai amplitude 20 cm dan sarat air 1/2D nilai RAO *pitch* memiliki kecenderungan yang semakin besar pada periode 6 sekon. Sedangkan perubahan simpangan pendulum yang terjadi akibat perubahan periode gelombang menunjukkan simpangan maksimum terjadi saat periode 6 sekon pada variasi panjang lengan 106,7 cm dan jumlah pendulum 2 dengan nilai sebesar 198,07°. Pada variasi panjang lengan pendulum nilai simpangan terbesar terjadi pada panjang lengan pendulum 106,7 cm. Sedangkan pada variasi jumlah pendulum nilai simpangan terbesar terjadi pada ponton dengan jumlah pendulum 2.
- Daya yang dihasilkan akibat variasi periode gelombang, panjang lengan pendulum dan jumlah pendulum memiliki nilai maksimal sebesar 1167 Watt pada ponton dengan jumlah pendulum 2, 1680,93 Watt pada ponton dengan jumlah pendulum 3 dan 1750,37 Watt pada ponton dengan jumlah pendulum 4.

#### **5.2 Saran**

Penelitian ini masih memerlukan penyempurnaan lebih lanjut, maka saran yang dapat diberikan pada penelitian ini antara lain sebagai berikut:

- Pada simulasi gelombang diperlukan menggunakan sistem mooring agar ponton tidak berpindah ketika dikenai gelombang.
- Diperlukan simulasi terhadap variasi tinggi cadik dan panjang cadik terhadap respon gerak ponton ponton dan perubahan simpangannya.

- Simulasi ponton multi pendulum pada keadaan sebenarnya dengan melakukan simulasi menggunakan jenis gelombang *irregular* secara lebih rinci.

## DAFTAR PUSTAKA

- An Overview of Ocean Energy Activities in 2018. (2018). *Ocean Energy Systems Annual Report*, 67.
- Ansys, I. (2012). *AQWA User Manual*. Southpointe: Ansys.
- Bhuyan, J. K. (2009). Ocean Energy: Global Technology Development Status. *Report prepared by Powertech Labs for the IEA-OES (Implementing Agreement on Ocean Energy Systems - International Energy Agency)*.
- Chakrabarti, S. K. (1997). In *Offshore Structure Modelling*. World Scientific.
- D.V. Evan, A. d. (1986). Hydrodynamic of Ocean Wave Energy Utilization. *Springer*, 51-55.
- Darmawan, W. (2018). Pemodelan Sistem Gerak Pendulum pada Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut - Sistem Bandulan (SB). *Tugas Akhir*.
- Derret, B. (2001). *Ship Stability for Masters and Mates*. Tottenham: Stanford Maritime.
- Djarmiko. (2012). In *Perilaku dan Operabilitas Bangunan Laut di Atas Gelombang Acak*. Surabaya: ITS Press.
- Falnes, J. (2007). A Review of wave Energy Extraction. *Science Direct Marine Structure*, 20, 185-201.
- Fatnanta, F. (2009). Kajian Perilaku Transmisi dan Stabilitas Pemecah Gelombang Kantong Pasir tipe Tenggelam. *Disertasi, ITS Surabaya*.
- Goldman, A. (2012). Introduction to Wave Energy Converter. *Renewable Green Energy Power*.
- Ibrahim. (2015). RANCANG BANGUN DAN STUDI EKSPERIMEN RESPON DINAMIS MODEL PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GELOMBANG LAUT SISTEM PONTON DENGAN TIGA BANDUL.
- Irfan, I. R. (2017). Respon to Pontoon and Pendulum Motion at Wave Energy Converter Based on Pendulum System. *E3S Web of Conferences 43,01022 (2018)*.
- Isnaini, R. (2016). Analisis Karakteristik Osilasi Pendulum pada PLTGL\_SB . *Tugas Akhir*.

