



TUGAS AKHIR TF 141581

**PEMODELAN SISTEM GERAK PENDULUM
PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA
GELOMBANG LAUT - SISTEM BANDUL (SB)**

WISNU DARMAWAN

NRP. 0231 14 40000 042

Dosen Pembimbing:

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

Ir. Jerri Susatio, M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA

Fakultas Teknologi Industri

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya 2018



FINAL PROJECT TF 141581

**MODELLING OF PENDULUM MOTION ON
OCEAN WAVE POWER PLANT BASED ON
PENDULUM SYSTEM**

WISNU DARMAWAN

NRP. 0231 14 40000 042

Supervisors:

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

Ir. Jerri Susatio, M.T.

**Engineering Physics Department
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018**

LEMBAR PENGESAHAN

**PEMODELAN SISTEM GERAK PENDULUM PADA
PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GELOMBANG
LAUT – SISTEM BANDUL (SB)**

TUGAS AKHIR

oleh:

WISNU DARMAWAN
NRP. 0231 14 40000 042

Surabaya, 6 Juni 2018

Pembimbing I,

Pembimbing II,



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



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

**Kepala Departemen
Teknik Fisika FTI ITS,**



Gus Muhammad Hatta, ST., M.Si., Ph.D
NIPN. 19780902 200312 1 002

LEMBAR PENGESAHAN

PEMODELAN SISTEM GERAK PENDULUM PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GELOMBANG LAUT – SISTEM BANDUL (SB)

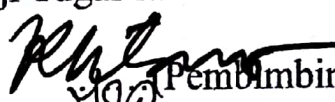

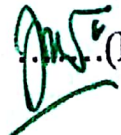
TUGAS AKHIR

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

Oleh:

WISNU DARMAWAN
NRP. 0231 14 40000 042

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. Ir. Sarwono, M.M.  (Penguji 1)
4. Ir. Harsono Hadi, M.T., Ph.D(Penguji 2)
5. Dyah Sawitri, S.T., M.T.  (Penguji 3)

PEMODELAN SISTEM GERAK PENDULUM PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GELOMBANG LAUT – SISTEM BANDUL (SB)

Nama Mahasiswa : Wisnu Darmawan
NRP : 0231144000042
Jurusan : Teknik Fisika FTI ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.
Ir. Jerri Susatio, M.T.

ABSTRAK

Energi gelombang laut merupakan salah satu energi terbarukan. Alat untuk mengkonversi energi gelombang laut disebut *Wave Energy Converter* (WECs). Selain itu, terdapat pula WECs yang dikembangkan di Indonesia yaitu menggunakan sistem pendulum atau disebut sebagai pembangkit listrik tenaga gelombang laut sistem bandul (PLTGL-SB). Bentuk ponton yang diteliti adalah ponton yang terdiri dari silinder besar ditengah dan terdapat dua buah jukung disebelah kanan dan kiri. Pada penelitian kali ini dilakukan suatu pemodelan matematis yang bertujuan untuk mengetahui gerak ponton dan simpangan maksimal yang dihasilkan oleh ponton dan pendulum tersebut. Eksperimen juga dilakukan untuk memvalidasi hasil simulasi dimana didapatkan nilai RMSE untuk *heave* dan *roll* masing-masing 1.152 dan 0.039. Berdasarkan hasil simulasi didapatkan nilai simpangan maksimum pendulum sebesar 56.37° . Nilai ini didapat saat kombinasi variabel-variabel berikut ini besar amplitudo 3 cm, periode gelombang sebesar 0.8 s, panjang lengan cadik sebesar 515 mm, dan massa pendulum sebesar 40 g, dengan daya yang dihasilkan sebesar 0.026 Watt dari torsi pendulum.

Kata Kunci: Ponton, Energi Terbarukan, Simpangan, *Heave*, *Roll*.

MODELLING OF PENDULUM MOTION ON OCEAN WAVE POWER PLANT BASED ON PENDULUM SYSTEM

Name : Wisnu Darmawan
NRP : 0231144000042
Department : Teknik Fisika FTI ITS
Supervisor : Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.
Ir. Jerri Susatio, M.T.

