



**TUGAS AKHIR - TF 181801**

**ANALISA RESPON GERAK DUA PENDULUM VERTIKAL DAN  
PONTON KATAMARAN PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA  
GELOMBANG LAUT - SISTEM BANDUL (PLTGL - SB)**

**BARIZ IRFAN RIDHO**  
NRP. 02311640000147

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 DUA PENDULUM VERTIKAL DAN  
PONTON KATAMARAN PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA  
GELOMBANG LAUT - SISTEM BANDUL (PLTGL - SB)**

**BARIZ IRFAN RIDHO  
NRP. 02311640000147**

Dosen Pembimbing:  
Dr. Ridho Hantoro, ST., MT  
Erna Septyaningrum, ST., MT

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 TWO-VERTICAL PENDULUM AND  
CATAMARAN PONTOON MOTION RESPONSE AT OCEAN  
WAVE POWER PLANT BASED ON PENDULUM SYSTEM***

BARIZ IRFAN RIDHO  
NRP. 02311640000247

Supervisors:  
Dr. Ridho Hantoro, ST., MT  
Erna Septyaningrum, ST., MT

*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 : Bariz Irfan Ridho  
NRP : 02311640000147  
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 Dua Pendulum Vertikal dan Ponton Katamaran Pada Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut – Sistem Bandul (PLTGL – 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, 2 Mei 2020

Yang membuat pernyataan,



Bariz Irfan Ridho

NRP. 02311640000147

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

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

**ANALISA RESPON GERAK DUA PENDULUM VERTIKAL DAN  
PONTON KATAMARAN PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA  
GELOMBANG LAUT – SISTEM BANDUL (PLTGL – SB)**

Oleh:

Bariz Irfan Ridho

NRP. 02311640000147

Surabaya,

Menyetujui,  
Pembimbing I

  
Dr. Ridho Hantoro, ST., MT  
NIP. 19761223 200501 1 001

Menyetujui,  
Pembimbing II

  
Erna Septyaningrum, ST., MT  
NPP. 1992201912073

Mengetahui,

Kepala Departemen

Teknik Fisika FT-IRS-ITS

  
Dr. Suvanto, ST., MT  
NIP. 197111131 995121 002

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## LEMBAR PENGESAHAN

### ANALISA RESPON GERAK DUA PENDULUM VERTIKAL DAN PONTON KATAMARAN PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GELOMBANG LAUT – SISTEM BANDUL (PLTGL – 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:

**BARIZ IRFAN RIDHO**

**NRP. 02311640000147**

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

- |                                    |                                                                                      |                       |
|------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| 1. Dr. Ridho Hantoro, ST., MT      |  | ..... (Pembimbing I)  |
| 2. Erna Septyaningrum, ST., MT     |  | ..... (Pembimbing II) |
| 3. Ir. Sarwono, MM                 |  | ..... (Ketua Penguji) |
| 4. Gunawan Nugroho, ST., MT., Ph.D |  | ..... (Penguji I)     |
| 5. Detak Yan Pratama, ST., M.Sc    |  | ..... (Penguji II)    |

**SURABAYA**

**2020**

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

**ANALISA RESPON GERAK DUA PENDULUM VERTIKAL  
DAN PONTON KATAMARAN PADA PEMBANGKIT LISTRIK  
TENAGA GELOMBANG LAUT – SISTEM BANDUL  
(PLTGL – SB)**

**Nama** : Bariz Irfan Ridho  
**NRP** : 02311640000147  
**Departemen** : Teknik Fisika FT-IRS - ITS  
**Dosen Pembimbing** : Dr. Ridho Hantoro, ST., MT  
Erna Septyaningrum, ST., MT

**ABSTRAK**

Sumber energi terbarukan menjadi pilihan yang sangat baik selain karena ramah lingkungan sumber dayanya juga melimpah. Salah satu sumber energi terbarukan berasal dari laut, energi gelombang laut sangat berpotensi untuk diekstraksi secara berkelanjutan. Alat yang mengubah energi laut menjadi energi listrik disebut dengan Wave Energy Converters (WECs). Pada penelitian ini, akan dilakukan analisa respon gerak terhadap ponton berbentuk katamaran yang memiliki dua pendulum, dengan harapan memiliki gerakan yang dapat mengikuti permukaan gelombang laut, sehingga dapat melakukan ekstraksi energi secara terus menerus dan menghasilkan energi yang lebih besar. Dari simulasi tahap pertama untuk melihat pengaruh parameter gelombang terhadap ponton, didapatkan nilai simpangan ponton terbesar pada variasi ke 44 dengan amplitudo gelombang 0.60 meter dan periode 7 s sebesar  $88.721^\circ$ . Sedangkan pada simulasi tahap kedua untuk melihat pengaruh *pitching* ponton terhadap simpangan pendulum, didapatkan nilai simpangan pendulum terbesar pada variasi ke 53 dengan amplitudo gelombang 0.6 meter dan periode 7 s, serta panjang lengan pendulum 1.5 meter dan massa beban 152 kg sebesar  $10275^\circ$  atau mengalami sebanyak 27.777 kali putaran.

**Kata Kunci:** Ponton, Gelombang, Simpangan, dan *Pitching*

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

**ANALYSIS OF TWO-VERTICAL PENDULUM AND  
CATAMARAN PONTOON MOTION RESPONSE AT OCEAN  
WAVE POWER PLANT BASED ON PENDULUM SYSTEM**

**Name** : Bariz Irfan Ridho  
**NRP** : 02311640000147  
**Department** : Engineering Physics FT-IRS - ITS  
**Supervisors** : Dr. Ridho Hantoro, ST., MT  
Erna Septyaningrum, ST., MT

**ABSTRACT**

*Renewable energy are an excellent choice besides being environmentally friendly, the resources are also abundant. One of the renewable energy sources comes from the sea, ocean wave energy has the potential to be extracted sustainably. Devices that convert ocean energy into electrical energy are called Wave Energy Converters (WECs). In this research, an analysis of motion responses to catamaran-shaped pontoon having two pendulums is expected to have movements that can follow the surface of the ocean waves, so that they can extract energy continuously and produce more energy. The first simulation intend to see the effect of wave parameters on the pontoon, the largest pontoon pitching value is obtained in the 44th variation with 88,721°. The second simulation intend to see the effect of pontoon pitching on the pendulum deviation, the largest pendulum deviation value was obtained in the 53rd variation with 10275° or as much as 27,777 lap times.*

**Keywords:** Pontoon, Wave, Deviation, and Pitching

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji dan syukur senantiasa terpanjatkan kepada ALLAH SWT atas semua berkah, petunjuk dan karunia-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul “**Analisa Respon Gerak Dua Pendulum Vertikal dan Ponton Katamaran Pada Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut – Sistem Bandul (PLTGL – SB)**”. Selama pengerjaan penulis tidak terlepas dari bantuan segala pihak. Oleh karena itu pada penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Suyanto, ST., MT. selaku Kepala Departemen Teknik Fisika ITS.
2. Bapak Dr. Ridho Hantoro, ST., MT. dan Ibu Erna Septyaningrum, ST., MT. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan ilmu, mengarahkan penulis, dan memberikan motivasi serta semangat untuk menyelesaikan tugas akhir ini.
3. Bapak dan Ibu dosen Teknik Fisika ITS yang telah memberikan ilmu dan motivasi selama perkuliahan.
4. Keluarga di rumah yang selalu memberikan doa dan dukungan kepada penulis sehingga mampu menempuh pendidikan di ITS.
5. Mas Sony, Pak Irfan, Pak Baidowi, dan Mas Seno yang telah membantu memberikan saran ketika melakukan perhitungan serta simulasi.
6. Teman – teman Angkatan 2016 Teknik Fisika ITS yang saling menyemangati untuk menyelesaikan pengerjaan tugas akhir ini.
7. Rofik, Prastowo, Yusuf, Krisna, Aryeshah, dan Qori yang telah menemani dan membantu selama pengerjaan tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa laporan ini belum sempurna dan banyak kekurangan maka dari itu kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan agar penyusunan laporan selanjutnya lebih baik lagi. Semoga laporan tugas akhir ini dapat dipergunakan dengan sebaik-baiknya.

Surabaya, 2 Mei 2020

Penulis

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
COVER PAGE.....	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI .....	v
LEMBAR PENGESAHAN .....	vii
LEMBAR PENGESAHAN .....	ix
ABSTRAK .....	xi
ABSTRACT.....	xiii
KATA PENGANTAR .....	xv
DAFTAR ISI.....	xvii
DAFTAR GAMBAR .....	xix
DAFTAR TABEL.....	xxi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	3
1.3 Tujuan.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Sistematika Laporan .....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....	5
2.1 Teori Dasar Gelombang Laut .....	5
2.2 Getaran Mekanik .....	6
2.3 Teori Stabilitas .....	7
2.4 RAO (Response Amplitude Operator) .....	9
2.5 Generator .....	10
2.6 Cara Kerja Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut .....	11

2.7	Parameter yang Mempengaruhi Kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut .....	12
2.8	Teknologi yang Telah Ada pada Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut .....	12
BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....		15
3.1	Diagram Alir Penelitian .....	15
3.2	Desain Ponton .....	18
3.3	Simulasi dengan Menggunakan Perangkat Lunak .....	20
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....		23
4.1	Verifikasi Hasil Simulasi .....	23
4.2	Pengaruh Perubahan Parameter Gelombang Laut Terhadap Gerakan Ponton .....	27
4.3	Pengaruh Perubahan Geometri Pendulum Terhadap Gerakannya .....	32
4.4	Kegunaan Dua Pendulum .....	41
4.5	Diskusi .....	41
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....		47
5.1	Kesimpulan .....	47
5.2	Saran .....	47
DAFTAR PUSTAKA .....		49
LAMPIRAN .....		53
BIODATA PENULIS .....		91

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2. 1</b> Perambatan Gelombang Laut (Rodrigues, 2008) .....	5
<b>Gambar 2. 2</b> Formasi dari Gelombang (Rodrigues, 2008) .....	6
<b>Gambar 2. 3</b> Gerakan Sistem Pendulum (Rumus Hitung, 2014).....	6
<b>Gambar 2. 4</b> Contoh Letak Pusat Gravitasi dan Gaya Apung (Barras & Derret, 2001) .....	8
<b>Gambar 2. 5</b> Contoh Letak Titik Berat (Barras & Derret, 2001) .....	8
<b>Gambar 2. 6</b> Letak Titik Apung (Barras & Derret, 2001) .....	9
<b>Gambar 2. 7</b> Letak Titik Metasentris (Barras & Derret, 2001) .....	9
<b>Gambar 2. 8</b> Gerakan Benda Terapung (Ardakani & J., 2011).....	10
<b>Gambar 2. 9</b> Generator (AliExpress, 2020).....	10
<b>Gambar 2. 10</b> Ketika pada Laut Tanpa Gelombang .....	11
<b>Gambar 2. 11</b> Ketika pada Laut yang Memiliki Gelombang .....	11
<b>Gambar 3. 1</b> Diagram Alir Penelitian.....	15
<b>Gambar 3. 2</b> Salah Satu Variasi Desain.....	18
<b>Gambar 3. 3</b> Desain Tampak Depan.....	19
<b>Gambar 3. 4</b> Desain Tampak Samping.....	20
<b>Gambar 3. 5</b> Contoh Simulasi Interaksi Ponton Terhadap Gelombang .....	21
<b>Gambar 3. 6</b> Contoh Simulasi Interaksi Gerakan Pendulum Terhadap Gerakan Ponton .....	21
<b>Gambar 4. 1</b> Nilai Massa Jenis Air dan Nilai Gravitasi .....	23
<b>Gambar 4. 2</b> Contoh Letak Titik Berat .....	24
<b>Gambar 4. 3</b> Volume Ponton yang Tercelup Air.....	24
<b>Gambar 4. 4</b> Nilai Momen Inersia .....	25
<b>Gambar 4. 5</b> Hasil <i>Meshing</i> .....	25
<b>Gambar 4. 6</b> Hasil <i>Meshing</i> pada Geometri .....	26
<b>Gambar 4. 7</b> <i>set up</i> untuk pilihan “ <i>Use Linear starting Conditions</i> ” .....	26
<b>Gambar 4. 8</b> <i>Set Up</i> Parameter Gelombang.....	27

<b>Gambar 4. 9</b> Perbandingan <i>Pitching</i> Ponton Variasi 1, 2 dan 3 .....	28
<b>Gambar 4. 10</b> Perbandingan <i>Pitching</i> Ponton Variasi 4, 5, dan 6 .....	28
<b>Gambar 4. 11</b> Perbandingan <i>Pitching</i> Ponton Variasi 7, 8, dan 9 .....	29
<b>Gambar 4. 12</b> Perbandingan <i>Pitching</i> Ponton Variasi 1, 4 dan 7 .....	30
<b>Gambar 4. 13</b> Perbandingan <i>Pitching</i> Ponton Variasi 2, 5, dan 8 .....	31
<b>Gambar 4. 14</b> Perbandingan <i>Pitching</i> Ponton Variasi 3, 6, dan 9 .....	31
<b>Gambar 4. 15</b> Perbandingan Simpangan Pendulum Variasi 1, 19, dan 37 .....	32
<b>Gambar 4. 16</b> Perbandingan Simpangan Pendulum Variasi 2, 20, dan 38 .....	33
<b>Gambar 4. 17</b> Perbandingan Simpangan Pendulum Variasi 3, 21, dan 39 .....	34
<b>Gambar 4. 18</b> Perbandingan Simpangan Pendulum Variasi 4, 22, dan 40 .....	34
<b>Gambar 4. 19</b> Perbandingan Simpangan Pendulum Variasi 5, 23, dan 41 .....	35
<b>Gambar 4. 20</b> Perbandingan Simpangan Pendulum Variasi 1 dan 10 .....	36
<b>Gambar 4. 21</b> Perbandingan Simpangan Pendulum Variasi 2 dan 11 .....	37
<b>Gambar 4. 22</b> Perbandingan Simpangan Pendulum Variasi 3 dan 12 .....	37
<b>Gambar 4. 23</b> Perbandingan Simpangan Pendulum Variasi 4 dan 13 .....	38
<b>Gambar 4. 24</b> Perbandingan Simpangan Pendulum Variasi 23 dan 32 .....	39
<b>Gambar 4. 25</b> Perbandingan Simpangan Pendulum Variasi 40 dan 46 .....	40
<b>Gambar 4. 26</b> Perbandingan Simpangan Pendulum Variasi 43 dan 52 .....	40
<b>Gambar 4. 27</b> Letak Titik Metasentris Hasil Simulasi.....	44

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 3. 1</b> Variasi Simulasi .....	16
<b>Tabel 3. 2</b> Data Geometri Ponton .....	19

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Seiring dengan meningkatnya pertumbuhan populasi manusia yang ada di Indonesia akan berdampak pada jumlah konsumsi energinya. Menurut data RUEN, konsumsi energi di Indonesia pada tahun 2017 sebesar 110,5 MTOE sedangkan untuk produksinya, total sebesar 382,9 MTOE (Dewan Energi Nasional, 2018). Untuk tahun 2018 konsumsi energi sebesar 114 MTOE dan produksi sebesar 411,6 MTOE (Dewan Energi Nasional, 2019). Sehingga konsumsi energi di Indonesia meningkat sebesar 3,5 MTOE. Meningkatnya kebutuhan energi yang ada di Indonesia ini tidak diimbangi dengan nilai produksinya, contoh pada sektor produksi untuk minyak bumi mengalami penurunan untuk tahun 2018. Sedangkan untuk memenuhi kebutuhan listrik di Indonesia pembangkit listrik berbahan bakar batubara masih menjadi pembangkit listrik dengan produksi terbesar jika dibandingkan dengan jenis pembangkit listrik lainnya. Batubara merupakan salah satu sumber energi yang tersedia di Indonesia, namun keberadaannya terbatas dan tidak dapat diperbarui. Maka diperlukannya pilihan lain sebagai sumber untuk pembangkit yang ada di Indonesia. Sumber energi terbarukan menjadi pilihan yang sangat baik selain karena ramah lingkungan sumber dayanya juga melimpah. Sudah banyak energi terbarukan yang dikembangkan dan diubah menjadi energi listrik salah satunya energi yang berasal dari laut. Tiga energi laut yang paling banyak dikembangkan yaitu energi pasang surut, energi gelombang, dan energi panas laut. Dari ketiga sumber energi laut tersebut energi gelombang laut sangat berpotensi untuk dieksploitasi secara berkelanjutan (Said, 2014).

Alat yang mengubah energi laut menjadi energi listrik atau yang biasa disebut dengan *Wave Energy Converters* (WECs) yang sedang dikembangkan oleh peneliti Indonesia yang menggunakan sistem pendulum atau disebut pembangkit listrik tenaga gelombang laut sistem bandul (PLTGL-SB). Pembangkit listrik tersebut di Indonesia pertama kali dilakukan oleh Zamrisyaf, pembangkit listrik ini adalah sistem yang dirancang dalam bentuk ponton yang ditempatkan mengapung diatas

permukaan laut, sistem tersebut akan mengikuti gerak atau arus gelombang sesuai frekuensi gelombang laut sehingga menyebabkan PLTGL-SB selalu bergerak sesuai dengan gelombang yang datang (Goldman, 2012). Pada tahun 2016 telah dilakukan penelitian berupa permodelan matematik untuk perhitungan simpangan ponton jenis katamaran yang telah dilakukan dan didapatkan hasil simpangan sebesar  $14.29^\circ$  dengan kondisi periode gelombang 0,6 detik serta menggunakan pendulum dengan massa 20 gram dan panjang lengan pendulum sebesar 10,67 cm (Safitri, 2016). Tahun 2018 telah dilakukan penelitian berupa permodelan sistem gerak pendulum menggunakan perangkat lunak MATLAB dengan tujuan mencari simpangan terbesar yang dihasilkan, pada penelitian ini didapatkan simpangan terbesar pada sudut  $56,37^\circ$  (Darmawan, 2018). Sedangkan pada tahun 2019 juga telah dilakukan penelitian terkait pembangkit listrik tenaga gelombang laut berbasis perangkat lunak komputasi fluida dinamik dan didapatkan hasil simulasi untuk ekstraksi energi sebesar 0.02697 watt dengan kondisi amplitudo setinggi 1,75 cm dan periode gelombang sebesar 0,8 detik dan menggunakan pendulum dengan massa sebesar 40 gram (Kholiq, 2019).

Penelitian ini akan dilakukan analisa respon gerak terhadap ponton berbentuk katamaran dengan harapan memiliki gerakan yang dapat mengikuti permukaan gelombang laut, sehingga dapat melakukan ekstraksi energi secara terus menerus dan menghasilkan energi yang lebih besar. Gelombang yang datang akan menyebabkan 2 buah bandul pada ponton mengayun, gerakan tersebut kemudian ditransmisi ke dalam sistem transmisi untuk menggerakkan generator sehingga gerakan putarnya dapat diubah menjadi energi listrik, sehingga energi listrik tersebut dapat dimanfaatkan baik secara langsung maupun menggunakan penyimpanan sementara berupa baterai. Daya yang dihasilkan oleh PLTGL-SB ini banyak dipengaruhi oleh dimensi ponton, panjang bandul, massa bandul, dan susunan ponton (Mustofa, 2012). Untuk mengetahui gerakan ponton akibat dari gelombang laut dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak CFD (*Computational Fluid Dynamics*).

## 1.2 Rumusan Masalah

Berikut adalah permasalahan yang mendasari dari dilakukannya penelitian ini, antara lain:

- a) Bagaimana pengaruh dari perubahan tinggi dan periode gelombang terhadap gerak dua pendulum?
- b) Bagaimana pengaruh dari perubahan panjang lengan dan massa beban pendulum ponton terhadap gerak dua pendulum?

## 1.3 Tujuan

Dari perumusan masalah di atas maka dapat diambil tujuan dari penelitian ini, antara lain:

- a) Dapat menganalisa perubahan tinggi dan periode gelombang terhadap gerak dua pendulum.
- b) Dapat menganalisa pengaruh dari perubahan panjang lengan dan massa beban pendulum ponton terhadap gerak dua pendulum.

## 1.4 Batasan Masalah

Berikut adalah Batasan masalah pada penelitian ini, antara lain:

- a) Gelombang yang digunakan pada penelitian ini adalah gelombang *regular* dengan menggunakan Batasan nilai amplitudo dan periode gelombang di Indonesia
- b) Simulasi dilakukan menggunakan CFD (*Computational Fluid Dynamics*).
- c) Ponton yang digunakan merupakan jenis ponton katamaran.

## 1.5 Sistematika Laporan

Laporan penelitian ini disusun secara sistematis dengan perincian sebagai berikut:

## BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi tentang penjelasan latar belakang, permasalahan, batasan masalah, tujuan, metodologi penelitian, dan sistematika laporan

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

Bab ini berisi tentang gelombang laut, getaran mekanik, teori stabilitas, dan RAO (*Response Amplitude Operator*)

## **BAB III METODOLOGI PENELITIAN**

Berisi tentang penjelasan langkah – langkah yang dilakukan dalam penelitian

## **BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN**

Bab ini berisi tentang analisa hasil simulasi respon ponton terhadap gelombang reguler dan analisa besar simpangan dua pendulum

## **BAB V KESIMPULAN DAN SARAN**

Berisi tentang kesimpulan dari hasil respon ponton dan dua pendulum dan juga saran

## **DAFTAR PUSTAKA**

Daftar pustaka dari semua referensi yang digunakan dalam penyusunan tugas akhir ini

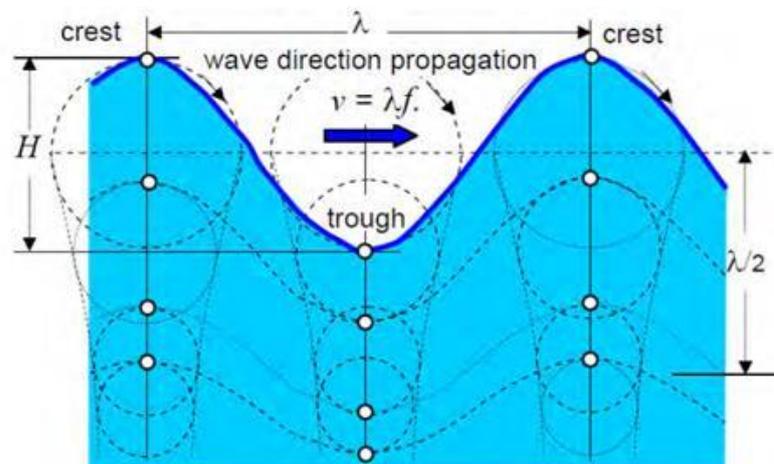
## **LAMPIRAN**

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

#### 2.1 Teori Dasar Gelombang Laut

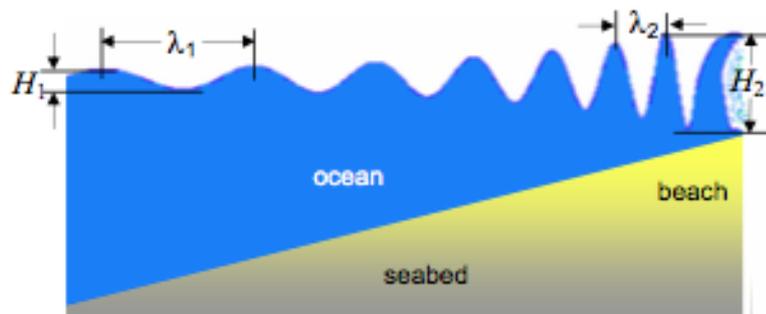
Gelombang laut terbentuk dari kombinasi antara gaya gravitasi, tegangan permukaan laut, dan adanya angin yang berhembus. Besar kecilnya gelombang ditentukan oleh kecepatan angin, jarak antara angin yang merangsang terbentuknya gelombang dengan gelombang itu sendiri, kedalaman, dan topografi dari dasar laut. (Rodrigues, 2008). Contohnya untuk gelombang di Pulau Jawa, tinggi gelombang pada laut selatan akan lebih tinggi dibandingkan dengan tinggi gelombang pada laut utara. Karena berdasarkan geografisnya laut di utara Pulau Jawa terdapat banyak pulau lainnya sehingga hal ini dapat meredam gelombang laut, apabila pada laut selatan tidak terdapat pulau – pulau yang berdekatan dengan Pulau Jawa.



**Gambar 2. 1** Perambatan Gelombang Laut (Rodrigues, 2008)

Seperti yang dapat dilihat pada gambar 2.1, jarak antar puncak gelombang atau jarak antar titik terendah disebut sebagai sebagai panjang gelombang ( $\lambda$ ). Sedangkan periode (T) merupakan waktu yang dibutuhkan oleh gelombang untuk bergerak sejauh panjang gelombangnya. Frekuensi gelombang merupakan jumlah gelombang yang muncul pada dalam waktu satu detik. Sehingga cepat rambat suatu gelombang dapat dicari menggunakan persamaan berikut:

$$v = \lambda \cdot f \tag{2.1}$$



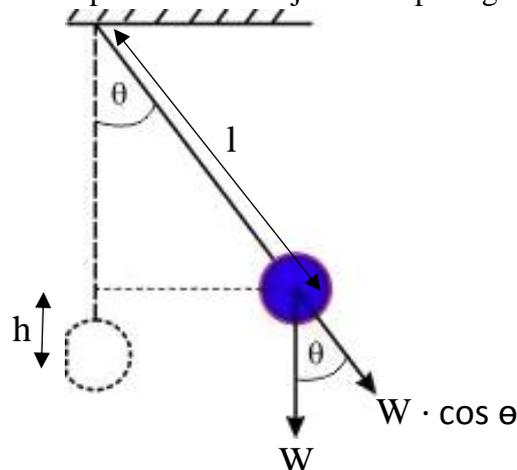
**Gambar 2. 2** Formasi dari Gelombang (Rodrigues, 2008)

Gelombang laut akan mentransmisikan energi mekanikal, contohnya ketika tsunami maka gelombang yang jauh dari bibir pantai akan memiliki ketinggian yang rendah serta rentang panjang gelombang yang panjang, berlawanan dengan hal tersebut apabila gelombang sudah mendekat ke bibir pantai maka gelombang akan semakin tinggi dengan rentang panjang gelombang yang semakin mengecil seperti yang telah diilustrasikan pada gambar 2.2.

## 2.2 Getaran Mekanik

Getaran mekanik merupakan gerakan bolak – balik dalam melewati titik seimbangnya. Getaran berhubungan dengan osilasi benda dan gaya yang berhubungan dengan gerak tersebut. Semua benda yang memiliki massa akan mampu bergetar, begitu juga pendulum akan melakukan gerakan bolak – balik (Kholiq, 2019). Berikut adalah persamaan dari kecepatan sebuah bandul, dengan nilai  $h$  merupakan ketinggian bandul ketika mengayun, seperti pada gambar 2.3:

Skema dari Gerakan sistem pendulum ditunjukkan seperti gambar berikut:



**Gambar 2. 3** Gerakan Sistem Pendulum (Rumus Hitung, 2014)

$$h = l - l (\cos(\theta)) \quad (2.2)$$

$$V = \sqrt{2gh} \quad (2.3)$$

$$\omega = \frac{V}{l} \quad (2.4)$$

$$W = m \cdot g \quad (2.5)$$

Dari persamaan 2.4 maka akan didapatkan nilai dari  $\omega$  pendulum dengan besaran rad/s. Nilai tersebut dapat dirubah menjadi besaran lainnya seperti rpm.

### 2.3 Teori Stabilitas

Ketika sebuah benda dikatakan pada posisi keseimbangan stabil adalah bila digeser ke suatu posisi baru, benda tersebut dapat kembali lagi ke posisi awal. Perhitungan stabilitas pada suatu benda terapung memperhatikan nilai dari pusat gravitasi, pusat daya apung, serta pusat massanya. Benda terapung juga dikatakan stabil apabila dapat mempertahankan kondisinya pada air yang tenang maupun air yang bergelombang. Sebuah benda akan terapung apabila massa jenisnya lebih rendah dibandingkan massa jenis fluidanya. Berat dari benda harus sama terhadap berat air yang dipindahkan oleh kapal (Priyadharsi, Kavhita, & Ramya, 2019). Untuk letak dari titik berat, titik apung dan titik metasentris diilustrasikan pada gambar 2.4. untuk melakukan perhitungan gaya angkat suatu benda terapung dapat dihitung melalui persamaan berikut

$$FA = \rho \cdot g \cdot Va \quad (2.6)$$

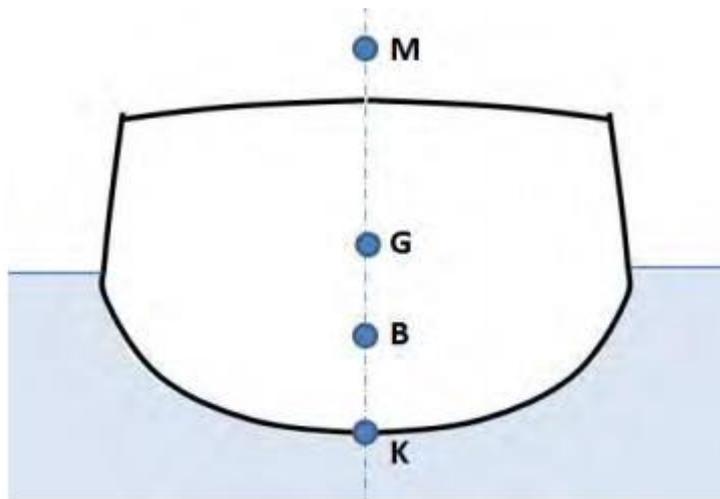
Dimana:

$FA$  = Gaya Angkat (N)

$\rho$  = Massa Jenis Air ( $\text{Kg/m}^3$ )

$g$  = Gravitasi ( $\text{m/s}^2$ )

$Va$  = Volume yang Tercelup ( $\text{m}^3$ )



**Gambar 2. 4** Contoh Letak Pusat Gravitasi dan Gaya Apung (Barras & Derret, 2001)

Terdapat beberapa titik penting yang ada pada benda terapung yaitu titik berat (*center of gravity*), titik apung (*center of buoyancy*) dan titik metasentris.

- Titik Berat (*center of gravity*)

Titik ini merupakan titik tangkap dari semua gaya – gaya yang bekerja ke bawah. Letak titik ini tergantung pada pembagian berat bend itu sendiri. Sebagai contoh apabila sebuah benda memiliki beban yang lebih besar pada bagian atasnya maka benda tersebut akan memiliki titik berat yang condong pada bagian atas benda. Jadi pada penelitian ini semua beban yang ada pada ponton menjadi pertimbangan letak titik beratnya (Barras & Derret, 2001).



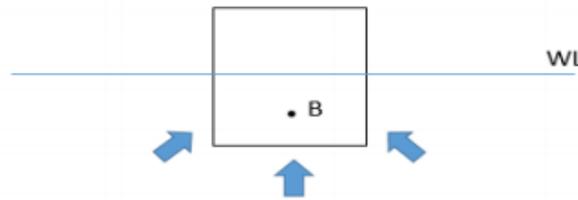
**Gambar 2. 5** Contoh Letak Titik Berat (Barras & Derret, 2001)

Pada gambar 2.5 menunjukkan titik berat berada pada tengah sumbu z maka pembagian berat pada benda tersebut sama untuk bagian atas dan bagian bawah benda.

- Titik Apung (*center of buoyancy*)

Titik ini merupakan titik tangkap dari resultan gaya yang bergerak ke atas dari bagian benda yang tercelup pada air. Posisi titik ini juga tergantung pada sarat

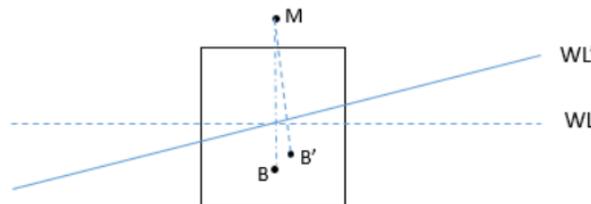
air pada benda (Barras & Derret, 2001). Pada gambar 2.6 merupakan contoh letak dari titik apung yang bekerja pada suatu benda.



**Gambar 2. 6** Letak Titik Apung (Barras & Derret, 2001)

- Titik Metasentris

Titik ini merupakan titik semu yang menjadi batas, dimana titik G tidak boleh melewati di atasnya agar supaya benda tetap mempunyai stabilitas yang positif (stabil) (Barras & Derret, 2001). Pada gambar 2.7 merupakan contoh dari letak titik metasentris yang ada pada sebuah benda terapung.



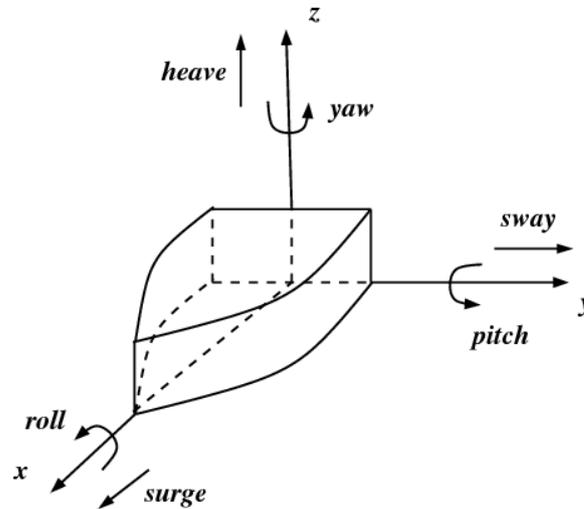
**Gambar 2. 7** Letak Titik Metasentris (Barras & Derret, 2001)

## 2.4 RAO (Response Amplitude Operator)

Merupakan sebuah analisis respons dinamis yang dilakukan untuk mempelajari seberapa jauh aerodinamik maupun hidrodinamik, dan struktur dinamis di lingkungan sekitar seperti pertimbangan kehadiran gelombang dan angin di sekitarnya. Respons gerak translasi merupakan perbandingan antara amplitudo gerak dibandingkan dengan amplitudo gelombang insidental. Sedangkan respons gerak rotasi merupakan perbandingan antara amplitudo gerakan rotasi dengan kemiringan gelombang (Baidowi, Arief, & Munib, 2019).

Dapat dilihat pada gambar berikut dapat dilihat mode gerakan bebas yang dimiliki oleh benda terapung. Untuk gerakan translasi sendiri terbagi menjadi tiga yaitu: *surge* (gerakan translasi pada arah sumbu x), *sway* (gerakan translasi pada arah sumbu y), dan *heave* (gerakan translasi pada arah sumbu z). Dan untuk gerakan rotasional juga terbagi menjadi tiga, antara lain: *roll* (gerakan rotasional pada

sumbu  $x$ ), *pitch* (gerakan rotasional pada sumbu  $y$ ), dan *yaw* (gerakan rotasional pada sumbu  $z$ ).



