



TUGAS AKHIR - TF141581

ANALISIS KARAKTERISTIK OSILASI PENDULUM PADA PLTGL-SB

RODHIATUL ISNAINI
NRP. 2412 100 043

Dosen Pembimbing
Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.
Ir. Jerri Susatio, M.T.

JURUSAN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016



FINAL PROJECT - TF141581

**CHARACTERISTIC ANALYSIS OF PENDULUM
OSCILLATION AT PLTGL-SB**

RODHIATUL ISNAINI
NRP. 2412 100 043

Supervisor:
Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.
Ir. Jerri Susatio, M.T.

DEPARTMENT OF ENGINEERING PHYSICS
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2016

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS KARAKTERISTIK OSILASI PENDULUM PADA PLTGL-SB

TUGAS AKHIR

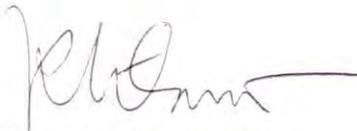
Oleh:

RODHIATUL ISNAINI
NRP. 2412 100 043

Surabaya, 22 Januari 2016
Mengetahui/Menyetujui,

Pembimbing I,

Pembimbing II,



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



Ir. Jerri Susatio, M.T.
NIP. 19541017 198003 1 005



**Ketua Jurusan
Teknik Fisika FTI-ITS**
Agus Muhamad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D.
NIP. 19780902 200312 1 002

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS KARAKTERISTIK OSILASI PENDULUM PADA PLTGL-SB

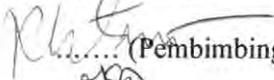
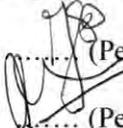
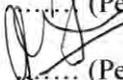
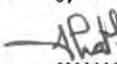
TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Rekayasa Energi
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

RODHIATUL ISNAINI
NRP. 2412 100 043

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.  (Pembimbing 1)
2. Ir. Jerri Susatio, M.T.  (Pembimbing 2)
3. Dr. Gunawan Nugroho, S.T., M.T.  (Penguji 1)
4. Ir. Matraji, M.Sc.  (Penguji 2)
5. Herry Sufyan Hadi, S.T., M.T.  (Penguji 3)

SURABAYA
JANUARI 2016

ANALISIS KARAKTERISTIK OSILASI PENDULUM PADA PLTGL-SB

Nama Mahasiswa : Rodhiatul Isnaini
NRP : 2412100043
Jurusan : Teknik Fisika - ITS
Dosen Pembimbing : 1. Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.
2. Ir. Jerri Susatio, M.T.

Abstrak

Energi terbarukan adalah energi yang dapat diperoleh ulang (terbarukan) dan bersifat kontinyu. Jenis energi terbarukan yang paling melimpah di Indonesia sendiri adalah energi gelombang. Alat yang digunakan untuk mengkonversi energi gelombang laut menjadi energi listrik sendiri ada banyak jenisnya. Salah satu alat yang mempunyai sistem sederhana yaitu PLTGL-SB (Pembangkit Listrik Energi Gelombang Laut Sistem Bandul) yang pertama kali dibuat oleh Zamrisyaf pada tahun 2010. Namun sampai saat ini belum ditemukan parameter bentuk ponton yang menghasilkan olah gerak paling baik untuk menghasilkan daya yang besar. Telah dilakukan eksperimen dengan menggunakan *prototype* 1:10 berbentuk silinder dengan cadik simetris di kedua sisinya untuk diperoleh parameter yang paling sesuai sehingga didapatkan gerakan pendulum dengan amplitudo yang besar untuk menghasilkan daya yang besar pula. Berdasarkan hasil eksperimen tersebut, diperoleh kesimpulan bahwa variasi yang menghasilkan simpangan pendulum paling besar yaitu ketika panjang lengan cadik 413 mm, tinggi cadik 40 mm, panjang lengan pendulum 106.7 mm, massa pendulum 20 gram, dan periode gelombang 0.8 detik dengan simpangan pendulum maksimum sebesar 60 derajat.

Keyword: Energi Terbarukan, Energi Gelombang Laut, Ponton Trimaran

CHARACTERISTICS ANALYSIS OF PENDULUM OSCILLATION AT PLTGL-SB

Name : Rodhiatul Isnaini
NRP : 2412100043
Department : Engineering Physics - ITS
Supervisor : 1. Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.
2. Ir. Jerri Susatio, M.T.

Abstract

Renewable energy is kind of energy that can be obtained repetitively and tend to be continuous. One type of renewable energy that overflow in the world is ocean wave energy. The devices that used to extract ocean wave energy into electrical energy is called WECs (Wave Energy Converters). Recently, there are many kind of WECs that already developed by engineer. Ocean wave power plant based on pendulum system is one type of the WECs that has simple ways of working. The first man who invented this device is Zamrisyaf at 2010. But until today, the researcher still haven't found the parameter of pontoon geometry that can afford a good seakeeping for this WECs. In this work, the research of the ocean wave power plant based on pendulum system has been performed using experimental investigation. The aim of this study is to analyze the novel geometry of pontoon that identical to trimaran that can produce large amplitudo of pendulum oscillation through experimental approach. The analyzed aspect are the combination of outrigger length, outrigger height, pendulum rod length, pendulum mass, and wave periods which have maximum amplitude of pendulum oscillation. The experimental results shown that the best combination is pontoon thus has outrigger length of 413 mm, outrigger height of 40 mm, pendulum rod length of 106.7 mm, pendulum mass of 20, and wave periods of 0.8 s which have maximum amplitude of pendulum oscillation as big as 60 degrees.

Keywords: *Renewable Energy, Wave Energy, Trimaran Pontoon*

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur senantiasa terpanjatkan kepada Allah SWT atas semua yang telah diberikan kepada penulis untuk menyelesaikan tugas akhir yang berjudul:

“ANALISIS KARAKTERISTIK OSILASI PENDULUM PADA PLTGL-SB”

Penulis tentu saja tidak akan mampu menyelesaikan tugas akhir ini tanpa bantuan dari berbagai pihak yang telah bersedia membantu demi terselesaikannya tugas akhir ini. Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Bapak Agus Muhammad Hatta, ST, M.Si, Ph.D selaku ketua Jurusan Teknik Fisika FTI-ITS.
2. Ir. Sarwono, M.M. selaku kepala laboratorium Rekayasa Energi dan Pengondisian Lingkungan Teknik Fisika.
3. Dr. Ridho Hantoro, ST, MT dan Ir. Jerri Susatio, MT selaku dosen pembimbing yang selalu memberikan pengarahan dan juga motivasi kepada penulis.
4. Bapak Langgeng Condro, Bapak Rudi, dan seluruh staff Laboratorium Hidrodinamika Teknik Perkapalan FTK-ITS yang telah banyak membantu penulis.
5. Murad, Yulia, Ainun, Peto, Junivan, Chusnul, Iwang, Pandika, Rudi, Berto, Fardan, Salman, Zain, Abdi, Seno, Fahmi, dan semua teman-teman yang telah bersedia membantu penulis selama pengerjaan tugas akhir ini.
6. Semua pihak yang telah membantu dalam pelaksanaan dan penyusunan laporan kerja praktik ini.

Selain itu, penulis berharap laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi siapapun yang membacanya.

Surabaya, 1 Februari 2016

Rodhiatul Isnaini

DAFTAR ISI

| | |
|---|------|
| HALAMAN JUDUL | i |
| PAGE OF TITLE | ii |
| LEMBAR PENGESAHAN | iii |
| LEMBAR PENGESAHAN | iv |
| Abstrak | v |
| Abstract | vi |
| KATA PENGANTAR | vii |
| DAFTAR ISI | viii |
| DAFTAR GAMBAR | x |
| DAFTAR TABEL | xii |
| BAB I PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1 Latar Belakang | 1 |
| 1.2 Rumusan Masalah | 3 |
| 1.3 Tujuan Penelitian | 3 |
| 1.4 Batasan Masalah | 4 |
| 1.5 Manfaat Penelitian | 4 |
| 1.6 Sistematika Laporan | 4 |
| BAB II TINJAUAN PUSTAKA | 7 |
| 2.1 Energi Gelombang Laut | 7 |
| 2.2 Gelombang Reguler | 9 |
| 2.3 Teori Dasar Gerakan Bangunan Laut Akibat Beban Gelombang | 10 |
| 2.4 Teori Stabilitas | 11 |
| 2.5 Ukuran dalam Stabilitas | 14 |
| 2.6 Keseimbangan Benda dalam Fluida | 15 |
| 2.7 Gerak Harmonik Sederhana | 16 |
| 2.8 Koordinat Umum dan Persamaan Lagrange | 18 |
| 2.9 Penelitian Terdahulu | 20 |
| BAB III METODOLOGI PENELITIAN | 23 |
| 3.1 Studi Literatur | 24 |
| 3.2 Perhitungan Analitis | 25 |
| 3.3 Penentuan <i>Prototype</i> yang Akan Dibuat | 28 |
| 3.4 Fabrikasi <i>Prototype</i> | 28 |
| 3.5 Pengambilan Data | 29 |

| | |
|---|----|
| 3.6 Analisis Data dan Penyusunan Laporan | 30 |
| BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN | 33 |
| 4.1 Dimensi Ponton..... | 33 |
| 4.2 Perhitungan Massa, Volume, dan Kestabilan Ponton | 34 |
| 4.3 Hasil Eksperimen Ponton dan Simpangan Pendulum | 36 |
| 4.4 Pengaruh Variabel Terhadap Osilasi Pendulum..... | 39 |
| 4.4.1 Efek Perubahan Periode Gelombang Terhadap Osilasi Pendulum..... | 39 |
| 4.4.2 Efek Perubahan Panjang Lengan Cadik Terhadap Osilasi Pendulum..... | 40 |
| 4.4.3 Efek Perubahan Tinggi Cadik Terhadap Osilasi Pendulum..... | 42 |
| 4.4.4 Efek Perubahan Massa Pendulum Terhadap Osilasinya | 43 |
| 4.4.5 Efek Perubahan Panjang Lengan Pendulum Terhadap Osilasinya | 44 |
| 4.5 Perhitungan Torsi dan Daya | 45 |
| BAB V PENUTUP | 47 |
| 5.1 Kesimpulan | 47 |
| 5.2 Saran | 47 |
| DAFTAR PUSTAKA..... | 49 |
| LAMPIRAN A | |
| LAMPIRAN B | |
| LAMPIRAN C | |
| LAMPIRAN D | |

DAFTAR TABEL

| | |
|---|----|
| Tabel 4. 1 Berat Ponton Beserta Konstruksi Pendulum | 35 |
| Tabel 4. 2 Kestabilan Ponton..... | 36 |

DAFTAR GAMBAR

| | |
|--|----|
| Gambar 2. 1 Gelombang yang disebabkan oleh badai | 7 |
| Gambar 2. 2 Perambatan gelombang laut..... | 8 |
| Gambar 2. 3 Estimasi distribusi global energi gelombang laut..... | 9 |
| Gambar 2. 4 Spektrum tunggal karakteristik gelombang regular.. | 9 |
| Gambar 2. 5 Gelombang acak atau <i>irreguler</i> | 10 |
| Gambar 2. 6 <i>Six degree of freedom</i> (SDOF) pada kapal | 11 |
| Gambar 2. 7 Tiga kondisi kestabilan..... | 12 |
| Gambar 2. 8 Contoh titik berat sebuah benda terapung..... | 12 |
| Gambar 2. 9 Letak titik berat di air | 13 |
| Gambar 2. 10 Letak titik <i>metacenter</i> | 14 |
| Gambar 2. 11 Ukuran-ukuran yang di gunakan dalam perhitungan stabilitas..... | 14 |
| Gambar 2. 12 Tiga kondisi kesetimbangan | 15 |
| Gambar 2. 13 Ilustrasi gerak harmonik sederhana | 17 |
| Gambar 2. 14 Gaya yang bekerja pada pendulum..... | 17 |
| Gambar 2. 15 Sistem dengan pendulum bertingkat..... | 19 |
| Gambar 3. 1 Diagram alir metodologi penelitian | 24 |
| Gambar 3. 2 Desain ponton tampak depan..... | 25 |
| Gambar 3. 3 Desain ponton dalam 3D | 26 |
| Gambar 3. 4 Ponton dengan <i>ballast</i> 2.3 kg..... | 29 |
| Gambar 3. 5 Ponton dengan <i>ballast</i> 1.2 kg..... | 29 |
| Gambar 3. 6 Setting alat untuk pengambilan data..... | 30 |
| Gambar 4. 1 Dimensi ponton dengan <i>ballast</i> 1.2 kg | 33 |
| Gambar 4. 2 Pendulum dengan massa 20 gram dan panjang lengan 106.7 mm..... | 34 |
| Gambar 4. 3 Pendulum dengan massa 40 gram dan panjang lengan 165 mm..... | 34 |
| Gambar 4. 4 Letak titik agar benda stabil positif ($K=keel$, $B=COB$, $G=COG$, dan $M=metacenter$)..... | 35 |
| Gambar 4. 5 Gerakan ponton dan pendulum untuk variasi 12 | 38 |
| Gambar 4. 6 Gerakan ponton dan pendulum untuk variasi 36 | 38 |
| Gambar 4. 7 Gerakan ponton dan pendulum untuk variasi 42 | 39 |
| Gambar 4. 8 Osilasi pendulum dengan periode gelombang yang berbeda | 39 |

| | |
|--|----|
| Gambar 4. 9 Osilasi pendulum dengan perubahan panjang lengan cadik | 40 |
| Gambar 4. 10 Gerakan <i>rolling</i> pada variasi 12 dan 15 | 41 |
| Gambar 4. 11 Osilasi pendulum dengan perubahan tinggi cadik | 42 |
| Gambar 4. 12 Gerakan <i>rolling</i> pada saat variasi 6 dan 27 | 43 |
| Gambar 4. 13 Osilasi pendulum dengan perubahan massa | 43 |
| Gambar 4. 14 Osilasi pendulum dengan perubahan panjang lengan lendulum | 44 |
| Gambar 4. 15 Torsi, kecepatan sudut, dan daya rata-rata pada masing-masing variasi | 45 |
| Gambar 4. 16 Kecepatan sudut rata-rata pada masing-masing variasi..... | 46 |

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring meningkatnya permintaan energi, terutama energi listrik di dunia, maka mengakibatkan semakin parahnya *greenhouse effect* sebagai efek ketergantungan terhadap sumber energi fosil [1]. Selain itu, ketergantungan terhadap energi fosil sebagai sumber energi dapat mengakibatkan dampak-dampak negatif lainnya seperti emisi gas rumah kaca yang menyebabkan semakin cepatnya kenaikan suhu di bumi, mengurangi persediaan energi, dan menyebabkan isu geopolitik sehubungan dengan kontrol terhadap cadangan minyak yang menjadi inti dari beberapa permasalahan konflik bersenjata pada beberapa dekade terakhir ini [2]. Dikarenakan semua permasalahan tersebut dunia mulai menyadari akan pentingnya sumber energi yang bersih atau sumber energi terbarukan beserta teknologi konversinya [1,2]. Salah satu sumber energi terbarukan yang sangat berpotensi untuk dapat dikonversi menjadi energi listrik yaitu berasal dari laut yang secara garis besar dapat diklasifikasikan menjadi beberapa jenis, yaitu energi pasang-surut, energi gelombang, energi panas laut, energi arus laut, dan energi angin laut beserta gradien keasinan [3]. Tiga jenis energi laut yang paling banyak dikembangkan adalah energi pasang surut, energi gelombang, dan energi panas laut [1]. Gelombang laut sebagai salah satu energi terbarukan diketahui sebagai sumber daya yang berpotensi untuk dieksploitasi secara berkelanjutan untuk dikonversi menjadi energi listrik [4].