ABSTRACT

Ocean wave energy is one of the renewable energy forms. The tool to convert the sea wave energy is called the Wave energy converter (WECs). Furthermore, there are types of WECs developed in Indonesia which is using pendulum. This type of WECs is called the pendulum system marine wave power station. In this research, the writer studies the pontoon with large cylinder in the center and two canoe on its left and right side. The writer did a mathematical modeling to learn the pontoon's motion and its maximum amplitude created by the pontoon. Experiment also conducted to validate the simulation result with the RMSE value result for heave and roll are 1.152 and 0.039 respectively. From the simulation, the result obtained for the maximum pendulum amplitude is 56.37° . This value is obtained when the following variable combination is wave amplitude at 3 cm, wave periode is 0.8 s, the outrigger arm length is 515 mm and the pendulum mass is 40 g. with 0.026 Watt power generated from the pendulum torsion.

Key Words: *Pontoon, Renewable Energy, Amplitude, Heave, Roll.*

KATA PENGANTAR

Puji Syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT, karena berkat rahmat dan hidayah-Nya, penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul **Pemodelan Sistem Gerak Pendulum Pada Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut – Sistem Bandul (SB)**.

Selama pengerjaan tugas akhir dan penyusunan laporan ini tidak terlepas dari bantuan segala pihak. Penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada:

1. Bapak dan Ibu di rumah yang tidak lupa untuk selalu memberikan doa dan dana kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan kuliah di ITS.
2. Seluruh pihak keluarga, yang telah mendukung dan selalu mendoakan penulis.
3. Bapak Agus M. Hatta, S.T, M.Si, Ph.D selaku Ketua Departemen Teknik Fisika ITS.
4. Bapak Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan ilmu, mengarahkan penulis, dan memberikan motivasi untuk menyelesaikan tugas akhir ini.
5. Bapak Ir. Jerri Susatio, M.T. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan ilmu, mengarahkan penulis, dan memberikan motivasi untuk menyelesaikan tugas akhir ini.
6. Bapak Arif selaku laboran Lab Energi Lautan Departemen Teknik Kelautan yang telah membantu penulis dalam melakukan eksperimen tugas akhir ini.

7. Rachmatra Arvisa dan Yusuf Ilham Kholiq sebagai rekan yang telah banyak membantu penulis dalam pengerjaan tugas akhir ini.
8. Teman-teman Teknik Fisika Angkatan 2014, teman-teman Laboratorium Fisika Rekayasa, teman-teman Laboratorium Rekayasa Energi dan Pengkondisian Lingkungan, dan pihak-pihak lain yang tidak dapat disebut satu per satu yang telah membantu melancarkan pengerjaan tugas akhir ini.

Saya menyadari bahwa laporan ini belum sempurna dan banyak salah, oleh karena itu kritik yang membangun serta saran atas laporan ini sangat saya terima. Akhir kata semoga laporan tugas akhir ini bermanfaat bagi kita semua.

Surabaya, Juni 2018

Penulis

DAFTAR ISI

ABSTRAK.....	iv
ABSTRACT.....	v
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR SIMBOL.....	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Permasalahan.....	3
1.3 Tujuan.....	3
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Manfaat Penelitian	4
1.6 Sistematika Laporan.....	4
BAB II DASAR TEORI.....	7
2.1 Gerakan Bangunan Laut	7
2.2 Energi Gelombang Laut.....	8
2.3 Gelombang Reguler dan Irreguler	9
2.4 Teori Stabilitas	10