**Gambar 2. 8** Gerakan Benda Terapung (Ardakani & J., 2011)

## 2.5 Generator

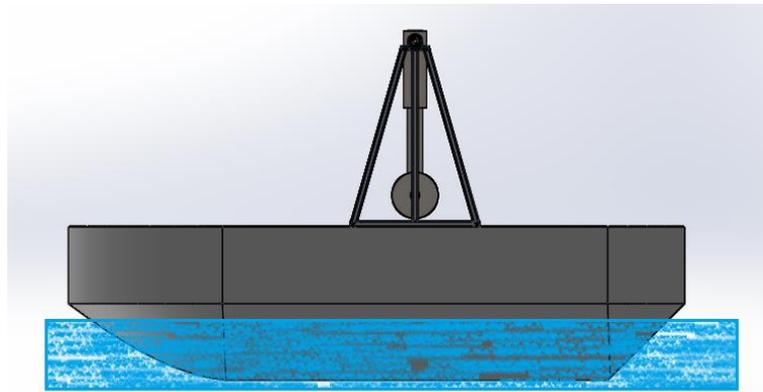
Generator merupakan sebuah alat yang merubah energi mekanik menjadi energi listrik dengan menggunakan prinsip kerja induksi elektromagnetik. Ketika kumparan tembaga diputar diantara kutub – kutub magnet, kumparan akan menerima fluks magnet dan akan menimbulkan gaya gerak listrik induksi (AZ, 2015). Komponen utamanya ada dua yaitu *rotor* dan *stator*. *Rotor* merupakan komponen yang akan berputar sedangkan *stator* merupakan komponen yang diam. Pada penelitian ini digunakan generator dengan kapasitas daya 1 KW dengan putaran 600RPM.



**Gambar 2. 9** Generator (AliExpress, 2020)

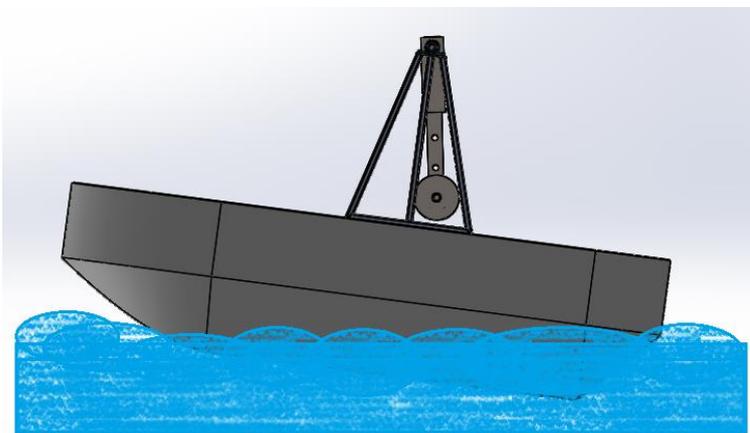
## 2.6 Cara Kerja Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut

Pembangkit listrik tenaga gelombang laut bekerja dengan cara meletakkan ponton pada laut, dan gelombang laut akan mengakibatkan ponton miring terhadap sumbu  $y$  atau *pitching* (Nirmalasari & Hendrowati, 2014). Akibat dari gerakan ponton ini maka pendulum akan mengayun. Dikarenakan gelombang laut yang akan terus menerus terbentuk, maka pendulum dapat mengayun secara terus menerus. Dan lagi energi ini tidak menghasilkan emisi apapun sehingga menjadikannya sebagai energi yang ramah lingkungan (Felayati, Nugroho, & Fitri, 2015). Untuk lebih jelasnya gambar berikut merupakan ilustrasi untuk cara kerja pembangkit listrik tenaga gelombang laut ini.



**Gambar 2. 10** Ketika pada Laut Tanpa Gelombang

Ketika ponton berada pada permukaan air yang tidak memiliki gelombang maka pendulum akan tetap untuk mempertahankan pada posisinya, seperti pada gambar 2.9 di atas.



**Gambar 2. 11** Ketika pada Laut yang Memiliki Gelombang

Akibat dari adanya gelombang maka ponton akan mengalami miring pada sumbu y atau *pitching* sedangkan pendulum akan mempertahankan posisinya karena pada bagian atas lengan pendulum dipasangkan pada *bearing* sehingga membuat pendulum dapat mengayun bebas, seperti pada gambar 2.10. Dan nantinya gerakan berputar dari pendulum ini akan ditransmisikan melalui poros dan dilanjutkan ke generator yang berfungsi sebagai alat untuk merubah energi mekanik menjadi energi listrik. Energi listrik tersebut dapat digunakan secara langsung maupun ditampung dahulu pada penyimpanan sementara seperti baterai. di

## **2.7 Parameter yang Mempengaruhi Kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut**

Kinerja dari pembangkit listrik tenaga gelombang laut ini dipengaruhi oleh beberapa faktor dari gelombang laut itu sendiri maupun dari geometri pembangkit listriknya. Setiap gelombang memiliki arah datang, nilai amplitudo, dan periode. Karakteristik dari gelombang akan mempengaruhi dari gerakan benda terapung di atasnya (Primadani, 2015). Arah datang gelombang laut juga juga dipengaruhi oleh angin dan akan berpengaruh pada gerakan ponton enam derajat kebebasan (Junianto, Mukhtasor, & Prastianto, 2017).

Selain faktor dari gelombang laut, geometri juga akan berpengaruh pada kinerja pembangkit listrik ini. Contoh dari geometrinya adalah Panjang lengan pendulum, massa beban pendulum, dan dimensi ponton. Setiap benda yang berada pada pembangkit listrik akan mempengaruhi letak titik beratnya, dan juga akan berpengaruh pada gerakan ponton. Dan gerakan ponton akan mempengaruhi gerakan pendulum.

## **2.8 Teknologi yang Telah Ada pada Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut**

Potensi energi gelombang laut sangat besar, gerakan gelombang laut ini dapat menggerakkan suatu mekanisme konversi energi tertentu. Mekanisme ini akan mengubah gerak gelombang tersebut menjadi gerak rotasi yang nantinya dapat digunakan untuk memutar generator. Model pendulum yang ditempatkan di atas benda terapung (Noerpamoengkas & Ulum, 2017).

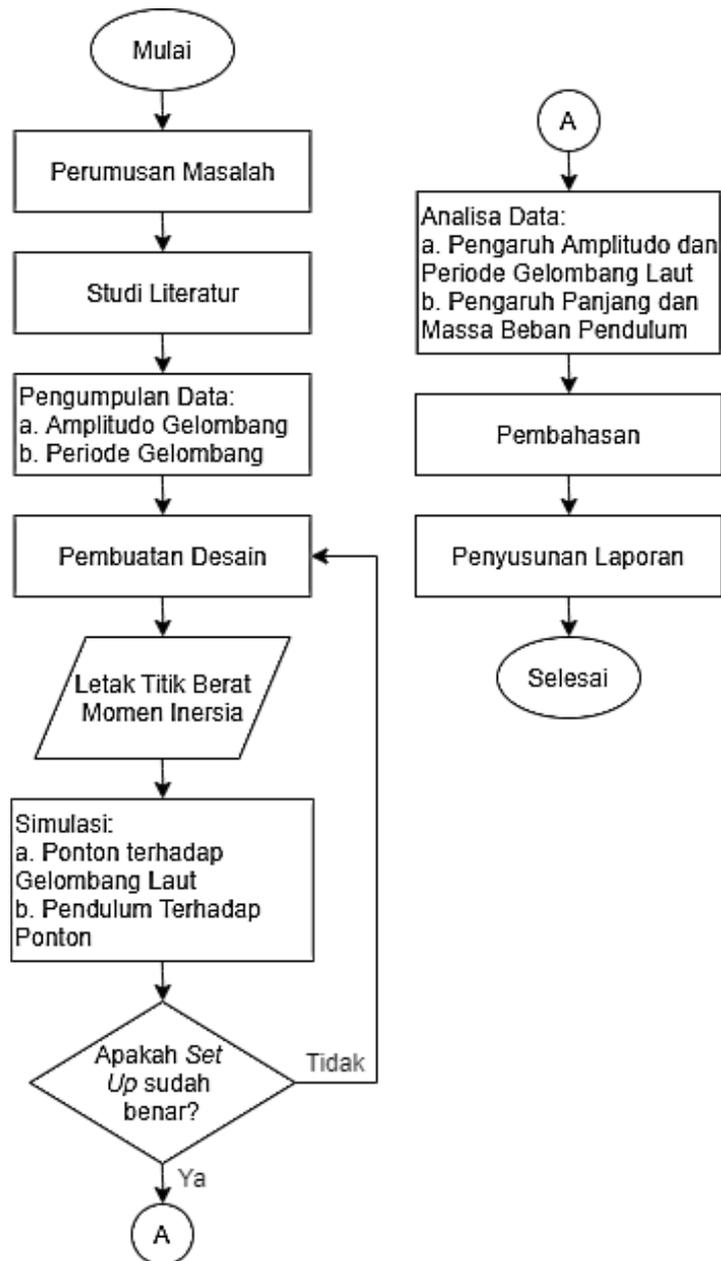
Teknologi yang dapat mengekstraksi energi pada gelombang laut pertama kali dikembangkan oleh Girard bersaudara, seorang ilmuwan asal Prancis pada tahun 1799. Kemudian pada abad 19, M. Fursenot, seorang insinyur di Algeria menciptakan alat yang menangkap osilasi gelombang laut dan merubah menjadi energi bentuk lainnya dengan menggunakan sistem *buoyance*. Pada tahun 2000, Skotlandia membangun WECs (*Wave Energy Converters*) dengan jenis OWC (*Oscillating Water Column*). Dan pada tahun 2008, Portugis juga mendirikan WECs (Isnaini, 2016). Pembangkit listrik tenaga gelombang laut di Indonesia pertama kali dilakukan oleh Zamrisyaf, pembangkit listrik ini adalah sistem yang dirancang dalam bentuk ponton yang ditempatkan mengapung diatas permukaan laut, pembangkit listrik yang dikembangkan menggunakan sistem pendulum atau disebut pembangkit listrik tenaga gelombang laut sistem bandul (PLTGL-SB). Setelah itu mulai bermunculan penelitian mengenai pembangkit listrik tenaga gelombang laut ini. Pada tahun 2012 terdapat penelitian mengenai pembangkit listrik segidelapan sebanyak tiga buah yang dirangkai sehingga membentuk pola segitiga sama sisi, yang harapannya mampu menyerap energi yang lebih besar dari gelombang laut yang diterima badan ponton, dan ponton model ini akan cenderung lebih stabil (Mustofa, 2012). Dilanjutkan pada penelitian tahun 2014 ponton segidelapan dirangkai menjadi pola segitiga sama kaki dengan siku – siku dan hasilnya ponton jenis ini lebih baik dibandingkan dengan penelitian sebelumnya (Nafis, Arief, & Musriadi, 2014). Pada tahun 2017 telah dilakukan sebuah penelitian mengenai permodelan sebuah pembangkit listrik tenaga gelombang dengan skala 1:12 pada sebuah basin, penelitian ini dilakukan oleh Nicola dengan tujuan untuk validasi perhitungan matematis yang telah dilakukannya (Pozzi, Passione, Bracco, & Sirigu, 2017). Perkembangan teknologi pembangkit listrik tenaga gelombang ini memang saat ini sedang intensif, karena memang memiliki potensi pasar yang tinggi apabila telah berhasil diterapkan dengan baik (Falnes, 2007).

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Diagram Alir Penelitian

Berikut adalah tahapan – tahapan yang dilakukan untuk menyelesaikan penelitian ini:



**Gambar 3. 1** Diagram Alir Penelitian

a. Perumusan Masalah

Perumusan masalah dibuat berdasarkan adanya permasalahan yang sedang terjadi saat ini.

b. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan untuk memahami konsep-konsep yang terkait dan berhubungan dengan penelitian ini. Studi literatur dilakukan dengan membaca buku dan me-review jurnal atau *paper* dari topik-topik seperti hidrodinamika pada suatu ponton, hukum archimedes yang bekerja pada bangunan apung, *Response Amplitude Operational (RAO)* dan *computational fluid dynamic (CFD)*.

c. Pengumpulan Data

Adapun data mengenai material serta geometri dari desain yang akan dibuat, serta periode dan amplitudo gelombang laut. Maka didapatkan berupa beberapa variasi yang akan disimulasikan, berikut adalah variasi yang akan disimulasikan:

**Tabel 3. 1** Variasi Simulasi

No	Panjang Lengan Bandul (m)	Massa Bandul (Kg)	Amplitudo Gelombang (m)	Periode Gelombang (s)
1	1	100	0.1	2.32
2				7
3				12
4			0.35	2.32
5				7
6				12
7			0.6	2.32
8				7
9				12
10		152	0.1	2.32
11				7
12				12
13			0.35	2.32
14				7
15				12
16			0.6	2.32
17				7
18				12

19	1.25	100	0.1	2.32
20				7
21				12
22			2.32	
23			7	
24			12	
25			2.32	
26			7	
27			12	
28		2.32		
29		7		
30		12		
31		2.32		
32		7		
33		12		
34		2.32		
35		7		
36		12		
37	1.5	100	0.1	2.32
38				7
39				12
40			2.32	
41			7	
42			12	
43			2.32	
44			7	
45			12	
46		2.32		
47		7		
48		12		
49		2.32		
50		7		
51		12		
52		2.32		
53		7		
54		12		

d. Analisa Hasil Simulasi

Hasil simulasi dapat dijadikan dalam bentuk tabel maupun grafik agar pembaca lebih mudah untuk memahami. Berikut adalah contoh dari salah satu variasi yang telah disimulasikan.

e. Pembahasan

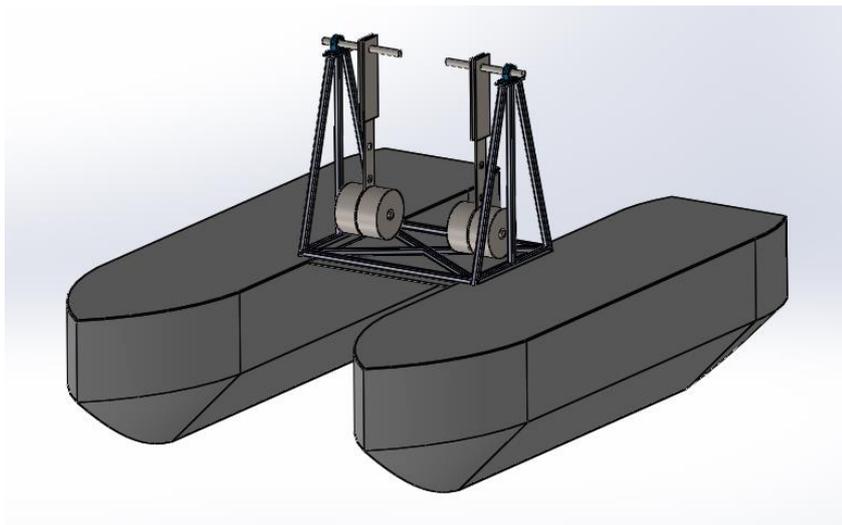
Dilakukan pembahasan terkait apa yang dilakukan terkait dengan apa yang telah dilakukan ketika mensimulasikan desain.

f. Pengambilan Kesimpulan

Dari hasil simulasi dapat disimpulkan apa yang telah dilakukan, sehingga dapat menjawab dari permasalahan yang telah dirumuskan.

### 3.2 Desain Ponton

Setelah melakukan tahapan – tahapan sebelumnya maka dapat dilakukan pembuatan desain dari ponton serta kerangka yang menopang bandul dengan menggunakan salah satu perangkat lunak 3D desain. Disini kondisi ponton akan tetap berotasi namun ponton tetap dalam keadaan yang stabil. Desain dari ponton harus menjamin dapat menopang dari seluruh beban baik ponton itu sendiri maupun seluruh sistem yang berada di atasnya. Dimensi dari ponton yang dibuat merupakan desain ponton katamaran.



**Gambar 3. 2** Salah Satu Variasi Desain

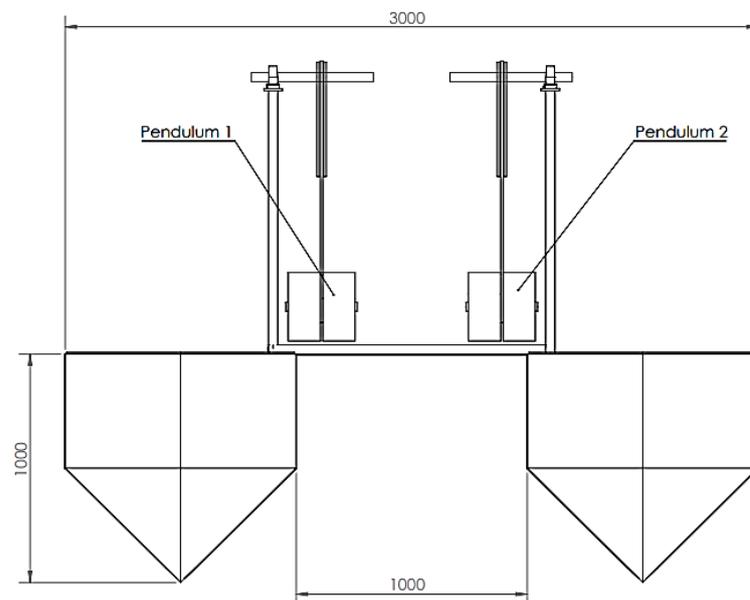
Pada ponton ini diberikan penetapan untuk sarat air setinggi 0.45m, maka volume ponton yang tercelup pada air adalah  $1.312 \text{ m}^3$  sehingga ponton tersebut dapat menopang beban maksimal seberat 1312.6 kg dengan asumsi massa jenis air

1025 kg/m<sup>3</sup>. Sedangkan pada variasi yang digunakan memiliki beban total terberat dengan nilai 1086 kg, sehingga ponton tidak akan tenggelam karena mampu menopang seluruh beban yang ada di atasnya termasuk apabila terdapat orang yang sedang melakukan perbaikan pada sistem maka ponton masih bisa menopangnya. Spesifikasi dari desain ponton yang akan disimulasikan adalah sebagai berikut:

**Tabel 3. 2** Data Geometri Ponton

Tinggi Ponton	1 m
Lebar Ponton	1 m
Panjang Ponton	4 m
Panjang Lengan Pendulum	1 m, 1.25 m, dan 1.5 m
Massa Beban Pendulum	100 kg dan 152 kg
Massa Ponton	531.4 kg

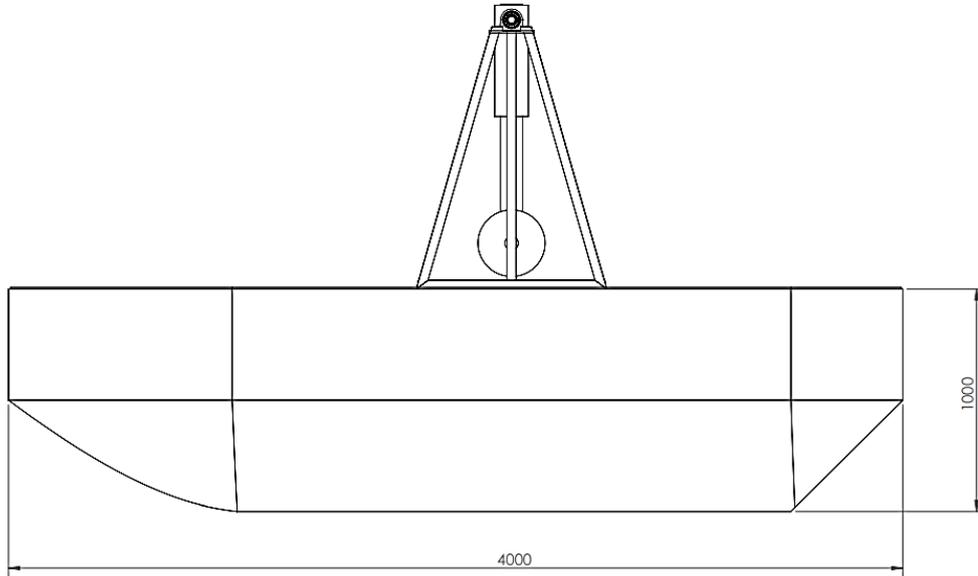
Berikut adalah detail mengenai ukuran pada desain yang telah dibuat



**Gambar 3. 3** Desain Tampak Depan

Pada gambar 3.3 dapat diketahui bahwa ukuran tinggi ponton 1 meter dengan jarak antar lambung 1 meter serta lebar lambung 1 meter. Ponton katamaran ini menopang kerangka beserta pendulumnya, dengan panjang lengan pendulum yang

telah dipilih tiga variasi yaitu 1 meter, 1.25 meter, dan 1.5 meter. Pada desainnya pembangkit listrik tenaga gelombang ini memiliki dua buah pendulum.



**Gambar 3. 4** Desain Tampak Samping

Pada gambar 3.4 dapat diketahui bahwa panjang dari lambung adalah 4 meter, maka volume dari ponton ini sendiri  $12 \text{ m}^3$

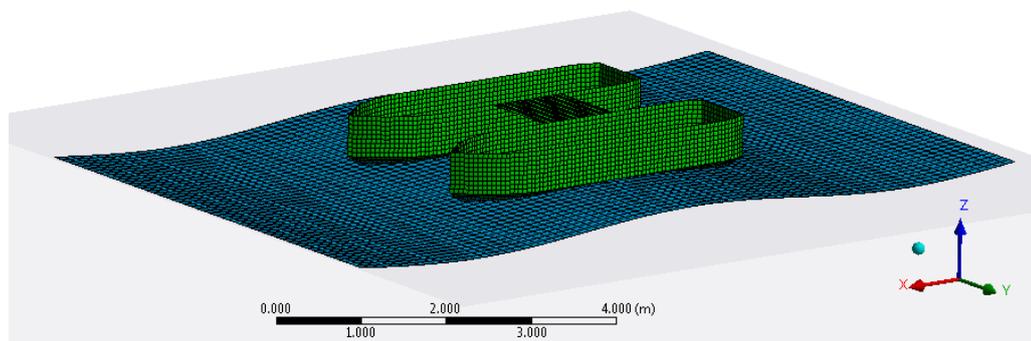
### 3.3 Simulasi dengan Menggunakan Perangkat Lunak

Simulasi dilakukan dengan melalui dua tahapan, tahapan pertama dilakukan untuk melihat interaksi gelombang yang datang dengan ponton. Setelah hasilnya akan digunakan sebagai data masukan untuk simulasi untuk melihat gerakan pendulum akibat dari gerakan ponton. Untuk simulasi pada tahapan pertama dibutuhkan berbagai macam nilai yang diperlukan seperti sarat air, nilai titik berat, dan titik gaya angkat. Data tersebut dapat diperoleh melalui perangkat lunak desain yang digunakan.

Pada simulasi ini digunakan ombak yang datang sejajar dengan sumbu x setelah itu juga dimasukkan untuk variasi dari tinggi dan periode gelombang. Pada hasil simulasi ini akan didapatkan nilai simpangan dari ponton akibat dari gelombang. Simpangan dari ponton yang diambil merupakan gerakan ponton yang berotasi terhadap sumbu y atau biasa disebut dengan *pitching*. Dan nantinya gerakan inilah yang mengakibatkan pendulum dapat berotasi. Kemudian data

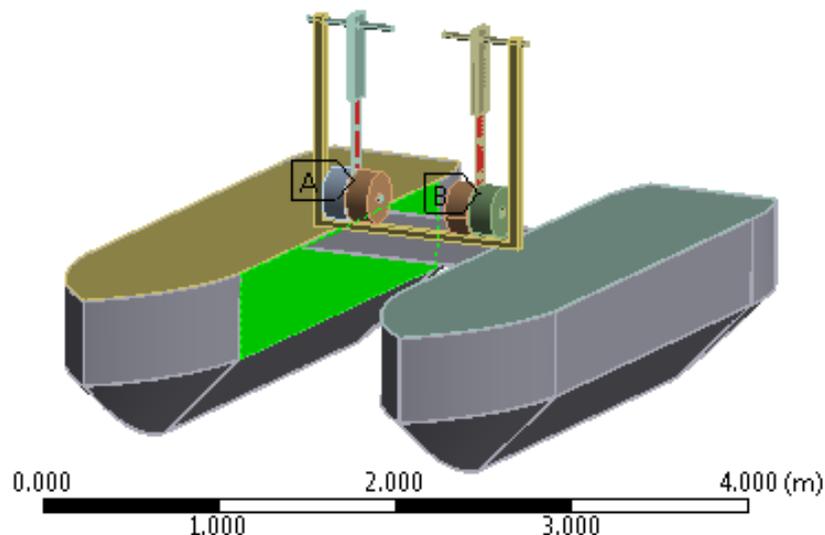
tersebut digunakan untuk memasukkan dari simulasi gerakan pendulum akibat dari gerakan ponton yang dikenai gelombang.

Pada simulasi tahap pertama desain yang digunakan cukup bagian pontonnya saja dengan menggunakan seluruh parameter – parameter ketika ponton telah menopang seluruh sistem di atasnya. Pada gambar 3.5 berikut merupakan contoh hasil ketika ponton telah disimulasikan terhadap gelombang laut dengan salah satu parameter pada variasi yang telah ditentukan. Setelah simulasi telah dilakukan maka akan didapatkan data berupa *pitching* ponton.



**Gambar 3. 5** Contoh Simulasi Interaksi Ponton Terhadap Gelombang

Pada simulasi tahap kedua disini dimasukkan geometri keseluruhannya karena yang akan ditinjau adalah pendulumnya. Setelah itu geometri ini diberikan masukkan data berupa *pitching* ponton yang telah diperoleh pada tahap pertama setelah itu ponton akan berotasi sesuai data yang telah dimasukkan dan bandul akan mengayun. Data simpangan bandul ini akan diambil untuk dilakukan analisis.



**Gambar 3. 6** Contoh Simulasi Interaksi Gerakan Pendulum Terhadap Gerakan Ponton

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

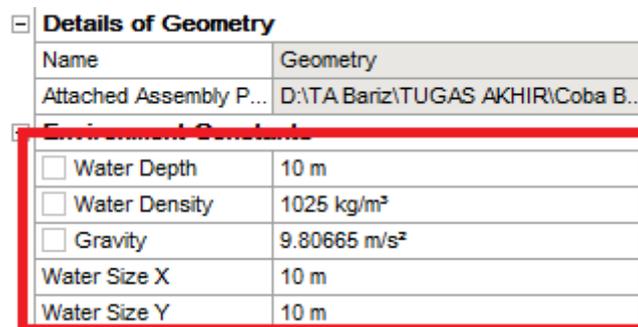
## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab IV ini berisi mengenai verifikasi hasil simulasi, analisa data, dan pembahasan. Analisa data yang pertama merupakan analisa pengaruh parameter gelombang laut terhadap gerakan ponton. Sedangkan analisa kedua merupakan analisa perubahan geometri pendulum terhadap gerak pendulum.

#### 4.1 Verifikasi Hasil Simulasi

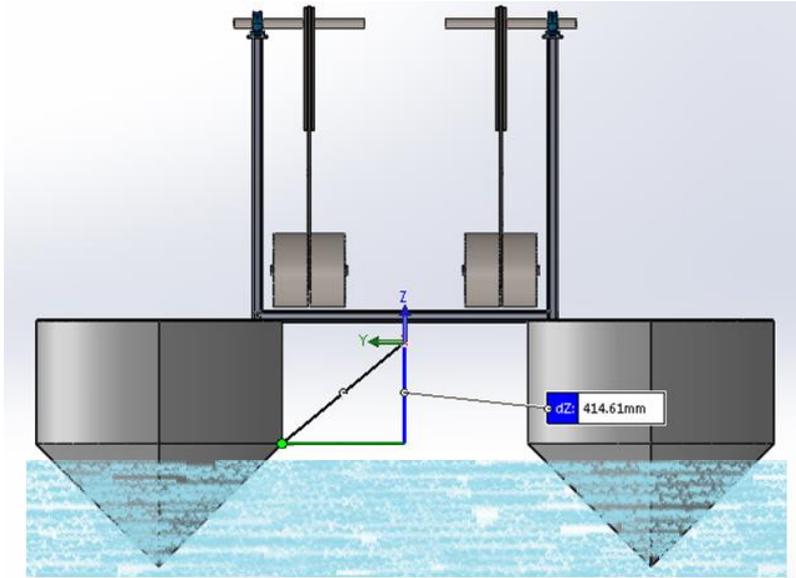
Verifikasi hasil simulasi merupakan sebuah tahapan dimana dilakukan pengecekan terhadap *set up* parameter yang digunakan terhadap simulasi yang telah dilakukan. Pertama diperlukan melakukan *setup* untuk ukuran laut yang digunakan untuk simulasi dan juga untuk massa jenis airnya, digunakan untuk besar nilai massa jenisnya adalah  $1025 \text{ kg/m}^3$  seperti pada gambar 4.1 sedangkan untuk nilai gravitasi yang digunakan adalah  $9.80665 \text{ m/s}^2$ .



Details of Geometry	
Name	Geometry
Attached Assembly P...	D:\TA Bariz\TUGAS AKHIR\Coba B...
Environment Constants	
<input type="checkbox"/> Water Depth	10 m
<input type="checkbox"/> Water Density	1025 kg/m <sup>3</sup>
<input type="checkbox"/> Gravity	9.80665 m/s <sup>2</sup>
Water Size X	10 m
Water Size Y	10 m

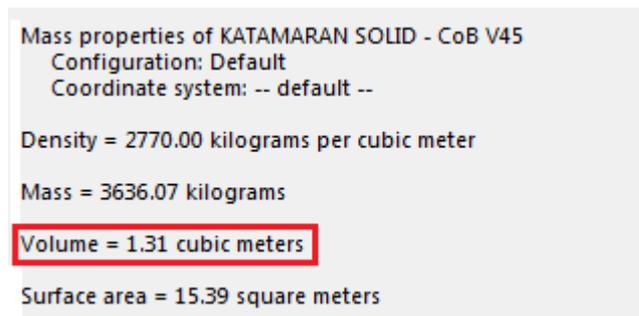
**Gambar 4. 1** Nilai Massa Jenis Air dan Nilai Gravitasi

Sebelum melakukan simulasi diperlukan penentuan sarat air pada ponton, penentuan ini harus disesuaikan dengan beban yang ditopang oleh ponton. Dengan menggunakan persamaan 2.6 maka dapat ditentukan untuk sarat air ponton. Setelah dilakukan perhitungan desain ponton ini dengan sarat air 0.45 m dapat menopang beban seberat 1342.75 kg, sehingga dapat menopang beban terberat dari variasi yang akan disimulasikan yaitu 1086 kg. Data pertama yang digunakan untuk melakukan simulasi ponton terhadap gelombang laut merupakan titik berat. Titik berat dari seluruh komponen ini dapat diperoleh dari perangkat lunak desain 3D. Gambar 4.2 merupakan salah satu contoh letak titik berat dari suatu benda.



**Gambar 4. 2** Contoh Letak Titik Berat

Selain titik berat juga diperlukan untuk memasukkan parameter untuk volume yang tercelup air. Nilai ini dapat diperoleh dengan cara memotong desain 3D dengan menyisakan bagian yang tercelup pada air. Apabila ponton memiliki sarat air 0.45 meter maka didapatkan volume yang tercelup sebesar 1.31 meter<sup>3</sup>. Pada gambar 4.3 berikut adalah hasil perhitungan volume melalui perangkat lunak desainer yang digunakan.



**Gambar 4. 3** Volume Ponton yang Tercelup Air

Kedua, data yang dibutuhkan untuk melakukan simulasi pada perangkat lunak CFD (*Computational Fluid Dynamics*) yang digunakan adalah momen inersianya yang juga didapatkan dari perangkat lunak desain 3D. Pada gambar 4.4 berikut merupakan salah satu contoh nilai momen inersia dari variasi yang digunakan.

Center of mass: ( meters )		
X = 0.00		
Y = 0.00		
Z = 0.00		
Principal axes of inertia and principal moments of inertia: ( kilograms * square meters )		
Taken at the center of mass.		
Ix = ( 1.00, 0.00, 0.03)	Px = 781.16	
Iy = ( 0.00, 1.00, 0.00)	Py = 834.03	
Iz = (-0.03, 0.00, 1.00)	Pz = 1282.96	
Moments of inertia: ( kilograms * square meters )		
Taken at the center of mass and aligned with the output coordinate system.		
Lxx = 781.48	Lxy = -0.01	Lxz = 12.57
Lyx = -0.01	Lyy = 834.03	Lyz = 0.00
Lzx = 12.57	Lzy = 0.00	Lzz = 1282.64
Moments of inertia: ( kilograms * square meters )		
Taken at the output coordinate system.		
Ixx = 781.48	Ixy = -0.01	Ixz = 12.57
Iyx = -0.01	Iyy = 834.03	Iyz = 0.00
Izx = 12.57	Izy = 0.00	Izz = 1282.64

**Gambar 4. 4** Nilai Momen Inersia

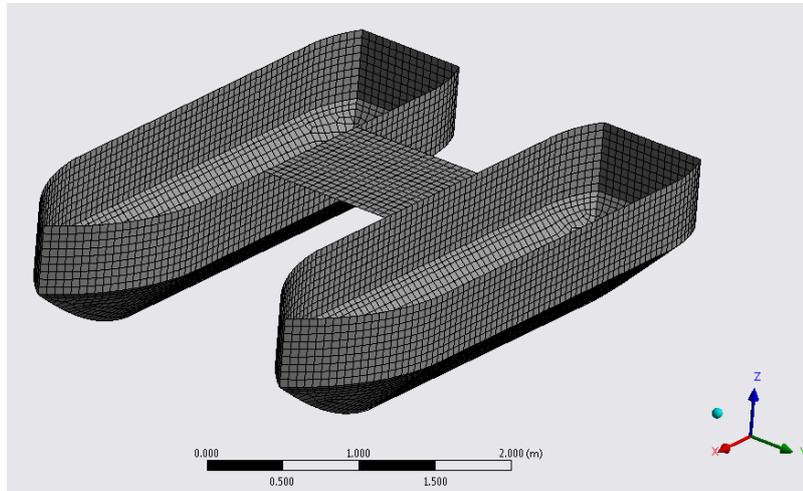
Selanjutnya adalah meshing disini diperlukan untuk memasukkan *defeaturing tolerance* dan *maximum element size* berikut adalah nilai yang dimasukkan seperti pada gambar 4.5.

[-] <b>Details of Mesh</b>	
[-] <b>Defaults</b>	
Control Type	Basic Controls
[-] <b>Mesh Parameters</b>	
Defeaturing Tolerance	0.05 m
Maximum Element Size	0.1 m
Maximum Allowed Fre...	1.776 Hz
Meshing Type	Program Controlled
[-] <b>Generated Mesh Information</b>	
Total Nodes	6729
Total Elements	6587
Diffracting Nodes	2921
Diffracting Elements	2778
Line Body Nodes	0
Line Body Elements	0
Field Points	0

**Gambar 4. 5** Hasil *Meshing*

Ketentuan dari penyedia perangkat lunak simulasi ini adalah memiliki nilai *total elements* yang tidak melebihi 40000 elemen untuk versi 64-bit dan 18000 elemen untuk versi 32-bit. Semakin besar nilai *maximum element size* maka hasilnya akan kurang akurat. Pada salah satu jurnal menggunakan ukuran *maximum*

*element size* 0.5 meter (Junianto, Mukhtasor, & Prastianto, 2017). Setelah melakukan *meshing* maka didapatkan hasil pada geometri seperti gambar 4.6.