- J.P Kofoed, P. F.-M. (2006). Prototype Testing of the Wave Energy Converter Wave Dragon. *Renew Energy*, 181-189, 31.
- Ji, C. (2017). Numerical and Experimental investigation of Hydrodynamic Performance of a Cylindrical Duall Pontoon-net Floating Breakwater. *Coastal Engineering*, 129, 1-16.
- Kholiq, Y. (2018). Simulasi Respon Gerak Multi Pendulum pada Ponton Trimaran Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut. *Tugas Akhir*.
- M.I. Nafis, I. T. (2014). Analisa Perbandingan Gerakan Ponton Model Tripod Sama Kaki dan Siku-Siku untuk Energi Gelombang Sistem Bandulan. *Jurnal teknik POMITS*, 3, 1.
- Nakasone, Y. (2018). Chapter 2 Overview of ANSYS structure and visual capabilities . In *Engineering Analysis with ANSYS Software* (pp. 37-49). United State: Butterworth-Heinemann.
- Nicola, P. (2017). Wave Tank Testing of a Pendulum Wave Energi Converter 1:12 Scale Model. *International Journal of Applied Mechanics*, 9, 30.
- Rodrigues, L. (2010). Wave power conversion system for electrical energy production. In *Wave power conversion systems for electrical energy production* (pp. 3-7).
- S. Mehrangiz, Y. E. (2013). Various Technologies for Producing Energy from Wave. *International Journal of Smart Green and Clean Energy*, 2, 289-294.
- Safitri, Y. (2016). Respon Gerak Ponton dan Pendulum pada Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Sistem Bandul (SB). *Tugas Akhir*.
- Said, S. (2014). *Energi Outlook Indonesia* (Vol. 11). Jakarta Selatan: Dewan Energi Nasional.
- Setiawan. (2013). SPECTRAL REPRESENTATION IN SABANG AND JEPARA COAST . *Eco Rekayasa*, 9, 34-41.
- Titah, H. (2015). An Up-to-Date Technologies Review and Evaluation of Wave Energy Converters. *International Review of Electrical Engineering* , 10.
- Waters, R. (2008). Energy from Ocean Wave : Full Scale Experimental Verification of a Wave. *Digital Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations*, 24.
- Yaz, A. (2007). Gerak Harmonik Sederhana. In *Fisika SMA Kelas XI* (pp. 74-91). Yudhistira.

## LAMPIRAN

### A. Variasi Simulasi

Variasi	Amplitudo	Periode	Panjang Pendulum	Jumlah Pendulum
1	20	6	106.7	2
2	20	6	110	2
3	20	6	130	2
4	20	6	165	2
5	20	6	106.7	3
6	20	6	110	3
7	20	6	130	3
8	20	6	165	3
9	20	6	106.7	4
10	20	6	110	4
11	20	6	130	4
12	20	6	165	4
13	20	8	106.7	2
14	20	8	110	2
15	20	8	130	2
16	20	8	165	2
17	20	8	106.7	3
18	20	8	110	3
19	20	8	130	3
20	20	8	165	3
21	20	8	106.7	4
22	20	8	110	4
23	20	8	130	4
24	20	8	165	4
25	20	10	106.7	2
26	20	10	110	2
27	20	10	130	2
28	20	10	165	2
29	20	10	106.7	3
30	20	10	110	3
31	20	10	130	3
32	20	10	165	3
33	20	10	106.7	4
34	20	10	110	4
35	20	10	130	4
36	20	10	165	4

Variasi	Amplitudo	Periode	Panjang Pendulum	Jumlah Pendulum
37	20	12	106.7	2
38	20	12	110	2
39	20	12	130	2
40	20	12	165	2
41	20	12	106.7	3
42	20	12	110	3
43	20	12	130	3
44	20	12	165	3
45	20	12	106.7	4
46	20	12	110	4
47	20	12	130	4
48	20	12	165	4

## B. Nilai RAO dan Simpangan Pendulum

Variasi	Hasil RAO (pitch)		Simpangan Pendulum	
	Max	Min	Max	Min
1	0.00302	0.0000173	198.07	-69.37
2	0.1593871	0.0000357	174.88	-23.52
3	0.244434605	0.000246443	150.84	-140.73
4	0.285656414	0.000322302	118.61	-87.84
5	0.541325378	0.000111	177.18	-86.22
6	0.0378201	0.00047136	139.95	-9.89
7	0.004051217	4.41365E-05	119.74	-4.10
8	0.258920898	4.31685E-05	118.40	-93.43
9	1.064703979	0.000465445	161.36	-87.89
10	1.15484273	0.000465631	121.96	-17.59
11	1.056499786	0.000465835	112.09	-96.97
12	1.147742615	0.000465708	91.44	-8.66
13	0.00297	0.0000173	173.03	-86.84
14	0.11368501	0.0000357	163.18	-76.25
15	0.14559762	0.000246443	138.81	-138.38
16	0.263323574	0.000322302	57.25	-97.80
17	0.199342327	0.000181178	152.88	-100.62
18	0.0217483	0.00047136	129.44	-65.09
19	0.003727877	4.4634E-05	105.92	-26.29
20	0.110968866	3.44382E-05	53.03	-121.97
21	1.030015564	0.000457619	136.12	-78.79
22	1.02973159	0.0004575	108.14	-72.84