2.5	Getaran	14
2.6	Persamaan Lagrange	16
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		19
3.1	Studi Literatur	20
3.2	Penentuan Desain Prototype	20
3.3	Fabrikasi Prototype	22
3.4	Pemodelan	22
3.5	Simulasi	23
3.6	Eksperimen	24
3.7	Pengambilan Data.....	25
3.8	Analisa Data.....	25
3.9	Penyusunan Laporan	27
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN		29
4.1	Validasi Hasil Simulasi	29
4.2	Pengaruh Variabel Terhadap Gerakan Ponton	31
4.2.1	Gerak Ponton Variasi Amplitudo Gelombang	31
4.2.2	Gerak Ponton Variasi Periode Gelombang	32
4.2.3	Gerak Ponton Variasi Panjang Lengan Cadik	34
4.3	Pengaruh Perubahan Variabel Terhadap Gerakan Pendulum	35
4.3.1	Gerak Pendulum Variasi Amplitudo Gelombang	36
4.3.2	Efek Perubahan Panjang Lengan Cadik	38
4.3.3	Efek Perubahan Massa Pendulum.....	39
4.3.4	Efek Perubahan Periode Gelombang	40

4.4 Perhitungan Torsi dan Daya	41
BAB V PENUTUP	43
5.1 Kesimpulan	43
5.2 Saran	44
DAFTAR PUSTAKA	45
LAMPIRAN A	
LAMPIRAN B	
LAMPIRAN C	
LAMPIRAN D	
LAMPIRAN E	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Notasi dan gerakan standart pada kapal.....	8
Gambar 2.2. Perambatan Gelombang Laut.....	9
Gambar 2.3 Gelombang reguler.....	10
Gambar 2.4 Gelombang irreguler.....	10
Gambar 2.5 Tiga kondisi ketabilan.....	11
Gambar 2.6 Titik berat G sebuah benda terapung.....	12
Gambar 2.7 Titik apung B sebuah benda terapung.....	13
Gambar 2.8 Letak titik metasentris M.....	14
Gambar 2.9 Sistem pegas dengan beban.....	15
Gambar 2.10 Plot sinyal getaran terhadap waktu.....	16
Gambar 2.11 Sistem Suspensi.....	17
<i>Gambar 3.1 Diagram alir penelitian.....</i>	<i>19</i>
Gambar 3.2 Gambar <i>prototype</i> dalam 3D.....	20
Gambar 3.3 Desain ponton tampak depan.....	21
Gambar 3.4 Ponton saat pengambilan data.....	25
Gambar 4.1 Perbandingan Simulasi dan Eksperimen.....	30
Gambar 4.2 Respon Heave Variasi Amplitudo.....	31
Gambar 4.3 Respon Roll Variasi Amplitudo.....	32
Gambar 4.4 Respon Heave Variasi Periode Gelombang.....	33
Gambar 4.5 Respon Roll Variasi Periode Gelombang.....	34
Gambar 4.6 Respon Heave Variasi Panjang Lengan Cadik.....	35

Gambar 4.7 Respon Roll Variasi Panjang Lengan Cadik.....	35
Gambar 4.8 Respon Pendulum Variasi Amplitudo Gelombang saat $T=0.8$ s.....	37
Gambar 4.9 Respon Pendulum Variasi Amplitudo Gelombang saat $T=1$ s	37
Gambar 4.10 Respon Pendulum Variasi Amplitudo Gelombang saat $T=1.2$ s.....	38
Gambar 4.11 Perubahan Panjang Lengan Cadik Terhadap Simpangan Maksimal Pendulum.....	39
Gambar 4.12 Perubahan Massa Pendulum Terhadap Simpangan Maksimal Pendulum.....	40
Gambar 4.13 Perubahan Periode Gelombang terhadap Simpangan Maksimal Pendulum.....	41
Gambar 4.14 Torsi dan Daya Maksimal yang Dihasilkan pada Setiap	42
Gambar 4.15 Kecepatan Sudut Maksimal pada Setiap Variasi	42

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Derajat Kebebasan Kapal.....	7
Tabel 3.1 Geometri <i>prototype</i>	21
Tabel 3.2 Parameter-parameter Simulasi.....	23
Tabel 3.3 Variasi Eksperimen.....	24
Tabel 4.1 Perbandingan Simulasi dan Eksperimen.....	30