**Gambar 4. 6** Hasil *Meshing* pada Geometri

Selain simulasi untuk *hydrodynamic diffraction* untuk mendapatkan data *time response analysis* maka diperlukan untuk simulasi pada *hydrodynamic response* dan salah satu pengaturan yang diubah yaitu “*Use Linear starting Conditions*”, karena simulasi pada *hydrodynamic response* merupakan simulasi lanjutan dari simulasi *hydrodynamic diffraction* maka diperlukan melakukan pengaturan tersebut agar posisi ponton pada simulasi *hydrodynamic response* memiliki posisi yang sama dengan posisi ketika simulasi *hydrodynamic diffraction*. Pada gambar 4.7 berikut merupakan *set up* untuk pilihan “*Use Linear starting Conditions*”.

<b>Common Analysis Options</b>	
Convolution	No
Call Routine "user_force"	No
Use Linear Starting Conditions	Yes
Use Linear Stiffness Matrix to Calculu...	No
Account for Current Phase Shift	Yes
Use Wheeler Stretching	Yes

**Gambar 4. 7** *Set Up* untuk pilihan “*Use Linear starting Conditions*”

Parameter yang terakhir merupakan konfigurasi untuk gelombang, sesuai dengan variasi yang telah digunakan untuk amplitudo dan periodenya. Untuk amplitudo digunakan variasi 0.1, 0.35 dan 0.6 meter. Sedangkan untuk periode digunakan variasi 2.32, 7, dan 12 detik. Ketika memasukkan parameter ini juga terdapat opsi untuk parameter frekuensinya namun jika sudah memasukkan parameter periode

maka parameter frekuensinya tidak perlu dilakukan lagi. Selain itu juga diberi arah datang gelombang, arah  $180^\circ$  ini merupakan gelombang yang datang dari depan ponton. Pada gambar 4.8 berikut merupakan *set up* untuk memasukkan parameter gelombang.

Name	Regular Wave 1
Visibility	Visible
Activity	Not Suppressed
<b>Wave Definition</b>	
Wave Type	Stokes 2nd Order Wave m
<input type="checkbox"/> Direction	$180^\circ$
<input type="checkbox"/> Amplitude	0.1 m
<input type="checkbox"/> Period	2.32 s
<input type="checkbox"/> Frequency	0.431034482758621 Hz
Sampling Method	Program Controlled

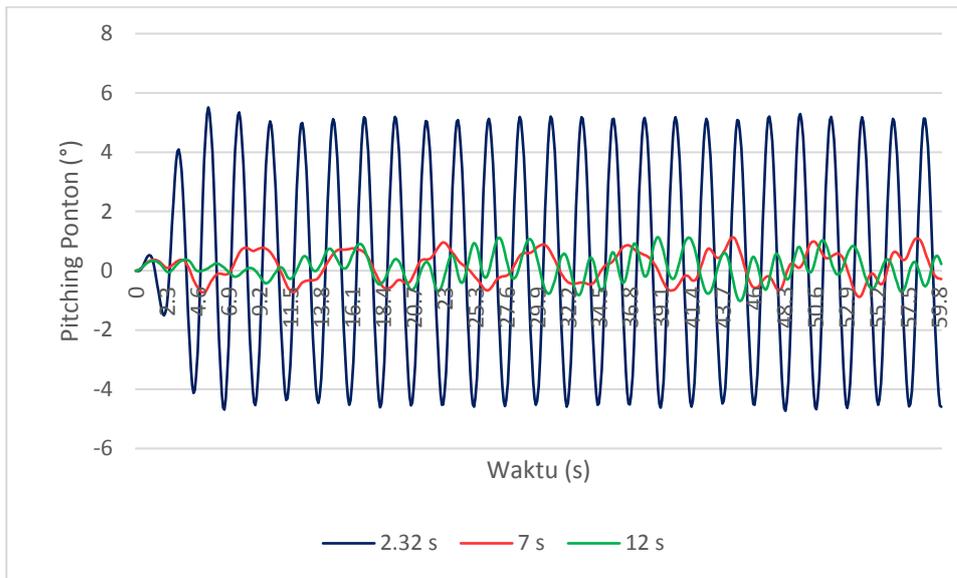
**Gambar 4. 8** *Set Up* Parameter Gelombang

## 4.2 Pengaruh Perubahan Parameter Gelombang Laut Terhadap Gerakan Ponton

Hasil simulasi tahap pertama merupakan hasil simulasi dari gerakan ponton akibat dari gelombang. Analisa gerakan ponton dilakukan berdasarkan variasi tinggi gelombang yaitu 0.1 m, 0.35 m, dan 0.60 m. Selain itu juga dilakukan variasi panjang lengan dan massa beban pendulum maka tentu saja massa keseluruhan akan bertambah dan juga berakibat pada pergeseran titik tengah gravitasi.

### 4.2.1 Gerak Ponton Terhadap Variasi Periode Gelombang Laut

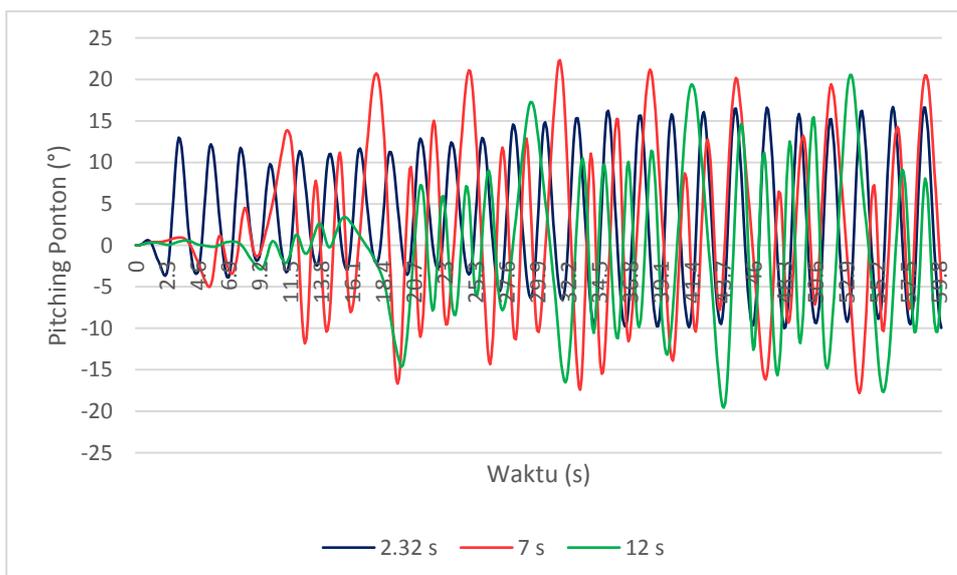
Hasil respon gerak ponton akibat dari variasi periode gelombang 2.32 s, 7 s, dan 12 s. Berikut adalah grafik untuk perbandingan *pitching* ponton dengan massa beban 100 kg, panjang lengan pendulum 1 m, pada amplitudo gelombang 0.1 m dengan variasi periode gelombang terkait.



**Gambar 4. 9** Perbandingan *Pitching Ponton* Variasi 1, 2 dan 3

Pada gambar 4.9 merupakan perbandingan dari *pitching* ponton terhadap periode gelombang dapat dilihat apabila ponton pada gelombang laut dengan amplitudo 0.1 meter memiliki *pitching* ponton tertinggi pada periode 2.32 s apabila dibandingkan dengan periode lainnya.

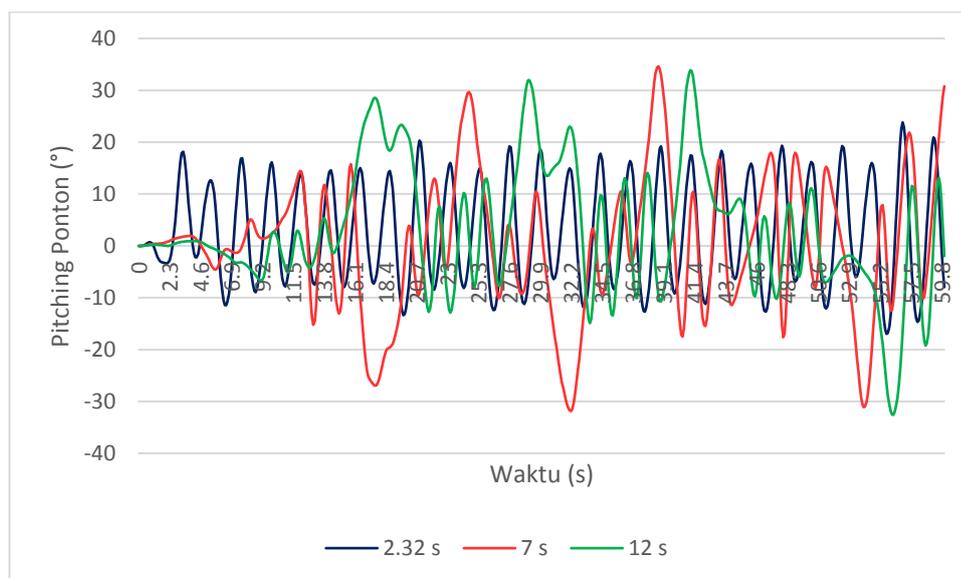
Berbeda dengan ketika gelombang laut dengan amplitudo 0.1 meter, berikut adalah grafik untuk perbandingan *pitching* ponton dengan massa beban 100 kg, panjang lengan pendulum 1 meter, pada amplitudo gelombang 0.35 meter dengan variasi periode gelombang terkait.



**Gambar 4. 10** Perbandingan *Pitching Ponton* Variasi 4, 5, dan 6

Pada gambar 4.10 dapat dilihat untuk semua nilai *pitching* ponton pada semua variasi periode terlihat naik ketika pada amplitudo 0.35 meter. Pada variasi ini terlihat untuk periode 2.32 s tidak lagi memiliki nilai *pitching* ponton tertinggi karena pada amplitudo 0.35 meter jarak antara puncak gelombang berdekatan sehingga ketika ponton akan mengalami *pitching* dengan nilai negatif maka ponton tersebut kembali terkena gelombang berikutnya sehingga mengalami *pitching* dengan nilai positif, ini terjadi karena panjang dari ponton yang cukup panjang yaitu 4 meter.

Sama seperti ketika pada gelombang dengan amplitudo 0.35 meter, berikut adalah grafik untuk perbandingan *pitching* ponton dengan massa beban 100 kg, panjang lengan pendulum 1 m, pada amplitudo gelombang 0.60 meter dengan variasi periode gelombang terkait.

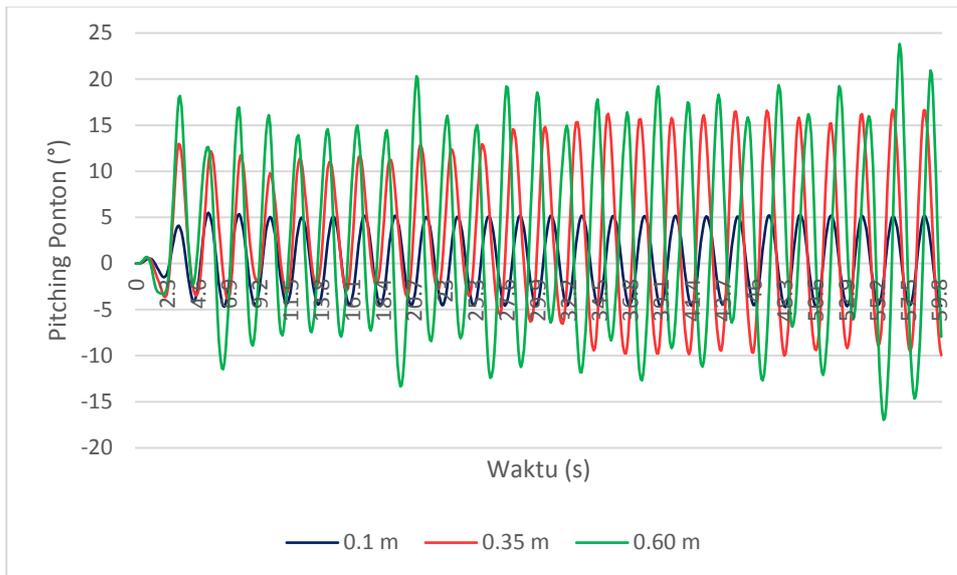


**Gambar 4. 11** Perbandingan *Pitching* Ponton Variasi 7, 8, dan 9

Pada gambar 4.11 dapat terlihat untuk nilai *pitching* ponton tertinggi terjadi pada periode ponton 12 s. Pada variasi ini sama seperti ketika diterapkan pada variasi amplitudo 0.35 meter, terlihat untuk periode 2.32 s nilai *pitching* ponton memiliki nilai yang kecil karena pada periode ini jarak antara puncak gelombang berdekatan sehingga ketika ponton akan mengalami *pitching* dengan nilai negatif maka ponton tersebut kembali terkena gelombang berikutnya sehingga mengalami *pitching* dengan nilai positif. Karena sudah terwakilkan dengan gambar 4.8 hingga 4.10 perbandingan variasi periode lainnya dapat dilihat pada lampiran A.1 hingga A.15.

#### 4.2.2 Gerak Ponton Terhadap Variasi Amplitudo Gelombang Laut

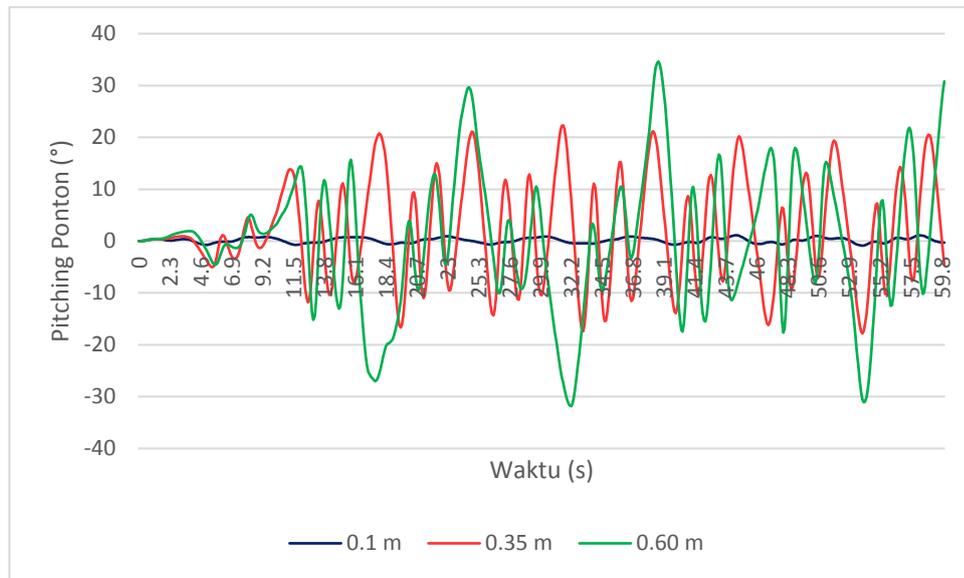
Hasil respon gerak ponton akibat dari variasi amplitudo gelombang 0.1 m, 0,35 m dan 0.60 m. Berikut adalah grafik untuk perbandingan *pitching* ponton dengan massa beban 100 kg, panjang lengan pendulum 1 m pada periode gelombang 2.32 s dengan variasi tinggi gelombang terkait.



**Gambar 4. 12** Perbandingan *Pitching* Ponton Variasi 1, 4 dan 7

Pada gambar 4.12 merupakan perbandingan dari *pitching* ponton terhadap amplitudo gelombang dapat dilihat apabila ponton pada gelombang laut dengan periode 2.32 s memiliki *pitching* ponton tertinggi pada amplitudo 0.60 meter apabila dibandingkan dengan amplitudo lainnya.

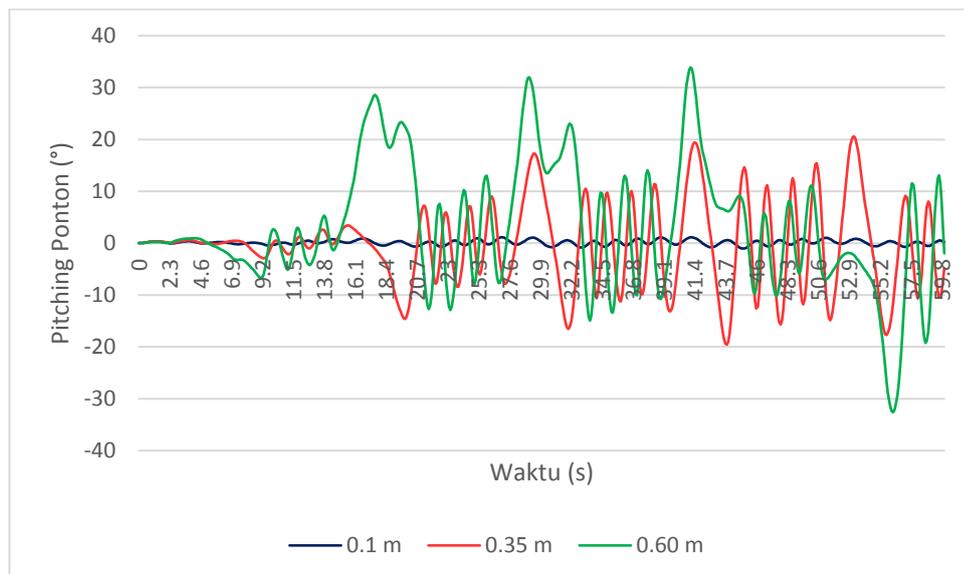
Berikut adalah grafik untuk perbandingan *pitching* ponton dengan massa beban 100 kg, panjang lengan pendulum 1 m, pada periode 7 s dengan variasi amplitudo gelombang terkait.



**Gambar 4. 13** Perbandingan *Pitching* Ponton Variasi 2, 5, dan 8

Pada gambar 4.13 merupakan perbandingan dari *pitching* ponton terhadap amplitudo gelombang dapat dilihat apabila ponton pada gelombang laut dengan periode 7 s memiliki *pitching* ponton tertinggi pada amplitudo 0.60 meter.

Berikut adalah grafik untuk perbandingan *pitching* ponton dengan massa beban 100 kg, panjang lengan pendulum 1 m pada periode 12 s dengan variasi tinggi gelombang terkait.



**Gambar 4. 14** Perbandingan *Pitching* Ponton Variasi 3, 6, dan 9

Pada gambar 4.14 merupakan perbandingan dari *pitching* ponton terhadap amplitudo gelombang dapat dilihat apabila ponton pada gelombang laut dengan

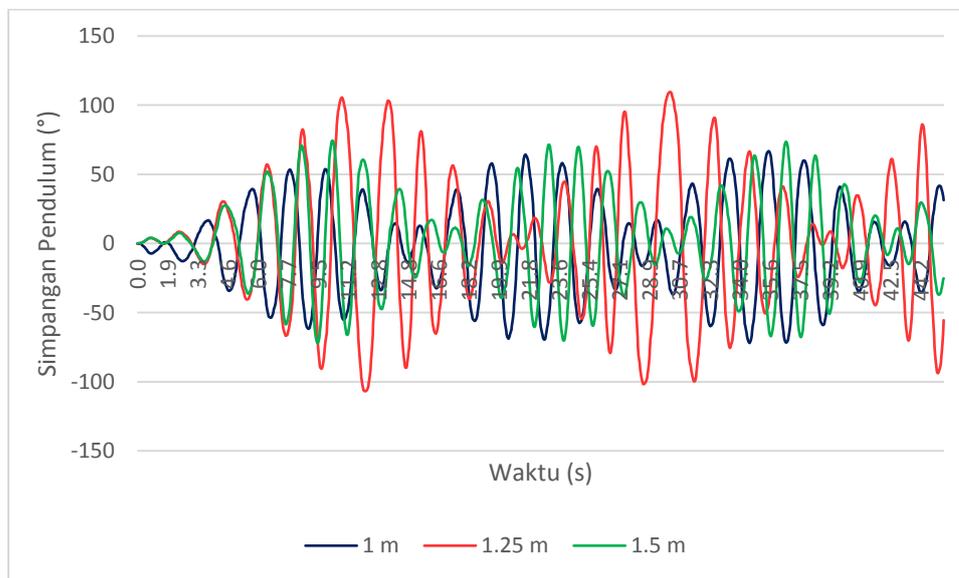
periode 12 s memiliki *pitching* ponton tertinggi pada amplitudo 0.60 meter, sama seperti ketika pada gelombang dengan periode 2.32 s dan 7 s. Karena sudah terwakilkan dengan gambar 4.11 hingga 4.13 perbandingan variasi periode lainnya dapat dilihat pada lampiran A.16 hingga A.30.

### 4.3 Pengaruh Perubahan Geometri Pendulum Terhadap Gerakannya

Pada simulasi tahap kedua dilakukan simulasi dengan menggunakan data dari hasil simulasi tahap pertama yang kemudian akan mengakibatkan pergerakan pada pendulum. Hasil data dari simulasi ini berupa simpangan yang terjadi pada pendulum.

#### 4.3.1 Gerak Pendulum Terhadap Variasi Panjang Lengannya

Setelah dilakukan simulasi terhadap variasi panjang lengan maka dapat dilihat pengaruh dari perubahan panjang lengan pendulum terhadap gerakan pendulum. Berikut adalah grafik untuk perbandingan simpangan pendulum dengan massa beban 100 kg, pada periode 2.32 s dan amplitudo gelombang 0.1 meter dengan variasi panjang lengan pendulum terkait.

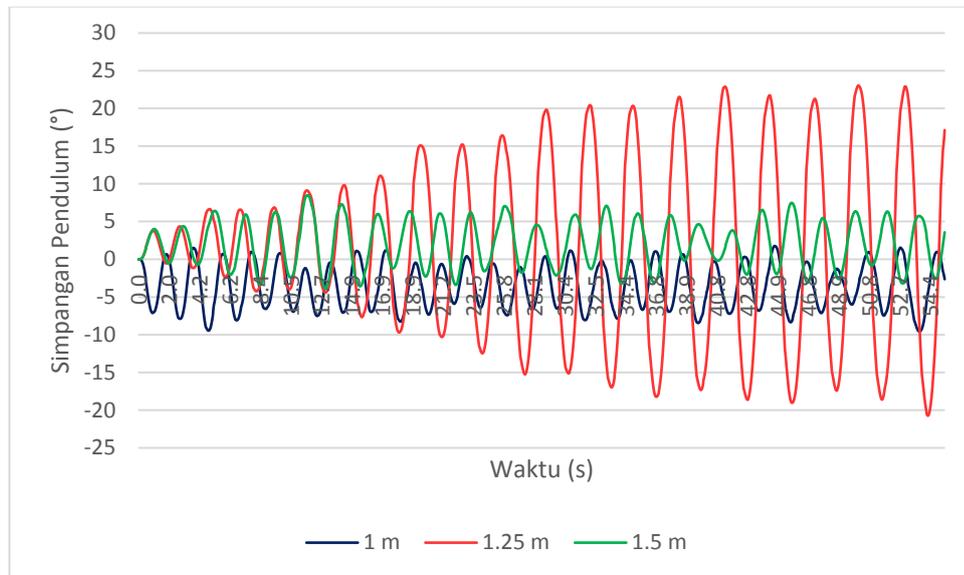


**Gambar 4. 15** Perbandingan Simpangan Pendulum Variasi 1, 19, dan 37

Pada gambar 4.15 merupakan perbandingan simpangan pendulum terhadap perubahan panjang lengan. Dapat dilihat apabila simpangan pendulum pada

gelombang laut dengan amplitudo 0.1 meter dan periode 2.32 s memiliki simpangan pendulum tertinggi ketika memiliki panjang lengan 1.25 meter.

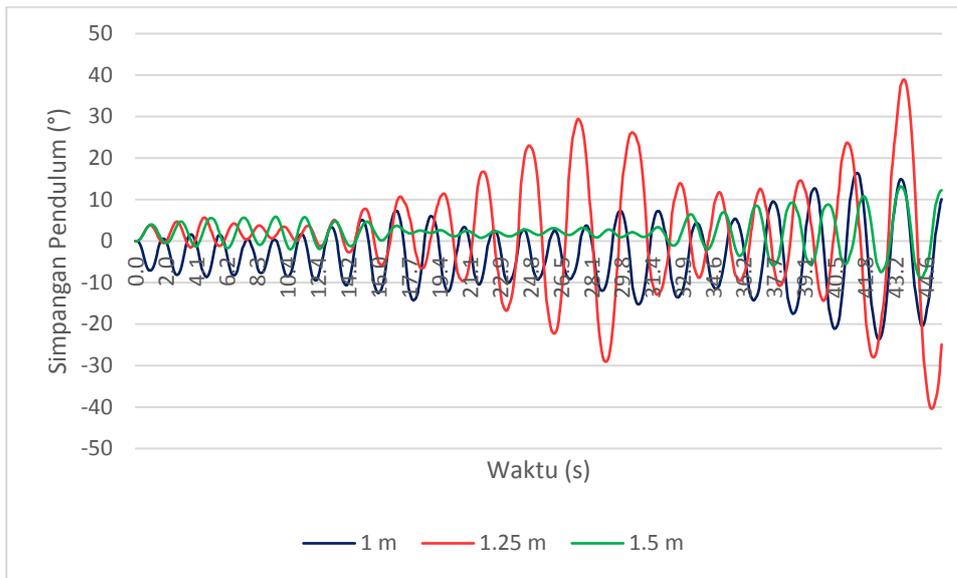
Berikut adalah grafik untuk perbandingan simpangan pendulum dengan massa beban 100 kg, pada periode 7 s dan amplitudo gelombang 0.1 meter dengan variasi panjang lengan pendulum terkait.



**Gambar 4. 16** Perbandingan Simpangan Pendulum Variasi 2, 20, dan 38

Pada gambar 4.16 merupakan perbandingan simpangan pendulum terhadap perubahan panjang lengan. Dapat dilihat apabila simpangan pendulum pada gelombang laut dengan amplitudo 0.1 meter dan periode 7 s juga memiliki simpangan pendulum tertinggi ketika memiliki panjang lengan 1.25 meter.

Berikut adalah grafik untuk perbandingan simpangan pendulum dengan massa beban 100 kg, pada periode 12 s dan amplitudo gelombang 0.1 meter dengan variasi panjang lengan pendulum terkait.



**Gambar 4.17** Perbandingan Simpangan Pendulum Variasi 3, 21, dan 39

Pada gambar 4.17 merupakan perbandingan simpangan pendulum terhadap perubahan panjang lengan. Dapat dilihat apabila simpangan pendulum pada gelombang laut dengan amplitudo 0.1 meter dan periode 12 s juga memiliki simpangan pendulum tertinggi ketika memiliki panjang lengan 1.25 meter.

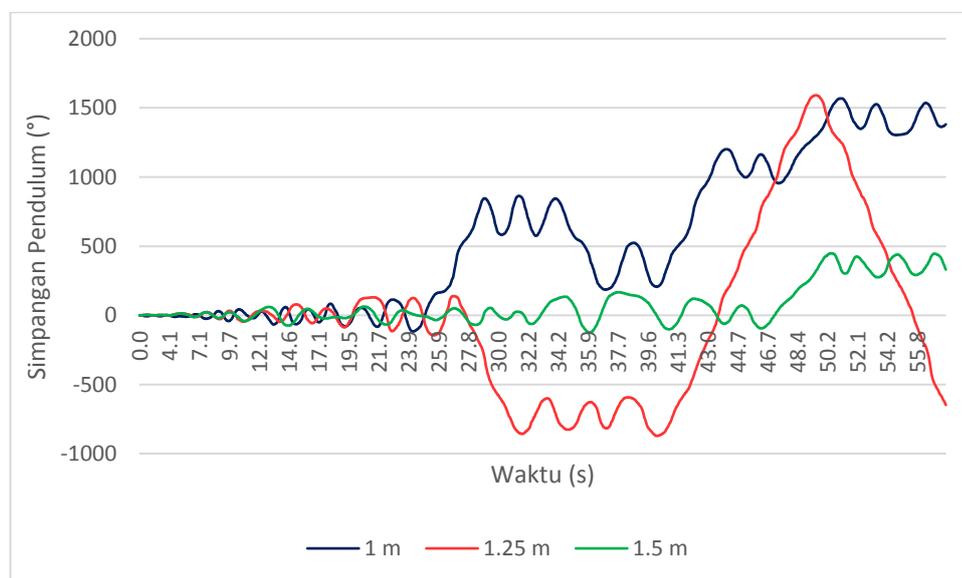
Berikut adalah grafik untuk perbandingan simpangan pendulum dengan massa beban 100 kg, pada periode 2.32 s dan amplitudo gelombang 0.35 meter dengan variasi panjang lengan pendulum terkait.



**Gambar 4.18** Perbandingan Simpangan Pendulum Variasi 4, 22, dan 40

Pada gambar 4.18 merupakan perbandingan simpangan pendulum terhadap perubahan panjang lengan. Dapat dilihat apabila simpangan pendulum pada gelombang laut dengan amplitudo 0.35 meter dan periode 2.32 s memiliki karakter yang berbeda dibandingkan dengan grafik sebelumnya, namun tetap memiliki simpangan tertinggi pada panjang lengan 1.25 meter. Pada grafik tersebut terlihat sudut simpangan telah melampaui  $360^\circ$ , hal ini berarti pendulum telah berputar penuh.

Berikut adalah grafik untuk perbandingan simpangan pendulum dengan massa beban 100 kg, pada periode 2.32 s dan amplitudo gelombang 0.35 meter dengan variasi panjang lengan pendulum terkait.

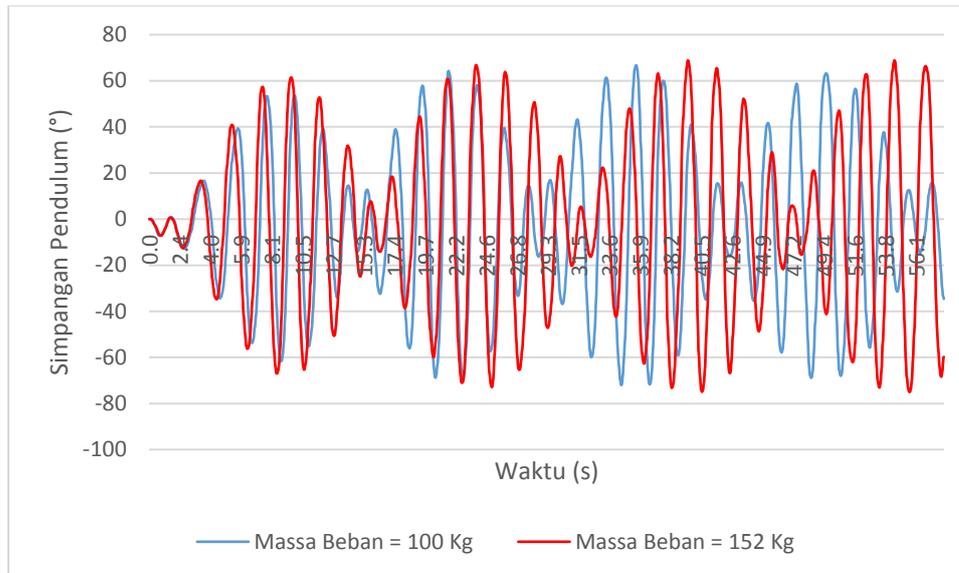


**Gambar 4. 19** Perbandingan Simpangan Pendulum Variasi 5, 23, dan 41

Pada gambar 4.19 merupakan perbandingan simpangan pendulum terhadap perubahan panjang lengan. Dapat dilihat apabila simpangan pendulum pada gelombang laut dengan amplitudo 0.35 meter dan periode 7 s memiliki simpangan pendulum tertinggi ketika memiliki panjang lengan 1.25 meter. Pada grafik tersebut terlihat sudut simpangan telah melampaui  $360^\circ$ , hal ini berarti pendulum telah berputar penuh. Karena sudah terwakili dengan gambar 4.14 hingga 4.18 perbandingan variasi periode lainnya dapat dilihat pada lampiran A.31 hingga A.43.

### 4.3.2 Gerak Pendulum Terhadap Variasi Massa Pendulum

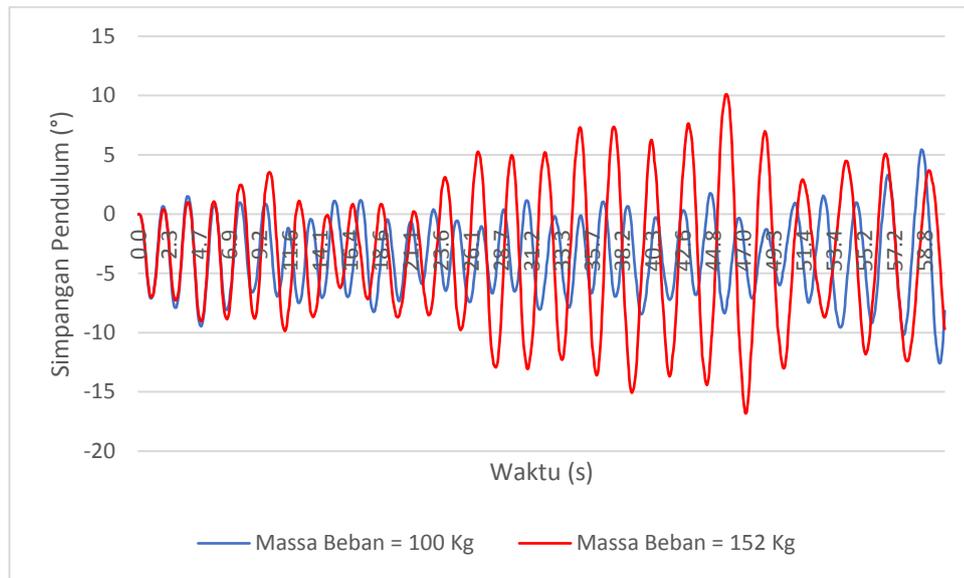
Setelah dilakukan simulasi terhadap variasi massa pendulum maka dapat dilihat pengaruh dari perubahan massa beban pendulum terhadap gerakan pendulum. Berikut adalah grafik untuk perbandingan simpangan pendulum dengan panjang lengan 1 meter, pada periode 2.32 s dan amplitudo gelombang 0.1 meter dengan variasi massa beban pendulum terkait.



**Gambar 4. 20** Perbandingan Simpangan Pendulum Variasi 1 dan 10

Pada gambar 4.20 merupakan perbandingan simpangan pendulum terhadap perubahan massa beban pendulum. Dapat dilihat apabila simpangan pendulum pada gelombang laut dengan amplitudo 0.1 meter dan periode 2.32 s memiliki simpangan pendulum yang lebih tinggi ketika menggunakan massa beban 152 kg.