Seperti halnya di dunia, permintaan energi listrik di Indonesia juga semakin meningkat seiring dengan perkembangan zaman. Selain itu, setidaknya ada tiga kelompok besar permasalahan energi nasional yaitu tingkat elektrifikasi yang masih rendah, ketergantungan pada sumber energi fosil, dan rendahnya pemanfaatan energi baru terbarukan [5]. Untuk mengejar kebutuhan energi di masa mendatang kebijakan yang harus dilakukan adalah dengan mengintegrasikan energi yang terbarukan dan tak terbarukan, dengan perubahan komposisi penggunaan yang

semakin besar pada jenis energi yang terbarukan. Indonesia sendiri merupakan Negara maritim dengan potensi energi gelombang yang besar. Energi gelombang laut merupakan energi terbarukan yang keberadaannya kontinyu dan sangat ramah lingkungan [5]. Alat untuk mengkonversi energi gelombang laut menjadi energi listrik disebut *Wave Energy Converter (WECs)* [6]. Sampai saat ini, telah terdapat beberapa jenis WECs yang telah dikembangkan di dunia, di antaranya yaitu *submerged pressure differential, oscillating wave surge converter, overtopping device, oscillating water coloumn*, dan lain-lain [7]. Selain itu, terdapat pula alat konversi energi gelombang laut menjadi energi listrik yang dikembangkan oleh peneliti yang berasal dari Indonesia yaitu menggunakan sistem pendulum atau disebut sebagai pembangkit listrik tenaga gelombang laut sistem bandul (PLTGL-SB). Studi mengenai PLTGL sistem bandulan ini pertama kali dilakukan oleh Zamrisyaf, salah satu staf perencanaan PLN di wilayah Sumatera Barat. Konsep pembangkit listrik tenaga gelombang laut sistem bandul ini sederhana yaitu dengan memanfaatkan fluktuasi gerakan gelombang air laut yang akan membuat bandul akan bergerak seperti lonceng, gerakan tersebut kemudian ditransmisi ke dalam gerakan putar untuk menggerakkan dinamo kemudian menjadi energi listrik [8]. Daya yang dihasilkan oleh pembangkit listrik tenaga gelombang laut sistem bandul banyak dipegaruhi oleh dimensi ponton, panjang bandul, dan massa bandul [9]. Parameter yang mempengaruhi besarnya daya yaitu besarnya torsi yang berhubungan dengan amplitude dan frekuensi getaran yang dihasilkan [10].

Pada penelitian-penelitian yang pernah dilakukan sebelumnya, bentuk ponton yang diteliti yaitu persegi panjang oleh Zamrisyaf. Setelah meneliti bentuk persegi panjang, penelitian mengenai bentuk ponton kembali dilakukan dengan ponton berbentuk lingkaran, persegi delapan, kemudian persegi enam. Hasil yang paling baik untuk tinggi gelombang dan periode yang sama didapatkan ketika ponton berbentuk persegi enam. Parameter-parameter yang mempengaruhi gerakan bandul sendiri yaitu kestabilan dari ponton yang digunakan. Pada tugas akhir ini akan

diteliti daya yang dihasilkan oleh sistem PLTGL-SB dengan ponton berbentuk silinder yang mempunyai cadik simetris di kedua sisinya. Selain itu, akan diteliti juga mengenai hubungan massa, panjang lengan bandul, panjang lengan cadik, dan ketinggian cadik dari dasar terhadap torsi yang dihasilkan oleh pendulum. Penelitian akan dilakukan melalui eksperimen di laboratorium dengan menggunakan *prototype* yang mempunyai skala 1:10 terhadap dimensi sesungguhnya.

1.2 Rumusan Masalah

Dari paparan latar belakang diatas, maka permasalahan dari pelaksanaan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

- a. Bagaimana efek perubahan massa dan panjang lengan pendulum terhadap osilasinya pada PLTGL-SB?
- b. Bagaimana efek perubahan panjang lengan dan tinggi cadik dari dasar terhadap osilasi pendulum dari PLTGL-SB?
- c. Bagaimanakah efek perubahan periode gelombang terhadap osilasi pendulum pada PLTGL-SB?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan pemaparan latar belakang dan rumusan masalah di atas tujuan dari pelaksanaan program ini adalah sebagai berikut:

- a. Dapat mengetahui efek perubahan massa dan panjang lengan pendulum osilasinya pada PLTGL-SB.
- b. Dapat mengetahui efek perubahan massa dan panjang lengan pendulum terhadap osilasi pendulum pada PLTGL-SB berdasarkan perhitungan analitis.
- c. Mengetahui efek perubahan periode gelombang terhadap osilasi pendulum pada PLTGL-SB.

1.4 Batasan Masalah

Untuk memfokuskan penyelesaian masalah pada penelitian tugas akhir ini diperlukan beberapa batasan masalah diantaranya sebagai berikut:

- a. Dimensi ponton yang diteliti yaitu ponton berbentuk silinder dengan cadik simetris di kedua sisi dan memiliki panjang yang sama dengan bentuk ponton utama dengan perbandingan 1:10.
- b. Gelombang yang digunakan untuk eksperimen yaitu gelombang regular dengan mengabaikan gangguan lain seperti halnya angin dan sebagainya.
- c. Penelitian dilakukan dengan hanya meninjau 3 derajat kebebasan. Dua derajat kebebasan dari ponton yaitu *heave* dan *roll*, serta satu derajat kebebasan dari bandul.
- d. *Prototype* dibuat tanpa ada generator. Daya yang dihasilkan oleh sistem akan diperoleh melalui perhitungan analitis berdasarkan data simpangan dan frekuensi bandul yang didapat dari hasil eksperimen.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian tugas akhir ini adalah dapat ditemukannya parameter-parameter yang dapat menghasilkan amplitudo osilasi yang besar sehingga daya yang dihasilkan oleh sistem pembangkit listrik juga bernilai besar.

1.6 Sistematika Laporan

Laporan penelitian Tugas Akhir 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

Bab ini berisi tentang teori gelombang, teori gerak dinamik ponton, dan teori gerak pendulum

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Dalam bab ini akan dijelaskan langkah yang dilakukan dalam penelitian.

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

Berisi tentang analisa hasil simulasi respon ponton terhadap gelombang regular dan analisa hasil simpangan dan torsi pendulum yang dihasilkan.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Berisi tentang kesimpulan dari hasil respon ponton dan pendulum dan saran penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

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

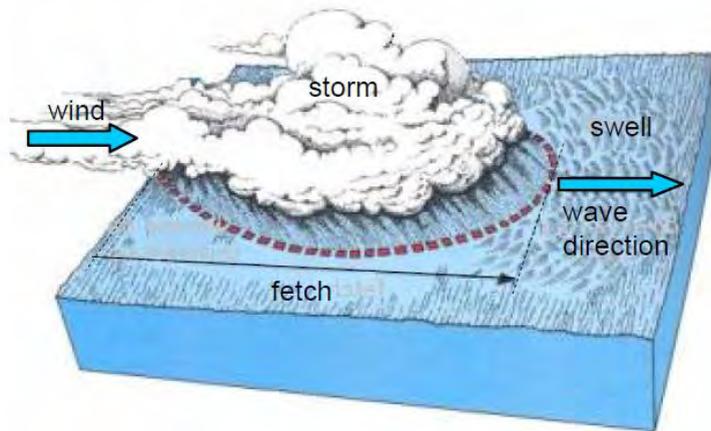
LAMPIRAN

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

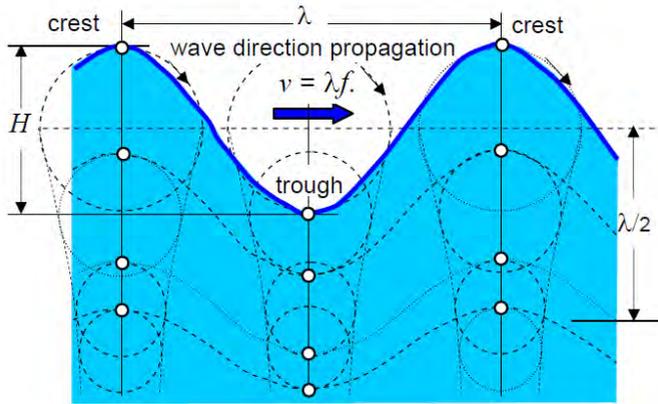
2.1 Energi Gelombang Laut

Gelombang laut terbentuk dari kombinasi gaya gravitasi, tegangan permukaan laut, dan juga dikarenakan adanya angin yang berhembus. Besar kecilnya gelombang ditentukan oleh kecepatan angin, jarak antara angin yang merangsang terbentuknya gelombang dengan gelombang itu sendiri (*fetch*), kedalaman, serta topografi dari dasar laut. Jika gelombang berada jauh dari angin yang merangsangnya maka bentuknya akan sebagaimana gelombang reguler dan disebut sebagai *swell*. Gambar 1 mengilustrasikan gelombang yang terbentuk akibat badai.



Gambar 2. 1 Gelombang yang disebabkan oleh badai

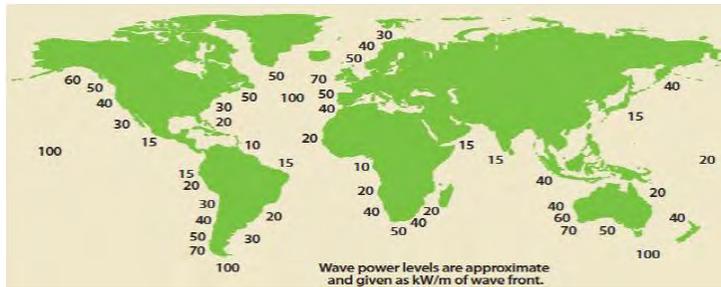
Partikel-partikel air yang terangsang oleh angin membentuk lintasan lingkaran pada masing-masing titik yang mempunyai diameter paling besar pada permukaannya. Semakin dalam letaknya, maka diameternya akan semakin berkurang secara eksponensial. Rangkaian dari gerakan melingkar tersebut nantinya akan membentuk gelombang laut dan perambatannya sebagaimana ditunjukkan oleh gambar 2.



Gambar 2. 2 Perambatan gelombang laut

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

Energi gelombang terdistribusi secara bervariasi di seluruh dunia. Gambar 3 menunjukkan atlas dunia dengan angka yang mengindikasikan energi gelombang pada daerah tersebut dalam kW/m . Dari gambar tersebut, diketahui bahwa pantai barat Pulau Sumatera bagian selatan dan pantai selatan Pulau Jawa bagian barat berpotensi memiliki energi gelombang laut sekitar 40 kW/m .

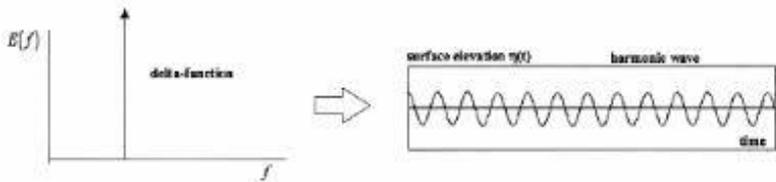


Gambar 2. 3 Estimasi distribusi global energi gelombang laut

2.2 Gelombang Reguler

Gelombang reguler merupakan gelombang dengan tinggi gelombang yang konstan, periode tunggal, sehingga gelombang ini juga mempunyai spectrum tunggal. (Fatnata, 2009). Teori gelombang reguler adalah pendekatan dari sebuah kenyataan dengan beberapa asumsi penyederhanaan dan idealisasi. Berikut ini adalah asumsi dasar teori gelombang:

- Fluida dianggap homogen
- Tekanan permukaan diabaikan
- Pressure di permukaan bebas dianggap konstan dan *uniform*
- Fluida dianggap ideal (tidak bisa ditekan/ *inviscid* dan *incompressible*)
- Gerakan partikel berdiri sendiri, tidak saling mengganggu dan bertubrukan selama bergerak
- Dasar laut dianggap datar, tetap *impermeable*, sehingga kecepatan vertikal di dasar adalah nol



Gambar 2. 4 Spektrum tunggal karakteristik gelombang reguler

Sedangkan gelombang irreguler merupakan gelombang superposisi dari beberapa gelombang reguler yang mempunyai frekuensi dan tinggi gelombang berbeda. Gelombang laut mempunyai bentuk dan arah gerakan tak beraturan/acak (*random*) dan tidak pernah berulang urutan kejadiannya, sehingga teori gelombang reguler tidak dapat secara langsung (deterministik) menjelaskannya.



Gambar 2. 5 Gelombang acak atau *irreguler*

Pada gelombang reguler terdapat istilah *Respond of Amplitude* (RAO) adalah respon struktur terhadap gelombang reguler.