DAFTAR SIMBOL

$y(t)$	= <i>heave</i> (cm)
$\alpha(t)$	= amplitudo pendulum (derajat)
$\theta(t)$	= <i>roll</i> (derajat)
R	= jari-jari silinder besar (cm)
M	= massa silinder besar (g)
m_1	= massa pendulum (g)
m_2	= massa silinder kecil / cadik (g)
m_3	= massa lengan cadik (g)
l_1	= panjang lengan pendulum (cm)
l_2	= panjang lengan cadik (cm)
k	= koefisien pegas air (N/m)
c	= koefisien redam air (N.s/m)
τ	= torsi (N.m)
ω	= kecepatan sudut (rad/s)
g	= percepatan gravitasi (m/s^2)
$h(t)$	= tinggi gelombang (cm)
P	= daya (Watt)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi laut merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang sangat berpotensi untuk dapat dikonversi menjadi energi listrik. Secara garis besar, energi laut dapat diklasifikasikan menjadi beberapa jenis, yaitu energi pasang-surut, energi gelombang, energi panas laut, energi arus laut, dan energi angin laut. Gelombang laut sebagai salah satu energi terbarukan yang sangat berpotensi untuk dieksploitasi secara berkelanjutan untuk dikonversi menjadi energi listrik. Di Indonesia sendiri, potensi energi baru dan terbarukan sangatlah besar, salah satunya adalah energi gelombang laut mengingat Indonesia memiliki wilayah laut yang lebih luas dari wilayah daratnya. Seperti halnya di dunia, permintaan listrik di Indonesia semakin meningkat dengan perkembangan zaman. Selain itu, berikut ini adalah beberapa masalah yang sedang dialami oleh Indonesia terkait dengan masalah energi, yaitu tingkat elektrifikasi yang masih rendah, ketergantungan pada sumber energi fosil, dan rendahnya pemanfaatan energi baru terbarukan.

Alat untuk mengkonversi energi gelombang laut menjadi energi listrik disebut *Wave Energy Converter* (WECs). Beberapa jenis WECs yang telah dikembangkan di dunia antara lain *Wave Activated Bodies* (WABs), *Oscillating Water Columns* (OWCs), *Overtopping Devices*, *Point Absorbers and Attenuator*, dan lain-lain.. Salah satu contoh dari WECs tipe *Attenuators* adalah *Wave Star* yang telah dikembangkan di Denmark, WECs ini memiliki daya tahan yang kuat terhadap kondisi badai, sejauh ini *Wave Star* telah berhasil menghasilkan listrik sebesar 600 kW, dan sedang dikembangkan secara kontinyu agar dapat menghasilkan listrik sebesar 6 MW (Bjerrum, 2008). Selain itu, terdapat pula WECs yang dikembangkan oleh peneliti Indonesia yaitu menggunakan

sistem pendulum atau disebut sebagai pembangkit listrik tenaga gelombang laut sistem bandul (PLTGL-SB). Penelitian pertama kali mengenai sistem bandul ini dilakukan oleh Zamrisyaf, konsep dari PLTGL-SB ini adalah sistem 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. Gelombang yang datang tadi akan menyebabkan bandul akan bergerak seperti lonceng, gerakan tersebut kemudian ditransmisi ke dalam gerakan berputar untuk menggerakkan dinamo kemudian menjadi energi listrik. Daya yang dihasilkan oleh PLTGL-SB ini banyak dipengaruhi oleh dimensi ponton, panjang bandul, dan massa bandul.