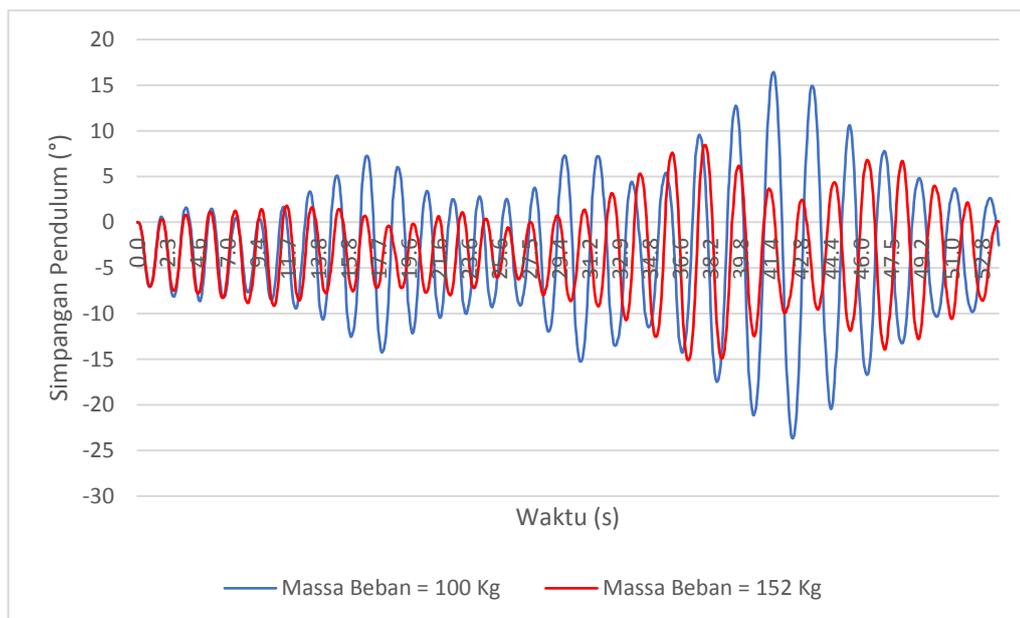
Berikut adalah grafik untuk perbandingan simpangan pendulum dengan panjang lengan 1 meter, pada periode 7 s dan amplitudo gelombang 0.1 meter dengan variasi massa beban pendulum terkait.



**Gambar 4. 21** Perbandingan Simpangan Pendulum Variasi 2 dan 11

Pada gambar 4.21 merupakan perbandingan simpangan pendulum terhadap perubahan massa beban pendulum. Dapat dilihat apabila simpangan pendulum pada gelombang laut dengan amplitudo 0.1 meter dan periode 7 s memiliki simpangan pendulum yang lebih tinggi ketika menggunakan massa beban 152 kg.

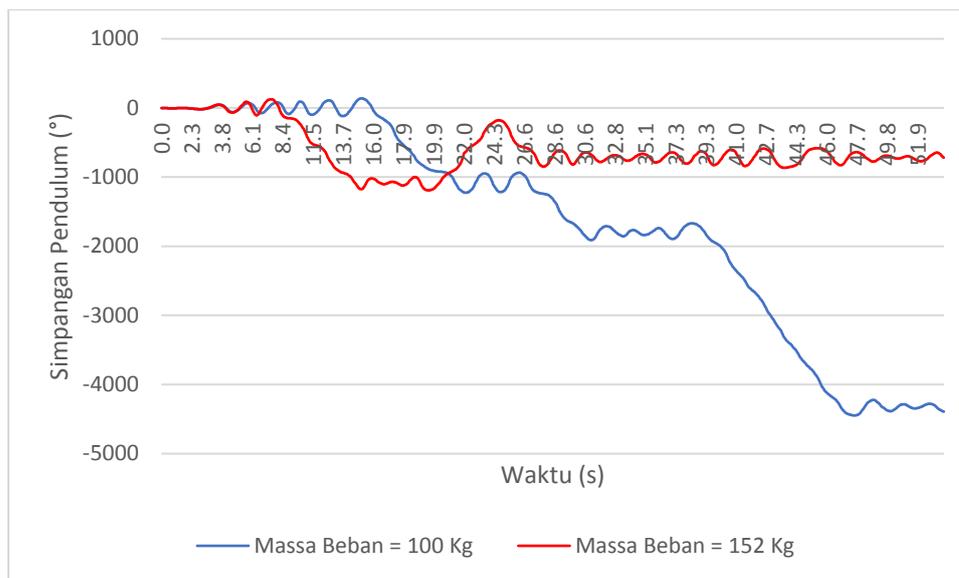
Berikut adalah grafik untuk perbandingan simpangan pendulum dengan panjang lengan 1 meter, pada periode 12 s dan amplitudo gelombang 0.1 meter dengan variasi massa beban pendulum terkait.



**Gambar 4. 22** Perbandingan Simpangan Pendulum Variasi 3 dan 12

Pada gambar 4.22 merupakan perbandingan simpangan pendulum terhadap perubahan massa beban pendulum. Dapat dilihat apabila simpangan pendulum pada gelombang laut dengan amplitudo 0.1 meter dan periode 12 s memiliki simpangan pendulum yang lebih tinggi ketika menggunakan massa beban 100 kg.

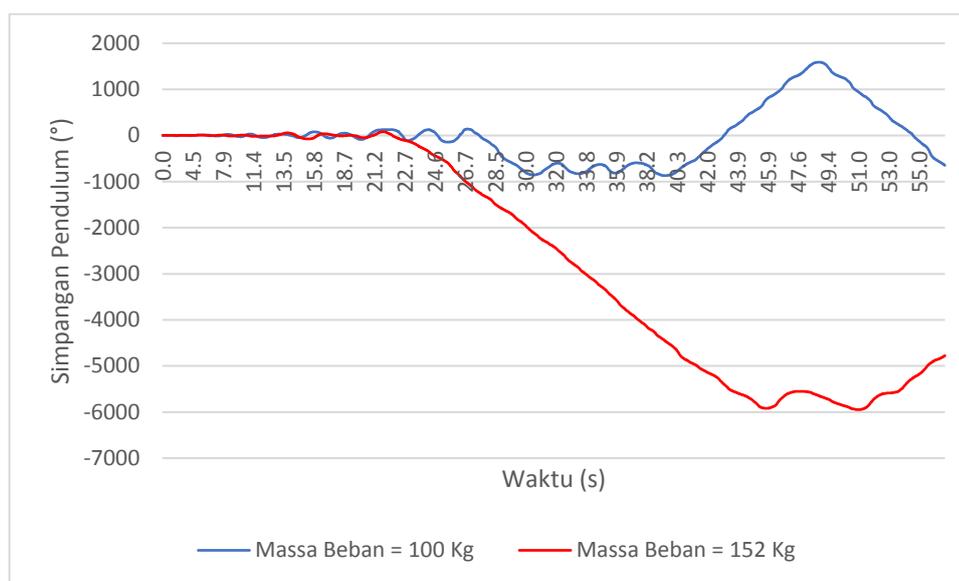
Berikut adalah grafik untuk perbandingan simpangan pendulum dengan panjang lengan 1 meter, pada periode 2.32 s dan amplitudo gelombang 0.35 meter dengan variasi massa beban pendulum terkait.



**Gambar 4. 23** Perbandingan Simpangan Pendulum Variasi 4 dan 13

Pada gambar 4.23 merupakan perbandingan simpangan pendulum terhadap perubahan massa beban pendulum. Dapat dilihat apabila simpangan pendulum pada gelombang laut dengan amplitudo 0.35 meter dan periode 2.32 s juga memiliki simpangan pendulum yang lebih tinggi ketika menggunakan massa beban 100 kg. untuk variasi berikutnya juga memiliki simpangan pendulum yang lebih besar ketika menggunakan massa beban 100 kg, untuk grafik perbandingan lainnya dapat dilihat pada lampiran A.44 hingga A.51.

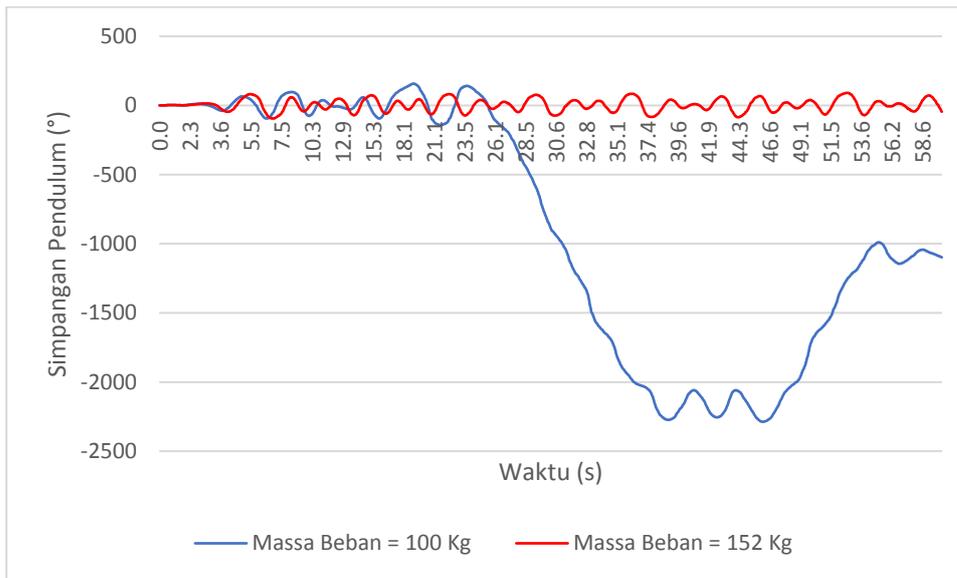
Berikut adalah grafik untuk perbandingan simpangan pendulum dengan panjang lengan 1.25 meter, pada periode 7 s dan amplitudo gelombang 0.35 meter dengan variasi massa beban pendulum terkait.



**Gambar 4. 24** Perbandingan Simpangan Pendulum Variasi 23 dan 32

Pada gambar 4.24 merupakan perbandingan simpangan pendulum terhadap perubahan massa beban pendulum. Dapat dilihat apabila simpangan pendulum pada gelombang laut dengan amplitudo 0.35 meter dan periode 7 s juga memiliki simpangan pendulum yang lebih tinggi ketika menggunakan massa beban 152 kg. untuk variasi berikutnya juga memiliki simpangan pendulum yang lebih besar ketika menggunakan massa beban 152 kg, untuk grafik perbandingan lainnya dapat dilihat pada lampiran A.51 hingga A56.

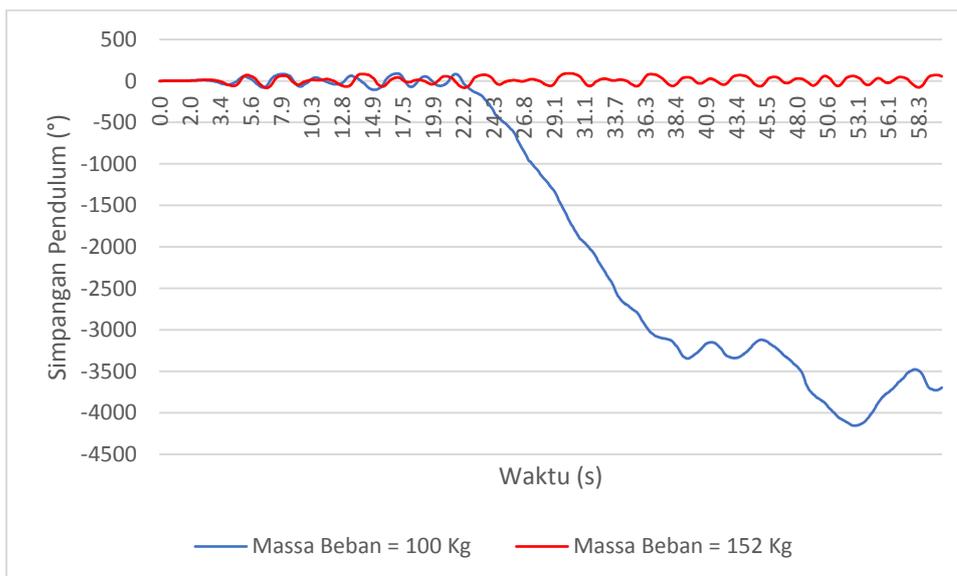
Berikut adalah grafik untuk perbandingan simpangan pendulum dengan panjang lengan 1.5 meter, pada periode 2.32 s dan amplitudo gelombang 0.35 meter dengan variasi massa beban pendulum terkait.



**Gambar 4. 25** Perbandingan Simpangan Pendulum Variasi 40 dan 46

Pada gambar 4.25 merupakan perbandingan simpangan pendulum terhadap perubahan massa beban pendulum. Dapat dilihat apabila simpangan pendulum pada gelombang laut dengan amplitudo 0.35 meter dan periode 2.32 s memiliki simpangan pendulum yang lebih tinggi ketika menggunakan massa beban 100 kg.

Berikut adalah grafik untuk perbandingan simpangan pendulum dengan panjang lengan 1.5 meter, pada periode 2.32 s dan amplitudo gelombang 0.60 meter dengan variasi massa beban pendulum terkait.



**Gambar 4. 26** Perbandingan Simpangan Pendulum Variasi 43 dan 52

Pada gambar 4.26 merupakan perbandingan simpangan pendulum terhadap perubahan massa beban pendulum. Dapat dilihat apabila simpangan pendulum pada gelombang laut dengan amplitudo 0.60 meter dan periode 2.32 s memiliki simpangan pendulum yang lebih tinggi ketika menggunakan massa beban 100 kg sama seperti pada kondisi amplitudo gelombang 0.35 meter. Untuk variasi perbandingan massa beban dengan lengan 1.5 meter dapat dilihat pada lampiran A.57 hingga A.63.

#### **4.4 Kegunaan Dua Pendulum**

Pada desain pembangkit listrik tenaga gelombang laut ini menggunakan dua buah pendulum untuk ilustrasinya dapat dilihat pada gambar 3.3. Digunakannya desain pembangkit listrik tenaga gelombang laut dengan dua pendulum ini karena ketika ponton mengalami *pitching* baik untuk nilai positif maupun negatif harapannya pendulum dapat bekerja secara bergantian. Apabila pendulum dapat bekerja secara bergantian maka rotasi yang disalurkan dari pendulum ke poros utama akan lebih kontinu karena ketika ponton mengalami *pitching* baik nilai positif maupun negatif pembangkit listrik ini tetap dapat melakukan ekstraksi energi dari gelombang laut. Berbeda dengan pembangkit listrik tenaga gelombang laut yang hanya menggunakan 1 pendulum maka hanya dapat melakukan ekstraksi energi dari gelombang laut pada salah satu nilai *pitching* ponton saja antara nilai positif dan negatif. Ketika menggunakan dua buah pendulum tentu massa dari pendulum menjadi dua kali lipat baik untuk massa beban dan lengannya, dan hal tersebut juga sudah diperhitungkan untuk penentuan dari sarat air yang digunakan pada ponton.

#### **4.5 Diskusi**

Pembangkit listrik tenaga gelombang laut sistem bandul merupakan salah satu dari pembangkit listrik energi terbarukan yang memanfaatkan energi dari gelombang laut. Pembangkit listrik ini memanfaatkan gelombang laut untuk memberi *pitching* pada ponton sehingga dapat menggerakkan pendulum yang

berada di atasnya. Kemudian rotasi dari pendulum ini akan dihubungkan pada generator sehingga energi mekanik tersebut dapat dikonversi menjadi energi listrik. Energi listrik inilah yang dapat dimanfaatkan kembali menjadi berbagai macam kegunaan lainnya. Energi listrik dari generator dapat digunakan secara langsung maupun disimpan terlebih dahulu pada baterai.

Pada desainnya pendulum menggunakan variasi panjang lengan pendulum 1, 1.25, dan 1.5 meter serta menggunakan massa beban dengan variasi 100 dan 152 kg. Pemilihan variasi tersebut karena pertimbangan torsi minimum yang harus dicapai untuk penggunaan pada generator 1 KW dengan spesifikasi 600 RPM, melalui perhitungan pada persamaan 2.2, 2.3, dan 2.4. Pada simulasi awal didapatkan nilai *pitching* terendah dengan nilai sekitar  $18.5^\circ$ , maka jika menggunakan panjang lengan pendulum 1 meter harus diberi massa beban minimum 98.45 kg apabila menurut perhitungan dengan menggunakan persamaan tersebut. Dari perhitungan tersebut maka digunakanlah variasi – variasi tersebut pada desainnya. Untuk perhitungan lebih detail dapat dilihat pada lampiran.

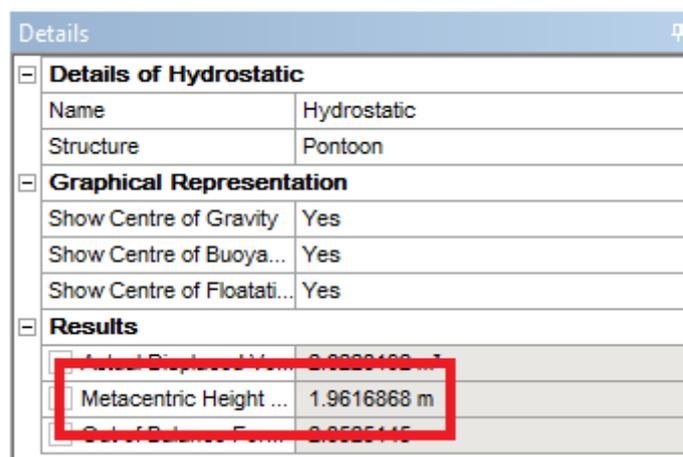
Dalam tugas akhir ini ponton yang digunakan berjenis katamaran dengan ketinggian 1 meter, lebar 1 meter, panjang 4 meter, dan jarak antar ponton 1 meter. Ilustrasi ponton dapat dilihat pada gambar 3.3 dan 3.4. Digunakan simulasi berbasis CFD (*Computational Fluid Dynamic*). Digunakan dua tahapan untuk mendapatkan hasil akhirnya, tahap pertama terdiri dari *hydrodynamics diffraction* dan *hydrodynamics response*. *Hydrodynamics diffraction* digunakan untuk melihat pengaruh gelombang laut terhadap ponton, pada simulasi ini diperlukan untuk melakukan pengaturan mengenai parameter gelombang laut yang digunakan seperti amplitudo, periode, dan arah datang gelombang. Sedangkan *hydrodynamics response* digunakan untuk melihat data *time response analysis* sehingga didapatkan data untuk *pitching* ponton. Simulasi tahap ke dua merupakan simulasi *rigid dynamics*, simulasi ini berguna untuk melihat nilai simpangan yang terjadi pada pendulum akibat dari *pitching* ponton. Variasi yang digunakan pada tugas akhir ini adalah amplitudo gelombang, periode gelombang, panjang lengan, dan massa beban pendulum untuk informasi lebih lanjut mengenai variasi yang digunakan dapat dilihat pada tabel 3.1.

Hasil dari simulasi untuk variasi periode semakin kecil periode gelombang maka nilai *pitching* ponton akan semakin tinggi tetapi ini akan hanya terlihat jelas ketika menggunakan amplitudo gelombang pada 0.1 meter dan beberapa variasi pada amplitudo gelombang 0.35 meter. Dan ketika pada amplitudo gelombang 0.60 meter beberapa variasi ponton terlihat lebih tinggi ketika pada periode 7 s dan 12 s. Hal ini terjadi karena ketika menggunakan amplitudo yang tinggi dan menggunakan periode yang rendah maka akan tercipta gelombang laut yang memiliki kecuraman yang tinggi, sedangkan untuk spesifikasi ponton ini sendiri memiliki panjang 4 meter sehingga ketika ponton akan mengalami *pitching* dengan nilai negatif atau menukik akan hanya terjadi dalam rentang yang kecil karena bagian depan ponton sudah mengenai puncak gelombang berikutnya. Hasil grafiknya dapat dilihat pada gambar 4.10 dan 4.11. Menurut teori apabila pada gelombang dengan periode yang kecil atau frekuensi yang besar akan mengakibatkan gerakan yang lebih besar pada benda terapung, jika dibandingkan dengan gelombang yang memiliki frekuensi yang besar (Pecher & Kofoed, 2017).

Pada variasi amplitudo gelombang digunakan variasi untuk 0.1, 0.35, dan 0.60 meter. Untuk semua variasi amplitudo gelombang memiliki nilai *pitching* ponton tertinggi pada variasi 0.60 meter. Semakin tinggi nilai amplitudo gelombang maka akan semakin tinggi juga nilai *pitching* ponton tersebut. Pada beberapa variasi terlihat grafik menunjukkan nilai *pitching* ponton yang naik lalu turun dengan nilai yang kecil (tidak kembali pada posisi sebelum naik) contohnya pada gambar 4.14. pada gambar 4.14 terlihat grafik nilai *pitching* untuk amplitudo 0.60 meter pada detik 18.4 mengalami fenomena ini, hal ini terjadi karena gelombang laut pada variasi tersebut memiliki kecuraman yang tinggi, sedangkan ponton ini memiliki panjang 4 meter sehingga ketika ponton akan mengalami *pitching* dengan nilai negatif atau menukik akan hanya terjadi dalam rentang yang kecil karena bagian depan ponton sudah mengenai puncak gelombang berikutnya. Fenomena ini sering terjadi ketika kondisi gelombang memiliki parameter amplitudo gelombang yang tinggi dan periode gelombang yang rendah.

Perbandingan simpangan pendulum akibat perubahan panjang lengan pendulum merupakan hasil dari simulasi *rigid dynamics*. Untuk hasilnya pada kondisi gelombang 0.1 meter dengan periode 2.32, 7, dan 12 s serta pada kondisi

gelombang 0.35 meter dengan periode 2.32 dan 7 s didapatkan untuk nilai simpangan pendulum tertinggi terjadi ketika menggunakan Panjang lengan 1.25 meter. Kondisi tersebut terjadi ketika menggunakan massa beban 100 kg. sedangkan untuk kondisi lainnya ketika menggunakan massa beban 100 kg rata – rata memiliki simpangan yang lebih tinggi ketika menggunakan Panjang lengan pendulum 1 meter. Untuk kondisi ketika menggunakan variasi massa beban 152 kg rata – rata juga terjadi ketika menggunakan panjang lengan pendulum 1.25 meter. Jadi dapat disimpulkan dari 54 variasi yang digunakan rata – rata memiliki simpangan terbaik ketika menggunakan panjang lengan 1.25 meter. Perubahan penambahan panjang lengan pendulum akan mengakibatkan bertambah tingginya kerangka yang menopangnya dan hal tersebut akan berakibat bergesernya titik gravitasi pada sistem. Namun untuk variasi yang digunakan memiliki panjang lengan terpanjang 1.5 meter sehingga menjadikan variasi ini memiliki titik gravitasi tertinggi dibanding variasi lainnya. Dari hasil simulasi variasi tersebut didapatkan letak titik metasentris berada pada ketinggian 1.961 meter sedangkan letak titik pusat gravitasi berada pada ketinggian 0.4787 meter sehingga letak titik metasentris diatas titik pusat gravitasi sehingga menurut teori ponton ini masih tergolong dalam stabilitas positif (Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan, 2015).



Details	
<b>Details of Hydrostatic</b>	
Name	Hydrostatic
Structure	Pontoon
<b>Graphical Representation</b>	
Show Centre of Gravity	Yes
Show Centre of Buoya...	Yes
Show Centre of Floatati...	Yes
<b>Results</b>	
Metacentric Height ...	1.9616868 m
Centre of Buoyancy ...	0.4787145 m

**Gambar 4. 27** Letak Titik Metasentris Hasil Simulasi

Pada hasil simulasi variasi perubahan massa beban pendulum dengan panjang lengan 1 meter dan parameter gelombang yang digunakan, didapatkan simpangan bandul yang lebih baik ketika menggunakan massa beban 100 kg kecuali pada kondisi amplitudo gelombang 0.1 meter dengan periode 2.32 dan 7 s. Sedangkan

dengan panjang lengan 1.25 meter dan parameter gelombang yang digunakan, didapatkan simpangan bandul yang lebih baik ketika menggunakan massa beban 152 kg kecuali pada kondisi amplitudo gelombang 0.1 meter dengan periode 7 dan 12 s. Jadi karakter ketika pada parameter gelombang yang cenderung lebih tenang didapatkan nilai simpangan yang lebih tinggi ketika menggunakan massa beban 100 kg khususnya ketika menggunakan panjang lengan 1.25 meter. Ketika menggunakan panjang lengan 1.5 meter dan parameter gelombang yang digunakan, didapatkan simpangan bandul yang lebih baik ketika menggunakan massa beban 100 kg untuk periode gelombang 2.32 s pada semua variasi amplitudo gelombang. Untuk variasi periode lainnya simpangan pendulum didapatkan lebih baik ketika menggunakan massa beban pendulum 152 kg.

Dari semua data yang telah diperoleh setelah melakukan simulasi dapat diketahui apabila ketika ponton berada pada gelombang laut dengan periode yang kecil akan mengakibatkan *pitching* ponton yang semakin besar nilainya, seperti yang dapat dilihat pada gambar 4.9. sedangkan apabila amplitudo gelombang semakin besar maka *pitching* ponton akan semakin besar juga, seperti yang dapat dilihat pada gambar 4.12. Hasil nilai akan semakin terlihat perbedaannya ketika pada gelombang laut yang memiliki jarak antar puncak gelombangnya yang semakin jauh (panjang gelombang). Jadi ponton akan dapat melakukan ekstraksi energi yang lebih baik ketika digunakan pada gelombang dengan jarak antar puncak gelombang yang tidak terlalu dekat, contohnya ketika pada gelombang laut dengan amplitudo 0.6 meter dan periode 2.32 s. Jarak antar puncak gelombangnya berdekatan jadi ponton kurang bisa untuk mengalami *pitching* mengikuti profil gelombang, justru ponton akan memecah gelombang berikutnya yang datang. Untuk simpangan pendulum terbaik rata - rata didapatkan ketika menggunakan panjang lengan pendulum 1.25 meter nilai ini terlihat ketika menggunakan parameter amplitudo gelombang yang kecil yaitu untuk amplitudo 0.1 dan 0.35. Sedangkan untuk amplitudo gelombang 0.60 meter hasil terbaik rata - rata didapatkan pada panjang lengan pendulum 1 dan 1.5 meter. Hal ini terjadi karena pada panjang gelombang 0.60 meter kurang bisa melakukan ekstraksi energi karena panjangnya ponton. Untuk variasi massa beban didapatkan nilai simpangan terbaik rata - rata ketika menggunakan massa 100 kg ketika pada gelombang dengan

amplitude 0.1 dan 0.35 meter sedangkan ketika amplitudo 0.60 meter hasil simpangan pendulum terbaik ketika menggunakan massa beban 152 kg.

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berikut adalah kesimpulan yang didapatkan setelah melakukan penelitian ini, antara lain:

- Semakin kecil nilai periode gelombang maka akan semakin besar nilai *pitching* ponton. Sedangkan semakin besar nilai amplitudo gelombang maka akan semakin besar nilai *pitching* ponton. Didapatkan nilai *pitching* ponton terbesar dari semua variasi terjadi pada variasi ke 44 dengan amplitudo gelombang 0.60 meter dan periode 7 s sebesar  $88.721^\circ$
- Panjang lengan pendulum 1.25 meter memiliki nilai simpangan terbesar ketika pada gelombang dengan amplitudo 0.1 dan 0.35 meter. Sedangkan untuk panjang lengan 1 dan 1.5 meter memiliki simpangan terbesar ketika amplitudo gelombang 0.60 meter. Untuk massa beban 100 kg memiliki nilai simpangan terbaik ketika pada gelombang dengan amplitudo 0.1 dan 0.35 meter sedangkan massa beban 152 kg memiliki nilai simpangan terbaik ketika pada gelombang dengan amplitudo 0.60 meter. Didapatkan nilai simpangan pendulum terbesar dari semua variasi terjadi pada variasi ke 53 dengan amplitudo gelombang 0.6 meter dan periode 7 s, serta panjang lengan pendulum 1.5 meter dan massa beban 152 kg sebesar  $10275^\circ$  atau mengalami sebanyak 27.777 kali putaran.

#### **5.2 Saran**

Berikut adalah saran yang dapat diberikan setelah melakukan penelitian ini, antara lain:

- Menambahkan pembatas pada samping lengan untuk membatasi simpangan pendulum agar ekstraksi lebih maksimal.
- Melakukan variasi pada arah datang gelombang karena hal tersebut juga mempengaruhi nilai *pitching* ponton.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR PUSTAKA

- (2020). Retrieved from AliExpress:  
<https://id.aliexpress.com/item/32934791825.html>
- Ardakani, H. A., & J., T. (2011). Shallow-water Sloshing in Vessels Undergoing Prescribed Rigid-body Motion in Three Dimensions. *Fluid Mechanical*, 667, 474 - 519.
- AZ, I. (2015). *RANCANG BANGUN DAN STUDI EKSPERIMEN*. Surabaya.
- Baidowi, A., Arief, I. S., & Munib, A. (2019, Maret). Analysis of the Motion Response on the Cylindrical Platform of the Deep Sea. *International Journal of Marine Engineering Innovation and Research*, 3(4), 118 - 227.
- Barras, B., & Derret, D. (2001). *Ship Stability for Masters And Mates*. Tottenham.
- Darmawan, W. (2018). *Pemodelan Sistem Gerak Pendulum pada Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut - Sistem Bandulan (SB)*. Tugas Akhir, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Teknik Fisika, Surabaya.
- Dewan Energi Nasional. (2018). *Outlook Energi Indonesia 2018*. Jakarta.
- Dewan Energi Nasional. (2019). *Outlook Energi Indonesia 2019*. Jakarta.
- Falnes, J. (2007). A review of wave-energy extraction. *Elsevier Marine Structures*, 185-201.
- Felayati, F. M., Nugroho, T. F., & Fitri, S. P. (2015). Permodelan Sistem Hidrolis Terhadap Variasi Tinggi Gelombang Air Laut Pada Sistem Wave Energy Hyperbaric Converter (WEHC). *Jurnal Teknik ITS*, 1-5.
- Goldman, A. (2012, Oktober 28). *Introduction to Wave Energy Converters*. Retrieved November 4, 2019, from Renewable Green Energy Power: <http://www.renewablegreenenergypower.com/introduction-to-wave-energy-converters-wecs/>
- Isnaini, R. (2016). *Analisis Karakteristik Osilasi Pendulum pada PLTGL-SB*. Surabaya.
- Junianto, S., Mukhtasor, & Prastianto, R. W. (2017). Motion Response Modeling of Catamaran Type for Floating Tidal Current Energy Conversion System n

- Beam Seas Condition. *Proceedings of Academicsera 12th International Conference*, (pp. 1-5). Seoul.
- Kementrian Pendidikan dan Kebudayaan. (2015). *Bangunan dan Stabilitas Kapal Perikanan 1*.
- Kholiq, Y. I. (2019). *Simulasi Respon Gerak Multi Pendulum Pada Ponton Trimaran Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Teknik Fisika, Surabaya.
- Mustofa, Y. B. (2012). Analisa Gerakan Ponton Model Tripod untuk Energi Gelombang Sistem Bandulan. *Jurnal Teknik ITS*, 1, 203-206.
- Nafis, M. I., Arief, I. S., & Musriadi, T. B. (2014). Analisa Perbandingan Gerakan Ponton Model Tripod Sama Kaki dengan Siku-Siku untuk Energi Gelombang Sistem Bandulan. *Jurnal Teknik POMITS*, 49-51.
- Nirmalasari, P. R., & Hendrowati, W. (2014). Studi Eksperimen dan Analisa Energi Listrik yang Dihasilkan Mekanisme Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut dengan Metode Ponton dan Single Pendulum. *Jurnal Teknik POMITS*, 1-6.
- Noerpamoengkas, A., & Ulum, M. (2017). Pemodelan Gerak Pendulum Vertikal pada Konverter Energi Gelombang Berinersia Tambahan Saat Resonansi. *Jurnal IPTEK*, 61-68.
- Pecher, A., & Kofoed, J. P. (2017). *Handbook of Ocean Wave Energy*. Aalborg: Springer.
- Pozzi, N., Passione, B., Bracco, G., & Sirigu, S. A. (2017). Wave Tank Testing of a Pendulum Wave Energy Converter 1:12 Scale Model. *International Journal of Applied Mechanics*, 1-30.
- Primadani, H. A. (2015). *Re-Desain Model Mekanisme PLTGL dengan Metode Ponton Single Pendulum dan Analisa Energi Listrik yang Dihasilkan*. Surabaya.
- Priyadharsi, Kavhita, & Ramya. (2019). A Study on Mathematical Modelling of Ship Stability. *International Journal of Multidisciplinary Research and Studies*, 02(01), 80-90.

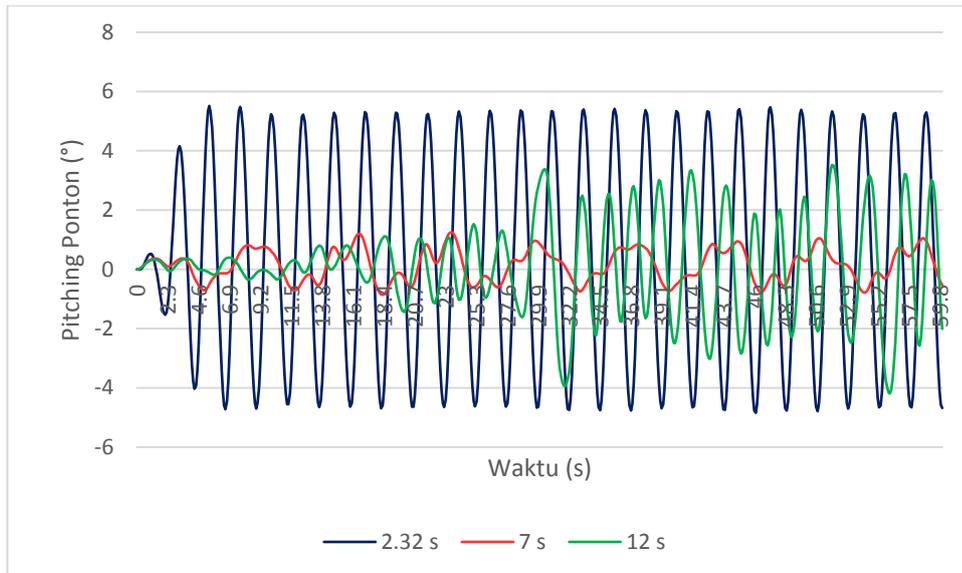
- Rodrigues, L. (2008). *Wave Power Conversion Systems for Electrical Energy Production*. Nova University of Lisbon, Department of Electrical Engineering, Caparica.
- Rumus Hitung*. (2014, Januari 23). Retrieved Februari 15, 2020, from <https://rumushitung.com/2014/01/23/rumus-getaran-harmonik-ayunan-sederhana/>
- Safitri, Y. (2016). *Analisa Respon Gerak Ponton dan Pendulum Vertikal pada Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut- Sistem Bandul (PLTGL-SB)*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Teknik Fisika, Surabaya.
- Said, S. (2014). *Energi Outlook Indonesia*. Jakarta Selatan: Dewan Energi Nasional.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## LAMPIRAN

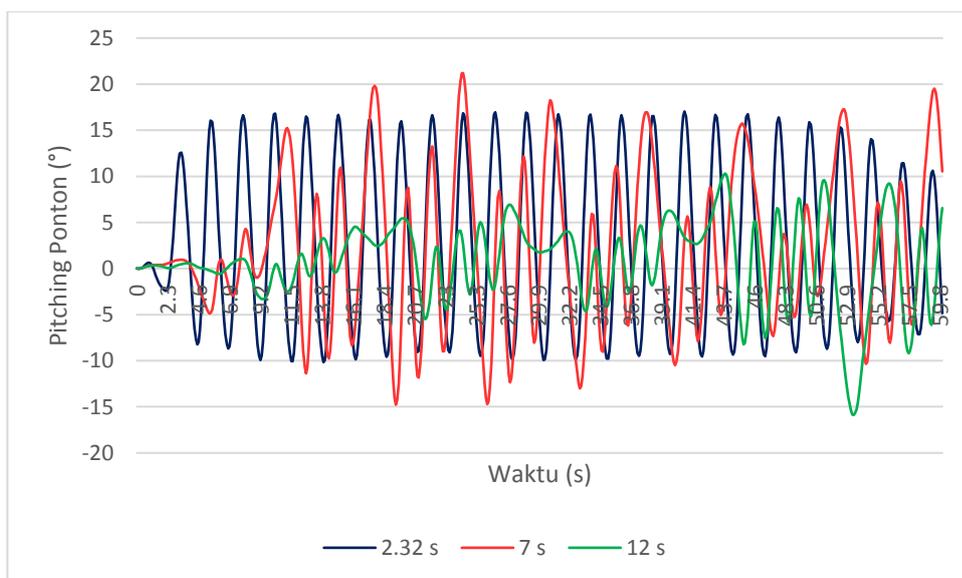
### A. Hasil Simulasi Lain

Berikut untuk gambar A.1 adalah perbandingan untuk variasi periode gelombang dengan amplitude 0.1 meter, massa beban 100 kg, dan panjang lengan pendulum 1.25 meter.