2.3 Teori Dasar Gerakan Bangunan Laut Akibat Beban Gelombang

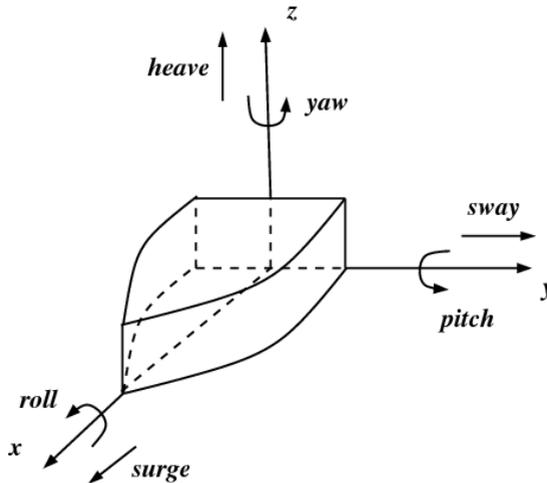
Pada dasarnya benda yang mengapung mempunyai 6 mode gerakan bebas (SDOF-*six degree of freedom*) yang terbagi menjadi dua kelompok, yaitu 3 mode gerakan translasional dan 3 mode gerakan rotasional. Berikut ini adalah keenam mode gerakan tersebut:

4.4.1 Mode Gerakan Translasional

- *Surge*, gerakan transversal arah sumbu x
- *Sway*, gerakan transversal arah sumbu y
- *Heave*, gerakan transversal arah sumbu z

4.4.2 Mode Gerakan Rotasional

- *Roll*, gerakan rotasional arah sumbu x
- *Pitch*, gerakan rotasional arah sumbu y
- *Yaw*, gerakan rotasional arah sumbu z



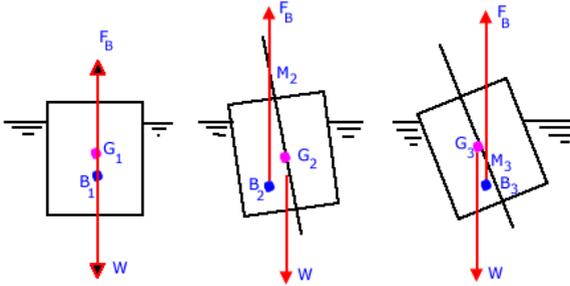
Gambar 2. 6 Six degree of freedom (SDOF) pada kapal

Definisi gerakan bangunan laut dalam enam derajat kebebasan dengan memakai konversi subu tangan kanan, tiga gerakan translasi pada arah sumbu x , y , dan z adalah masing-masing *surge*, *sway*, dan *heave* sedangkan untuk gerakan rotasi terhadap ketiga subu adalah *roll*, *pitch*, dan *yaw*. Dengan demikian domain gerakan yang mempengaruhi kapal dan ponton adalah gerakan rotasi dan translasi.

2.4 Teori Stabilitas

Sebuah benda yang berada pada posisi keseimbangan digeser ke suatu posisi baru, lalu mampu kembali ke posisi awal, benda tersebut disebut berada dalam keseimbangan stabil (*stable equilibrium*) dan kondisi tersebut disebut stabilitas positif terhadap acuan keseimbangan posisi awalnya. Apabila saat benda tersebut digerakkan dari posisi kesetimbangannya ke posisi baru dan kemudian tetap pada posisi baru tersebut, benda tersebut disebut dalam keseimbangan netral (*neutral equilibrium*), tetapi apabila suatu benda setelah digerakkan ke suatu posisi baru, benda tersebut terus bergerak semakin menjauhi posisi awalnya, maka keseimbangan benda tersebut dikatakan keseimbangan labil

(*unstable equilibrium*) dan kondisi ini dikategorikan sebagai stabilitas negatif terhadap acuan posisi awalnya.

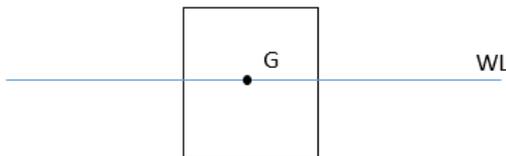


Gambar 2. 7 Tiga kondisi kestabilan

Pada struktur terapung akan terdapat dua buah gaya vertikal yang bekerja, yakni gaya apung (*buoyancy*) yang mengarah ke atas dan berat struktur itu sendiri yang mengarah kebawah.

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

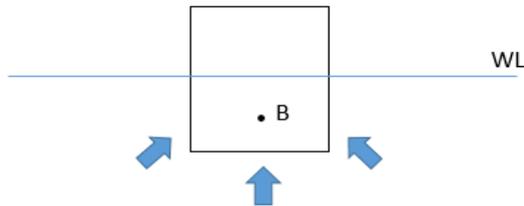
Titik berat (G) ialah titik tangkap dari semua gaya- gaya yang bekerja ke bawah. Letak titik G pada benda kosong ditentukan oleh hasil percobaan stabilitas. Perlu diketahui bahwa letak titik G tergantung daripada pembagian berat di benda. Jadi, selama tidak ada berat yang digeser/ ditambah/ dikurangi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



Gambar 2. 8 Contoh titik berat sebuah benda terapung

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

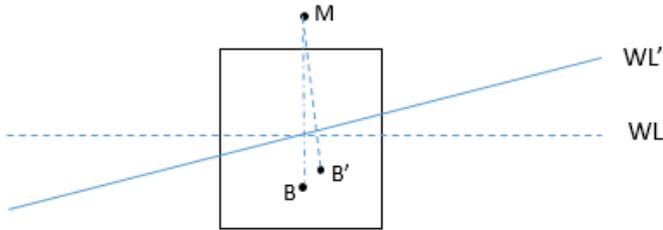
Titik apung (*center of buoyancy*) dikenal dengan titik B dari sebuah benda, merupakan titik tangkap dari resultan gaya-gaya yang menekan keatas dari bagian benda yang terbenam dalam air.



Gambar 2. 9 Letak titik berat di air

Titik tangkap B bukanlah merupakan suatu titik yang tetap, akan tetapi akan berpindah- pindah oleh adanya perubahan sarat dari benda. Dalam stabilitas benda, titik B inilah yang menyebabkan benda mampu untuk tegak kembali setelah mengalami senget. Letak titik B tergantung dari besarnya senget benda (bila senget berubah maka letak titik B akan berubah/ berpindah). Bila benda menyenget titik B akan berpindah kesisi yang rendah.

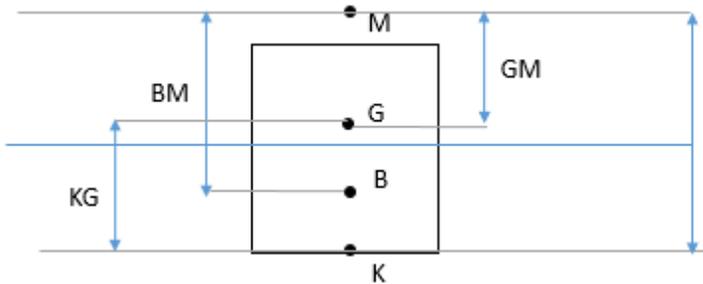
- Titik Metasentris (M)
Titik metasentris atau lebih dikenal dengan titik M dari sebuah benda, merupakan sebuah titik semu dari batas dimana titik G tidak boleh melewati di atasnya agar supaya benda tetap mempunyai stabilitas yang positif (stabil). Meta artinya berubah- ubah jadi titik metasentris dapat berubah letaknya, dan tergantung dari besarnya sudut senget. Apabila benda senget pada sudut kecil maka titik apung B bergerak di sepanjang busur di mana titik M merupakan titik pusatnya di bidang tengah benda (*center of line*) dan pada sudut senget yang kecil ini perpindahan letak titik M masih sangat kecil, sehingga masih dapat dikatakan tetap.



Gambar 2. 10 Letak titik *metacenter*

2.5 Ukuran dalam Stabilitas

Ada beberapa ukuran stabilitas yang sering digunakan dalam stabilitas, hal ini lah yang nantinya akan dipergunakan untuk merancang stabilitas pada Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut- Sistem Bandul, seperti pada gambar berikut:



Gambar 2. 11 Ukuran-ukuran yang di gunakan dalam perhitungan stabilitas

- KG-Tinggi titik dari *keel* ke *center of gravity*
Nilai KB untuk kapal kosong diperoleh dari hitungan.
- BM- Radius *Metacentric*
BM dinamakan jari- jari metasentris atau metasentris radius karena bila kapal mengoleng dengan sudut- sudut yang kecil, maka lintasan pergerakan titik B merupakan sebagian busur lingkaran dimana M merupakan titik pusatnya dan BM sebagai jari- jarinya. Titik M masih bisa dianggap tetap karena sudut olengnya kecil.
- KB – Tinggi titik apung dari *keel*

Letak titik B diatas keel bukanlah suatu titik yang tetap, akan tetapi berpindah pindah oleh adanya perubahan sarat atau senget kapal. Menurut Rubianto (1996), nilai KB dapat dicari:

Untuk kapal tipe *plat bottom*, $KB = 0.50d$

Untuk kapal tipe *V bottom*, $KB = 0.67d$

Untuk kapal tipe *U bottom*, $KB = 0.53d$

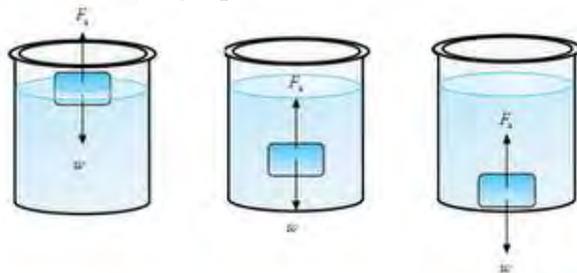
Dimana d adalah *draft* kapal

2.6 Kestimbangan Benda dalam Fluida

Benda terendam didalam zat cair diam, gaya- gaya yang bekerja adalah tekanan hidrostatis pada seluruh permukaan benda dan berat benda. Pada benda terendam dalam zat cair diam terdapat

- Komponen Gaya Horizontal : sama dan berlawanan arah sehingga saling meniadakan dan benda tidak bergerak
- Komponen Gaya Vertikal : akibat tekanan tiap satuan luas bertambah dengan kedalaman, sehingga komponen gaya keatas (F_u) lebih besar dari komponen gara arah ke bawah (F_d) atau resultannya adalah gaya keatas yang bekerja pada benda.

Perbedaan antara gaya tekanan ke atas dan ke bawah pada benda disebut gaya apung (F_b). Gaya apung ini dapat dijelaskan dengan hukum Archimedes: “Benda yang terapung/ terendam dalam zat cair akan mengalami gaya apung yang besarnya sama dengan berat zat cair yang dipindahkan benda tersebut”.



Gambar 2. 12 Tiga kondisi kesetimbangan

Dimana:

F_G : Gaya Berat

D : Sarat/ draft

B : Titik apung (titik dimana gaya apung bekerja, atau titik berat air dari volume zat cair yang dipindahkan)

F_B : Gaya Apung

G : Titik Berat

Terdapat tiga kemungkinan yang akan terjadi jika benda diletakkan di dalam zat cair

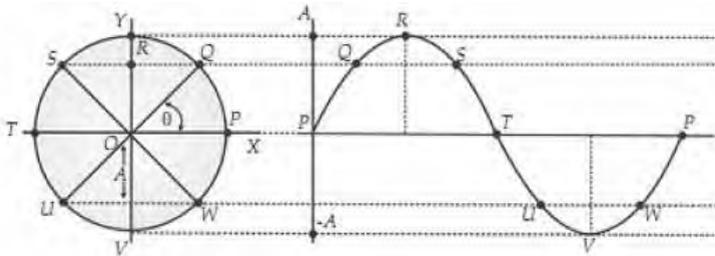
- $FB > FG$: benda akan terapung
- $FB < FG$: benda akan tenggelam

$FB = FG$: benda melayang

2.7 Gerak Harmonik Sederhana

Sebuah pendulum sederhana dapat dideskripsikan sebagai sebuah massa yang digantungkan pada tali yang massanya dapat diabaikan sehingga dapat bergerak bolak-balik. Pendulum sederhana dapat didekati sebagai sebuah besi kecil berbentuk silinder dengan jari-jari yang kecil dan massa yang besar jika dibandingkan dengan panjang dan massa dari tali yang digunakan untuk menggantung besi silinder tersebut.

Gerak harmonik sederhana adalah gerak bolak-balik benda melalui suatu titik kesetimbangan tertentu dengan banyaknya getaran benda dalam setiap sekon selalu konstan. Gerak harmonik dapat dinyatakan dengan grafik posisi partikel sebagai fungsi waktu berupa sinus atau kosinus seperti halnya pada gambar 2.13 Contoh gerak harmonik antara lain adalah gerakan sebuah bandul yang tergantung pada suatu tali yang massanya dapat diabaikan seperti halnya penjelasan di atas.



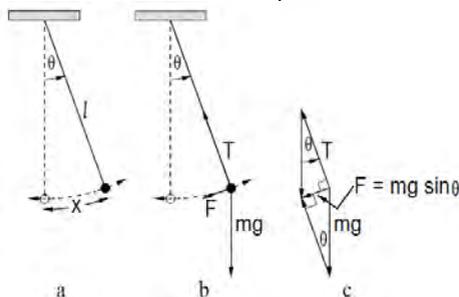
Gambar 2. 13 Ilustrasi gerak harmonik sederhana

Ketika pendulum dipindahkan dari titik equilibriumnya, akan ada gaya pemulih yang membuat pendulum kembali ke titik kesetimbangannya. Gaya pemulih pada pendulum ini besarnya merupakan resultan dari berat pendulum dengan tegangan dari tali. Jika massa dari pendulum adalah m dan tergantung pada tali sepanjang l dan berpindah dengan sudut θ dan jarak x dari titik kesetimbangan (gambar 2.14), maka gaya gravitasi akan bernilai sebagaimana persamaan 2.1

$$F = mg \sin \theta \quad (2.1)$$

Jika sudut θ bernilai kecil, maka $\sin \theta$ akan sama dengan θ , dan apabila kita substitusikan x/l untuk θ , maka akan didapatkan persamaan 2.2 di bawah ini.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \quad (2.2)$$



Gambar 2. 14 Gaya yang bekerja pada pendulum

Selain itu, parameter yang penting pada gerak harmonik sederhana adalah simpangannya. Simpangan getaran harmonik

sederhana dapat dianggap sebagai proyeksi partikel yang bergerak melingkar beraturan pada diameter lingkaran sebagaimana gambar 2.13 yang melukiskan sebuah partikel yang bergerak melingkar beraturan dengan kecepatan sudut ω dan jari-jari A . Anggap mula-mula partikel berada di titik P. Pada saat $t = 0$, partikel berada di titik P, setelah t sekon berada di Q. Besarnya sudut yang ditempuh adalah sebagaimana persamaan 2.3 dan 2.4.

$$\theta = \omega t \quad (2.3)$$

$$\theta = \frac{2\pi t}{T} \quad (2.4)$$

Simpangan gerak harmonik sederhana merupakan proyeksi titik Q pada salah satu sumbu utamanya (sumbu Y). Jika A adalah amplitudo simpangan (m), T adalah periode (s), ω adalah kecepatan sudut (rad/s), t adalah waktu (s), dan simpangan itu dinyatakan dengan sumbu Y, maka:

$$Y = A \sin \theta \quad (2.5)$$

$$Y = A \sin \frac{2\pi t}{T} \quad (2.6)$$

Besar sudut (θ) dalam fungsi sinus disebut sudut fase. Jika partikel mula-mula berada pada posisi sudut θ_0 , maka persamaanya dapat dituliskan sebagaimana persamaan 2.7 sampai dengan 2.9.