Pada penelitian sebelumnya mengenai sistem PLTGL-SB ini, ponton disusun menjadi model tripod, yaitu tiga buah ponton segidelapan yang dihubungkan dengan membentuk pola segitiga sama sisi, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui gerakan terbaik pada ponton model tripod, hasilnya adalah ponton model tripod ini sesuai untuk diaplikasikan pada PLTGL-SB jika dibandingkan dengan ponton segidelapan (Yasin Besari Mustofa, 2012). Penelitian lain juga telah dilakukan mengenai karakteristik osilasi pendulum pada PLTGL-SB dengan ponton berbentuk silinder didapatkan beberapa parameter yang sangat mempengaruhi amplitudo gerakan dari bandul pada PLTGL-SB antara lain panjang lengan cadik, tinggi cadik, massa bandul, dan panjang lengan pendulum (Rodhiatul Isnaini, 2012). Parameter-parameter yang mempengaruhi gerakan bandul sendiri yaitu kestabilan dari ponton yang digunakan. Pada tugas akhir ini akan dilakukan pemodelan gerakan dari pendulum pada PLTGL-SB dengan menggunakan ponton berbentuk tabung, pemodelan dilakukan supaya dapat mengetahui dan memprediksi respon yang akan dihasilkan oleh pendulum. Selain itu, data hasil dari pemodelan

ini akan dibandingkan dengan eksperimen yang akan dilakukan di laboratorium menggunakan *prototype* yang telah dibuat.

1.2 Permasalahan

Adapun permasalahan yang diangkat dalam Tugas Akhir ini adalah:

1. Bagaimana merancang model sistem gerak pendulum pada Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut – Sistem Bandul (SB)?
2. Bagaimana respon gerak pendulum yang paling baik untuk sistem Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut – Sistem Bandul (SB)?

1.3 Tujuan

Adapun tujuan dari Tugas Akhir ini adalah:

1. Mengetahui cara merancang model sistem gerak pendulum pada Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut – Sistem Bandul (SB).
2. Untuk mengetahui respon gerak pendulum yang paling baik untuk sistem Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut – Sistem Bandul (SB)?

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

1. Gelombang yang digunakan pada penelitian ini adalah gelombang reguler dengan mengabaikan gangguan-gangguan dari luar seperti angin dan sebagainya.
2. Gelombang yang digunakan adalah gelombang yang arahnya sejajar dengan bandul.
3. Simulasi dilakukan menggunakan Matlab.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah dapat dimodelkannya sistem PLTGL – SB untuk mengetahui respon gerak dari sistem sehingga dapat dipelajari responnya tanpa dilakukannya uji laboratorium.

1.6 Sistematika Laporan

Laporan penelitian ini disusun secara sistematis dengan perincian sebagai berikut ini :

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 ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Berisi tentang analisa hasil simulasi respon ponton terhadap perubahan-perubahan yang dilakukan pada parameter gelombang.

BAB V**KESIMPULAN DAN SARAN**

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

DAFTAR PUSTAKA

Daftar pustaka dari semua referensi yang digunakan dalam menyusun laporan ini.

“halaman ini sengaja dikosongkan”