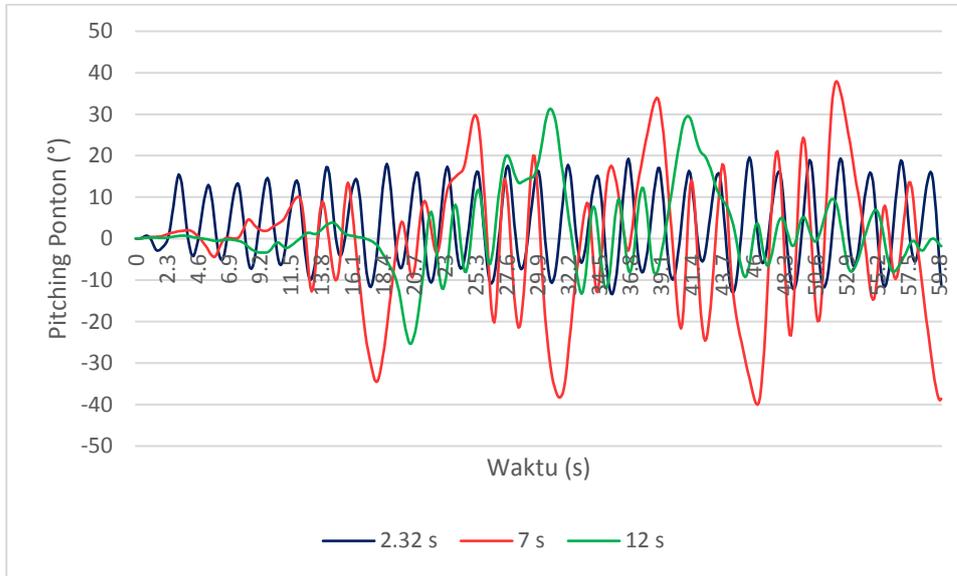
**Gambar A. 1** Perbandingan *Pitching Ponton* Variasi 19, 20, dan 21

Untuk gambar A.2 adalah perbandingan variasi periode gelombang dengan amplitudo 0.35 meter, massa beban 100 kg, dan panjang lengan pendulum 1.25 m.



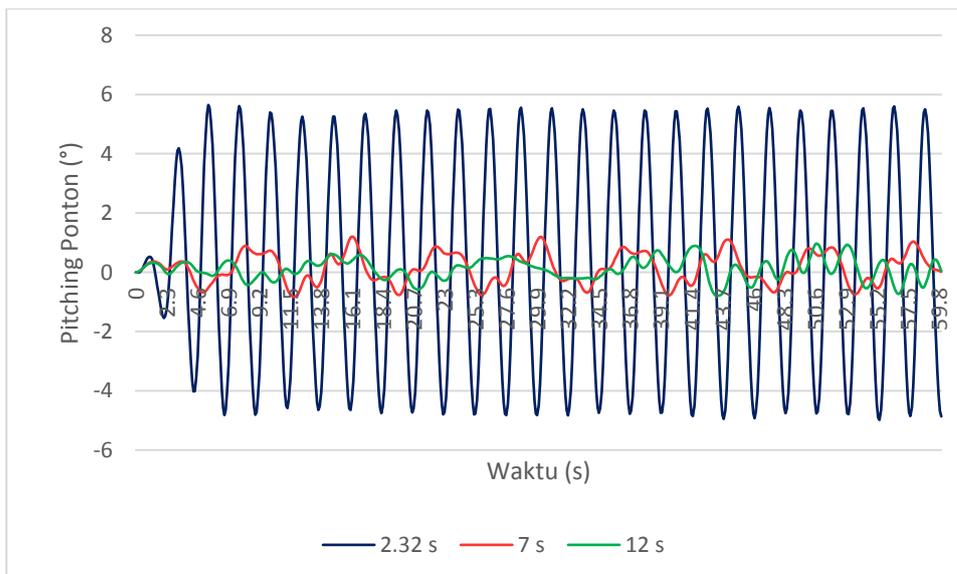
**Gambar A. 2** Perbandingan *Pitching Ponton* Variasi 22, 23, dan 24

Berikut untuk gambar A.3 adalah perbandingan untuk variasi periode gelombang dengan amplitudo 0.60 meter, massa beban 100 kg, dan panjang lengan pendulum 1.25 meter.



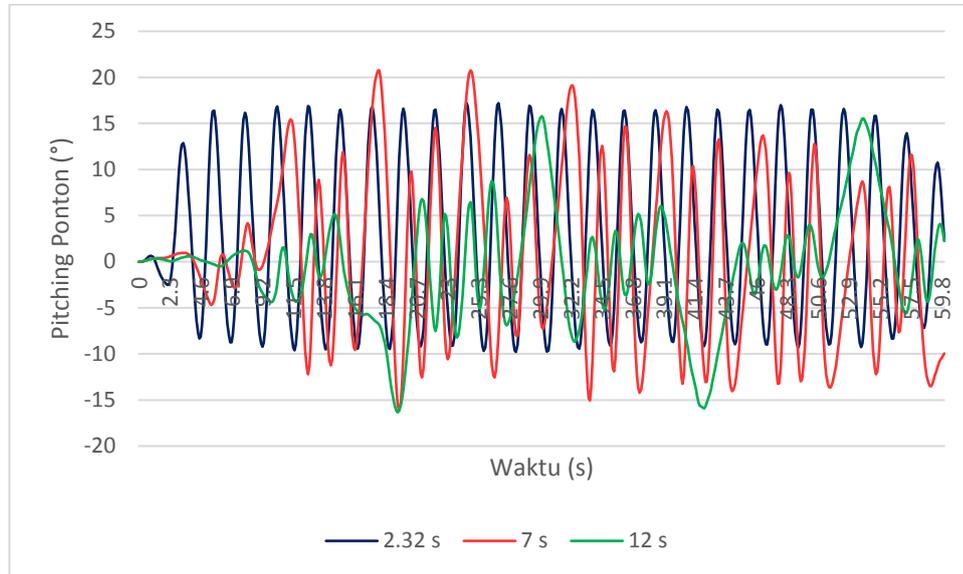
**Gambar A. 3** Perbandingan *Pitching Ponton* Variasi 25, 26, dan 27

Berikut untuk gambar A.4 adalah perbandingan untuk variasi periode gelombang dengan amplitudo 0.1 meter, massa beban 100 kg, dan panjang lengan pendulum 1.5 meter.



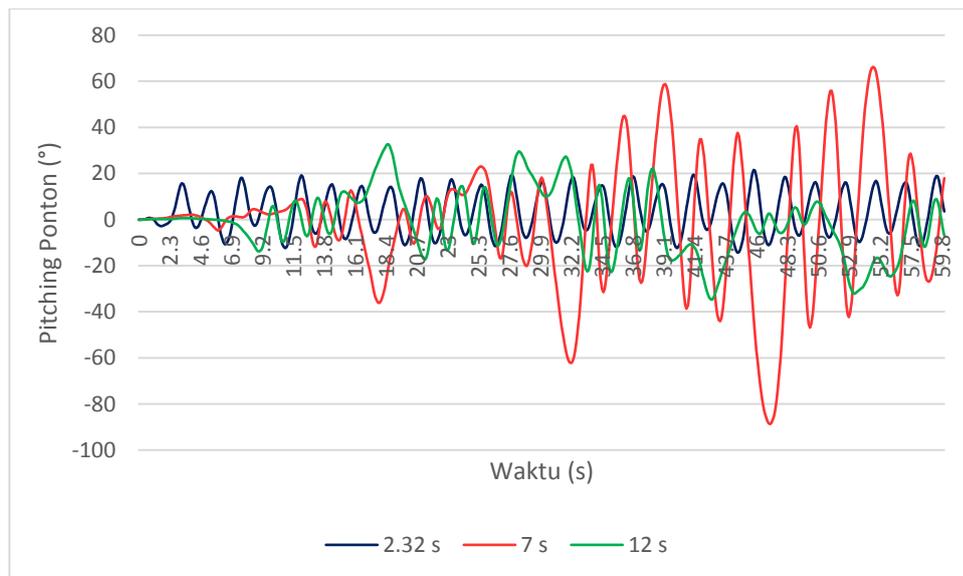
**Gambar A. 4** Perbandingan *Pitching Ponton* Variasi 37, 38, dan 39

Berikut untuk gambar A.5 adalah perbandingan untuk variasi periode gelombang dengan amplitudo 0.35 meter, massa beban 100 kg, dan panjang lengan pendulum 1.5 meter.



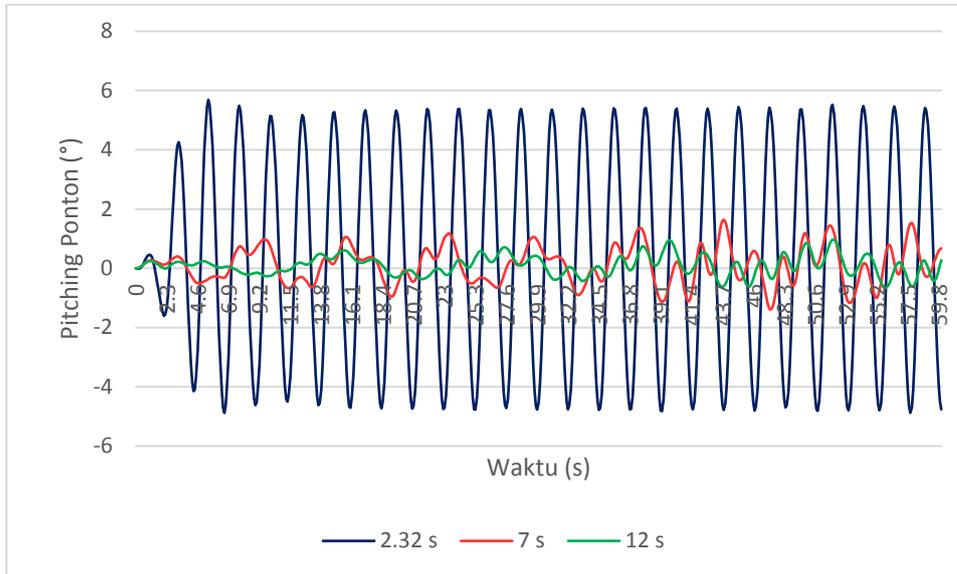
**Gambar A. 5** Perbandingan *Pitching Ponton* Variasi 40, 41, dan 42

Berikut untuk gambar A.6 adalah perbandingan untuk variasi periode gelombang dengan amplitudo 0.60 meter, massa beban 100 kg, dan panjang lengan pendulum 1.5 meter.



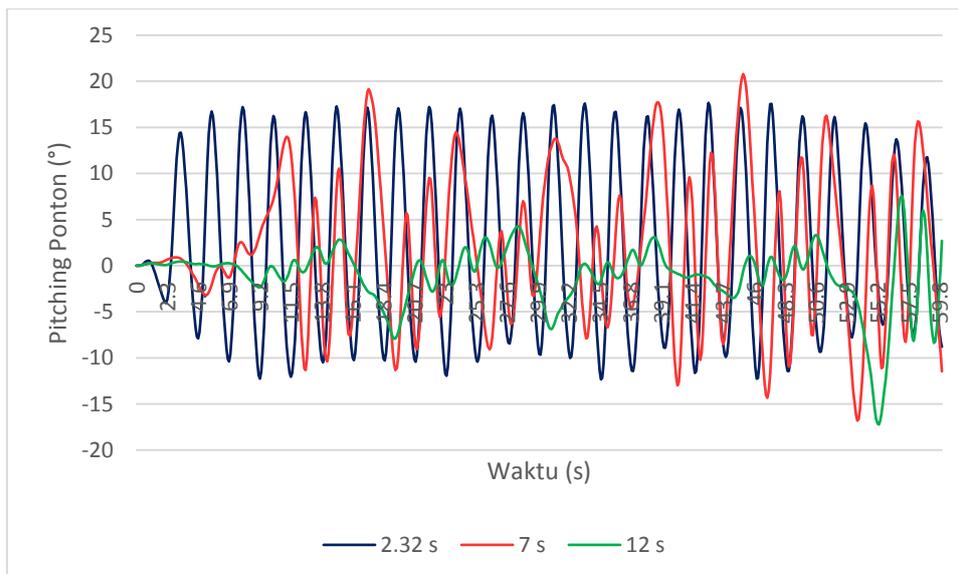
**Gambar A. 6** Perbandingan *Pitching Ponton* Variasi 43, 44, 45

Berikut untuk gambar A.7 adalah perbandingan untuk variasi periode gelombang dengan amplitudo 0.1 meter, massa beban 152 kg, dan panjang lengan pendulum 1 meter.



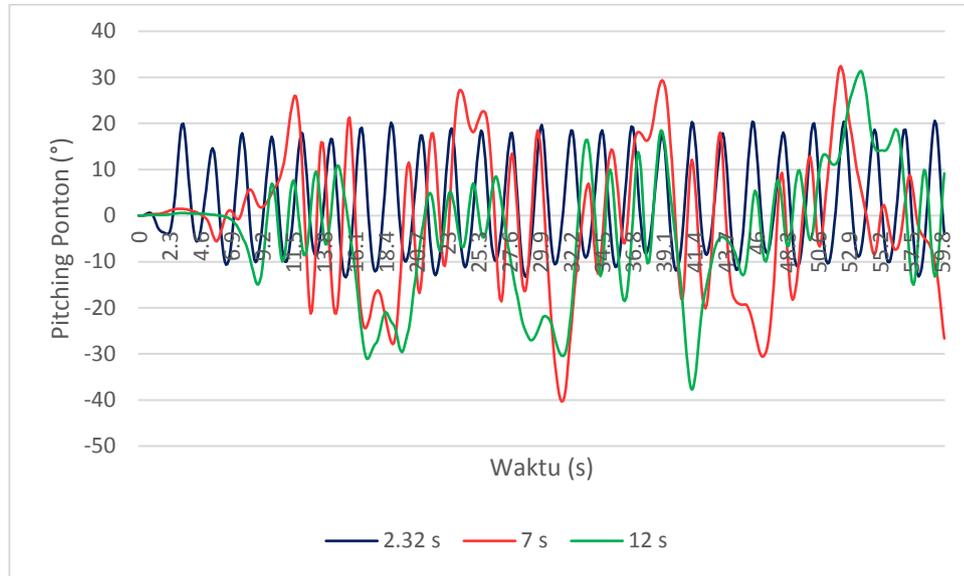
**Gambar A. 7** Perbandingan *Pitching Ponton* Variasi 10, 11, dan 12

Berikut untuk gambar A.8 adalah perbandingan untuk variasi periode gelombang dengan amplitudo 0.35 meter, massa beban 152 kg, dan panjang lengan pendulum 1 meter.



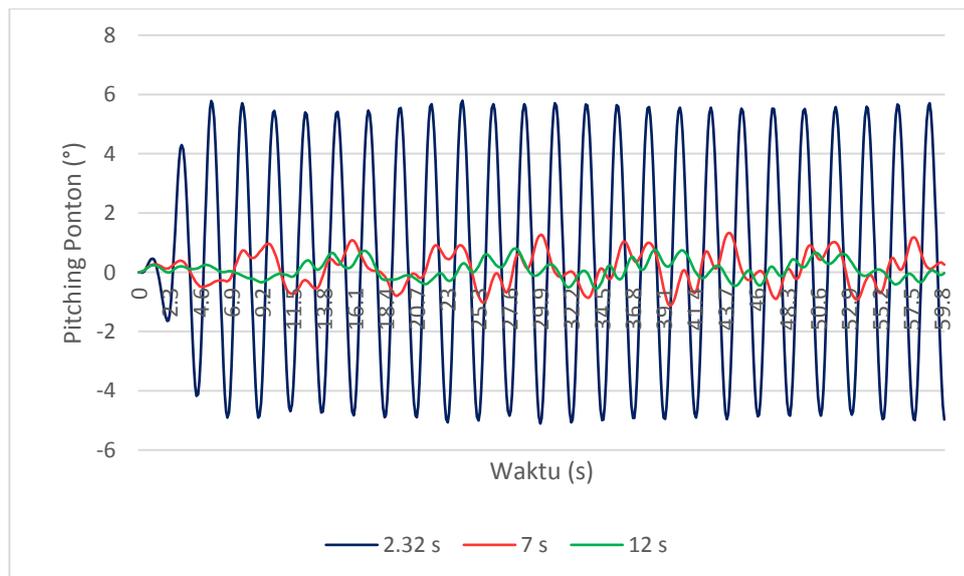
**Gambar A. 8** Perbandingan *Pitching Ponton* Variasi 13, 14, dan 15

Berikut untuk gambar A.9 adalah perbandingan untuk variasi periode gelombang dengan amplitudo 0.60 meter, massa beban 152 kg, dan panjang lengan pendulum 1 meter.



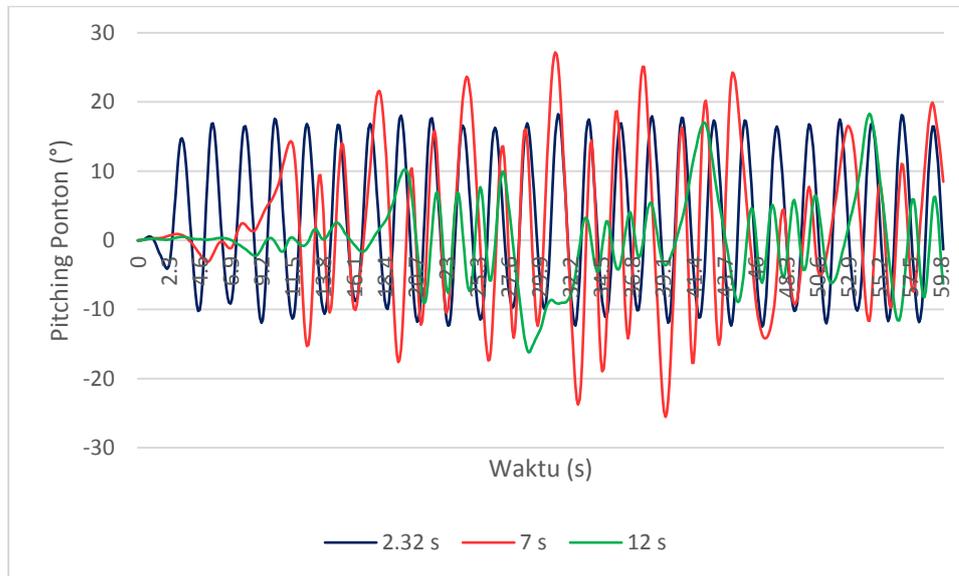
**Gambar A. 9** Perbandingan *Pitching Ponton* Variasi 16, 17, dan 18

Berikut untuk gambar A.10 adalah perbandingan untuk variasi periode gelombang dengan amplitudo 0.1 meter, massa beban 152 kg, dan panjang lengan pendulum 1.25 meter.



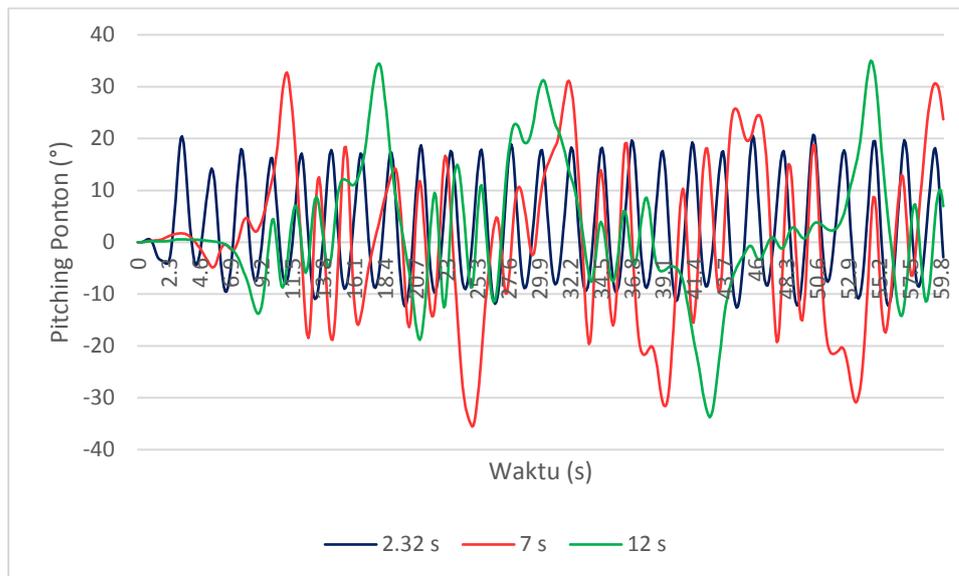
**Gambar A. 10** Perbandingan *Pitching Ponton* Variasi 28, 29, dan 30

Berikut untuk gambar A.11 adalah perbandingan untuk variasi periode gelombang dengan amplitudo 0.35 meter, massa beban 152 kg, dan panjang lengan pendulum 1.25 meter.



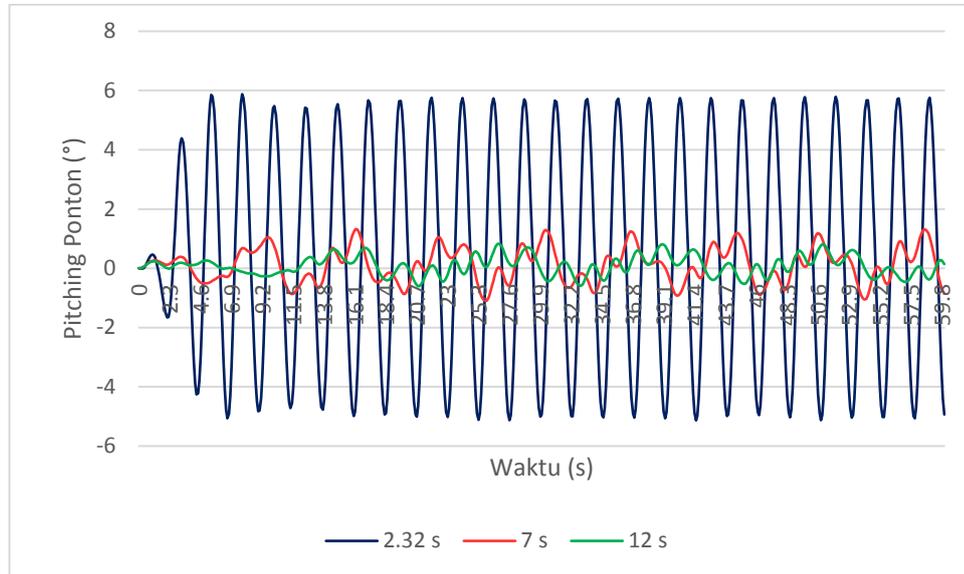
**Gambar A. 11** Perbandingan *Pitching Ponton* Variasi 31, 32, dan 33

Berikut untuk gambar A.10 adalah perbandingan untuk variasi periode gelombang dengan amplitudo 0.60 meter, massa beban 152 kg, dan panjang lengan pendulum 1.25 meter.



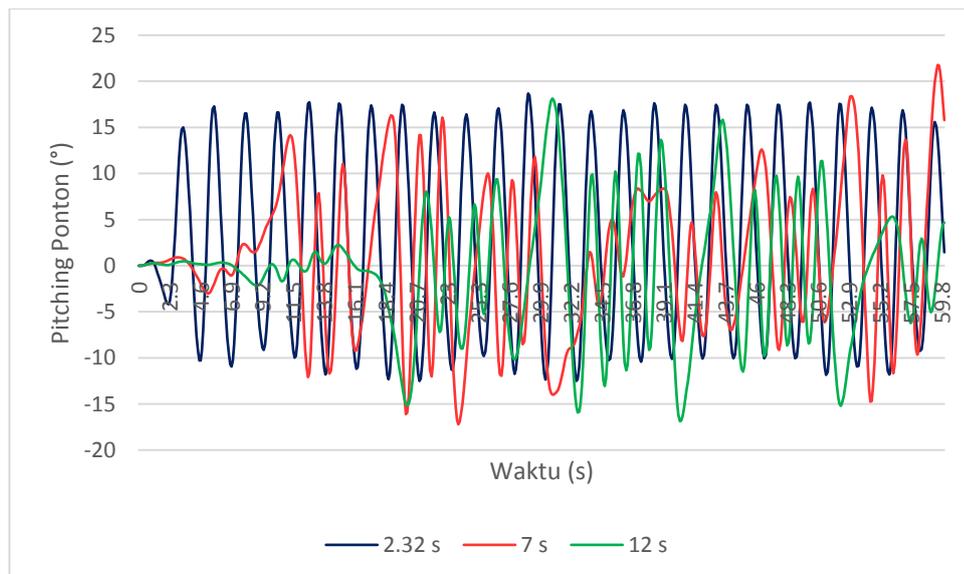
**Gambar A. 12** Perbandingan *Pitching Ponton* Variasi 34, 35, dan 36

Berikut untuk gambar A.13 adalah perbandingan untuk variasi periode gelombang dengan amplitudo 0.1 meter, massa beban 152 kg, dan panjang lengan pendulum 1.5 meter.



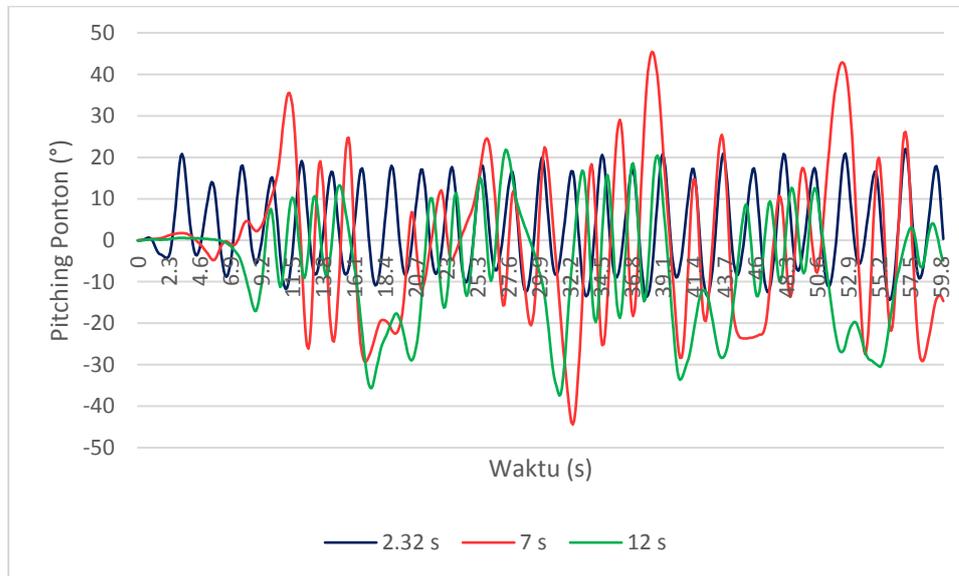
**Gambar A. 13** Perbandingan *Pitching Ponton* Variasi 46, 47, dan 48

Berikut untuk gambar A.14 adalah perbandingan untuk variasi periode gelombang dengan amplitudo 0.35 meter, massa beban 152 kg, dan panjang lengan pendulum 1.5 meter.



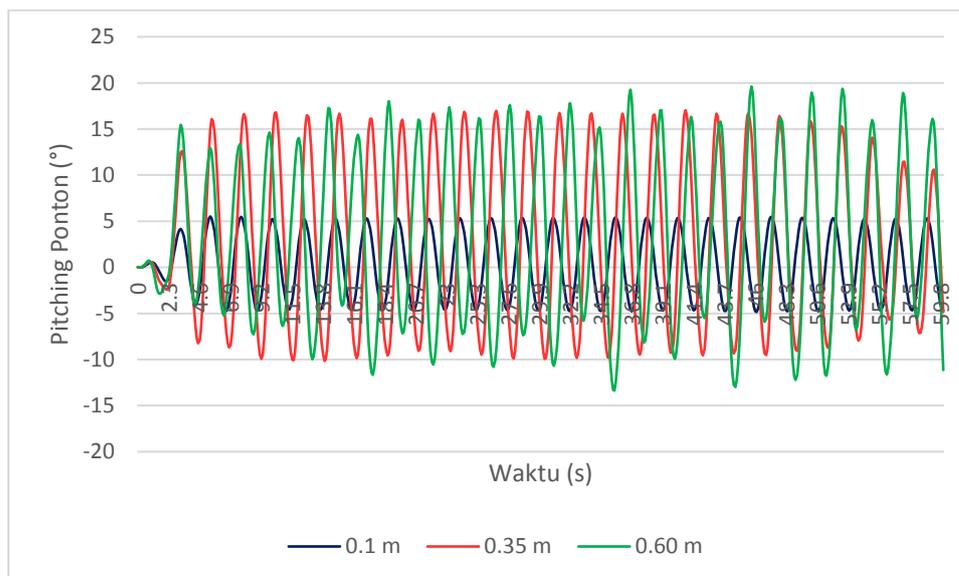
**Gambar A. 14** Perbandingan *Pitching Ponton* Variasi 49, 50, dan 51

Berikut untuk gambar A.13 adalah perbandingan untuk variasi periode gelombang dengan amplitudo 0.60 meter, massa beban 152 kg, dan panjang lengan pendulum 1.5 meter.



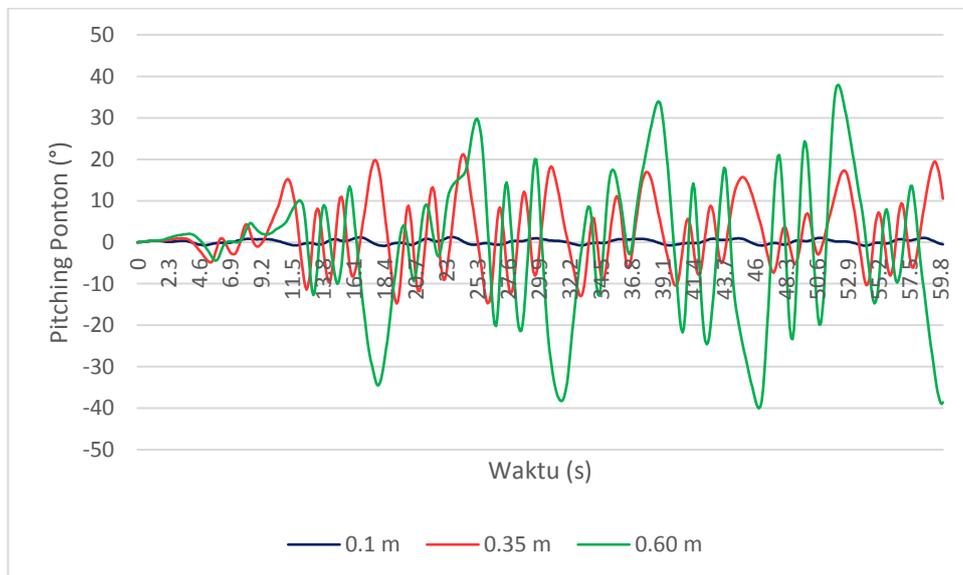
**Gambar A. 15** Perbandingan *Pitching Ponton* Variasi 52, 53, dan 54

Berikut untuk gambar A.16 adalah perbandingan untuk variasi amplitudo gelombang dengan periode 2.32 s, massa beban 100 kg, dan panjang lengan pendulum 1.25 meter.



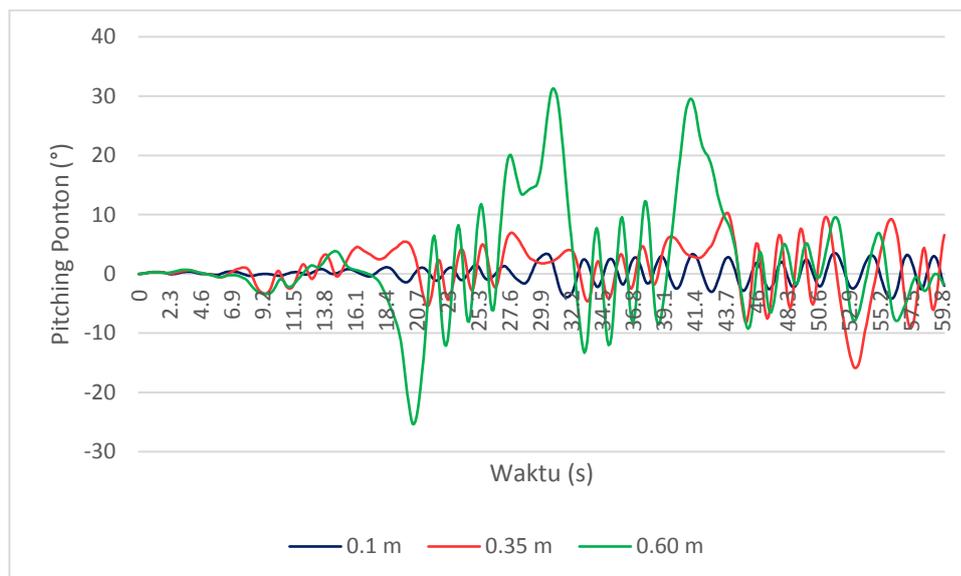
**Gambar A. 16** Perbandingan *Pitching Ponton* Variasi 19, 22, dan 25

Berikut untuk gambar A.17 adalah perbandingan untuk variasi amplitudo gelombang dengan periode 7 s, massa beban 100 kg, dan panjang lengan pendulum 1.25 meter.