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

$$Y = A \sin(\omega t + \theta_0) \quad (2.8)$$

$$Y = A \sin\left(\frac{2\pi t}{T} + \theta_0\right) \quad (2.9)$$

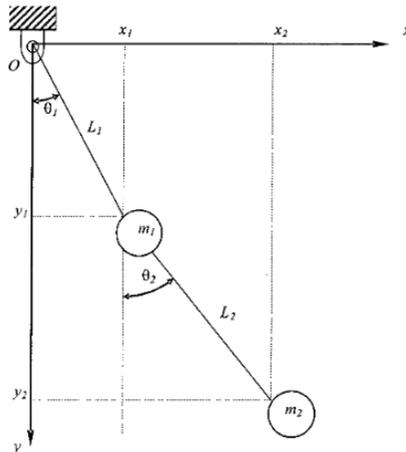
Maka sudut fase getaran harmoniknya adalah sebagaimana persamaan di bawah ini.

$$\theta = \frac{2\pi t}{T} + \theta_0 \quad (2.10)$$

2.8 Koordinat Umum dan Persamaan Lagrange

Persamaan Lagrange memberikan cara yang sistematis untuk memformulasikan persamaan gerak dari sistem mekanik atau sistem struktural yang fleksibel dengan derajat kebebasan yang banyak. Dengan menggunakan persamaan Lagrange (persamaan 2.11), solusi dari suatu persamaan diferensial getaran dengan derajat kebebasan yang banyak dapat lebih mudah untuk

didapatkan dibandingkan ketika menggunakan metode Newton. Dengan menggunakan persamaan Lagrange, maka pendekatan skalar diperoleh dengan adanya nilai skalar dari energi kinetik dan energi potensial untuk masing-masing koordinat umum. Misalnya saja kita tinjau sistem dengan pendulum bertingkat sebagaimana gambar 2.15.



Gambar 2. 15 Sistem dengan pendulum bertingkat

Koordinat umum dari sistem di atas yaitu θ_1 dan θ_2 . Setelah didapatkan energi kinetik dan energi potensial dari masing-masing koordinat umum, maka solusi dari persamaan diferensial getaran dengan pendulum bertingkat dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan Lagrange.

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial T}{\partial q} + \frac{\partial U}{\partial q} + \frac{\partial DE}{\partial \dot{q}} = Q_r \quad (2.11)$$

Dimana:

- T = Energi kinetik sistem
- U = Energi potensial sistem
- DE = Energi redaman sistem
- Q_r = Gaya Luar
- q = Koordinat Umum

2.9 Penelitian Terdahulu

Potensi energi gelombang laut di dunia diestimasikan sebesar 2 TW. Namun, diperlukan alat konversi khusus untuk mengubah energi gelombang laut menjadi energi listrik. Pada dasarnya prinsip kerja teknologi yang mengkonversi energi gelombang laut menjadi energi listrik adalah mengakumulasi energi gelombang laut untuk memutar turbin generator. Pengembangan dari alat konversi energi gelombang (*Wave Energy Converter-WECs*) telah banyak dilakukan sebelumnya.

Teknologi yang dapat digunakan untuk mengeksploitasi energi gelombang laut pertama kali ditemukan oleh Girard bersaudara, ilmuwan dari Prancis pada tahun 1799. Informasi mengenai alat yang diciptakan oleh Girard bersaudara tidak begitu banyak diketahui sehingga tidak banyak dikembangkan. Selama dekade pertama abad ke 19, seorang insinyur bernama M. Fursenot di Algeria menciptakan dan menginstalasi alat yang dapat menangkap osilasi gelombang laut dan mengubahnya menjadi bentuk energi lain menggunakan sistem buoyant yang dapat berosilasi ke atas dan ke bawah yang sampai saat ini masih banyak digunakan sebagai WECs di dunia. Penelitian tentang WECs terus dikembangkan sampai pada tahun 1898, seorang mekanik bernama P. Wright mematenkan karyanya yang diberi nama "*Wave Motor*". Pada abad ke 20, Skotlandia telah membangun WECs dengan jenis *oscillating water column* (OWC) di Islay tepatnya pada tahun 2000 yang dapat memproduksi listrik sebesar 500 kW. Portugis juga telah membangun WECs jenis pelamis pada September 2008. Sistem pelamis ini juga telah dikembangkan di UK. Pelamis merupakan divais yang mengapung dengan segmen silinder besi berlubang yang terhubung satu sama lain yang masing-masing sambungan mempunyai dua derajat kebebasan.

Penemuan WECs lain dengan mekanisme kerja yang cukup sederhana yaitu pembangkit listrik tenaga gelombang laut sistem bandulan (PLTGL-SB) yang merupakan salah satu teknologi dari Indonesia karya Zamrisyaf dari Badan Penelitian dan Pengembangan Ketenagalistrikan PT. Perusahaan Listrik Negara (Persero). Studi pemodelan dan simulasi Pembangkit Listrik

Tenaga Gelombang Laut-Sistem Bandulan (PLTGL – SB) dilakukan secara kerjasama antara Badan Penelitian dan Pengembangan Ketenagalistrikan PT. Perusahaan Listrik Negara (Persero) dan Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat Institut Teknologi Sepuluh Nopember tahun 2010. Pembangkit listrik yang digagas Zamrisyaf dibuat dengan memanfaatkan tenaga gelombang laut dan sistem bandulan. Rancang bangunnya berbentuk ponton, sampan yang rendah dan lebar, yang ditempatkan mengapung di atas permukaan air laut.

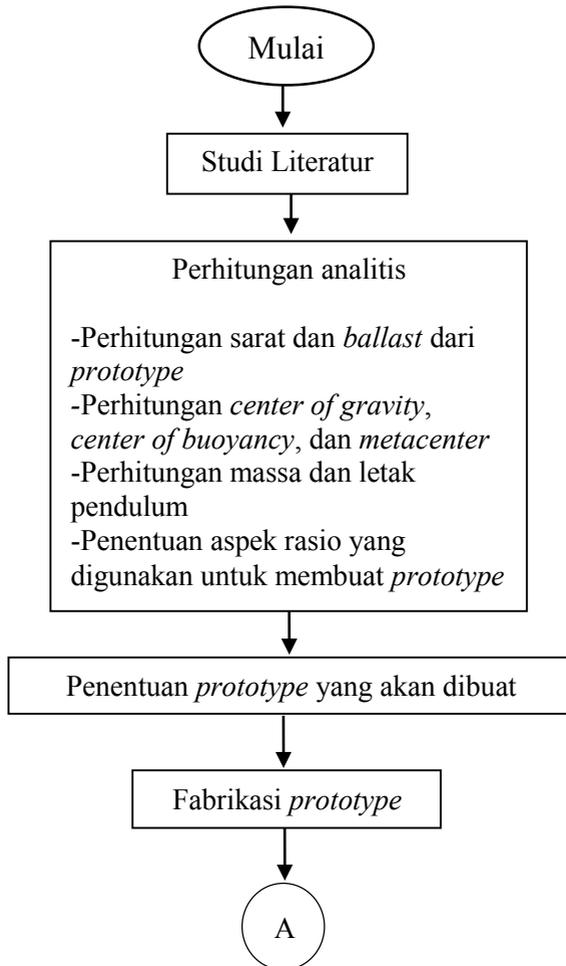
Pada Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut Sistem Bandulan (PLTGL-SB) ini, gerakan air laut akan menggerakkan ponton sesuai dengan alur dan fluktuasi gelombang air laut. Gerakan ponton akibat fluktuasi gelombang laut itu akan membuat bandul-bandul yang ada di dalamnya ikut bergoyang seperti lonceng. Gerakan bandul tersebut yang akan ditransmisikan menjadi gerakan putar untuk memutar dinamo. Dari situlah selanjutnya PLTGL-SB dapat menghasilkan listrik.

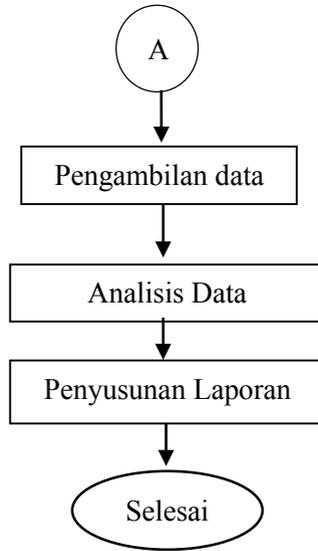
Gerakan ponton datar cenderung acak atau tidak beraturan diakibatkan oleh datangnya gelombang laut yang menggangukannya dan tidak beraturan pula. Pergerakan ponton datar yang acak ini mempengaruhi perputaran bandul yang berada di atasnya.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Tahapan-tahapan dalam pengerjaan tugas akhir ini akan ditunjukkan pada gambar 3.1 yang merupakan diagram alir dari pelaksanaan tugas akhir ini. Melalui gambar tersebut dapat diketahui tahapan-tahapan pelaksanaan tugas akhir.





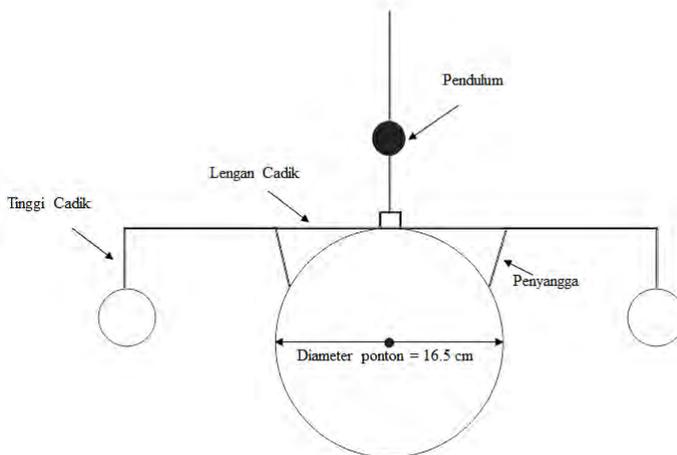
Gambar 3. 1 Diagram alir metodologi penelitian

3.1 Studi Literatur

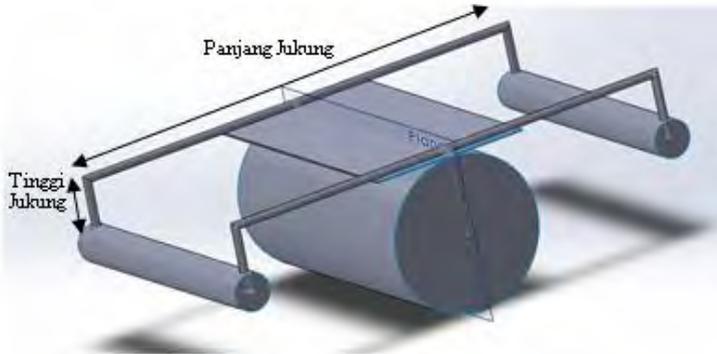
Studi literatur meliputi pemahaman konsep tentang tugas akhir yang akan dikerjakan mulai dari *review* jurnal pendukung sampai pengumpulan data yang dibutuhkan untuk menunjang pengerjaan tugas akhir ini. Dalam hal ini memahami prinsip kerja dari sistem pembangkit listrik tenaga gelombang laut sistem pendulum, pemahaman tentang aliran benda terendam, pemahaman tentang hidrodinamika, pemahaman tentang *flow separation*, aspek rasio pada perancangan turbin, serta pengambilan data mulai dari ukuran gelombang yang diciptakan untuk digunakan pada eksperimen sampai dengan frekuensi beserta *setting* alatnya. Studi literatur ini juga membantu peneliti untuk menentukan dimensi dari alat yang akan dibuat terkait dengan kestabilan dan respon gerakan benda tersebut saat diberi gelombang.

3.2 Perhitungan Analitis

Setelah ditentukan dimensi *prototype* ponton yang akan dibuat, maka dilakukan perhitungan analitis untuk menunjang data sehingga dapat diketahui kombinasi ukuran yang sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan, yaitu kondisi dimana ponton terus oleng namun tetap dalam kondisi yang stabil positif. Dimensi dari *prototype* ponton yang dibuat sendiri yaitu berbentuk silinder sepanjang 32 cm dengan jari-jari diameter 16.5 cm. yang memiliki cadik simetris di kedua sisinya sepanjang 32 cm dengan diameter 4 cm. Pendulum yang dibuat yaitu pendulum vertikal. Sedangkan arah gelombang yang diberikan yaitu 90 derajat dari muka ponton. Untuk lebih jelasnya, desain alat dapat dilihat seperti gambar 3.1 dan 3.2.



Gambar 3. 2 Desain ponton tampak depan



Gambar 3.3 Desain ponton dalam 3D

Spesifikasi dari desain *prototype* ponton yang akan dilakukan perhitungan analisisnya yaitu sebagai berikut.

| | |
|-------------------------|---|
| Diameter Silinder Besar | : 16.5 cm |
| Tebal Silinder Besar | : 0.7 cm |
| Diameter Silinder Kecil | : 4 cm |
| Tebal Silinder Kecil | : 0.2 cm |
| Panjang Silinder Besar | : 32 cm |
| Panjang Silinder Kecil | : 32 cm |
| Massa Jenis Silinder | : 1.39 gr/cm ³ |
| Sarat | : $\frac{1}{2}$ dan $\frac{2}{3}$ diameter ponton |
| Tinggi Jukung | : 1.5 cm dan 4 cm |
| Panjang Plat | : 32 cm |
| Lebar Plat | : 17 cm |
| Massa Jenis Plat | : 1.2 gr/cm ³ |

Setelah ditentukan ukuran utama dari dimensi ponton beserta bahan yang digunakan, maka dihitung parameter-parameter yang nantinya menentukan kestabilan dari *prototype* yang dibuat. Parameter-parameter tersebut yaitu COB, COG, dan *metacenter*. Hal pertama yang harus dihitung yaitu menentukan massa dari masing-masing komponen sehingga dapat diketahui massa total dari keseluruhan sistem. Perhitungan massa dapat dilakukan menggunakan persamaan 3.1 dengan ρ adalah massa jenis benda

dan V adalah volume benda. Setelah massa benda ditemukan, maka perlu dicari berat benda sebagaimana persamaan 3.2.

$$m_{tot} = \sum \rho_n V_n \quad (3.1)$$

$$B_{tot} = \sum m_n g \quad (3.2)$$

Apabila berat dari masing-masing komponen dan berat total sudah ditemukan, maka *center of gravity* (COG) dapat dicari menggunakan persamaan 3.3 dengan B adalah berat benda dan l adalah titik pusat masing-masing bagian ditinjau dari sumbu absis.

$$COG = \frac{B_1 l_1 + B_2 l_2 + B_n l_n}{B_{tot}} \quad (3.3)$$

Sedangkan untuk mencari nilai *center of buoyancy* (COB), akan dapat lebih mudah dicari karena kita telah menentukan dari awal besarnya bagian ponton yang terendam. COB diibaratkan sebagai COG dari bagian benda yang terendam, maka cara mencarinya akan sama dengan COG dengan catatan hanya bagian ponton yang terendam saja yang dijadikan sebagai tinjauan. Maka, COB dapat dicari dengan menggunakan persamaan 3.4.

$$COB = \frac{B_{terendam} l_{terendam}}{B_{terendam}} \quad (3.4)$$

Langkah selanjutnya yang harus dilakukan yaitu menghitung metacenter dari ponton. Metacenter sendiri dapat dicari menggunakan persamaan 3.5 dengan I_0 adalah momen inersia sistem, V_t adalah volume ponton yang terendam, dan $G_0 B_0$ adalah jarak antara COG dengan COB.

$$M = \frac{I_0}{V_t} - G_0 B_0 \quad (3.5)$$

Pada benda yang terapung, maka besarnya gaya Archimedes akan sama dengan gaya gravitasinya. Maka dari prinsip tersebut, kita dapat mengetahui seberapa besar bagian yang terendam sehingga kita dapat mengetahui seberapa besar *ballast* yang dibutuhkan agar ponton dapat mencapai sarat yang telah ditentukan sebelumnya. Maka untuk menentukan *ballast*, dapat dicari sebagaimana persamaan 3.6 sampai dengan 3.8 dengan ρ_f adalah massa jenis fluida, V_t adalah volume ponton yang terendam, m_s adalah massa total sistem sehingga ponton dapat terendam sesuai dengan sarat yang telah ditentukan, dan g adalah percepatan gravitasi bumi.

$$Fa = m_s g \quad (3.6)$$

$$\rho_f V_t g = m_s g \quad (3.7)$$

$$m_s = \rho_f V_t \quad (3.8)$$

Jika massa sistem sudah didapatkan, maka *ballast* dapat ditemukan dengan mengurangi massa sistem dengan massa total ponton yang sebelumnya telah dihitung menggunakan persamaan 3.1.