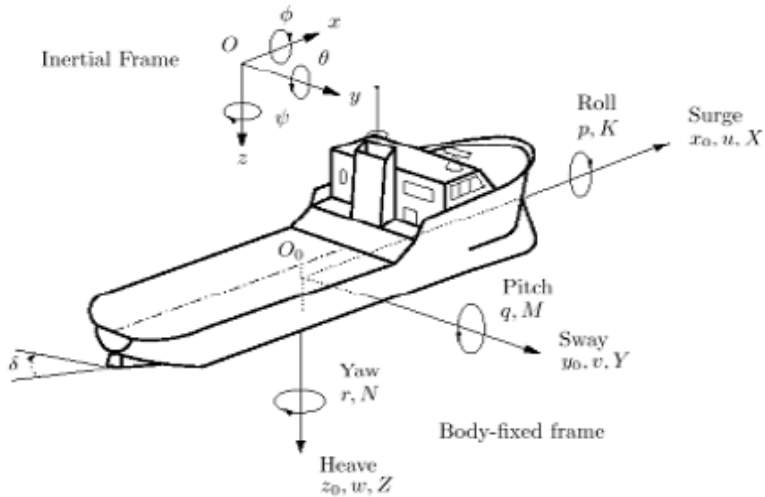
BAB II DASAR TEORI

2.1 Gerakan Bangunan Laut

Gerakan benda yang mengapung mempunyai 6 derajat kebebasan. Derajat kebebasan kapal ini terdiri dari 3 derajat kebebasan terhadap sumbu x, y, z dan 3 derajat kebebasan lainnya mengacu kepada arah rotasi dan orientasi dari kapal. Keenam derajat kebebasan dari kapal laut biasa disebut sebagai : *Surge, Sway, Heave, Roll, Pitch, Yaw*. Derajat kebebasan ini juga biasa disebut sebagai komponen gerak. Komponen gerak dari kapal dengan 6 komponen gerak dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 2.1. Derajat Kebebasan Kapal

DOF	Gerakan Kapal	Posisi dan Sudut	Kecepatan Linier dan Angular	Gaya dan Momen
1	Translasi sumbu-x (<i>surge</i>)	X	u	X
2	Translasi sumbu-y (<i>sway</i>)	Y	v	Y
3	Translasi sumbu-z (<i>heave</i>)	Z	w	Z
4	Rotasi sumbu-x (<i>roll</i>)	Φ	p	K
5	Rotasi sumbu-y (<i>pitch</i>)	θ	q	M
6	Rotasi sumbu-z (<i>yaw</i>)	Ψ	r	N

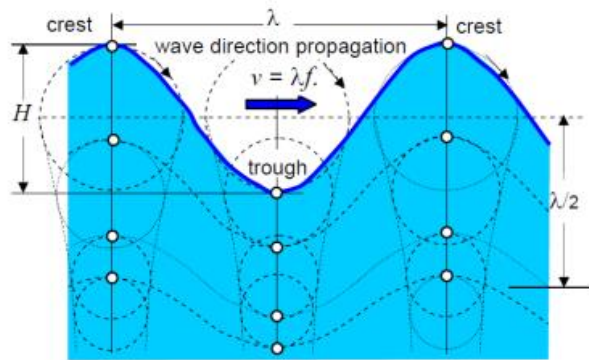


Gambar 2.1. Notasi dan gerakan standart pada kapal

2.2 Energi Gelombang Laut

Secara umum, potensi energy samudra yang dapat menghasilkan listrik dibagi ke dalam 3 jenis potensi energy yaitu energy pasang surut (*tidal power*), energy gelombang laut (*wave energy*), dan energy panas laut (*ocean thermal energy*). Energi pasang surut adalah energy yang dihasilkan dari pergerakan air laut akibat perbedaan pasang surut. Energi gelombang laut adalah energy yang dihasilkan dari pergerakan gelombang laut menuju daratan dan sebaliknya. Sedangkan energy panas laut memanfaatkan perbedaan temperature air laut di permukaan dan di kedalaman.

Gelombang laut adalah pergerakan naik turunnya air dengan arah tegak lurus permukaan air laut yang membentuk sinusoidal. Gerakan dari gelombang laut dapat dilihat pada gambar 2 berikut ini.



Gambar 2.2. Perambatan Gelombang Laut

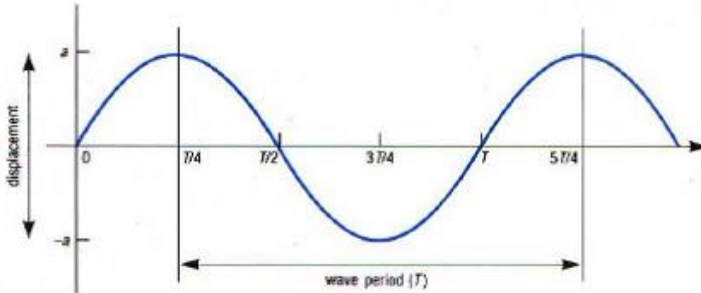
Jarak antara puncak ke puncak didefinisikan sebagai panjang gelombang (λ). Ketinggian gelombang (H) sebanding dengan intensitas angin dan durasinya. Periode gelombang (T) adalah waktu yang dibutuhkan untuk mencapai panjang gelombang dan sebanding dengan kedalaman laut. Frekuensi gelombang (f) adalah banyaknya gelombang dalam satu detik. Rasio antara panjang gelombang (λ), dibandingkan dengan dua kali ketinggian gelombang ($2H$) disebut *declivity*.