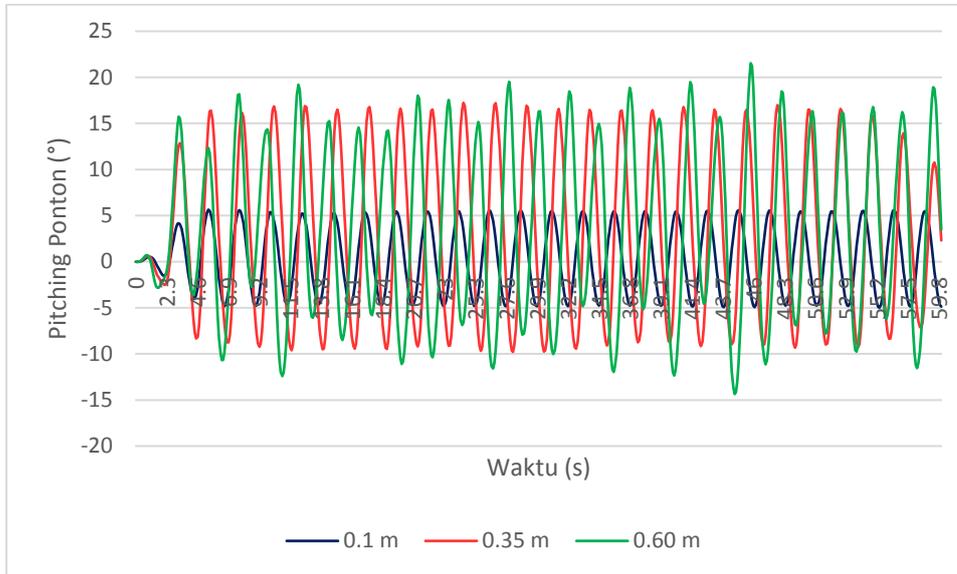
**Gambar A. 17** Perbandingan *Pitching Ponton* Variasi 20, 23, dan 26

Berikut untuk gambar A.18 adalah perbandingan untuk variasi amplitudo gelombang dengan periode 12 s, massa beban 100 kg, dan panjang lengan pendulum 1.25 meter.



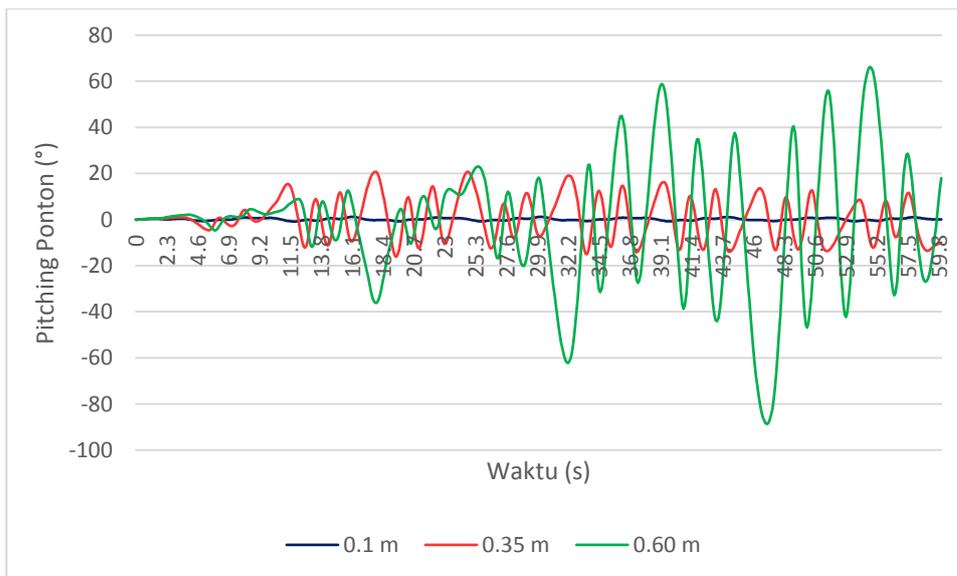
**Gambar A. 18** Perbandingan *Pitching Ponton* Variasi 21, 24, dan 27

Berikut untuk gambar A.19 adalah perbandingan untuk variasi amplitudo gelombang dengan periode 2.32 s, massa beban 100 kg, dan panjang lengan pendulum 1.5 meter.



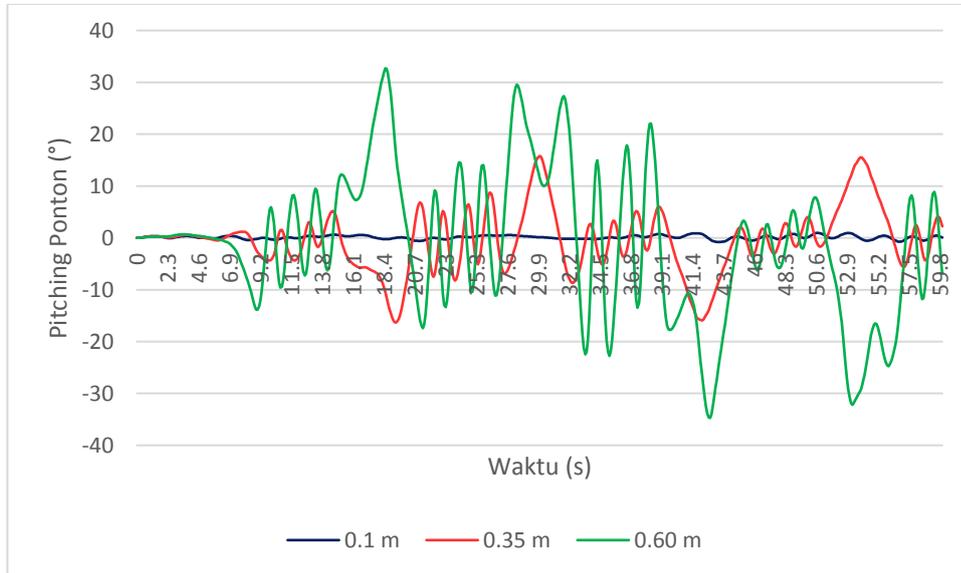
**Gambar A. 19** Perbandingan *Pitching Ponton* Variasi 37, 40, dan 43

Berikut untuk gambar A.20 adalah perbandingan untuk variasi amplitudo gelombang dengan periode 7 s, massa beban 100 kg, dan panjang lengan pendulum 1.5 meter.



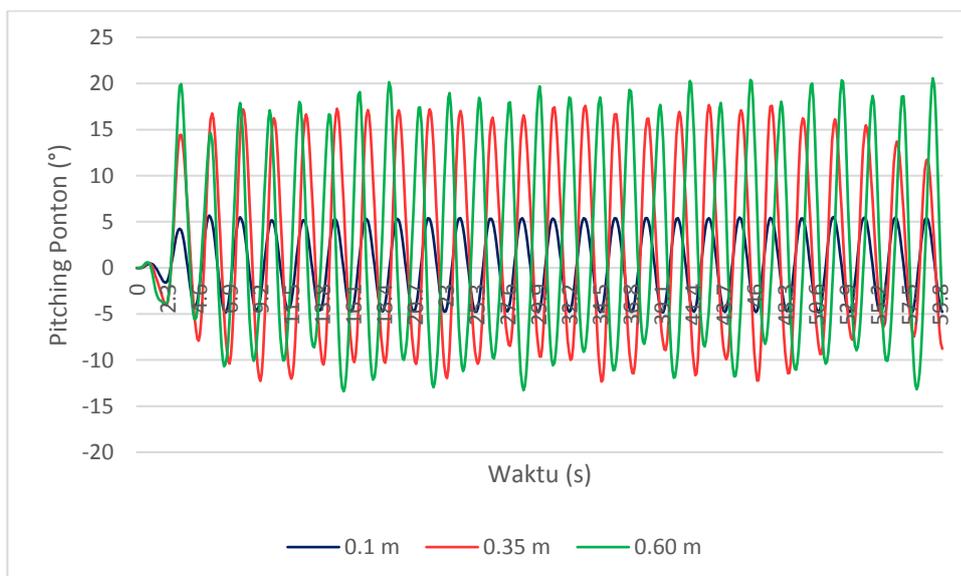
**Gambar A. 20** Perbandingan *Pitching Ponton* Variasi 38, 41, dan 44

Berikut untuk gambar A.21 adalah perbandingan untuk variasi amplitudo gelombang dengan periode 12 s, massa beban 100 kg, dan panjang lengan pendulum 1.5 meter.



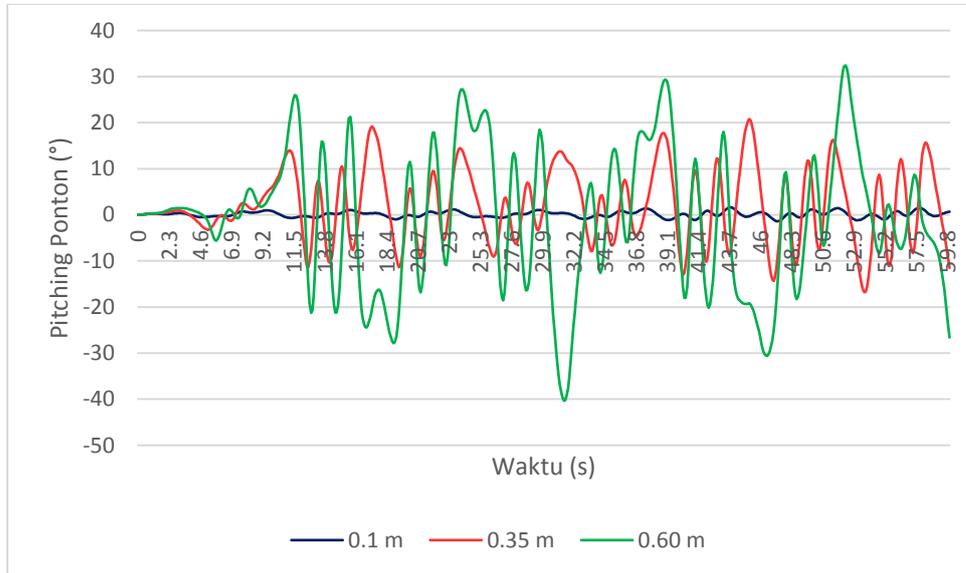
**Gambar A. 21** Perbandingan *Pitching Ponton* Variasi 39, 42, dan 45

Berikut untuk gambar A.22 adalah perbandingan untuk variasi amplitudo gelombang dengan periode 2.32 s, massa beban 152 kg, dan panjang lengan pendulum 1 meter.



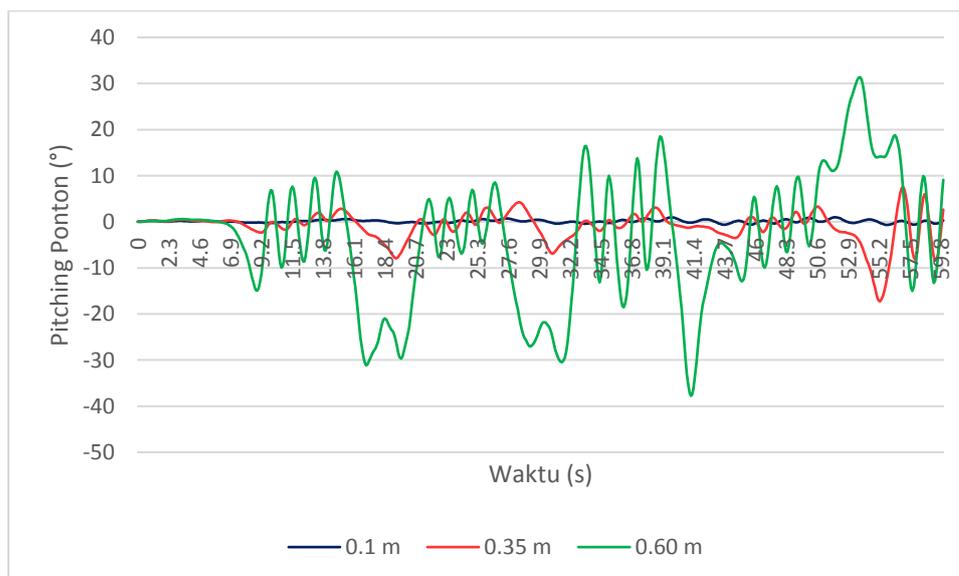
**Gambar A. 22** Perbandingan *Pitching Ponton* Variasi 10, 13, dan 16

Berikut untuk gambar A.23 adalah perbandingan untuk variasi amplitudo gelombang dengan periode 7 s, massa beban 152 kg, dan panjang lengan pendulum 1 meter.



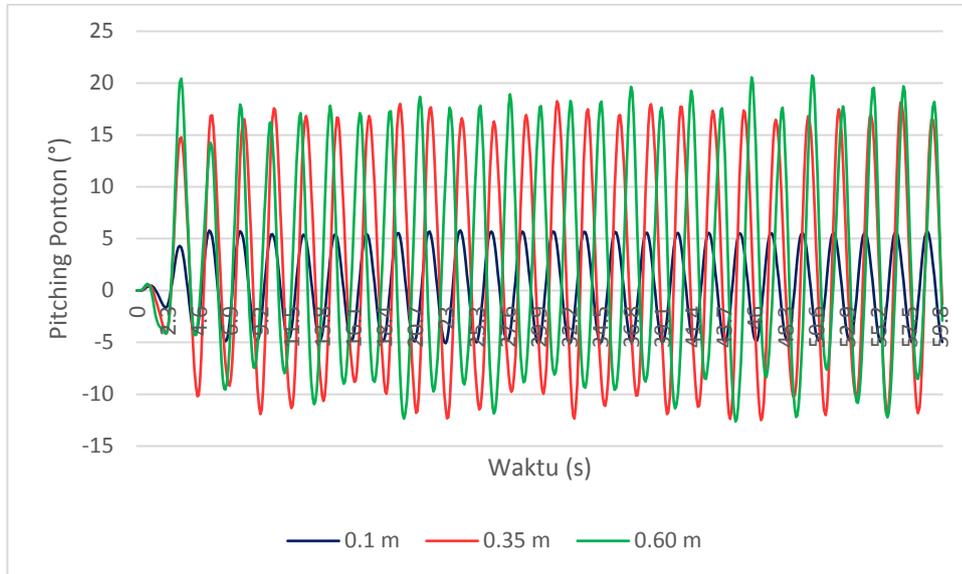
**Gambar A. 23** Perbandingan *Pitching Ponton* Variasi 11, 14, dan 17

Berikut untuk gambar A.24 adalah perbandingan untuk variasi amplitudo gelombang dengan periode 12 s, massa beban 152 kg, dan panjang lengan pendulum 1 meter.



**Gambar A. 24** Perbandingan *Pitching Ponton* Variasi 12, 15, dan 18

Berikut untuk gambar A.25 adalah perbandingan untuk variasi amplitudo gelombang dengan periode 2.32 s, massa beban 152 kg, dan panjang lengan pendulum 1.25 meter.



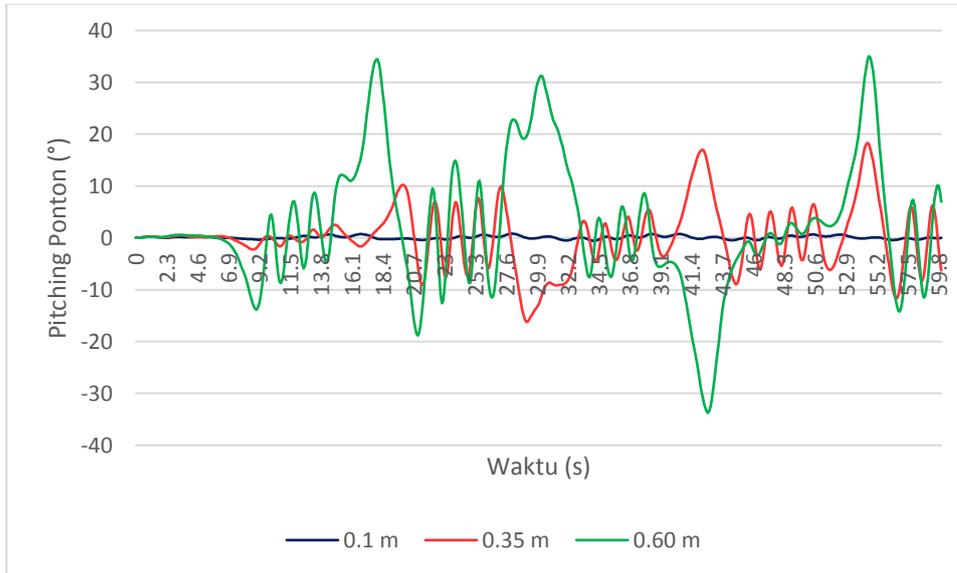
**Gambar A. 25** Perbandingan *Pitching Ponton* Variasi 28, 31, dan 34

Berikut untuk gambar A.25 adalah perbandingan untuk variasi amplitudo gelombang dengan periode 7 s, massa beban 152 kg, dan panjang lengan pendulum 1.25 meter.



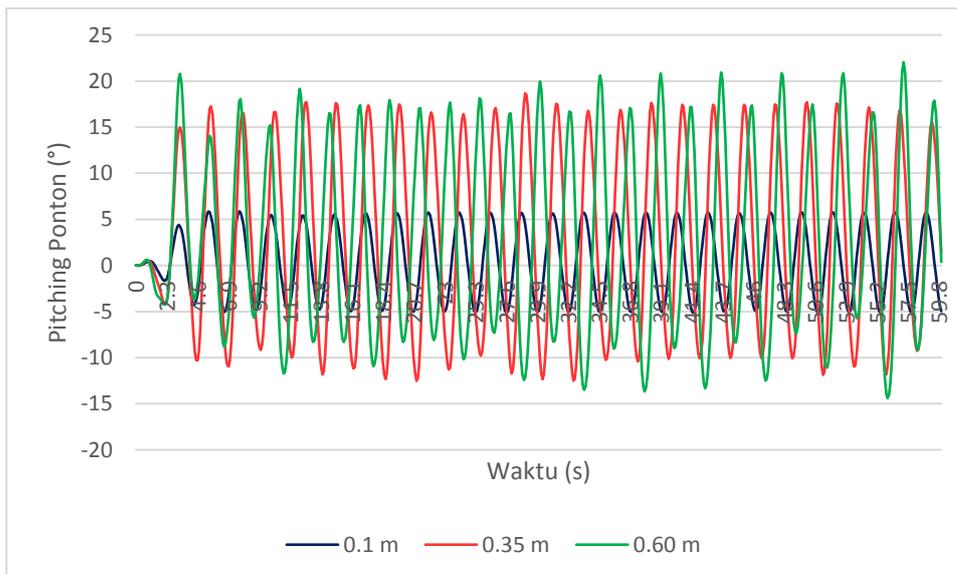
**Gambar A. 26** Perbandingan *Pitching Ponton* Variasi 29, 32, dan 35

Berikut untuk gambar A.27 adalah perbandingan untuk variasi amplitudo gelombang dengan periode 12 s, massa beban 152 kg, dan panjang lengan pendulum 1.25 meter.



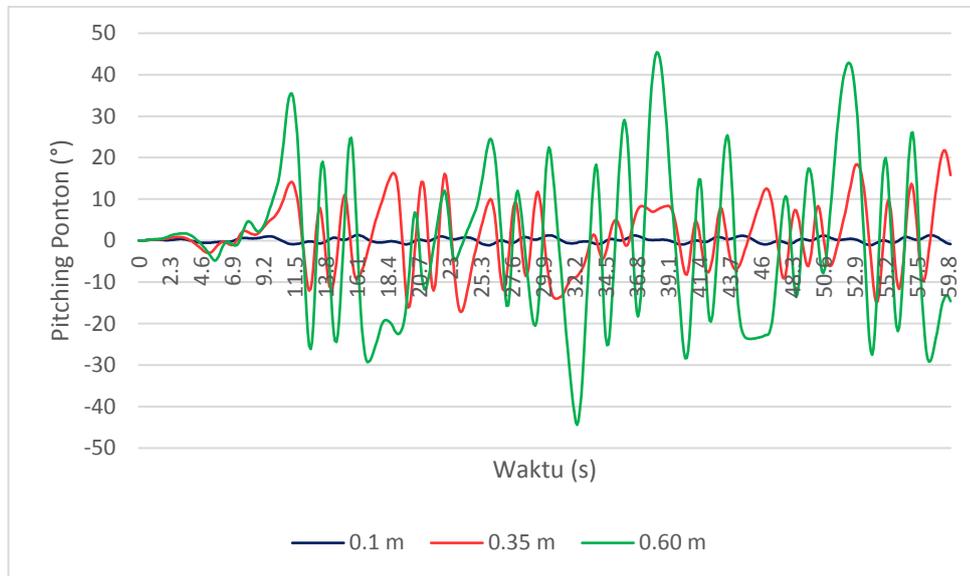
**Gambar A. 27** Perbandingan *Pitching Ponton* Variasi 29, 32, dan 35

Berikut untuk gambar A.28 adalah perbandingan untuk variasi amplitudo gelombang dengan periode 2.32 s, massa beban 152 kg, dan panjang lengan pendulum 1.5 meter.



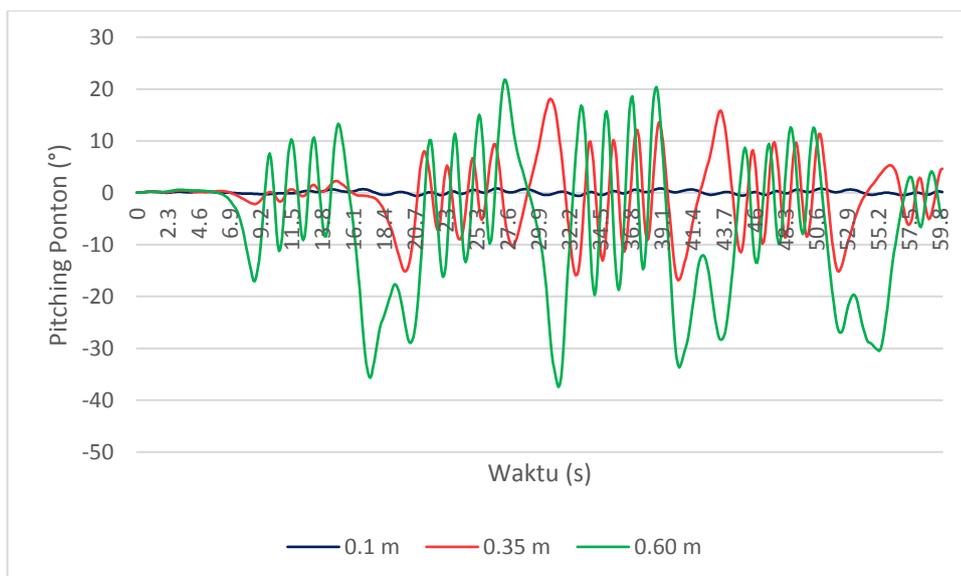
**Gambar A. 28** Perbandingan *Pitching Ponton* Variasi 46, 49, dan 52

Berikut untuk gambar A.29 adalah perbandingan untuk variasi amplitudo gelombang dengan periode 7 s, massa beban 152 kg, dan panjang lengan pendulum 1.5 meter.



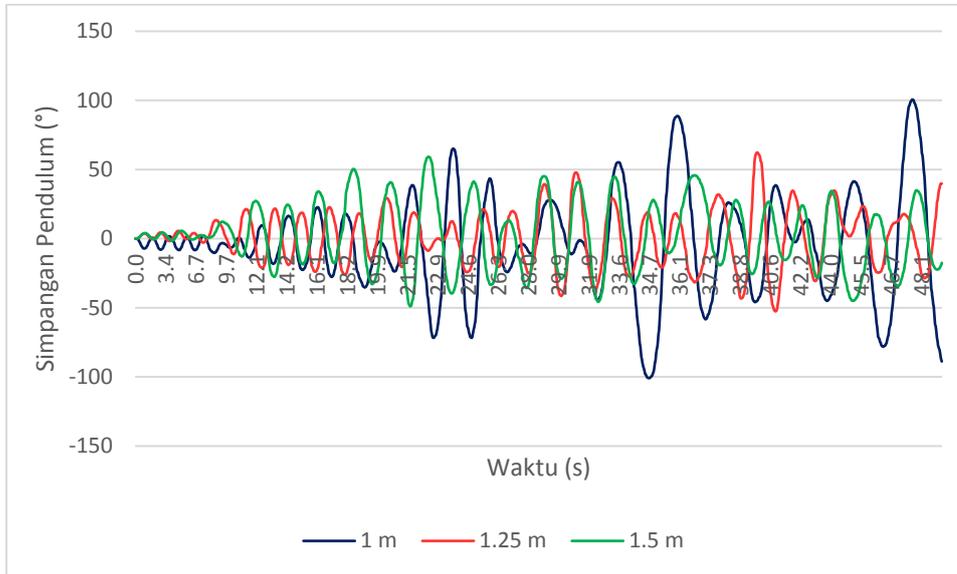
**Gambar A. 29** Perbandingan Pitching Ponton Variasi 47, 50, dan 53

Berikut untuk gambar A.30 adalah perbandingan untuk variasi amplitudo gelombang dengan periode 12 s, massa beban 152 kg, dan panjang lengan pendulum 1.5 meter.



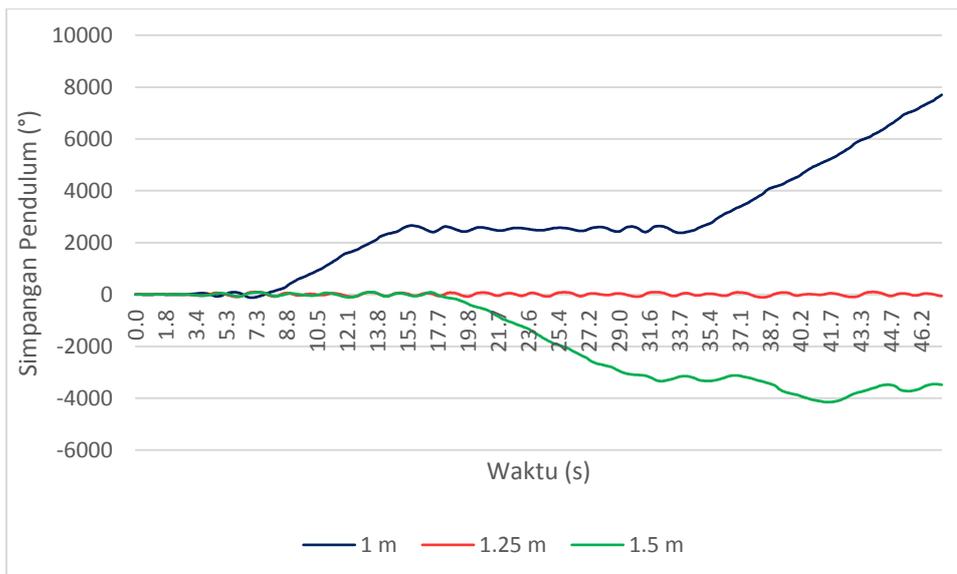
**Gambar A. 30** Perbandingan Pitching Ponton Variasi 48, 51, dan 54

Berikut untuk gambar A.31 adalah perbandingan untuk variasi panjang lengan pendulum dengan amplitudo gelombang 0.35 meter dan periode gelombang 12 s, massa beban 100 kg.



**Gambar A. 31** Perbandingan Simpangan Pendulum Variasi 6, 24, dan 42

Berikut untuk gambar A.32 adalah perbandingan untuk variasi panjang lengan pendulum dengan amplitudo gelombang 0.60 meter dan periode gelombang 2.32 s, massa beban 100 kg.



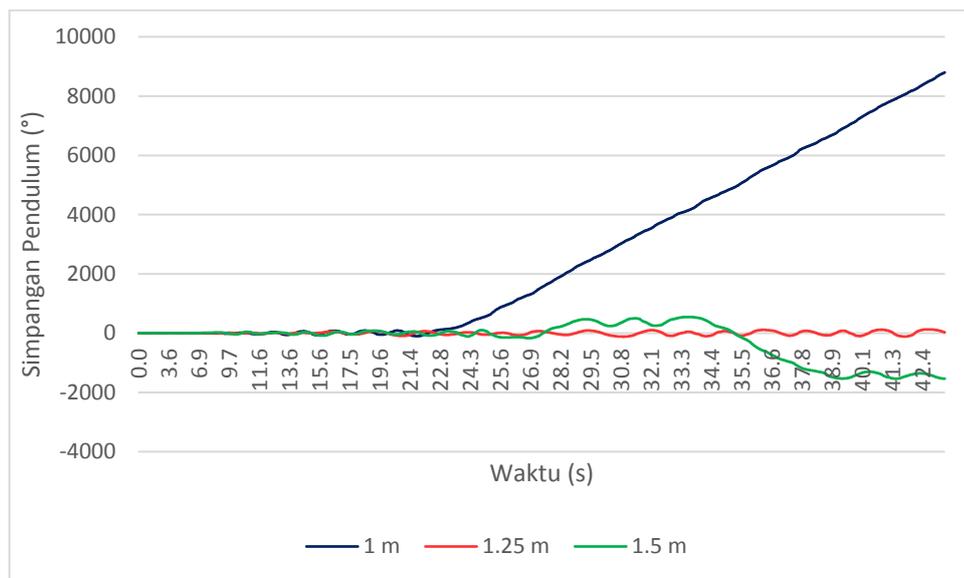
**Gambar A. 32** Perbandingan Simpangan Pendulum Variasi 7, 25, dan 43

Berikut untuk gambar A.33 adalah perbandingan untuk variasi panjang lengan pendulum dengan amplitudo gelombang 0.60 meter dan periode gelombang 7 s, massa beban 100 kg.



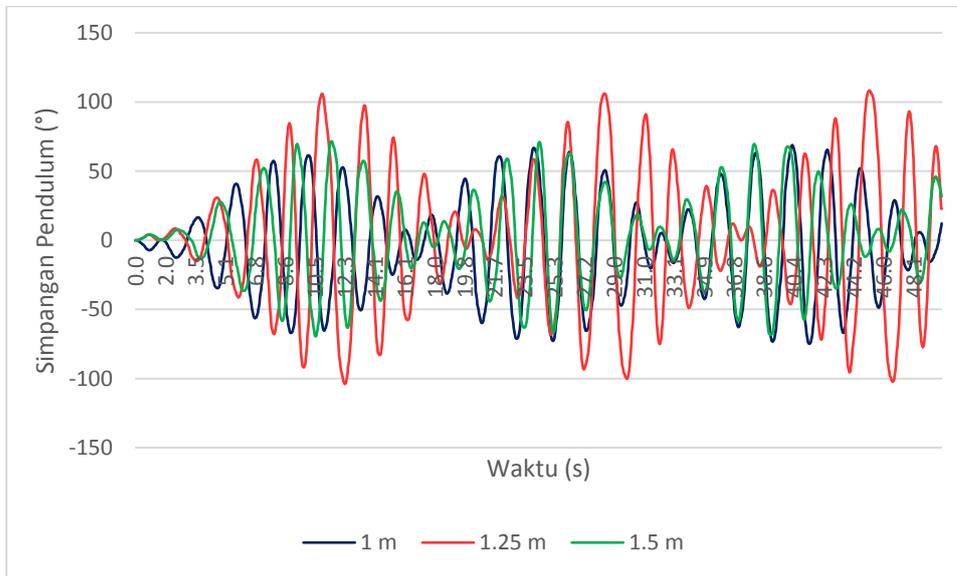
**Gambar A. 33** Perbandingan Simpangan Pendulum Variasi 8, 26, dan 44

Berikut untuk gambar A.34 adalah perbandingan untuk variasi panjang lengan pendulum dengan amplitudo gelombang 0.60 meter dan periode gelombang 12 s, massa beban 100 kg.



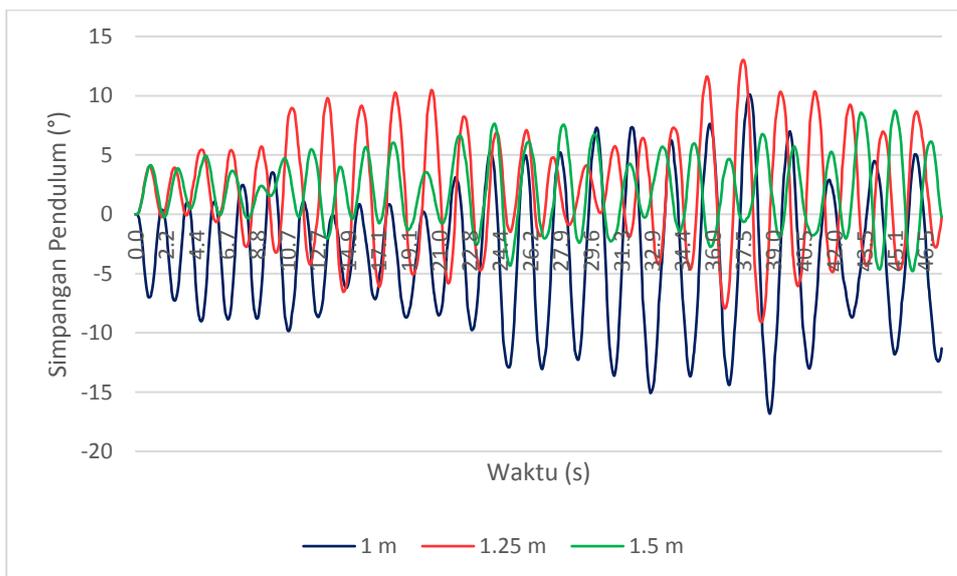
**Gambar A. 34** Perbandingan Simpangan Pendulum Variasi 9, 27, dan 45

Berikut untuk gambar A.35 adalah perbandingan untuk variasi panjang lengan pendulum dengan amplitudo gelombang 0.1 meter dan periode gelombang 2.32 s, massa beban 152 kg.



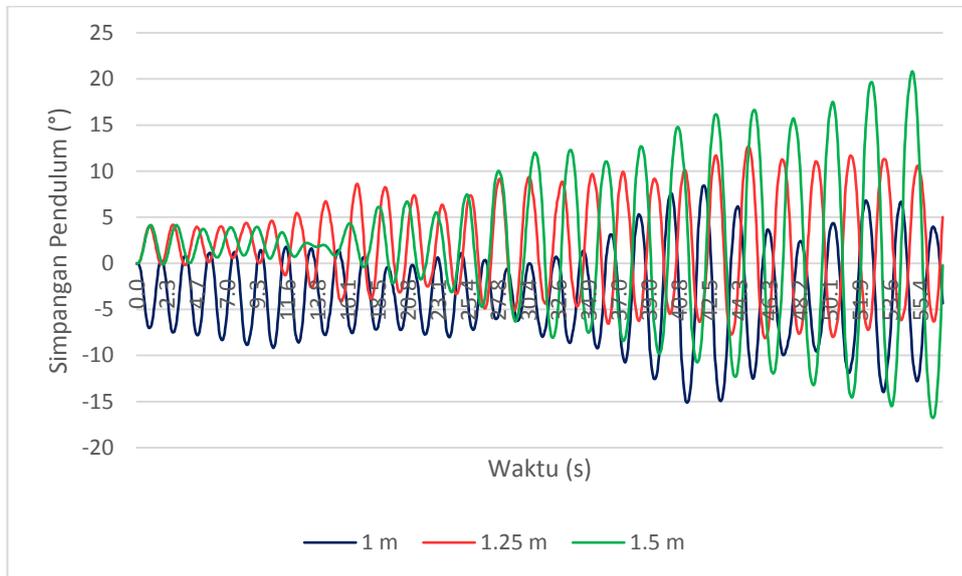
**Gambar A. 35** Perbandingan Simpangan Pendulum Variasi 10, 28, dan 46

Berikut untuk gambar A.36 adalah perbandingan untuk variasi panjang lengan pendulum dengan amplitudo gelombang 0.1 meter dan periode gelombang 7 s, massa beban 152 kg.