Variasi	Hasil RAO (pitch)		Simpangan Pendulum	
	Max	Min	Max	Min
23	0.96832077	0.000457524	77.72	-44.50
24	1.027103729	0.000457566	53.89	-86.40
25	0.00291	0.0000173	168.29	-84.13
26	0.081195889	0.0000357	136.17	-64.08
27	0.0971324	0.000246443	132.98	-113.80
28	0.134441671	0.000322302	38.23	-14.15
29	0.167086105	0.000203473	128.23	-99.16
30	0.0157138	0.00047136	119.45	-46.54
31	0.003472046	4.2352E-05	103.88	-4.27
32	0.080562687	2.77223E-05	37.85	-13.96
33	0.898836746	0.00046147	121.51	-945.86
34	0.79846219	0.00046143	107.25	-55.06
35	0.883086395	0.000461358	74.30	-16.52
36	0.597923965	0.000461419	37.75	-13.12
37	0.00282	0.0000173	129.51	-48.93
38	0.0084673	0.0000357	129.46	-114.61
39	0.063003788	0.000246443	118.03	-121.09
40	0.116814413	0.000322302	5.42	-14.30
41	0.161784801	0.000210536	126.43	-92.97
42	0.013950001	0.00047136	112.15	-105.26
43	0.003226405	4.09358E-05	102.88	-2.33
44	0.079191537	2.70743E-05	5.36	-37.92
45	0.568622437	0.000465445	112.24	-31.95
46	0.43843792	0.000465295	103.71	-116.62
47	0.558365784	0.000465835	69.01	-18.44
48	0.351732941	0.000465708	5.24	-84.64

### C. Torsi dan Daya

Variasi	Torsi	Daya (P)
1	193.236	1167.97
2	50.5043	151.0056
3	265.7613	31.77701
4	210.0531	384.7579
5	19.5541	69.38585
6	4.490358	20.31385
7	233.3145	229.0424
8	126.3857	290.0593
9	34.64766	176.8749
10	145.6349	835.2728
11	75.96011	201.3174
12	364.1723	1750.372
13	186.2427	1120.579
14	196.6953	107.1827
15	186.317	292.524
16	238.5216	398.8331
17	47.56348	248.8842
18	131.9019	748.0854
19	105.0281	248.7159
20	351.2554	1680.933
21	52.11525	274.7923
22	11.96273	43.94929
23	123.9758	624.3848
24	319.9943	1514.46
25	8.978494	34.13474
26	44.93342	229.9633
27	69.84132	189.4137
28	303.3907	387.9396
29	139.1256	808.6251
30	202.4382	41.97362
31	254.9714	1392.587
32	399.1113	143.7152
33	55.52881	294.3878
34	167.1619	215.7486
35	55.16697	158.1112
36	406.9135	50.45951

Variasi	Torsi	Daya (P)
37	114.6938	652.4765
38	127.9938	723.4999
39	12.71196	43.63488
40	171.5718	350.5866
41	102.5895	232.4614
42	69.34111	188.8201
43	131.2268	664.7554
44	148.4804	322.3263
45	84.6469	213.2601
46	203.1336	1212.418
47	263.0549	79.43517
48	103.0584	250.5068

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BIODATA PENULIS



Penulis lahir di Banyuwangi 5 Juni 1998. Penulis menempuh Pendidikan di SDN 1 Jajag (2004-2010), SMPN 1 Cluring (2010-2013), SMAN 1 Genteng (2013-2016) dan melanjutkan studinya di S-1 Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayas Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember melalui jalur SNMPTN 2016. Selama aktif menjadi mahasiswa, penulis bergabung dalam organisasi Badan Eksekutif Mahasiswa tingkat fakultas yaitu BEM FT-IRS ITS sebagai Staff Departemen Sosial Masyarakat pada tahun kedua dan sebagai Kabiro Aplikasi Teknologi Departemen Riset dan Teknologi pada tahun ketiga. Penulis juga tergabung dan aktif sebagai Pemandu ITS dalam kegiatan pelatihan manajerial mahasiswa. Selain aktif dalam kegiatan organisasi penulis juga tergabung sebagai asisten Laboratorium Energi dan Pengkondisian Lingkungan. Penulis pernah melakukan kerja praktik di PSTA Batan Yogyakarta dengan melakukan kalibrasi pada sensor ultrasonik tangki air Reaktor Kartini. Penulis dapat dihubungi melalui email [qoriatul.qa78@gmail.c](mailto:qoriatul.qa78@gmail.c)