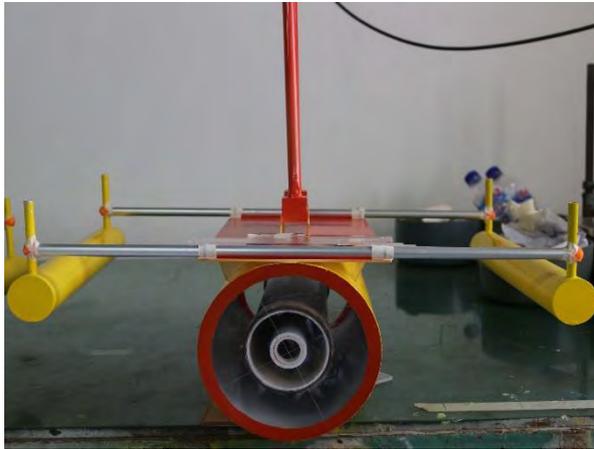
3.3 Penentuan *Prototype* yang Akan Dibuat

Setelah dilakukan perhitungan analitis, maka dapat ditentukan kelayakan *prototype* tersebut terkait dengan spesifikasinya yang telah sesuai dengan tujuan penelitian. Jika pada perhitungan sebelumnya titik metacenter berada paling atas, disusul dengan COG, lalu COB, maka ponton telah stabil positif sehingga spesifikasi yang telah ditentukan sebelumnya dapat dibuat.

Pada eksperimen kali ini, terdapat 48 variasi dengan 3 variasi periode gelombang, 2 variasi panjang lengan cadik, 2 variasi tinggi cadik yang dapat diwakili oleh sarat air, 2 variasi panjang lengan pendulum, dan 2 variasi massa pendulum. Untuk lebih jelasnya, variasi dari eksperimen ini dapat dilihat pada lampiran A Tinggi gelombang yang digunakan pada proses pengambilan data sendiri bernilai 1.5 cm untuk semua jenis variasi.

3.4 Fabrikasi *Prototype*

Setelah dilakukan perhitungan analitis dan penentuan dimensi ponton, maka *prototype* dapat difabrikasi sesuai dengan spesifikasi desain. Gambar 3.1 dan 3.2 menunjukkan *prototype* ponton yang telah dibuat.



Gambar 3. 4 Ponton dengan *ballast* 2.3 kg



Gambar 3. 5 Ponton dengan *ballast* 1.2 kg

3.5 Pengambilan Data

Pada studi eksperimental kali ini, pengambilan data dilakukan di *towing tank* laboratorium Hidrodinamika Teknik Perkapalan FTK-ITS. Yang memiliki panjang 50 m, lebar 3 m, dan kedalaman 2 m. Data-data yang diambil yaitu video pergerakan ponton dan

pendulum untuk mengetahui simpangannya, serta amplitudo *roll* dan *heave* dari ponton menggunakan sensor yang telah tersedia di laboratorium tersebut.



Gambar 3. 6 Setting alat untuk pengambilan data

3.6 Analisis Data dan Penyusunan Laporan

Seperti yang telah disebutkan pada subbab 3.5 bahwa data yang didapatkan dari eksperimen berupa simpangan *roll* dan *heave* dari ponton dan juga rekaman video untuk mengetahui data simpangan pendulum. Hal pertama yang dilakukan adalah mengolah video tersebut sehingga diperoleh data simpangan pendulum secara kuantitatif. Setelah didapatkan data simpangan pendulum dan juga ponton, maka dilakukan olah data sehingga diperoleh grafik dan tabel yang dapat merepresentasikan data-data tersebut. Selain itu, perlu dilakukan perhitungan daya yang dihasilkan oleh masing-masing kondisi dari eksperimen yang dilakukan. Sebelum dicari daya, maka nilai torsi (τ) haruslah diketahui. Torsi dapat diketahui menggunakan persamaan 3.9

dengan m adalah massa pendulum, g adalah percepatan gravitasi, l adalah panjang lengan pendulum, dan θ adalah simpangan pada osilasi pendulum.

$$\tau = mgl \sin \theta \quad (3.9)$$

Selain torsi, kecepatan sudut dari osilasi pendulum juga harus diketahui. Kecepatan sudut pendulum sendiri dapat diketahui nilainya menggunakan persamaan 3.10 dengan g adalah percepatan gravitasi, l adalah panjang lengan pendulum, dan h adalah perbedaan ketinggian pendulum saat berada pada simpangan θ yang besarnya dapat dicari menggunakan persamaan 3.11. Setelah mengetahui torsi dan kecepatan sudut, maka daya dapat dicari menggunakan persamaan 3.12.

$$\omega = \frac{\sqrt{2gh}}{l} \quad (3.10)$$

$$h = h - h \cos \theta \quad (3.11)$$

$$P = \tau \omega \quad (3.12)$$

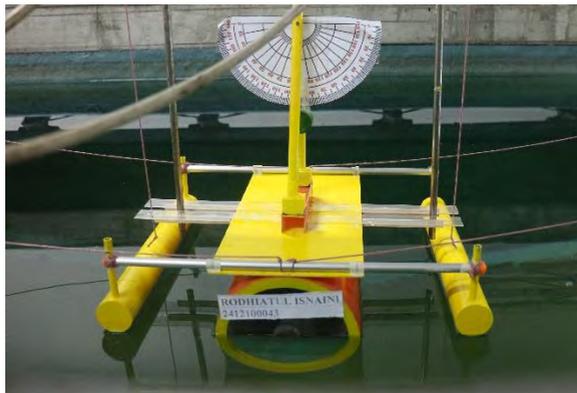
Setelah semua data selesai diolah, maka dilakukan penyusunan laporan yang merupakan tahap akhir dari pengerjaan tugas akhir ini dan dilakukan sebagai penyampaian hasil dan analisis dari pelaksanaan program penelitian. Laporan mengacu pada tahap-tahap sebelumnya dan menjelaskan seluruh proses kegiatan dengan menggunakan sistematika tertentu.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Dimensi Ponton

Ponton yang diuji adalah *prototype* dengan perbandingan 1:10. *Prototype* ponton yang dibuat yaitu berbentuk silinder dengan cadik simetris di kedua sisi dengan ukuran panjang 320 mm. Diameter dari ponton yaitu 165 mm, sedangkan cadik memiliki diameter 40 mm. Untuk pendulum yang digunakan terdiri dari 2 variasi massa, yaitu 20 gram dan 40 gram dengan variasi panjang lengan 106.7 mm dan 165 mm. Untuk lebih jelasnya, bentuk *prototype* beserta pendulum dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 4. 1 Dimensi ponton dengan *ballast* 1.2 kg



Gambar 4. 2 Pendulum dengan massa 20 gram dan panjang lengan 106.7 mm



Gambar 4. 3 Pendulum dengan massa 40 gram dan panjang lengan 165 mm

4.2 Perhitungan Massa, Volume, dan Kestabilan Ponton

Setelah ditentukan geometri dari ponton yang akan dibuat, maka perlu dilakukan perhitungan untuk mengetahui kestabilan ponton ketika terkena gaya eksitasi dari gelombang. Hal yang paling mempengaruhi kestabilan dari suatu benda ketika tercelup di air adalah banyaknya bagian yang terendam dari benda tersebut. Tinggi dari bagian benda yang tercelup di air disebut sebagai sarat (t). Jika sarat diketahui, maka *center of buoyancy* (COB) juga akan

diketahui. Untuk mengetahui semua data tersebut, maka perlu dihitung massa dan volume dari ponton yang akan diteliti.

Tabel 4. 1 Berat Ponton Beserta Konstruksi Pendulum

| No. | Bagian Ponton | Volume (cm ³) | Massa Jenis (gr/cm ³) | Massa (gr) |
|-----|---------------------|---------------------------|-----------------------------------|------------|
| 1. | Ponton | 1076.58 | 1.39 | 1496.45 |
| 2. | Cadik | 147.95 | 1.39 | 205.66 |
| 3. | Tutup ponton | 213.72 | 1.20 | 256.46 |
| 4. | Tutup cadik | 25.12 | 1.20 | 30.14 |
| 5. | Lengan cadik 1 | 7.61 | 2.71 | 57 |
| 6. | Lengan cadik 2 | 6.33 | 2.71 | 47.8 |
| 7. | Tinggi cadik | 15.2 | 2.71 | 70.68 |
| 8. | Konstruksi pendulum | - | - | 80.00 |

Berdasarkan perhitungan, maka diperoleh massa total dari ponton beserta konstruksi cadik dan pendulum yaitu sebesar 2.12 kg. Sarat yang dipilih sendiri yaitu sebesar 0.5 dan juga 0.67 diameter ponton. Melalui perhitungan analitis, dapat diperoleh bahwa letak titik COB, COG, dan *metacenter* sesuai dengan teori kestabilan sehingga ponton dapat kembali ke posisi semula (stabil positif).



Gambar 4. 4 Letak titik agar benda stabil positif (K=*keel*, B=COB, G=COG, dan M=*metacenter*)

Menurut perhitungan, massa dari sistem yaitu sebesar 2.12 kg. Namun, dengan massa 2.12 kg sarat yang dikehendaki tidak tercapai sehingga diperlukan adanya *ballast* atau pemberat. Data mengenai titik COG, COB, *metacenter*, dan juga *ballast* dapat dilihat pada tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Kestabilan Ponton

| Sarat | COG (cm) | COB (cm) | Metacenter (cm) | Ballast (kg) |
|--------|-------------|-------------|--------------------|-----------------|
| 0.5 D | 8.67 | 7.49 | 12.17 | 1.2 |
| 0.67 D | 9.26 | 7.68 | 11.78 | 2.3 |

4.3 Hasil Eksperimen Ponton dan Simpangan Pendulum

Pada penelitian ini, pengambilan data diperoleh dengan cara menguji *prototype* PLTGL-SB dengan dimensi seperti halnya dijelaskan pada poin 4.1 di *towing tank* laboratorium hidrodinamika jurusan Teknik Perkapalan FTK-ITS. Jumlah dari variasi yang diuji yaitu sebanyak 48 buah, dengan 3 variasi periode gelombang, 2 variasi panjang lengan cadik, 2 variasi ketinggian cadik, 2 variasi panjang lengan pendulum, dan 2 variasi massa pendulum (lampiran A).

Secara umum, karakteristik osilasi dari hasil eksperimen terbagi menjadi 4 bagian besar. Karakteristik pertama yaitu dimana tidak terjadi osilasi sama sekali. Fenomena ini terjadi pada variasi yang diberi gelombang datang dengan periode sebesar 0.4 detik.

Karakteristik kedua yaitu ketika pendulum berosilasi dengan amplitudo lebih kecil sama dengan 20 derajat. Fenomena ini terjadi pada beberapa variasi ponton yang diberi gaya gelombang dengan periode sebesar 0.6 ataupun 0.8 detik.

Karakteristik ketiga yaitu dimana pendulum bergetar maju mundur, bukan berosilasi ke samping sebagaimana diharapkan oleh peneliti. Fenomena ini terjadi pada 5 variasi yang diberi gaya gelombang dengan periode sebesar 0.6 detik (variasi 17, variasi 26, variasi 32, variasi 38, variasi 47).

Karakteristik keempat yaitu ketika amplitudo osilasi pendulum bernilai besar, yaitu lebih dari 20 derajat. Karakteristik keempat ini

terjadi pada beberapa variasi yang diberi gelombang dengan periode 0.6 dan 0.8 detik. Data lebih lengkap mengenai hasil eksperimen dapat dilihat pada lampiran B.

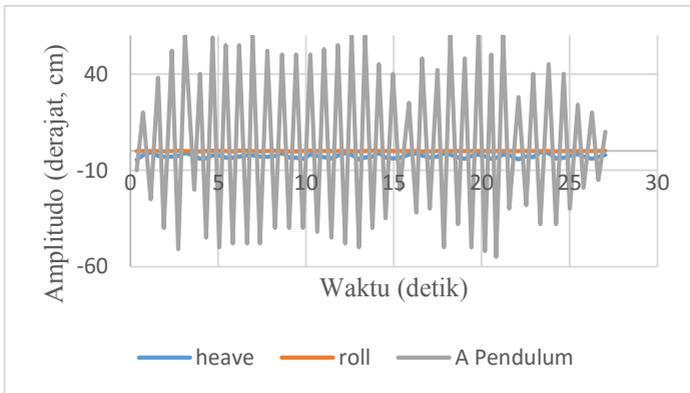
Dari keempat karakteristik yang telah disebutkan di atas, jenis keempatlah yang memenuhi syarat untuk digunakan sebagai pembangkit listrik tenaga gelombang laut karena menghasilkan amplitudo osilasi yang besar sehingga dapat menghasilkan daya yang besar pula. Dari beberapa variasi pada yang masuk karakteristik ke empat tersebut, terdapat 3 variasi yang menghasilkan amplitudo rata-rata dan amplitudo maksimum yang paling besar, yaitu variasi 12, 36, dan 42. Gambar 4.5 sampai dengan gambar 4.7 menunjukkan hasil osilasi pendulum beserta nilai *heaving* dan *rolling* dari ponton pada masing-masing variasi tersebut.