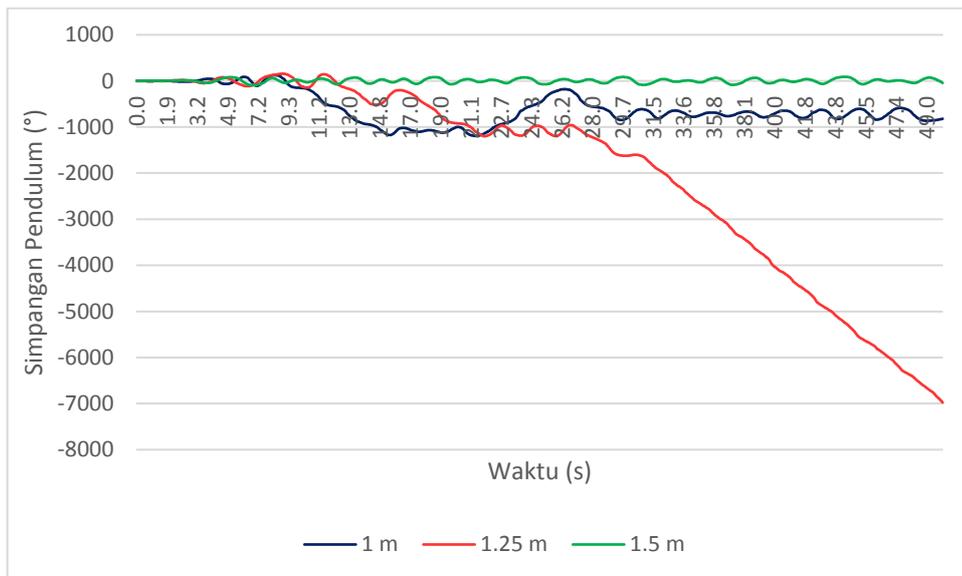
**Gambar A. 36** Perbandingan Simpangan Pendulum Variasi 11, 29, dan 47

Berikut untuk gambar A.37 adalah perbandingan untuk variasi panjang lengan pendulum dengan amplitudo gelombang 0.1 meter dan periode gelombang 12 s, massa beban 152 kg.



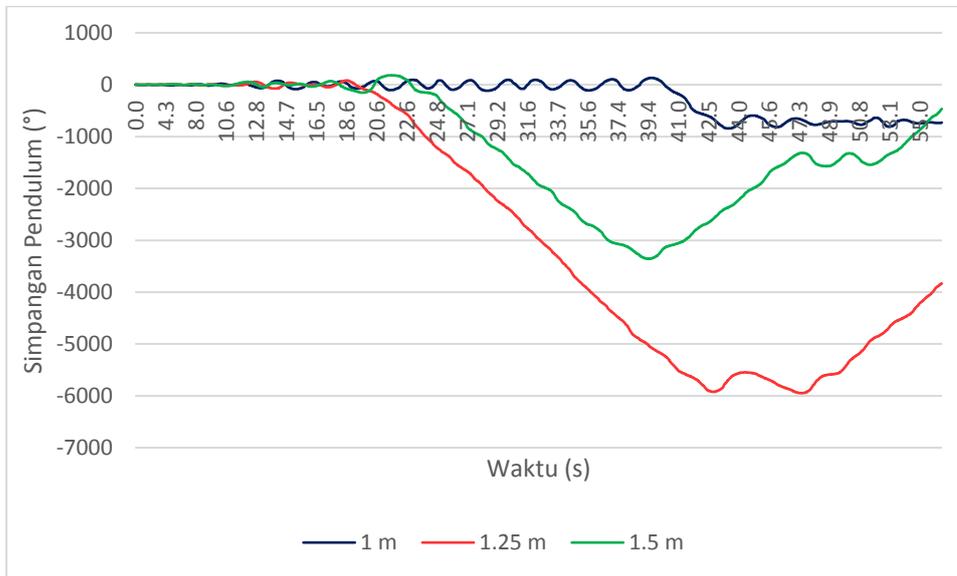
**Gambar A. 37** Perbandingan Simpangan Pendulum Variasi 12, 30, dan 48

Berikut untuk gambar A.38 adalah perbandingan untuk variasi panjang lengan pendulum dengan amplitudo gelombang 0.35 meter dan periode gelombang 2.32 s, massa beban 152 kg.



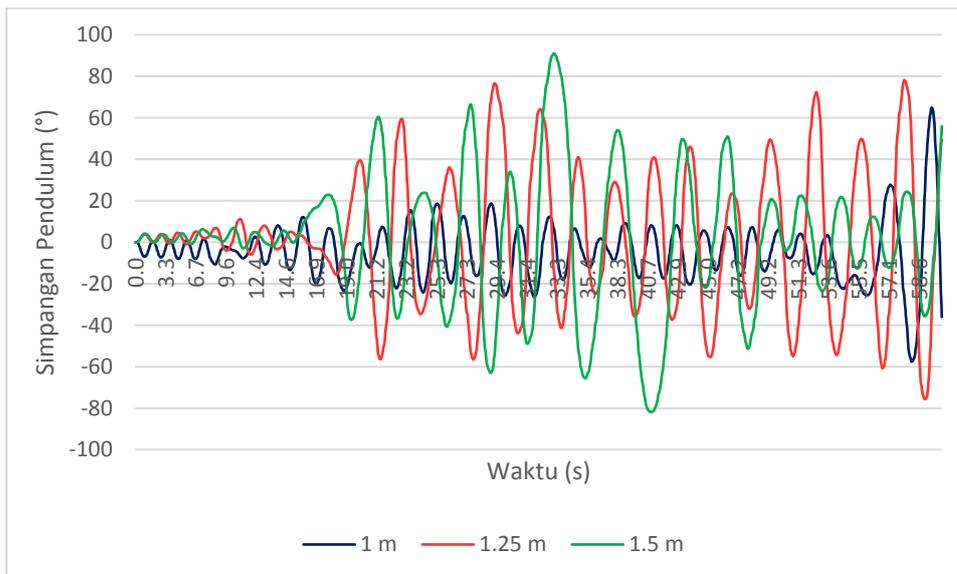
**Gambar A. 38** Perbandingan Simpangan Pendulum Variasi 13, 31, dan 49

Berikut untuk gambar A.39 adalah perbandingan untuk variasi panjang lengan pendulum dengan amplitudo gelombang 0.35 meter dan periode gelombang 7 s, massa beban 152 kg.



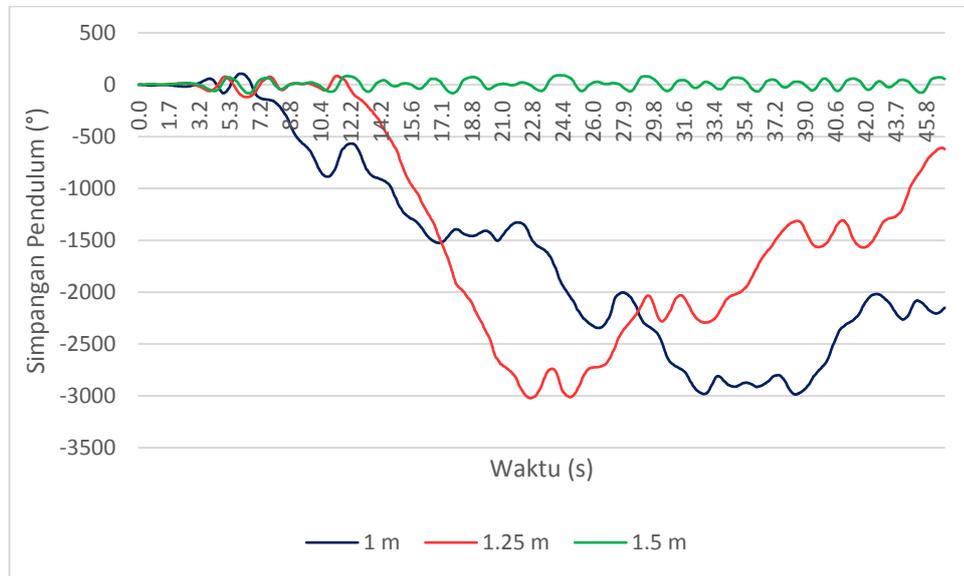
**Gambar A. 39** Perbandingan Simpangan Pendulum Variasi 14, 32, dan 50

Berikut untuk gambar A.40 adalah perbandingan untuk variasi panjang lengan pendulum dengan amplitudo gelombang 0.35 meter dan periode gelombang 12 s, massa beban 152 kg.



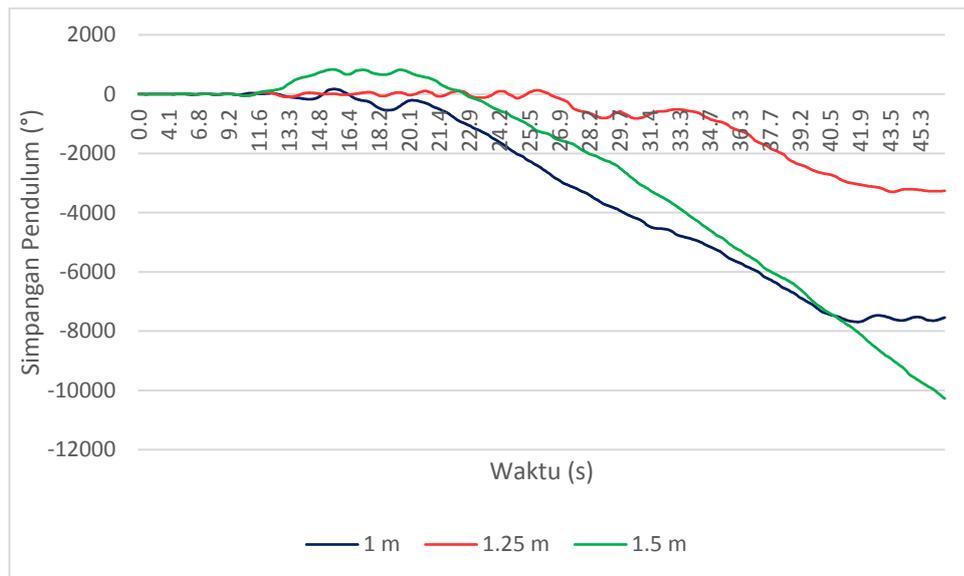
**Gambar A. 40** Perbandingan Simpangan Pendulum Variasi 15, 33, dan 51

Berikut untuk gambar A.41 adalah perbandingan untuk variasi panjang lengan pendulum dengan amplitudo gelombang 0.60 meter dan periode gelombang 2.32 s, massa beban 152 kg.



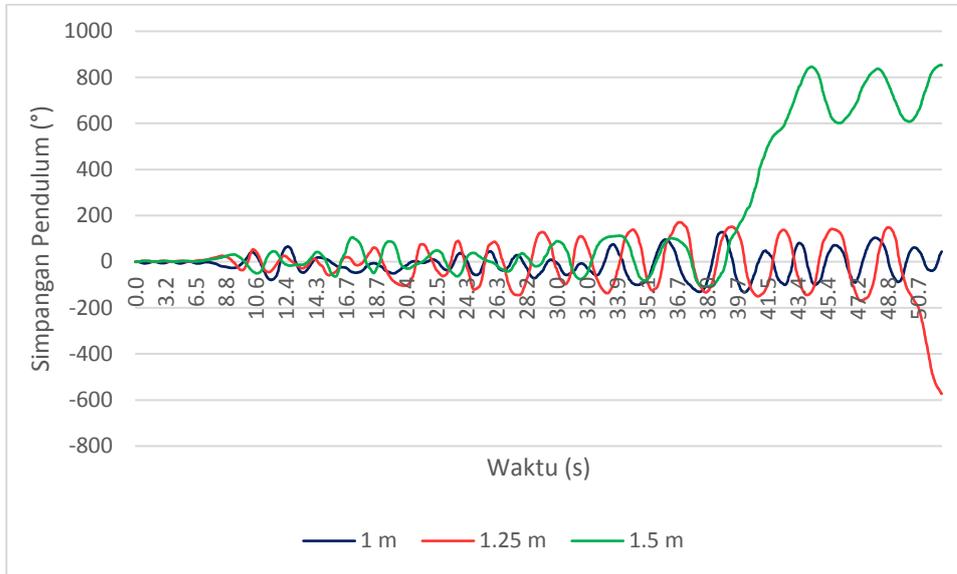
**Gambar A. 41** Perbandingan Simpangan Pendulum Variasi 16, 34, dan 52

Berikut untuk gambar A.42 adalah perbandingan untuk variasi panjang lengan pendulum dengan amplitudo gelombang 0.60 meter dan periode gelombang 7 s, massa beban 152 kg.



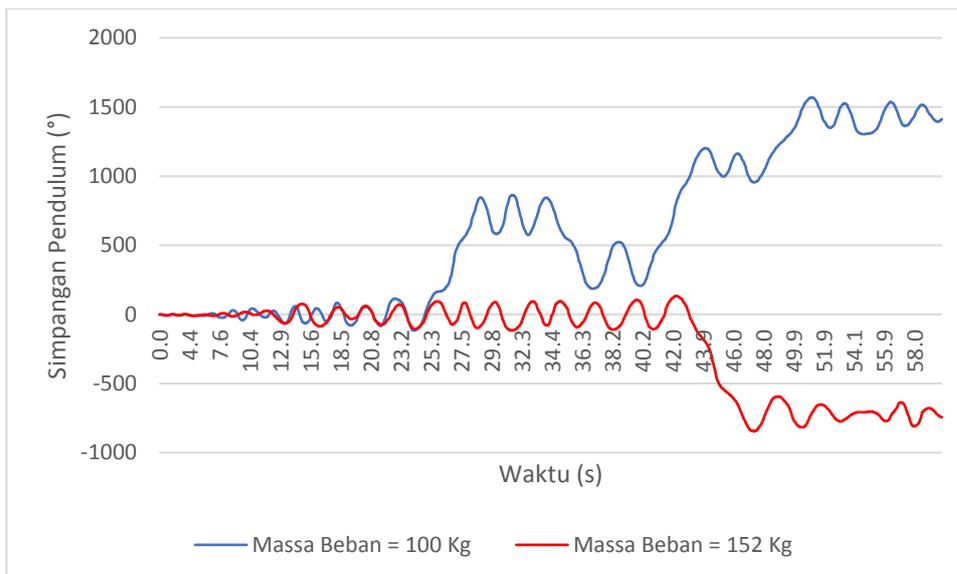
**Gambar A. 42** Perbandingan Simpangan Pendulum Variasi 17, 35, dan 53

Berikut untuk gambar A.43 adalah perbandingan untuk variasi panjang lengan pendulum dengan amplitudo gelombang 0.60 meter dan periode gelombang 12 s, massa beban 152 kg.



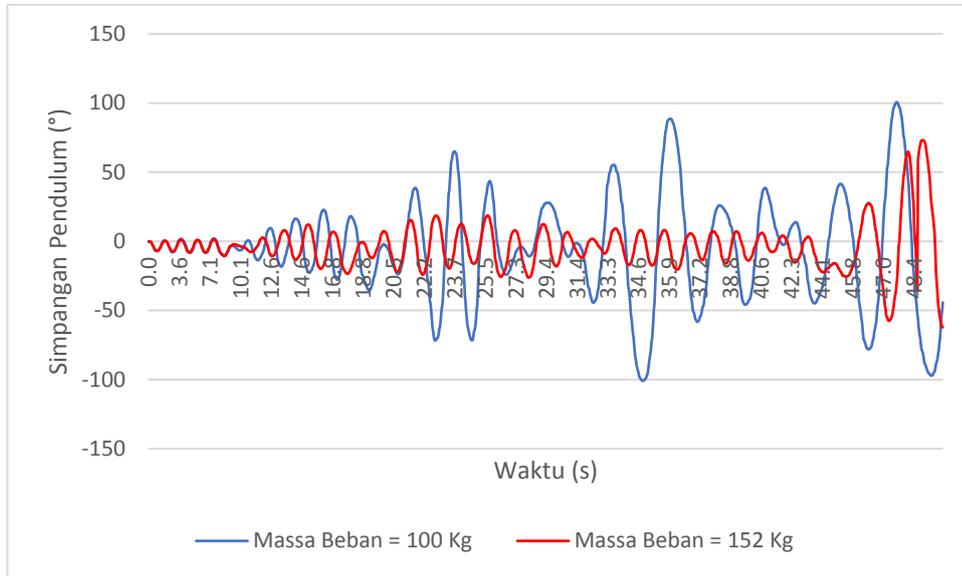
**Gambar A. 43** Perbandingan Simpangan Pendulum Variasi 18, 36, dan 54

Berikut untuk gambar A.44 adalah perbandingan untuk variasi massa beban pendulum dengan amplitudo gelombang 0.35 meter dan periode gelombang 7 s, panjang lengan 1 meter.



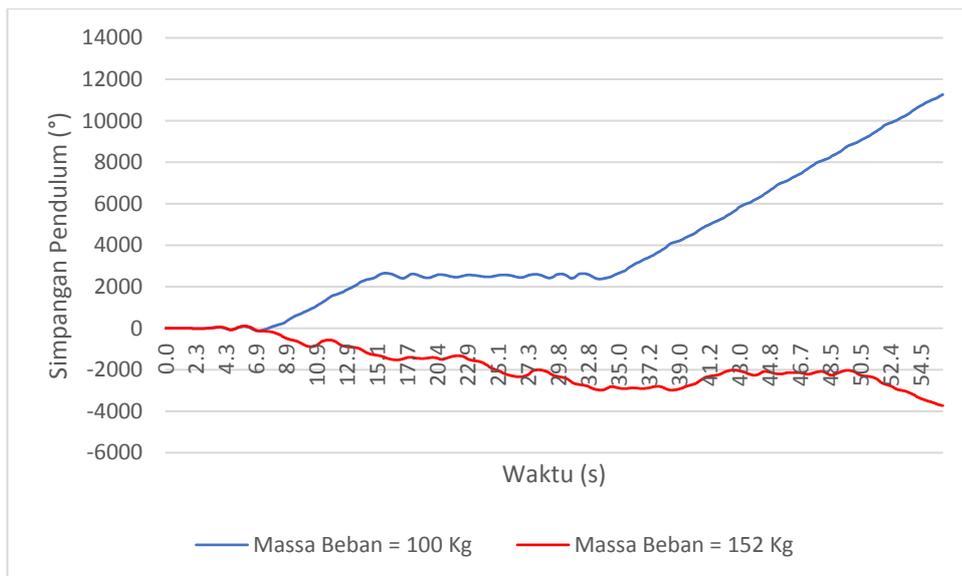
**Gambar A. 44** Perbandingan Simpangan Pendulum Variasi 5 dan 14

Berikut untuk gambar A.45 adalah perbandingan untuk variasi massa beban pendulum dengan amplitudo gelombang 0.35 meter dan periode gelombang 12 s, panjang lengan 1 meter.



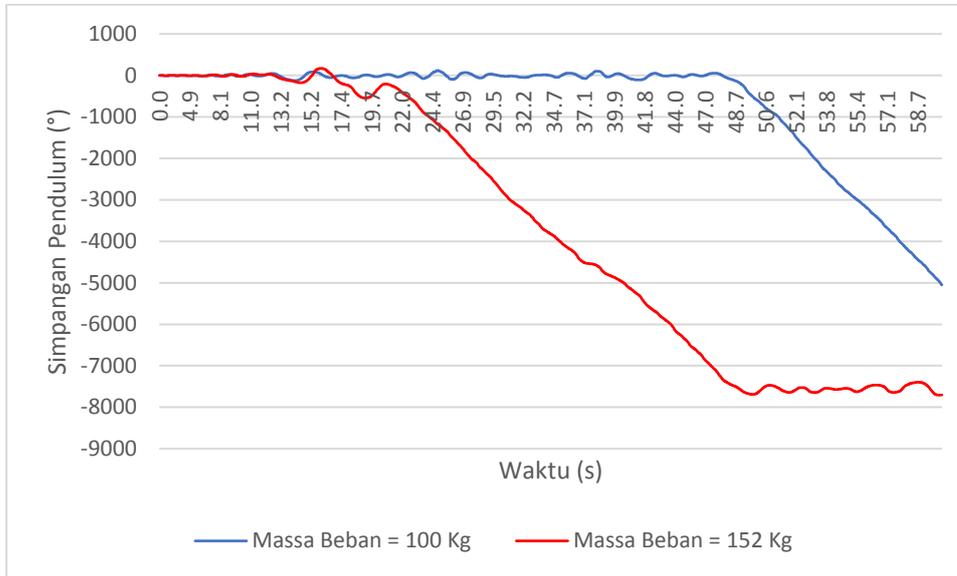
**Gambar A. 45** Perbandingan Simpangan Pendulum Variasi 6 dan 15

Berikut untuk gambar A.46 adalah perbandingan untuk variasi massa beban pendulum dengan amplitudo gelombang 0.60 meter dan periode gelombang 2.32 s, panjang lengan 1 meter.



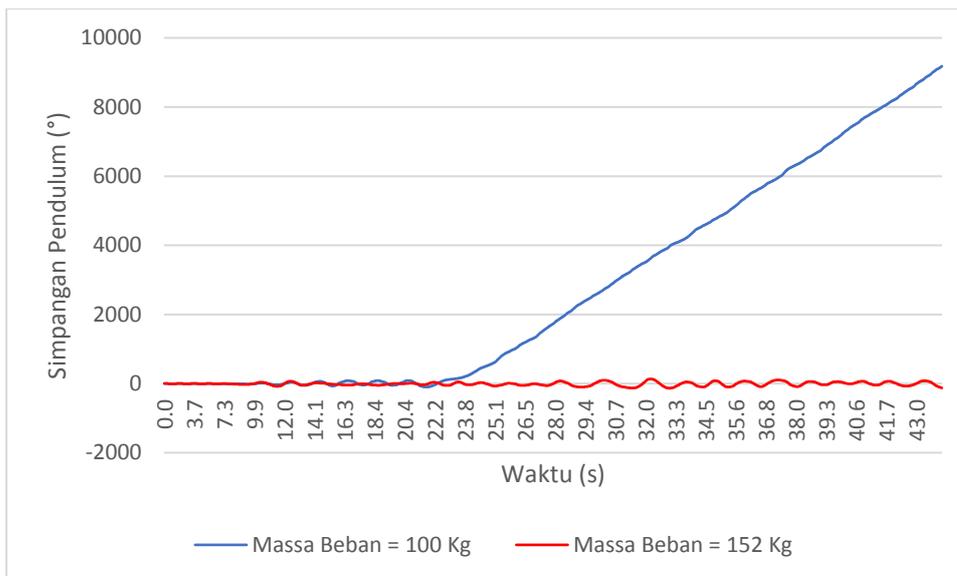
**Gambar A. 46** Perbandingan Simpangan Pendulum Variasi 7 dan 16

Berikut untuk gambar A.47 adalah perbandingan untuk variasi massa beban pendulum dengan amplitudo gelombang 0.60 meter dan periode gelombang 7 s, panjang lengan 1 meter.



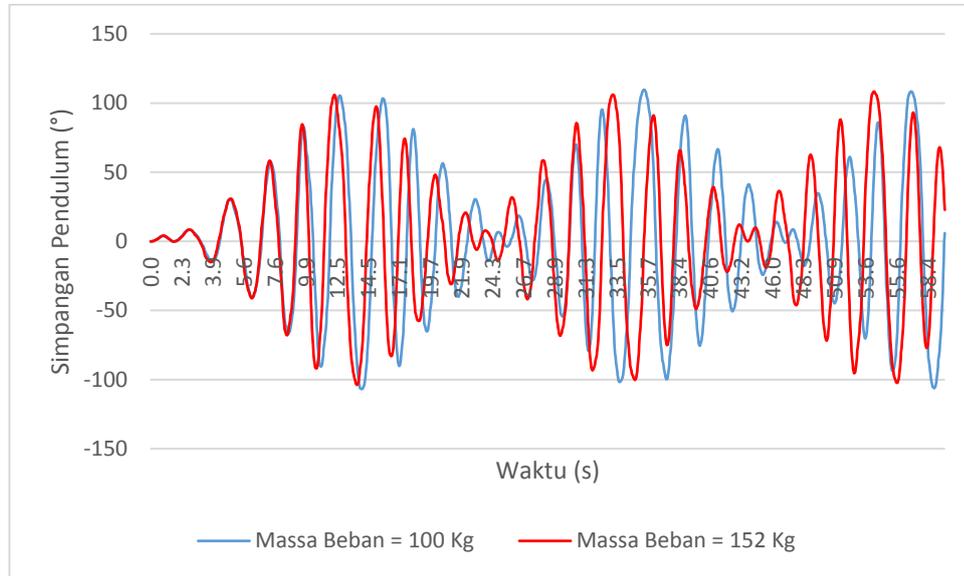
**Gambar A. 47** Perbandingan Simpangan Pendulum Variasi 8 dan 17

Berikut untuk gambar A.48 adalah perbandingan untuk variasi massa beban pendulum dengan amplitudo gelombang 0.60 meter dan periode gelombang 12 s, panjang lengan 1 meter.



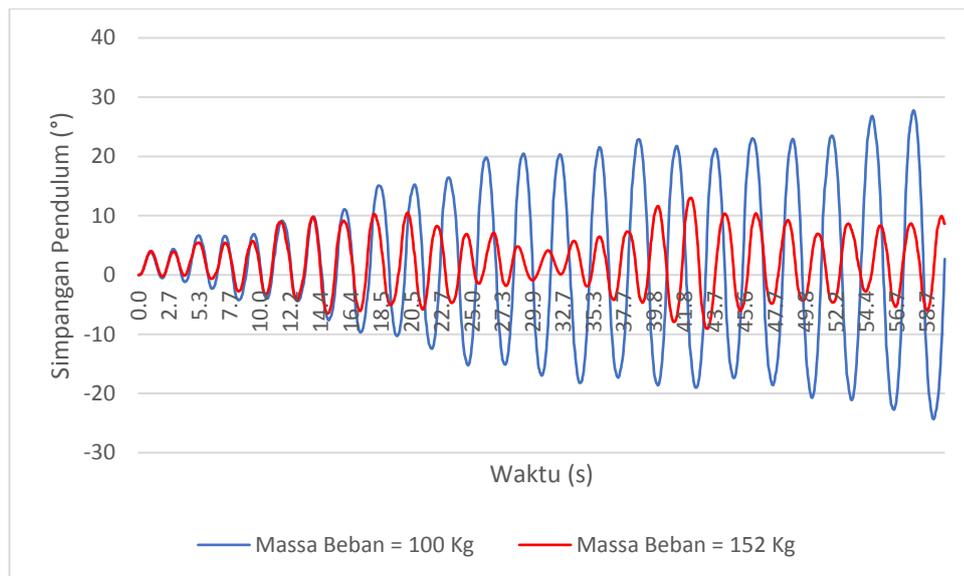
**Gambar A. 48** Perbandingan Simpangan Pendulum Variasi 9 dan 18

Berikut untuk gambar A.49 adalah perbandingan untuk variasi massa beban pendulum dengan amplitudo gelombang 0.1 meter dan periode gelombang 2.32 s, panjang lengan 1.25 meter.



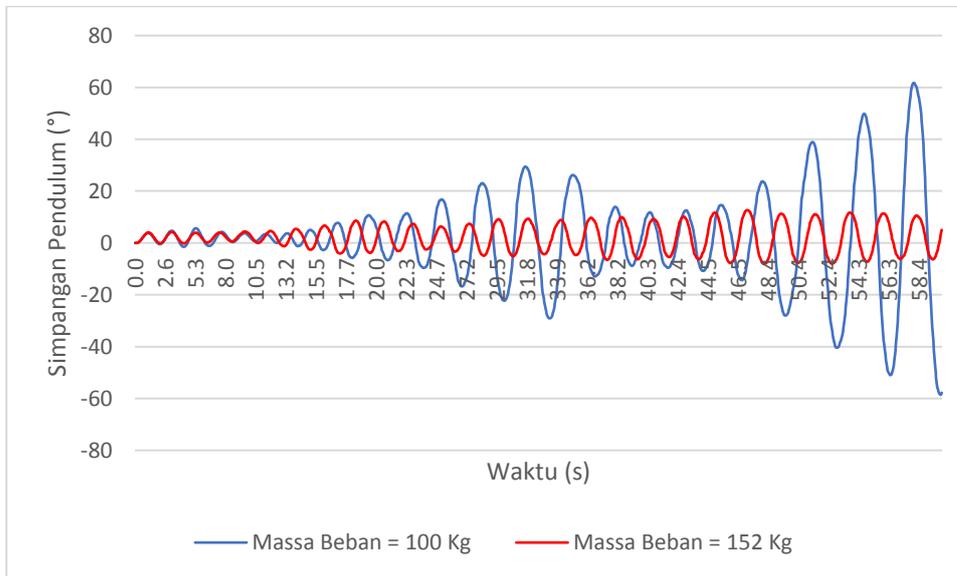
**Gambar A. 49** Perbandingan Simpangan Pendulum Variasi 19 dan 28

Berikut untuk gambar A.50 adalah perbandingan untuk variasi massa beban pendulum dengan amplitudo gelombang 0.1 meter dan periode gelombang 7 s, panjang lengan 1.25 meter.



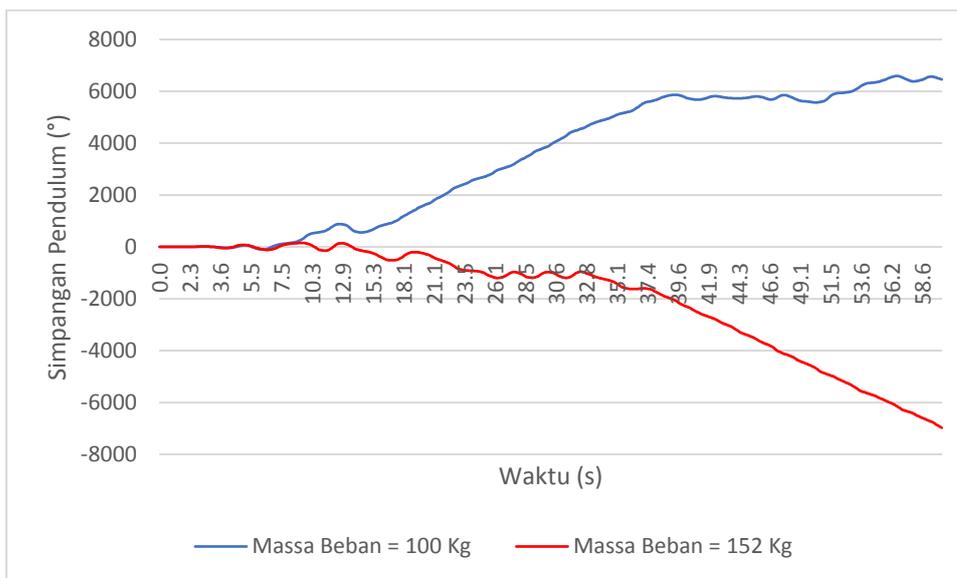
**Gambar A. 50** Perbandingan Simpangan Pendulum Variasi 20 dan 29

Berikut untuk gambar A.51 adalah perbandingan untuk variasi massa beban pendulum dengan amplitudo gelombang 0.1 meter dan periode gelombang 12 s, panjang lengan 1.25 meter.



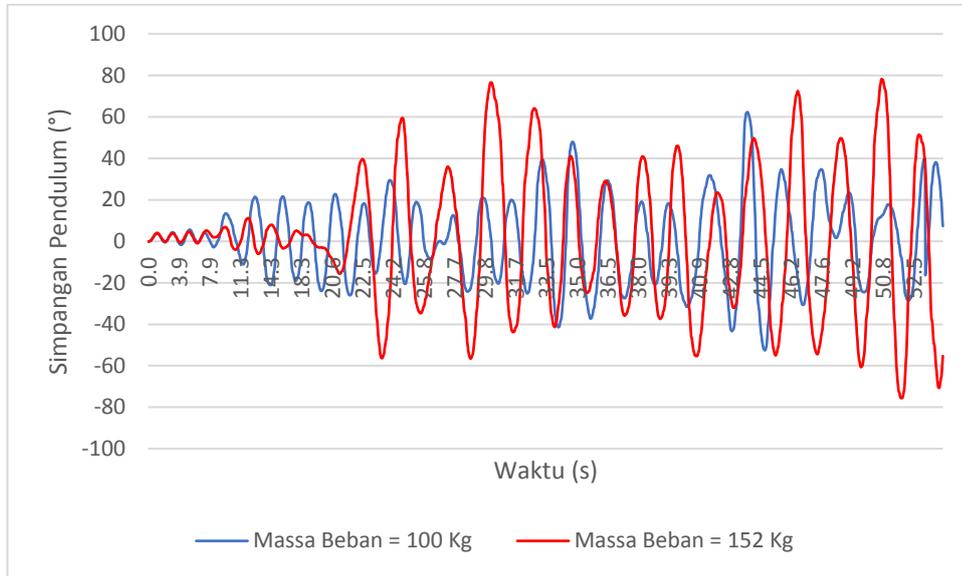
**Gambar A. 51** Perbandingan Simpangan Pendulum Variasi 21 dan 30

Berikut untuk gambar A.52 adalah perbandingan untuk variasi massa beban pendulum dengan amplitudo gelombang 0.35 meter dan periode gelombang 2.32 s, panjang lengan 1.25 meter.



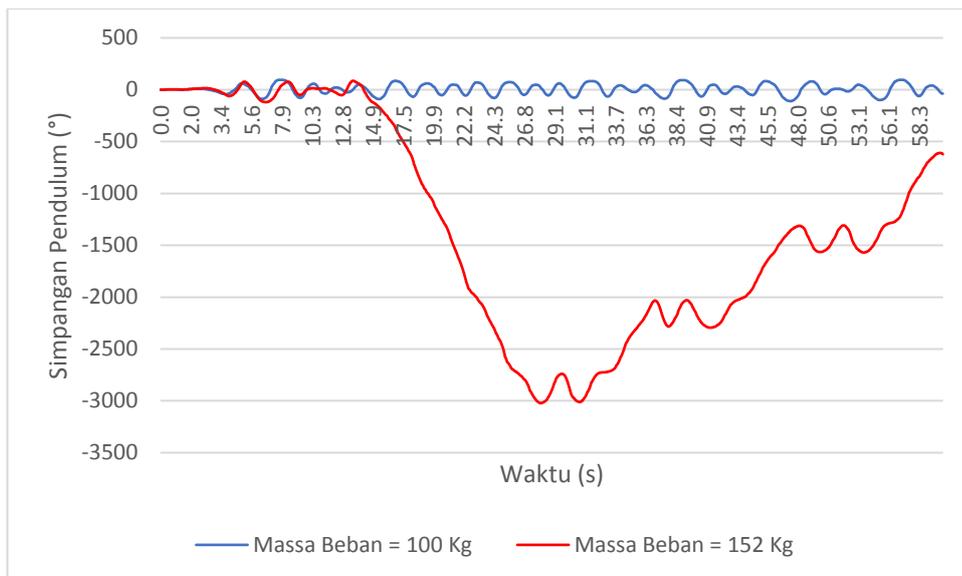
**Gambar A. 52** Perbandingan Simpangan Pendulum Variasi 22 dan 31

Berikut untuk gambar A.53 adalah perbandingan untuk variasi panjang lengan pendulum dengan amplitudo gelombang 0.35 meter dan periode gelombang 12 s, panjang lengan 1.25 meter.