Amplitudo rata-rata yang paling besar terjadi pada saat yang diuji adalah ponton variasi 12 dengan nilai amplitudo rata-ratanya sebesar 41.82 derajat dan amplitudo maksimum sebesar 60 derajat. Sedangkan amplitudo rata-rata saat variasi 36 dan 42 secara berturut-turut nilainya adalah 36.52 derajat dan 32.54 derajat. Variasi 12 menghasilkan nilai simpangan pendulum paling besar karena memang merupakan kombinasi paling sesuai untuk memperoleh nilai amplitudo yang besar sebagaimana akan dijelaskan pada subbab 4.4.

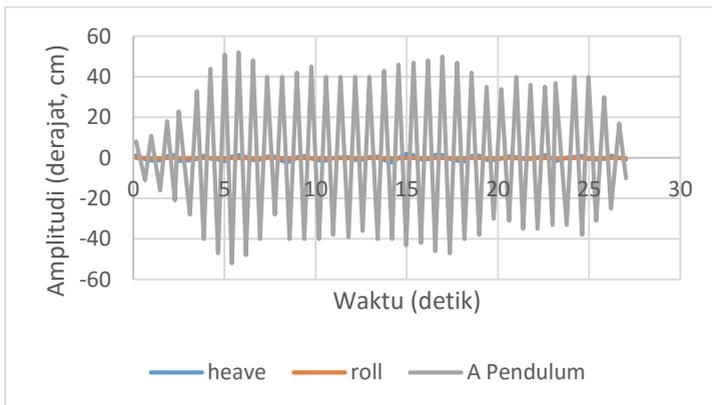
Jika digunakan analisis dimensional, maka saat diperbesar ke skala aslinya variasi 12 memiliki ukuran jari-jari ponton sebesar 1.65 m, jari-jari cadik sebesar 0.4 m, panjang ponton dan cadik 3.2 m, panjang lengan cadik 4.13 m, tinggi cadik 0.4 m, panjang lengan pendulum 1.067 m, serta massa pendulum sebesar 20 kg.

Selain dari segi dimensi, alat yang telah dibuat dalam skala sebenarnya perlu diberi gaya gelombang dengan parameter tertentu sehingga menghasilkan amplitudo osilasi yang sama sebagaimana eksperimen. Gelombang laut yang harus diberikan agar diperoleh amplitudo osilasi yang sama dengan hasil eksperimen *prototype* yaitu pada laut dengan tinggi gelombang dan periode rata-rata secara berturut-turut bernilai 1.55 m dan 8 detik atau amplitudo gelombang rata-rata sebesar 1 meter dengan periode rata-rata 5

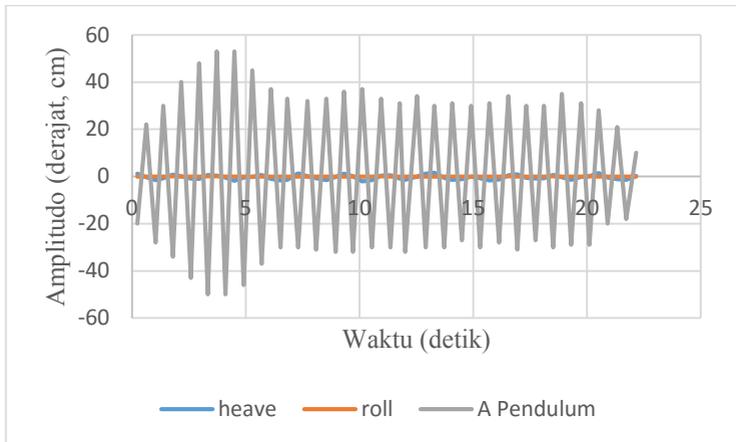
detik. Parameter ini berlaku untuk semua eksperimen dengan periode gelombang 0.8 s. Perhitungan mengenai perbesaran skala beserta parameter gelombang yang harus diberikan dapat dilihat pada lampiran C.



Gambar 4. 5 Gerakan ponton dan pendulum untuk variasi 12 ($T=0.8$ s; $P_c=413$ mm; $H_c=40$ mm; $L_p=106.7$ mm; $M_p=20$ gr)



Gambar 4. 6 Gerakan ponton dan pendulum untuk variasi 36 ($T=0.8$ s; $P_c=495$ mm; $H_c=15$ mm; $L_p=106.7$ mm; $M_p=20$ gr)

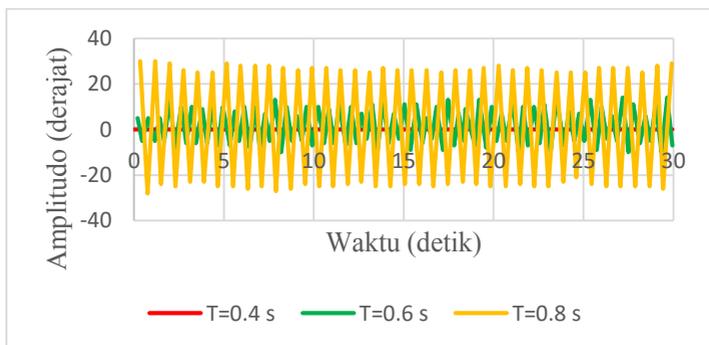


Gambar 4. 7 Gerakan ponton dan pendulum untuk variasi 42 ($T=0.8$ s; $P_c=413$ mm; $H_c=15$ mm; $L_p=106.7$ mm; $M_p=20$ gr)

4.4 Pengaruh Variabel Terhadap Osilasi Pendulum

Setelah dilakukan sebanyak 48 eksperimen, maka didapatkan pengaruh variabel yang terkait terhadap osilasi pendulum sebagaimana dijelaskan pada subbab 4.4.1 sampai dengan 4.4.5 seperti di bawah ini.

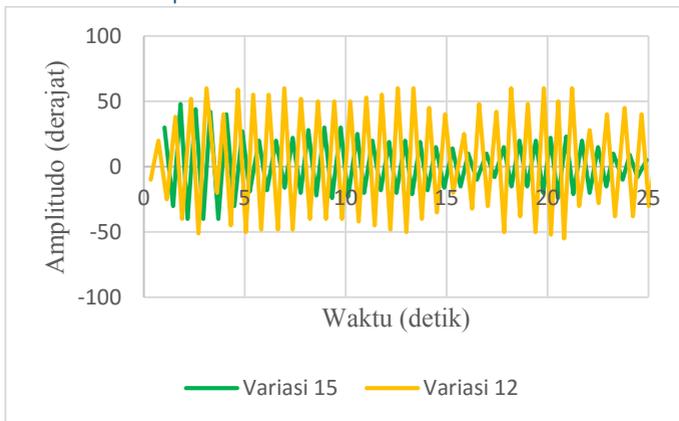
4.4.1 Efek Perubahan Periode Gelombang Terhadap Osilasi Pendulum



Gambar 4. 8 Osilasi pendulum dengan periode gelombang yang berbeda

Berdasarkan hasil eksperimen, didapatkan data bahwa semakin besar periode gelombang yang diberikan, maka amplitudo dari osilasi pendulum juga akan semakin besar. Semakin besar periode gelombang memang mengakibatkan sudut *rolling* akan menjadi semakin kecil, namun tidak demikian dengan kecepatan *rolling* yang terjadi. Semakin besar periode gelombang, maka kecepatan *rolling* akan semakin besar pula (Michael Karsten, 2012). Apabila kecepatan *rolling* besar, maka frekuensi ponton bergetar juga akan semakin cepat sehingga bandul akan makin mudah berosilasi.

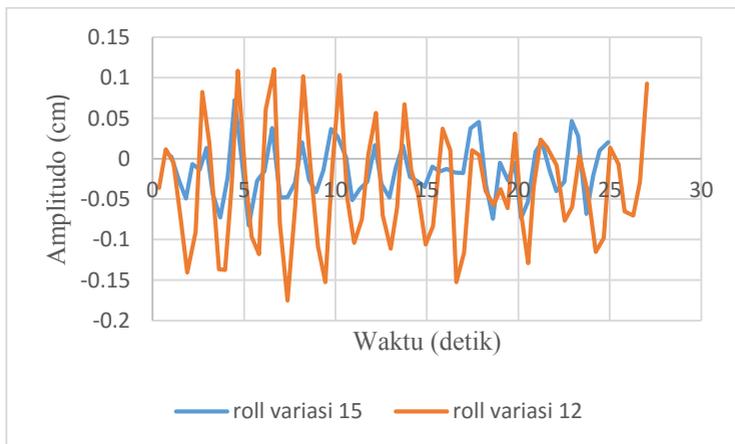
4.4.2 Efek Perubahan Panjang Lengan Cadik Terhadap Osilasi Pendulum



Gambar 4. 9 Osilasi pendulum dengan perubahan panjang lengan cadik

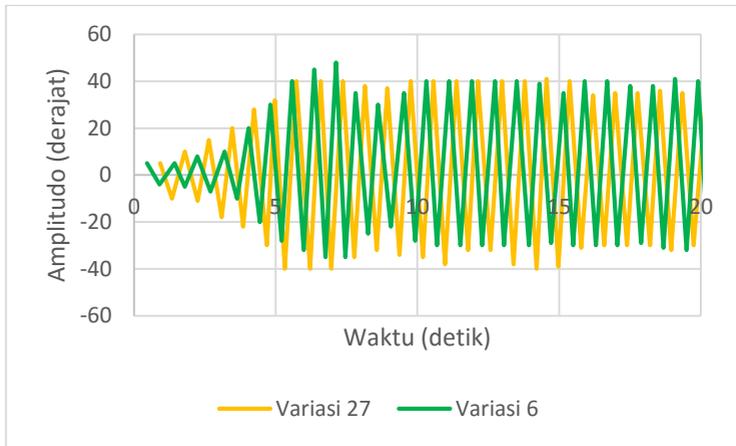
Berdasarkan tabel 3.1 variasi 15 adalah ketika ponton memiliki cadik dengan panjang lengan 495 mm dari ujung ke ujungnya, sedangkan pada variasi 12, panjang lengan cadik dari ujung ke ujung yaitu sebesar 413 mm.

Berdasarkan eksperimen, dapat kita lihat apabila panjang lengan cadik semakin besar, maka amplitudo rata-rata yang yang dihasilkan oleh osilasi pendulum akan semakin kecil. Pada saat variasi 12 (panjang lengan cadik=413 mm) amplitudo rata-rata dari osilasi pendulum yaitu sebesar 41.82 derajat dengan frekuensi getaran sebesar 1.23 Hz. Sedangkan ketika variasi 15 yang memiliki panjang lengan cadik 495 mm, pendulum akan berosilasi dengan amplitudo maksimum sebesar 21.44 derajat dan frekuensi 1.355 Hz. Menurut D. R. Berrett dan C. B. Barrass (1999) dengan memperbesar lebar kapal (panjang kapal di.anggap tetap), maka kapal akan semakin stabil. Hal inilah yang terjadi pada ponton yang diuji oleh penulis. Terlihat pada gambar 4.10 bahwa ponton variasi 15 dengan panjang lengan cadik yang semakin besar memiliki gerakan *rolling* yang lebih kecil, maka sebagai konsekuensi osilasi pendulum akan memiliki amplitudo yang lebih kecil pula.



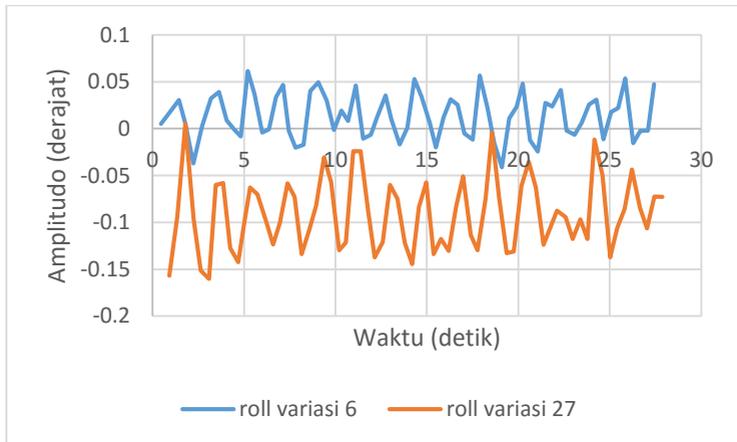
Gambar 4. 10 Gerakan *rolling* pada variasi 12 dan 15

4.4.1 Efek Perubahan Tinggi Cadik Terhadap Osilasi Pendulum



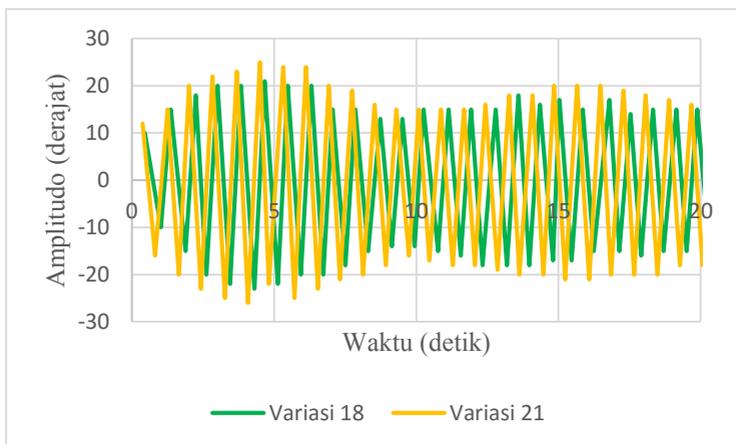
Gambar 4. 11 Osilasi pendulum dengan perubahan tinggi cadik

Pada eksperimen kali ini, perubahan tinggi cadik akan mempengaruhi besarnya sarat dari ponton yang tenggelam di air. Semakin besar tinggi cadik, maka nilai dari sarat ponton akan semakin kecil. Menurut Yoshiho Ikeda (2012) makin besar lambung kapal yang terendam, maka sudut *rolling* akan makin besar. Begitu pula hasil eksperimen yang telah dilakukan oleh penulis. Ponton yang memiliki sarat lebih besar (variasi 27, dengan sarat setinggi 106.7 mm) memiliki amplitudo *rolling* yang lebih besar dibandingkan dengan ponton yang memiliki sarat sebesar 82.5 mm. Perbandingan gerakan *rolling* ini dapat dilihat sebagaimana gambar 4.12. Amplitudo *rolling* yang lebih besar inilah penyebab variasi 27 memiliki amplitudo osilasi yang lebih besar dibandingkan dengan variasi 6.