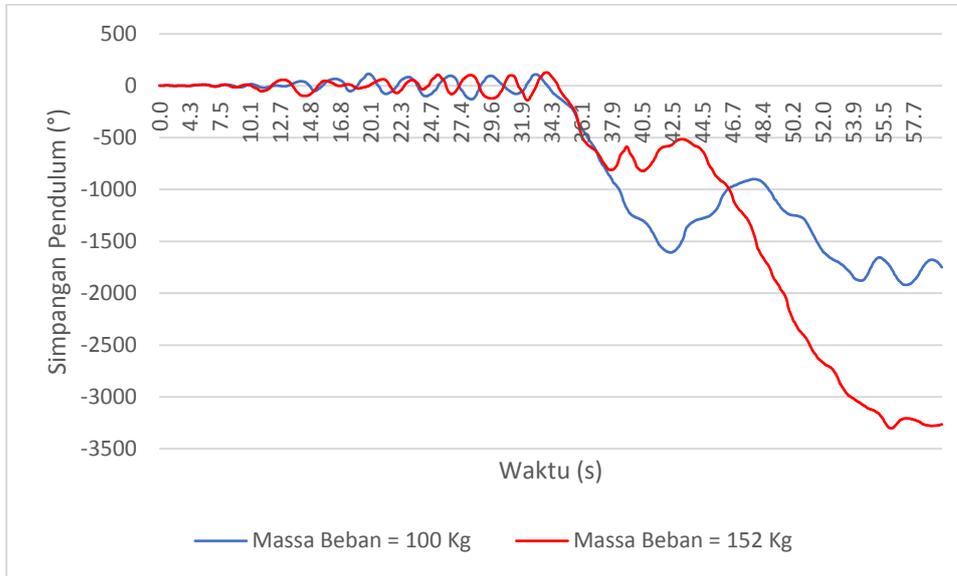
**Gambar A. 53** Perbandingan Simpangan Pendulum Variasi 24 dan 33

Berikut untuk gambar A.54 adalah perbandingan untuk variasi panjang lengan pendulum dengan amplitudo gelombang 0.60 meter dan periode gelombang 2.32 s, panjang lengan 1.25 meter.



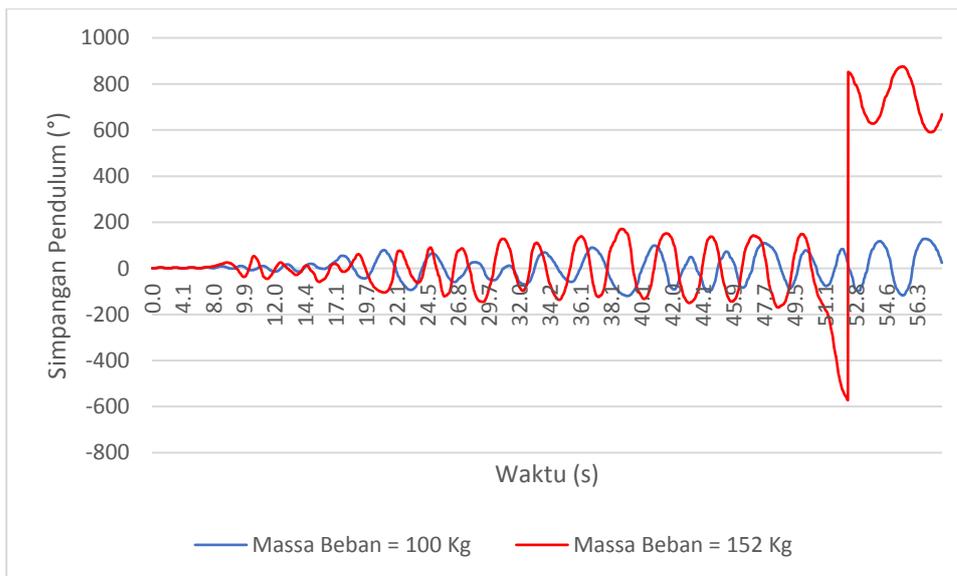
**Gambar A. 54** Perbandingan Simpangan Pendulum Variasi 25 dan 34

Berikut untuk gambar A.55 adalah perbandingan untuk variasi panjang lengan pendulum dengan amplitudo gelombang 0.60 meter dan periode gelombang 7 s, panjang lengan 1.25 meter.



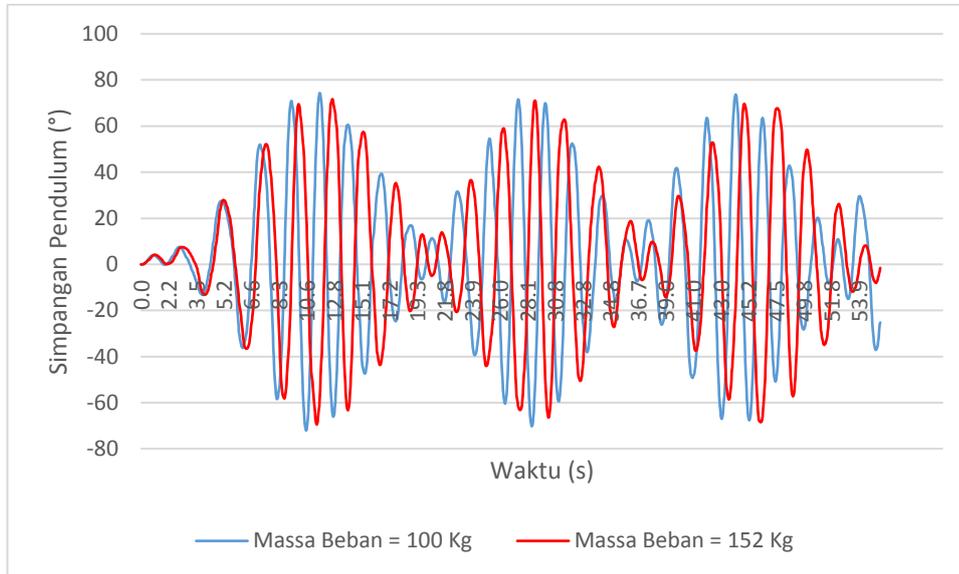
**Gambar A. 55** Perbandingan Simpangan Pendulum Variasi 26 dan 35

Berikut untuk gambar A.56 adalah perbandingan untuk variasi panjang lengan pendulum dengan amplitudo gelombang 0.60 meter dan periode gelombang 12 s, panjang lengan 1.25 meter.



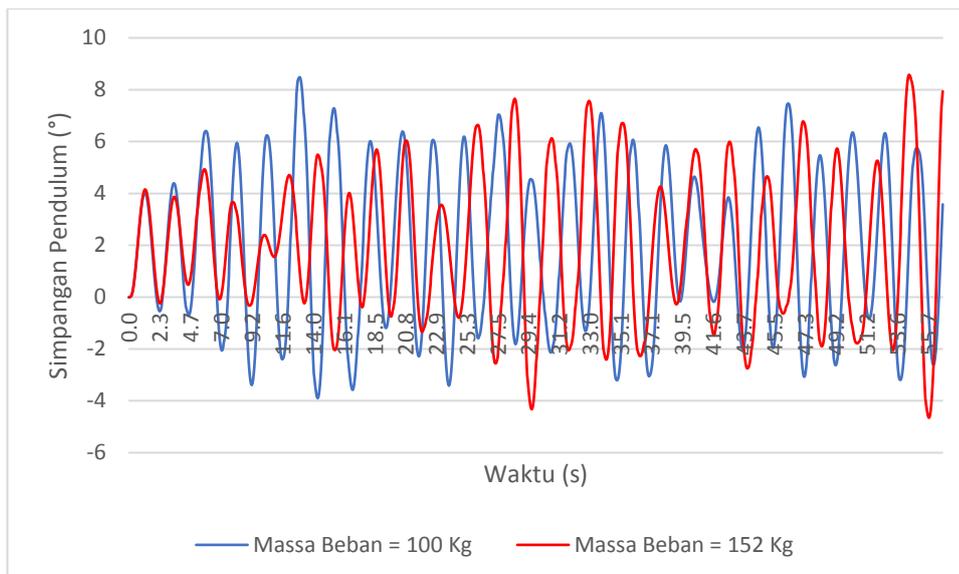
**Gambar A. 56** Perbandingan Simpangan Pendulum Variasi 27 dan 36

Berikut untuk gambar A.57 adalah perbandingan untuk variasi panjang lengan pendulum dengan amplitudo gelombang 0.1 meter dan periode gelombang 2.32 s, panjang lengan 1.5 meter.



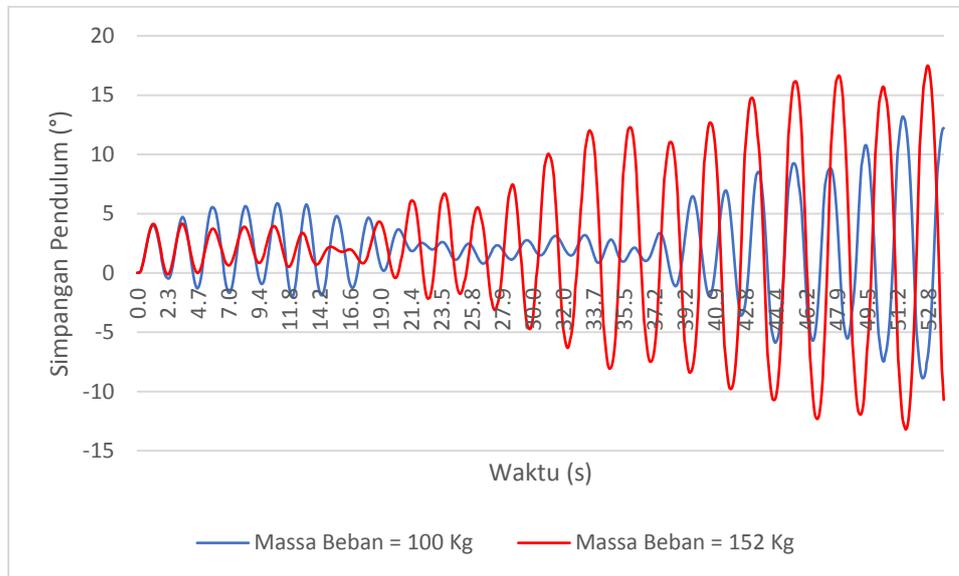
**Gambar A. 57** Perbandingan Simpangan Pendulum Variasi 37 dan 46

Berikut untuk gambar A.58 adalah perbandingan untuk variasi panjang lengan pendulum dengan amplitudo gelombang 0.1 meter dan periode gelombang 7 s, panjang lengan 1.5 meter.



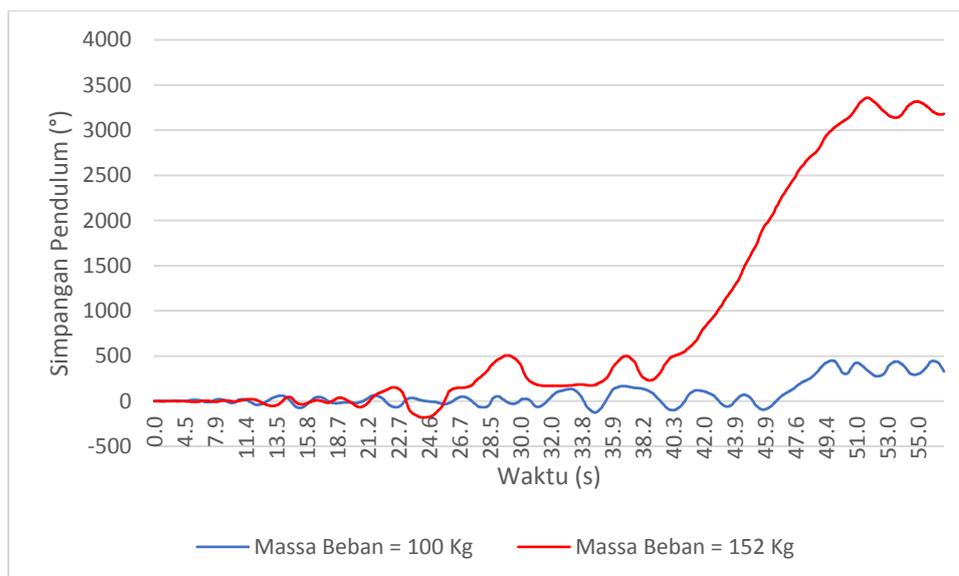
**Gambar A. 58** Perbandingan Simpangan Pendulum Variasi 38 dan 47

Berikut untuk gambar A.59 adalah perbandingan untuk variasi panjang lengan pendulum dengan amplitudo gelombang 0.1 meter dan periode gelombang 12 s, panjang lengan 1.5 meter.



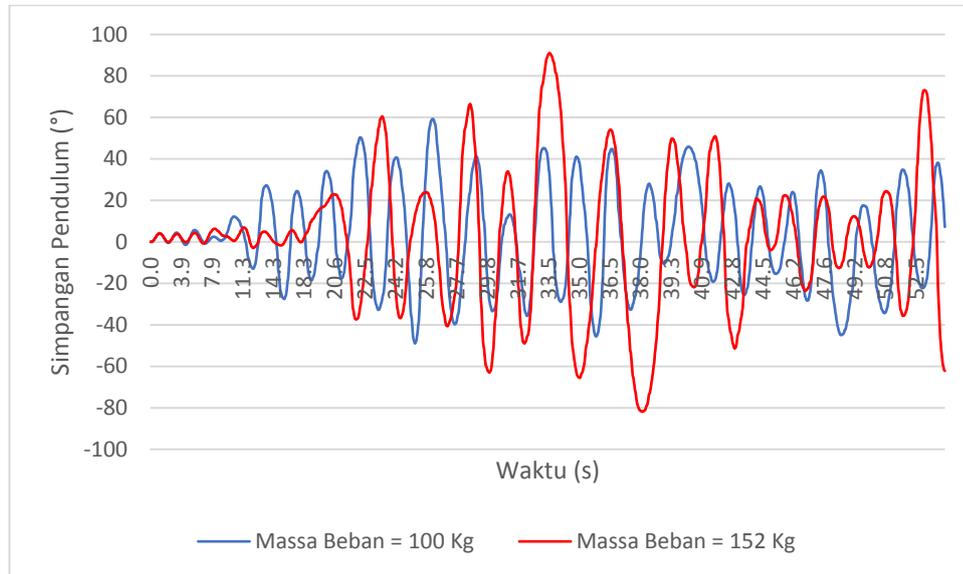
**Gambar A. 59** Perbandingan Simpangan Pendulum Variasi 39 dan 48

Berikut untuk gambar A.60 adalah perbandingan untuk variasi panjang lengan pendulum dengan amplitudo gelombang 0.35 meter dan periode gelombang 7 s, panjang lengan 1.5 meter.



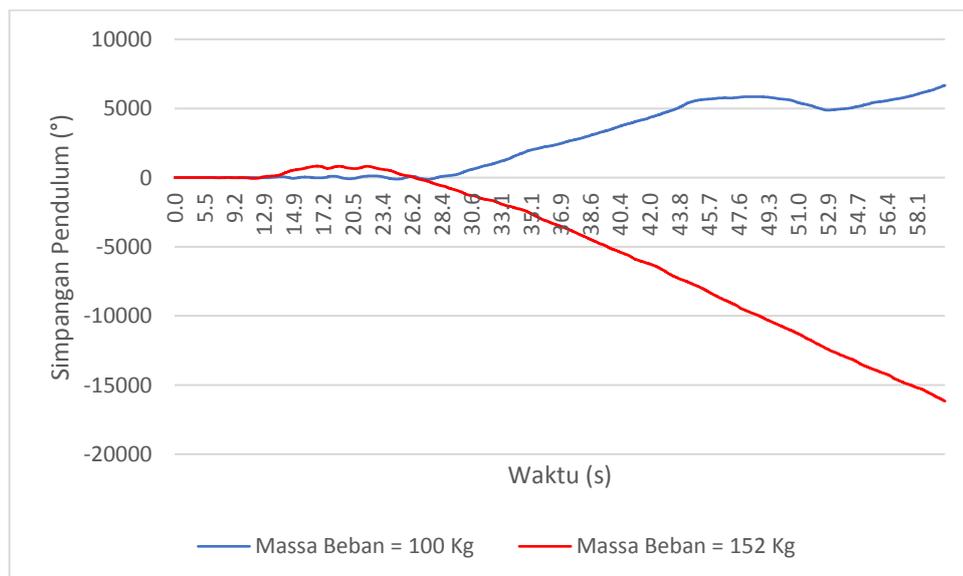
**Gambar A. 60** Perbandingan Simpangan Pendulum Variasi 41 dan 50

Berikut untuk gambar A.60 adalah perbandingan untuk variasi panjang lengan pendulum dengan amplitudo gelombang 0.35 meter dan periode gelombang 12 s, panjang lengan 1.5 meter.



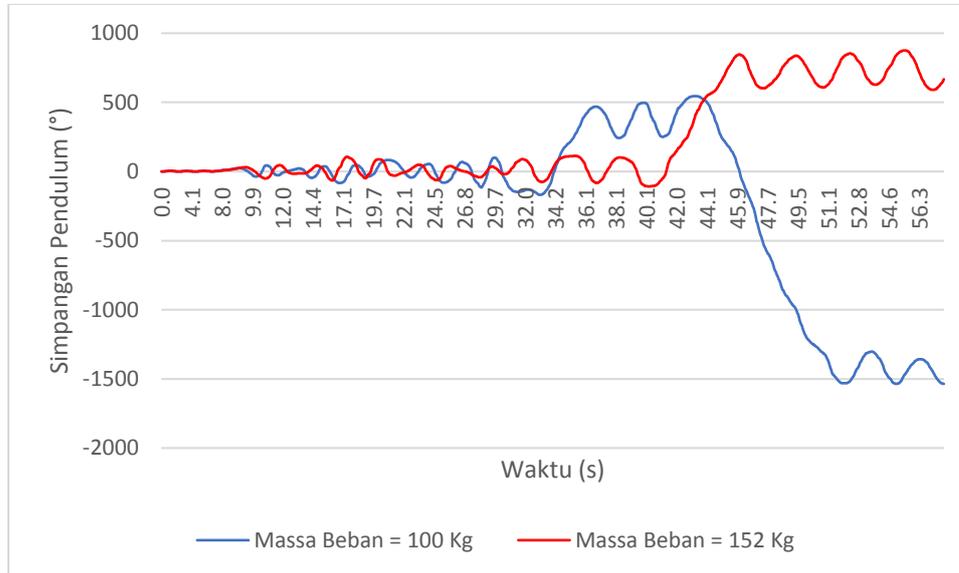
**Gambar A. 61** Perbandingan Simpangan Pendulum Variasi 42 dan 51

Berikut untuk gambar A.60 adalah perbandingan untuk variasi panjang lengan pendulum dengan amplitudo gelombang 0.60 meter dan periode gelombang 7 s, panjang lengan 1.5 meter.



**Gambar A. 62** Perbandingan Simpangan Pendulum Variasi 44 dan 53

Berikut untuk gambar A.60 adalah perbandingan untuk variasi panjang lengan pendulum dengan amplitudo gelombang 0.60 meter dan periode gelombang 12 s, panjang lengan 1.5 meter.



**Gambar A. 63** Perbandingan Simpangan Pendulum Variasi 45 dan 54

## B. Nilai Maksimal dan Minimal untuk *Pitching* Ponton dan Simpangan Pendulum untuk Setiap Variasi

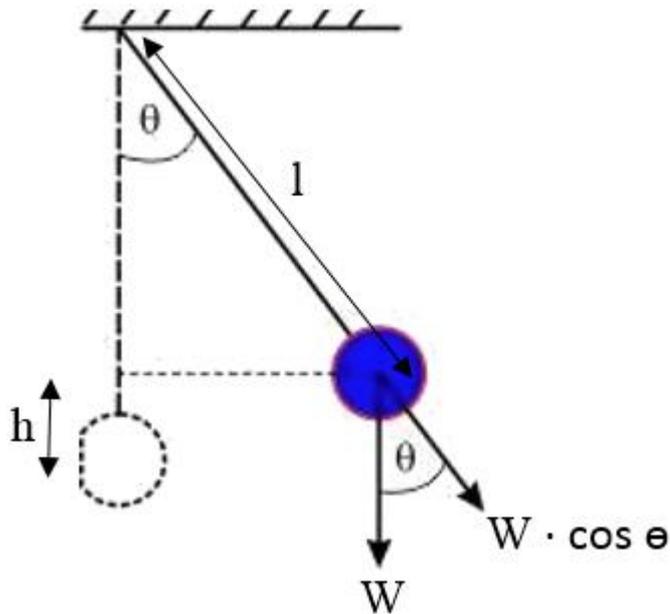
**Tabel A. 1** Nilai Maksimal dan Minimal pada Setiap Variasi

Variasi ke-	<i>Pitching</i> Ponton (°)		Simpangan Pendulum (°)	
	Min	Max	Min	Max
1	-4.73	5.51	-72.025	66.763
2	-0.888	1.126	-9.565	1.764
3	-1.023	1.135	-23.674	16.413
4	-9.991	16.679	-4447.5	138.97
5	-17.817	22.323	-116.93	1569
6	-19.57	20.543	-100.9	100.62
7	-16.974	23.814	-123.13	7701.8
8	-31.854	34.622	-5048.5	118.84
9	-32.588	33.9	-100.6	8800.3
10	-4.882	5.682	-74.859	68.869
11	-1.392	1.638	-16.829	10.111
12	-0.666	0.964	-15.109	8.445
13	-12.339	17.668	-1192	125.64
14	-16.805	20.794	-844.83	132.93

15	-17.237	7.595	-57.611	64.873
16	-13.39	20.577	-2987.2	106.57
17	-40.334	32.436	-7689.5	168.57
18	-37.77	31.376	-133.14	128.91
19	-4.845	5.515	-106.87	109.57
20	-0.86	1.251	-20.745	23.043
21	-4.191	3.519	-40.399	38.945
22	-10.158	17.032	-101.72	6775.6
23	-14.774	21.198	-871.66	1590.9
24	-15.886	10.305	-52.586	62.301
25	13.373	19.608	-110.2	96.452
26	-40.039	37.96	-3011.9	115.16
27	-25.349	31.312	-119.85	127.99
28	-5.107	5.791	-103.87	108.36
29	-1.128	1.327	-9.09	13.026
30	-0.554	0.801	-8.104	12.64
31	-12.498	18.25	-6978.3	156.11
32	-25.55	27.181	-5948.3	81.804
33	-16.204	18.317	-75.584	78.261
34	-12.623	20.728	-3022.5	85.422
35	-35.568	32.75	-3302.7	128.54
36	-33.766	35.028	-572.58	171.44
37	-4.983	5.645	-72.111	74.356
38	-0.836	1.205	-3.897	8.487
39	-0.793	0.968	-8.874	13.203
40	-9.788	17.233	-2287.4	157.53
41	-16.145	20.758	-126.34	449.02
42	-16.336	15.792	-48.951	59.24
43	-14.36	21.538	-4153.7	90.094
44	-88.721	66.235	-122.58	5859.9
45	-34.72	32.683	-1536.1	545.6
46	-5.132	5.875	-69.509	71.658
47	-1.094	1.327	-4.8	8.741
48	-0.603	0.833	-16.778	20.824
49	-12.511	18.673	-94.328	91.025
50	-17.211	21.772	-3357.2	182.52
51	-16.878	18.84	-81.861	90.997
52	-14.402	22.039	-82.737	91.831
53	-44.414	45.449	-10275	828.78
54	-37.457	21.84	-108.09	853.64

### C. Perhitungan

Hasil simulasi awal menunjukkan nilai pitching ponton sebesar sekitar  $18.5^\circ$  dengan spesifikasi generator 1KW 600rpm



- Sehingga didapatkan untuk nilai  $h$

$$h = l - l (\cos(\theta)) \quad (2.2)$$

$$h = 1 - 1 (\cos(18.5))$$

$$h = 0.0516 \text{ m}$$

$$V = \sqrt{2gh} \quad (2.3)$$

$$V = \sqrt{2(10)(0.0516)}$$

$$V = 1.016 \text{ m/s}$$

$$\omega = \frac{V}{l} \quad (2.4)$$

$$\omega = \frac{1.016}{1}$$

$$\omega = 1.016 \text{ rad/s}$$

- Dilakukan konversi ke RPM

$$\omega = (1.016)(9.55)$$

$$\omega = 9.703 \text{ RPM}$$

- Maka akan didapatkan rasio

$$\text{Rasio} = \frac{\text{RPM Generator}}{\text{RPM Bandul}}$$

$$\text{Rasio} = \frac{600}{9.443}$$

$$\text{Rasio} = 61.83$$

- Maka akan didapatkan nilai torsi yang harus dicapai bandul

$$\tau = \text{Torsi generator} \times \text{rasio}$$

$$\tau = 15.92 \times 61.83$$

$$\tau = 984.567 \text{ Nm}$$

- Maka akan didapatkan nilai massa beban

$$\tau = F \times L$$

$$F = \frac{984.567}{1}$$

$$F = 984.567 \text{ N}$$

$$M = \frac{984.567}{10}$$

$$M = 98.4567 \text{ Kg}$$

- Massa Total

Dengan asumsi massa elektrik 150 Kg, massa mekanik 100 Kg, massa ponton 532 Kg, dan pendulum variasi terbesar 304 Kg maka totalnya menjadi 1086 Kg.

- Volume Tercelup Minimal

$$FA = \rho \cdot g \cdot Va \tag{2.6}$$

$$11860 = 1025 \cdot 10 \cdot Va$$

$$Va = 1.059 \text{ m}^3$$

- Beban maksimal yang mampu ditopang ponton

Beban maksimal didapatkan dari melihat volume tercelup pada air, nilai ini dapat diperoleh dari perangkat lunak desain. Berikut adalah volume yang tercelup ketika sarat air setinggi 0.45 m

```
Volume = 1.31 cubic meters
Surface area = 15.39 square meters
Center of mass: ( meters )
  X = 0.01
  Y = 0.00
  Z = -0.32
```

$$FA = \rho \cdot g \cdot Va \tag{2.6}$$

$$FA = 1025 \cdot 10 \cdot 1.31$$

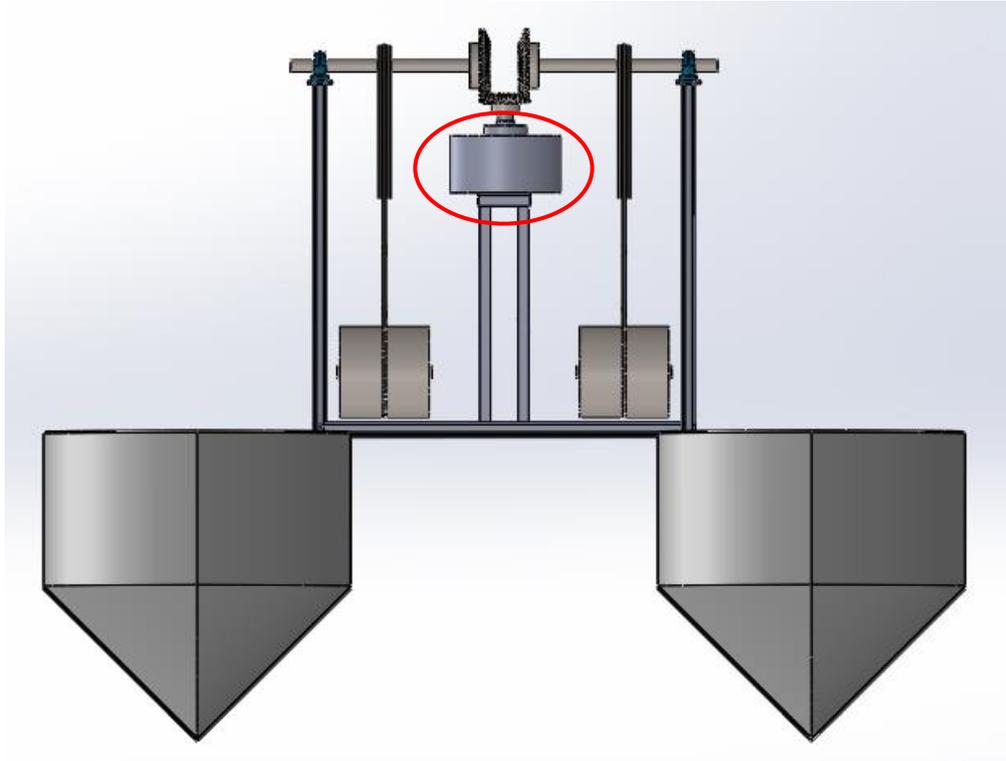
$$FA = 13427.5 \text{ N}$$

$$M = 1342.75 \text{ Kg}$$

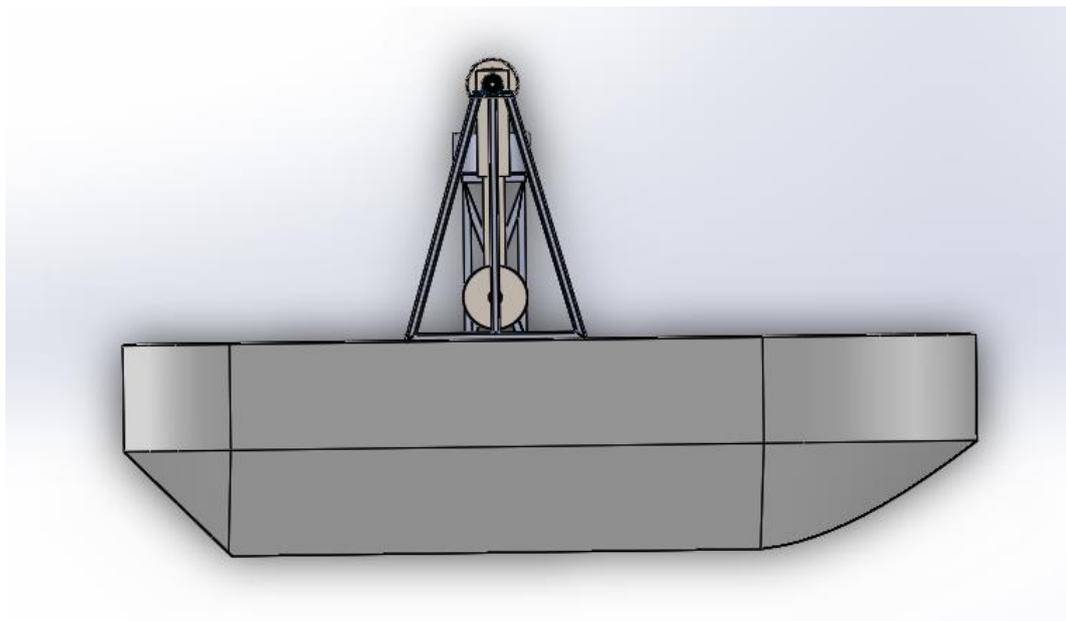
Beban maksimal yang mampu ditopang ponton adalah 1342.75 Kg

#### D. Desain dengan Komponen Lengkap

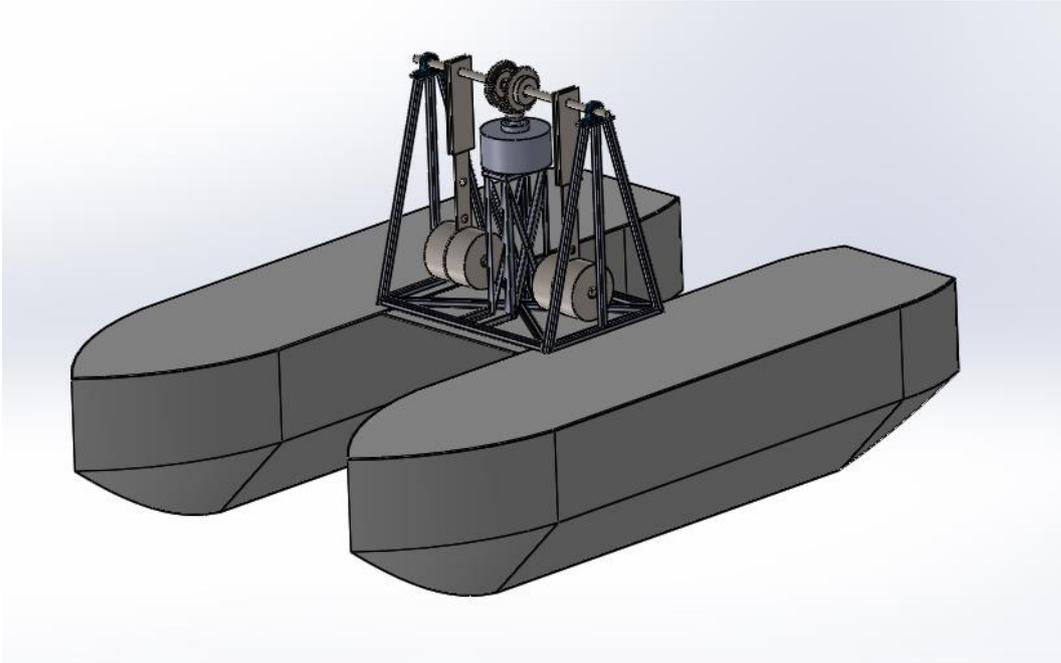
Berikut adalah rincian desain sistem pembangkit listrik tenaga gelombang sistem bandul. Pada lingkaran merah merupakan generator.



**Gambar D. 1** Desain Tampak Depan



**Gambar D. 2** Desain Tampak Samping



**Gambar D. 3** Desain Tampak Isometric

## BIODATA PENULIS



Penulis lahir pada 11 Oktober 1997 di Gresik, Jawa Timur. Penulis menempuh pendidikan di SDN 1 Pongangan (2004-2010), SMPN 2 Gresik (2010-2013), dan SMAN 1 Gresik (2013-2016). Pendidikan sarjana ditempuh di Jurusan Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Bidang minat yang diambil penulis adalah rekayasa energi dan pengkondisian lingkungan. Selama menjadi mahasiswa penulis tergabung dalam organisasi kemahasiswaan HMTF di departemen RISTEK dalam periode 2017-2018. Selain aktif dalam berorganisasi, penulis juga aktif dalam kegiatan akademik sebagai asisten Laboratorium Sistem Tertanam dan Siber-Fisik. Penulis juga aktif dalam mengikuti Program Kreativitas Mahasiswa. Pengalaman *internship* penulis adalah melakukan studi mengenai retrofit *anti-surge dry plant air* kompresor 156K502A di *residual fuel catalytic cracking* (RFCC) PT. Pertamina (Persero) *Refinery Unit IV* Cilacap. Penulis dapat dihubungi melalui *e-mail* [bariz.irfan.iz@gmail.com](mailto:bariz.irfan.iz@gmail.com).