Gambar 4. 12 Gerakan *rolling* pada saat variasi 6 dan 27

4.4.2 Efek Perubahan Massa Pendulum Terhadap Osilasinya

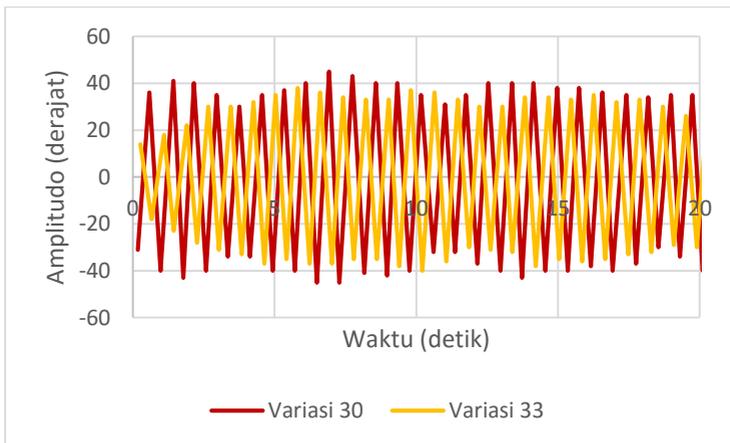


Gambar 4. 13 Osilasi pendulum dengan perubahan massa

Jika dilihat lagi persamaan 3.9 dapat diketahui bahwa massa akan berbanding terbalik dengan besarnya simpangan pendulum. Hal ini juga terjadi pada eksperimen yang telah

dilakukan oleh penulis. Dapat dilihat pada grafik 4.13 bahwa ponton dengan variasi 18 yang memiliki massa pendulum 40 gram memiliki simpangan rata-rata lebih kecil dibandingkan ketika ponton yang diuji adalah variasi 21 dengan massa pendulum 20 gram. Amplitudo pendulum saat variasi 18 yaitu bernilai 16.61 derajat, sedangkan variasi 21 memiliki amplitude osilasi pendulum rata-rata sebesar 19.32 derajat. Frekuensi dari osilasi pendulum sendiri tidak memiliki nilai perbedaan yang cukup signifikan sehingga dalam perhitungan daya nantinya tidak terlalu banyak berpengaruh.

4.4.3 Efek Perubahan Panjang Lengan Pendulum Terhadap Osilasinya



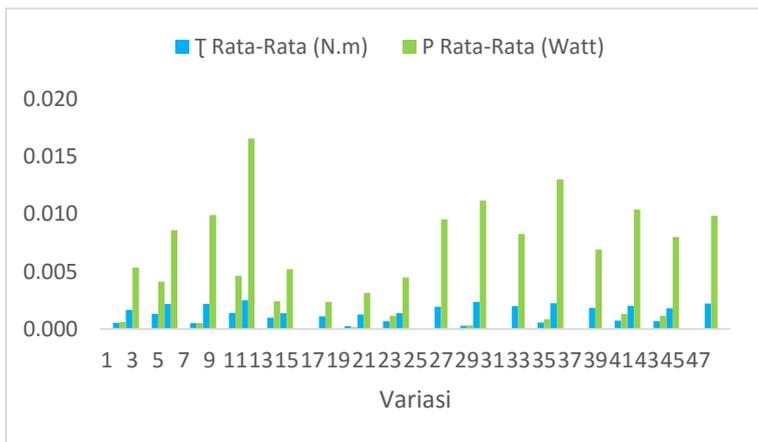
Gambar 4.14 Osilasi pendulum dengan perubahan panjang lengan lendulum

Jika dilihat pada persamaan 2.2, kita dapat mengetahui bahwa akar panjang lengan pendulum akan berbanding lurus dengan periodenya. Berdasarkan persamaan 2.4, simpangan sudut dari pendulum akan berbanding terbalik dengan periode. Sehingga dapat disimpulkan bahwa semakin pendek lengan pendulum maka simpangan akan semakin besar. Hal inilah yang menyebabkan simpangan pendulum dengan lengan

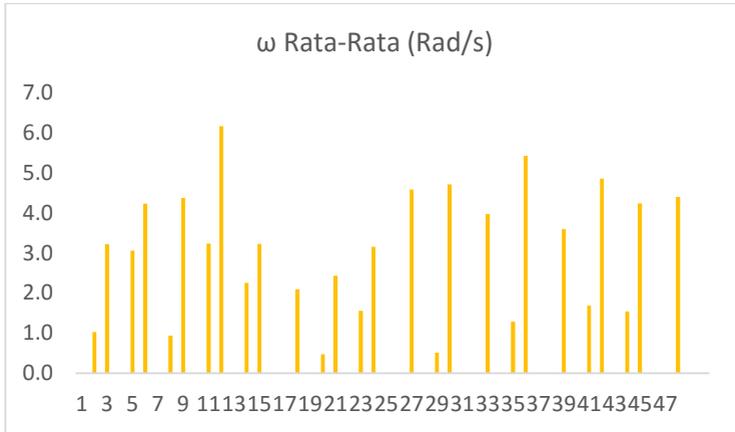
pendulum lebih panjang memiliki simpangan yang lebih kecil dibandingkan dengan pendulum dengan lengan lebih pendek sebagaimana pada gambar 4.14. Variasi 30 adalah ponton dengan lengan pendulum sebesar 106.7 mm dengan nilai simpangan pendulum rata-rata sebesar 38.01 derajat, sedangkan variasi 33 memiliki panjang lengan pendulum sebesar 165 mm dengan nilai simpangan pendulum rata-rata sebesar 31.87 derajat.

4.5 Perhitungan Torsi dan Daya

Berdasarkan langkah-langkah yang telah disebutkan sebelumnya pada subbab 3.6. maka didapatkan nilai torsi, omega, dan daya rata-rata dari masing-masing variasi sebagaimana gambar 4.15 dan gambar 4.16.



Gambar 4. 15 Torsi, kecepatan sudut, dan daya rata-rata pada masing-masing variasi



Gambar 4.16 Kecepatan sudut rata-rata pada masing-masing variasi

Jika dilihat pada gambar 4.15 dan 4.16 akan didapatkan bahwa daya rata-rata dan juga kecepatan sudut terbesar didapatkan saat variasi 12 yang pada saat kondisi tersebut diperoleh pula nilai simpangan terbesar dan rata-rata paling besar di antara variasi lainnya sebagaimana telah disebutkan pada subbab 4.3.

Berdasarkan perhitungan analitis, didapatkan bahwa daya yang diperoleh untuk variasi 12 yaitu sebesar 0.017 watt dengan kecepatan sudut rata-rata sebesar 6.173 m/s. Data lebih lengkap mengenai perhitungan daya yang dihasilkan oleh *prototype* dapat dilihat pada lampiran D.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Mengacu dari hasil analisis data dan pembahasan pada bab sebelumnya, maka dapat diambil beberapa kesimpulan tentang studi eksperimental ini sebagai berikut.

- Amplitudo osilasi pendulum menurun seiring dengan meningkatnya panjang lengan cadik, tinggi cadik, massa pendulum, dan panjang lengan pendulum memiliki, namun berbeda dengan kenaikan periode gelombang, amplitudo osilasi pendulum meningkat seiring dengan kenaikan parameter tersebut.
- Variasi yang menghasilkan nilai simpangan maksimum dan simpangan rata-rata paling besar yaitu variasi 12 dengan periode gelombang 0.8 s, panjang lengan cadik 413 mm, tinggi cadik 40 mm, panjang lengan pendulum 106.7 mm, dan massa pendulum 20 gram dengan nilai simpangan maksimum 60 derajat dan simpangan rata-rata 41.82 derajat.

5.2 Saran

Beberapa hal yang dapat disarankan dari hasil penelitian tugas akhir ini untuk kelanjutan pengembangannya antara lain:

- Salah satu hal yang mempengaruhi gerakan ponton adalah arah datangnya gelombang. Pada penelitian kali ini, arah gelombang yang digunakan yaitu 90 derajat dari muka ponton. Untuk penelitian selanjutnya, dapat dilakukan variasi dari pengaruh arah datangnya gelombang terhadap pergerakan ponton yang nantinya akan mempengaruhi osilasi pendulum.
- Pada penelitian ini, pengambilan data dilakukan secara kontinu dengan mengabaikan sisa riak gelombang pada *towing tank* yang belum benar-benar hilang. Pada penelitian selanjutnya, disarankan pengambilan data pada variasi selanjutnya dilakukan ketika kondisi air di *towing tank* sudah

benar-benar tenang. Selain itu, sensor juga perlu diperiksa tiap pergantian variasi agar data yang diperoleh dapat benar-benar ideal dan akurat.

Lampiran A- Variasi Percobaan PLTGL-SB

| Variasi | Periode Gelombang | Lengan Cadik | Tinggi Cadik | Lengan Pendulum | Massa Pendulum |
|---------|-------------------|--------------|--------------|-----------------|----------------|
| 1 | 0.4 s | 413 mm | 40 mm | 165 mm | 40 gram |
| 2 | 0.6 s | 413 mm | 40 mm | 165 mm | 40 gram |
| 3 | 0.8 s | 413 mm | 40 mm | 165 mm | 40 gram |
| 4 | 0.4 s | 413 mm | 40 mm | 106.7 mm | 40 gram |
| 5 | 0.6 s | 413 mm | 40 mm | 106.7 mm | 40 gram |
| 6 | 0.8 s | 413 mm | 40 mm | 106.7 mm | 40 gram |
| 7 | 0.4 s | 413 mm | 40 mm | 165 mm | 20 gram |
| 8 | 0.6 s | 413 mm | 40 mm | 165 mm | 20 gram |
| 9 | 0.8 s | 413 mm | 40 mm | 165 mm | 20 gram |
| 10 | 0.4 s | 413 mm | 40 mm | 106.7 mm | 20 gram |
| 11 | 0.6 s | 413 mm | 40 mm | 106.7 mm | 20 gram |
| 12 | 0.8 s | 413 mm | 40 mm | 106.7 mm | 20 gram |
| 13 | 0.4 s | 495 mm | 40 mm | 106.7 mm | 20 gram |
| 14 | 0.6 s | 495 mm | 40 mm | 106.7 mm | 20 gram |
| 15 | 0.8 s | 495 mm | 40 mm | 106.7 mm | 20 gram |
| 16 | 0.4 s | 495 mm | 40 mm | 165 mm | 40 gram |
| 17 | 0.6 s | 495 mm | 40 mm | 165 mm | 40 gram |
| 18 | 0.8 s | 495 mm | 40 mm | 165 mm | 40 gram |
| 19 | 0.4 s | 495 mm | 40 mm | 165 mm | 20 gram |
| 20 | 0.6 s | 495 mm | 40 mm | 165 mm | 20 gram |
| 21 | 0.8 s | 495 mm | 40 mm | 165 mm | 20 gram |
| 22 | 0.4 s | 495 mm | 40 mm | 106.7 mm | 40 gram |
| 23 | 0.6 s | 495 mm | 40 mm | 106.7 mm | 40 gram |
| 24 | 0.8 s | 495 mm | 40 mm | 106.7 mm | 40 gram |
| 25 | 0.4 s | 413 mm | 15 mm | 106.7 mm | 40 gram |
| 26 | 0.6 s | 413 mm | 15 mm | 106.7 mm | 40 gram |
| 27 | 0.8 s | 413 mm | 15 mm | 106.7 mm | 40 gram |

Lampiran A- Variasi Percobaan PLTGL-SB*Lanjutan*

| Variasi | Periode Gelombang | Lengan Cadik | Tinggi Cadik | Lengan Pendulum | Massa Pendulum |
|---------|-------------------|--------------|--------------|-----------------|----------------|
| 28 | 0.4 s | 413 mm | 15 mm | 165 mm | 20 gram |
| 29 | 0.6 s | 413 mm | 15 mm | 165 mm | 20 gram |
| 30 | 0.8 s | 413 mm | 15 mm | 165 mm | 20 gram |
| 31 | 0.4 s | 413 mm | 15 mm | 165 mm | 40 gram |
| 32 | 0.6 s | 413 mm | 15 mm | 165 mm | 40 gram |
| 33 | 0.8 s | 413 mm | 15 mm | 165 mm | 40 gram |
| 34 | 0.4 s | 413 mm | 15 mm | 106.7 mm | 20 gram |
| 35 | 0.6 s | 413 mm | 15 mm | 106.7 mm | 20 gram |
| 36 | 0.8 s | 413 mm | 15 mm | 106.7 mm | 20 gram |
| 37 | 0.4 s | 495 mm | 15 mm | 165 mm | 40 gram |
| 38 | 0.6 s | 495 mm | 15 mm | 165 mm | 40 gram |
| 39 | 0.8 s | 495 mm | 15 mm | 165 mm | 40 gram |
| 40 | 0.4 s | 495 mm | 15 mm | 106.7 mm | 20 gram |
| 41 | 0.6 s | 495 mm | 15 mm | 106.7 mm | 20 gram |
| 42 | 0.8 s | 495 mm | 15 mm | 106.7 mm | 20 gram |
| 43 | 0.4 s | 495 mm | 15 mm | 106.7 mm | 40 gram |
| 44 | 0.6 s | 495 mm | 15 mm | 106.7 mm | 40 gram |
| 45 | 0.8 s | 495 mm | 15 mm | 106.7 mm | 40 gram |
| 46 | 0.4 s | 495 mm | 15 mm | 165 mm | 20 gram |
| 47 | 0.6 s | 495 mm | 15 mm | 165 mm | 20 gram |
| 48 | 0.8 s | 495 mm | 15 mm | 165 mm | 20 gram |

Lampiran B - Hasil Eksperimen Ponton

| Variasi | Heaving (cm) | | Rolling (degrees) | | A Pendulum (degrees) | |
|---------|--------------|--------|-------------------|--------|----------------------|-----|
| | Min | Max | Min | Max | Min | Max |
| 1 | -0.523 | -0.523 | -0.011 | -0.011 | 0 | 0 |
| 2 | -1.834 | 0.485 | -0.092 | 0.067 | -10 | 14 |
| 3 | -2.176 | 0.945 | -0.085 | 0.063 | -28 | 30 |
| 4 | -0.207 | -0.207 | -0.013 | -0.013 | 0 | 0 |
| 5 | -1.666 | 0.722 | -0.089 | 0.072 | -22 | 25 |
| 6 | -2.024 | 1.370 | -0.106 | 0.085 | -35 | 48 |
| 7 | -1.476 | 0.869 | -0.065 | 0.060 | 0 | 0 |
| 8 | -2.334 | -0.362 | -0.051 | 0.056 | -10 | 15 |
| 9 | -3.095 | -0.093 | -0.041 | 0.061 | -50 | 50 |
| 10 | -3.299 | -0.848 | -0.094 | 0.054 | 0 | 0 |
| 11 | -3.414 | -0.953 | -0.097 | 0.078 | -30 | 30 |
| 12 | -4.612 | -0.710 | -0.175 | 0.110 | -55 | 60 |
| 13 | -0.098 | 2.313 | -0.098 | 0.036 | 0 | 0 |
| 14 | -1.809 | 0.554 | -0.078 | 0.046 | -31 | 32 |
| 15 | -2.530 | 0.505 | -0.083 | 0.072 | -40 | 48 |
| 16 | -1.870 | 0.563 | -0.075 | 0.039 | 0 | 0 |
| 17 | -0.185 | 0.553 | -0.067 | 0.042 | Gerakan maju mundur | |
| 18 | -2.039 | 0.598 | -0.071 | 0.073 | -23 | 21 |
| 19 | -1.919 | 0.701 | -0.069 | 0.016 | 0 | 0 |
| 20 | -1.696 | 0.709 | -0.083 | 0.029 | -7 | 7 |
| 21 | -4.885 | 3.611 | -0.076 | 0.056 | -26 | 25 |
| 22 | -1.880 | 0.529 | -0.074 | 0.033 | 0 | 0 |
| 23 | -2.134 | 0.654 | -0.065 | 0.017 | -15 | 20 |
| 24 | -2.581 | 0.360 | -0.116 | 0.060 | -30 | 32 |
| 25 | -1.049 | 1.174 | -0.118 | -0.026 | 0 | 0 |

Lampiran B - Hasil Eksperimen Ponton*Lanjutan*

| Variasi | Heaving (cm) | | Pitching (degrees) | | A Pendulum (degrees) | |
|---------|--------------|-------|--------------------|--------|----------------------|-----|
| | Min | Max | Min | Max | Min | Max |
| 26 | -1.060 | 1.518 | -0.107 | -0.007 | Gerakan maju mundur | |
| 27 | -1.674 | 2.207 | -0.160 | 0.005 | -40 | 41 |
| 28 | -1.015 | 0.971 | -0.120 | -0.001 | 0 | 0 |
| 29 | -1.331 | 1.092 | -0.112 | -0.004 | -15 | 20 |
| 30 | -2.106 | 1.993 | -0.170 | -0.018 | -50 | 45 |
| 31 | -1.130 | 0.564 | -0.111 | 0.023 | 0 | 0 |
| 32 | -1.337 | 0.882 | -0.132 | -0.028 | Gerakan maju mundur | |
| 33 | -2.445 | 1.286 | -0.161 | -0.018 | -43 | 40 |
| 34 | -1.278 | 0.819 | -0.145 | -0.042 | 0 | 0 |
| 35 | -1.322 | 1.402 | -0.139 | -0.023 | -18 | 15 |
| 36 | -2.283 | 1.844 | -0.205 | 0.002 | -52 | 52 |
| 37 | -1.255 | 1.402 | -0.065 | 0.057 | 0 | 0 |
| 38 | -1.476 | 1.402 | -0.060 | 0.065 | Gerakan maju mundur | |
| 39 | -2.049 | 1.429 | -0.085 | 0.079 | -40 | 35 |
| 40 | -1.408 | 1.352 | -0.065 | 0.048 | 0 | 0 |
| 0 | -1.390 | 0.967 | -0.051 | 0.046 | -20 | 17 |
| 42 | -2.074 | 1.558 | -0.111 | 0.046 | -50 | 53 |
| 43 | -1.234 | 1.217 | -0.052 | 0.048 | 0 | 0 |
| 44 | -1.460 | 1.167 | -0.079 | 0.047 | -20 | 15 |
| 45 | -2.224 | 1.519 | -0.112 | 0.062 | -39 | 40 |
| 46 | -1.652 | 0.939 | -0.058 | 0.041 | 0 | 0 |
| 47 | -1.628 | 1.306 | -0.059 | 0.052 | Gerakan maju mundur | |
| 48 | -2.126 | 1.161 | -0.086 | 0.061 | -50 | 48 |

Lampiran C – Ponton dalam Skala Sebenarnya

| Variasi | Parameter Gelombang | | Lengan Cadik | Tinggi cadik | Lengan Pendulum | Massa Pendulum |
|---------|---------------------|--------|--------------|--------------|-----------------|----------------|
| | Amp. | T | | | | |
| 1 | 1.5 m | 12.6 s | 4.13 m | 0.4 m | 1.65 m | 40 kg |
| 2 | 1.5 m | 10 s | 4.13 m | 0.4 m | 1.65 m | 40 kg |
| 3 | 1.5 m | 8 s | 4.13 m | 0.4 m | 1.65 m | 40 kg |
| 4 | 1.5 m | 12.6 s | 4.13 m | 0.4 m | 1.067 m | 40 kg |
| 5 | 1.5 m | 10 s | 4.13 m | 0.4 m | 1.067 m | 40 kg |
| 6 | 1.5 m | 8 s | 4.13 m | 0.4 m | 1.067 m | 40 kg |
| 7 | 1.5 m | 12.6 s | 4.13 m | 0.4 m | 1.65 m | 20 kg |
| 8 | 1.5 m | 10 s | 4.13 m | 0.4 m | 1.65 m | 20 kg |
| 9 | 1.5 m | 8 s | 4.13 m | 0.4 m | 1.65 m | 20 kg |
| 10 | 1.5 m | 12.6 s | 4.13 m | 0.4 m | 1.067 m | 20 kg |
| 11 | 1.5 m | 10 s | 4.13 m | 0.4 m | 1.067 m | 20 kg |
| 12 | 1.5 m | 8 s | 4.13 m | 0.4 m | 1.067 m | 20 kg |
| 13 | 1.5 m | 12.6 s | 4.95 m | 0.4 m | 1.067 m | 20 kg |
| 14 | 1.5 m | 10 s | 4.95 m | 0.4 m | 1.067 m | 20 kg |
| 15 | 1.5 m | 8 s | 4.95 m | 0.4 m | 1.067 m | 20 kg |
| 16 | 1.5 m | 12.6 s | 4.95 m | 0.4 m | 1.65 m | 40 kg |
| 17 | 1.5 m | 10 s | 4.95 m | 0.4 m | 1.65 m | 40 kg |
| 18 | 1.5 m | 8 s | 4.95 m | 0.4 m | 1.65 m | 40 kg |
| 19 | 1.5 m | 12.6 s | 4.95 m | 0.4 m | 1.65 m | 20 kg |
| 20 | 1.5 m | 10 s | 4.95 m | 0.4 m | 1.65 m | 20 kg |
| 21 | 1.5 m | 8 s | 4.95 m | 0.4 m | 1.65 m | 20 kg |
| 22 | 1.5 m | 12.6 s | 4.95 m | 0.4 m | 1.067 m | 40 kg |
| 23 | 1.5 m | 10 s | 4.95 m | 0.4 m | 1.067 m | 40 kg |
| 24 | 1.5 m | 8 s | 4.95 m | 0.4 m | 1.067 m | 40 kg |
| 25 | 1.5 m | 12.6 s | 4.13 m | 0.15 m | 1.067 m | 40 kg |
| 26 | 1.5 m | 10 s | 4.13 m | 0.15 m | 1.067 m | 40 kg |

Lampiran C – Ponton dalam Skala Sebenarnya*Lanjutan*

| Variasi | Parameter Gelombang | | Lengan Cadik | Tinggi Cadik | Lengan Pendulum | Massa Pendulum |
|---------|---------------------|--------|--------------|--------------|-----------------|----------------|
| | Amp. | T | | | | |
| 27 | 1.5 m | 8 s | 4.13 m | 0.15 m | 1.067 m | 40 kg |
| 28 | 1.5 m | 12.6 s | 4.13 m | 0.15 m | 1.65 m | 20 kg |
| 29 | 1.5 m | 10 s | 4.13 m | 0.15 m | 1.65 m | 20 kg |
| 30 | 1.5 m | 8 s | 4.13 m | 0.15 m | 1.65 m | 20 kg |
| 31 | 1.5 m | 12.6 s | 4.13 m | 0.15 m | 1.65 m | 40 kg |
| 32 | 1.5 m | 10 s | 4.13 m | 0.15 m | 1.65 m | 40 kg |
| 33 | 1.5 m | 8 s | 4.13 m | 0.15 m | 1.65 m | 40 kg |
| 34 | 1.5 m | 12.6 s | 4.13 m | 0.15 m | 1.067 m | 20 kg |
| 35 | 1.5 m | 10 s | 4.13 m | 0.15 m | 1.067 m | 20 kg |
| 36 | 1.5 m | 8 s | 4.13 m | 0.15 m | 1.067 m | 20 kg |
| 37 | 1.5 m | 12.6 s | 4.95 m | 0.15 m | 1.65 m | 40 kg |
| 38 | 1.5 m | 10 s | 4.95 m | 0.15 m | 1.65 m | 40 kg |
| 39 | 1.5 m | 8 s | 4.95 m | 0.15 m | 1.65 m | 40 kg |
| 40 | 1.5 m | 12.6 s | 4.95 m | 0.15 m | 1.067 m | 20 kg |
| 41 | 1.5 m | 10 s | 4.95 m | 0.15 m | 1.067 m | 20 kg |
| 42 | 1.5 m | 8 s | 4.95 m | 0.15 m | 1.067 m | 20 kg |
| 43 | 1.5 m | 12.6 s | 4.95 m | 0.15 m | 1.067 m | 40 kg |
| 44 | 1.5 m | 10 s | 4.95 m | 0.15 m | 1.067 m | 40 kg |
| 45 | 1.5 m | 8 s | 4.95 m | 0.15 m | 1.067 m | 40 kg |
| 46 | 1.5 m | 12.6 s | 4.95 m | 0.15 m | 1.65 m | 20 kg |
| 47 | 1.5 m | 10 s | 4.95 m | 0.15 m | 1.65 m | 20 kg |
| 48 | 1.5 m | 8 s | 4.95 m | 0.15 m | 1.65 m | 20 kg |

Lampiran D – Torsi, Kecepatan Sudut, dan Daya yang Dihasilkan

| Variasi | T Rata-Rata (N.m) | ω Rata-Rata (Rad/s) | P Rata-Rata (Watt) |
|---------|-------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| 1 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 2 | 3.527 | 1.023 | 3.577 |
| 3 | 2.942 | 3.221 | 9.463 |
| 4 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 5 | 3.117 | 3.058 | 9.484 |
| 6 | 2.663 | 4.236 | 11.615 |
| 7 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 8 | 3.550 | 0.938 | 3.308 |
| 9 | 2.663 | 4.380 | 11.476 |
| 10 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 11 | 3.077 | 3.239 | 9.911 |
| 12 | 2.507 | 6.173 | 14.808 |
| 13 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 14 | 3.296 | 2.254 | 7.322 |
| 15 | 3.088 | 3.225 | 9.552 |
| 16 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 17 | Tidak dapat dihitung | Tidak dapat dihitung | Tidak dapat dihitung |
| 18 | 3.237 | 2.093 | 6.740 |
| 19 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 20 | 3.679 | 0.469 | 1.713 |
| 21 | 3.147 | 2.432 | 7.622 |
| 22 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 23 | 3.452 | 1.555 | 5.316 |
| 24 | 3.096 | 3.159 | 9.678 |
| 25 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |

**Lampiran D - Torsi, Kecepatan Sudut,
dan Daya yang Dihasilkan**

Lanjutan

| Variasi | T Rata-Rata (N.m) | ω Rata-Rata (Rad/s) | P Rata-Rata (Watt) |
|---------|-------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| 26 | Tidak dapat dihitung | Tidak dapat dihitung | Tidak dapat dihitung |
| 27 | 0.002 | 4.588 | 0.010 |
| 28 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 29 | 0.000 | 0.512 | 0.000 |
| 30 | 0.002 | 4.717 | 0.011 |
| 31 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 32 | Tidak dapat dihitung | Tidak dapat dihitung | Tidak dapat dihitung |
| 33 | 0.002 | 3.974 | 0.008 |
| 34 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 35 | 0.001 | 1.286 | 0.001 |
| 36 | 0.002 | 5.432 | 0.013 |
| 37 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 38 | Tidak dapat dihitung | Tidak dapat dihitung | Tidak dapat dihitung |
| 39 | 0.002 | 3.602 | 0.007 |
| 40 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 41 | 0.001 | 1.687 | 0.001 |
| 42 | 0.002 | 4.861 | 0.010 |
| 43 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 44 | 0.001 | 1.540 | 0.001 |
| 45 | 0.002 | 4.245 | 0.008 |
| 46 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 47 | Tidak dapat dihitung | Tidak dapat dihitung | Tidak dapat dihitung |

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Indonesia Energy Outlook 2014, Badan Pengkajian dan Pengembangan Teknologi , 2014.
- [2] Pengenalan Teknologi Pemanfaatan Energi Angin, Tasikmalaya: Tim Lentera Angin Nusantara, 2014.
- [3] S. Mehrangiz, Y. Emami, S. H. S. Sadigh and A. Etemadi, "Various Technologies for Producing Energy from Wave," *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, vol. 2, no. 2, pp. 289-294, 2013.
- [4] G. Iglesias, M. Alvarez and P. Garcia, "Wave Energy Converters," *EOLLS*, vol. 55, pp. 235-241, 2013.
- [5] H. T. Benbouzid and M. Benbouzid, "An Up-to-Date Technologies Review and Evaluation," *INTERNATIONAL REVIEW OF ELECTRICAL-IREE*, vol. 10, no. 1, pp. 56-61, 2015.
- [6] J. Falnes, "A review of wave-energy extraction," *Science Direct Marine Structure*, vol. 20, pp. 185-201, 2007.
- [7] F. Triatmojo, "Dinamika Kebijakan Diversifikasi Energi di Indonesia : Analisis Kebijakan Pengembangan Energi Terbaru di Indonesia," *Jurnal Ilmiah Administrasi Publik dan Pembangunan*, vol. 4, pp. 146-159, 2013.
- [8] E. Renzi and R. Dias, "Hydrodynamics of the oscillating wave surge converter in the open ocean," *European Journal of Mechanics B/Fluids*, vol. 41, pp. 1-10, 2013.
- [9] B. Drew, A. R. Plummer and M. Sahinkaya, "A review of wave energy converter technology," *Proc. IMechE*, vol. 223, pp. 887-902, 2007.
- [10] E. Novianarenti, "Penentuan Parameter Bandul Matematis untuk Memperoleh Energi Maksimum dengan Gelombang dalam Tangki," *Jurnal Teknik ITS*, vol. 2, pp. 122-127, 2013.
- [11] Y. B. Mustofa, "Analisis Gerakan Ponton Model Tripod untuk Energi Gelombang Sistem Bandulan," *Jurnal Teknik ITS*, vol. 1, pp. 203-206, 2012.

- [12] A. S. Lohat, Fisika SMA KELAS XI, Jakarta: Erlangga, 2008.

BIOGRAFI PENULIS



Penulis lahir pada tanggal 1 Februari 1996 di Malang, Jawa Timur. Penulis menempuh pendidikan di MINU Bululawang (2002-2008), MTsN Malang 1 (2008-2010), dan MAN 3 Malang (2010-2012). Penulis melanjutkan studinya di Jurusan Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Bidang minat yang diambil penulis adalah rekayasa energi dan pengkondisian lingkungan. Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif sebagai pengurus di Himpunan Mahasiswa Teknik Fisika 2014/2015. Pengalaman *internship* penulis adalah melakukan simulasi sistem pengendalian berbasis PID pada *Kerosene Stripper* 11C6 di PT. Pertamina RU IV Cilacap. Penulis dapat dihubungi melalui *e-mail* rodhiatul.isnaini@gmail.com.