2.3 Gelombang Reguler dan Irreguler

Gelombang reguler merupakan gelombang dengan tinggi gelombang yang konstan, periode tunggal, sehingga gelombang ini memiliki spektrum tunggal. Teori gelombang reguler adalah pendekatan dari sebuah kenyataan dengan beberapa asumsi penyederhanaan. Berikut ini adalah asumsi pada dasar teori gelombang:

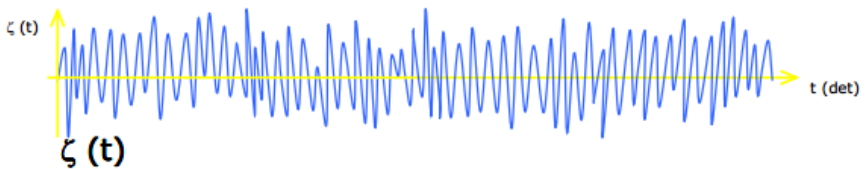
- a. Fluida dianggap homogen
- b. Tekanan permukaan diabaikan
- c. Tekanan di permukaan bebas dianggap konstan dan *uniform*
- d. Fluida dianggap ideal (*inviscid* dan *incompressible*)

- e. Gerakan partikel berdiri sendiri, tidak saling mengganggu dan bertubrukan selama bergerak.
- f. Dasar laut dianggap datar, sehingga kecepatan vertikal di dasar adalah nol.



Gambar 2.3 Gelombang reguler

Sedangkan gelombang irreguler merupakan gelombang superposisi dari beberapa gelombang reguler yang memiliki frekuensi dan tinggi gelombang yang berbeda-beda. Gelombang laut memiliki bentuk dan arah gerakan yang tidak beraturan, sehingga teori gelombang reguler tidak dapat secara langsung menjelaskannya.

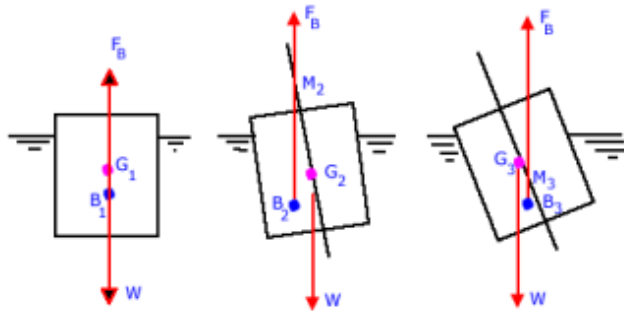


Gambar 2.4 Gelombang irreguler

2.4 Teori Stabilitas

Sebuah benda dikatakan pada posisi keseimbangan stabil (*stable equilibrium*) adalah bila digeser ke suatu posisi baru,

benda tersebut dapat kembali lagi ke posisi awal, 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 kondisi baru tersebut, maka benda tersebut dalam keseimbangan netral (*neutral equilibrium*), namun apabila suatu benda setelah digerakkan ke suatu posisi baru benda tersebut terus bergerak semakin jauh dari posisi awalnya, maka kesetimbangan benda tersebut dikatakan berada pada kesetimbangan labil (*unstable equilibrium*) dan kondisi ini dikategorikan sebagai stabilitas negatif terhadap acuan posisi awalnya.

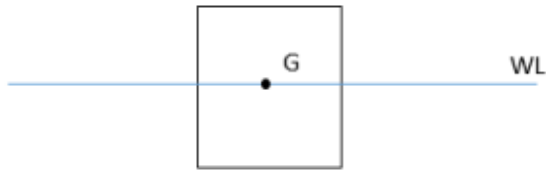


Gambar 2.5 Tiga kondisi ketabilan

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

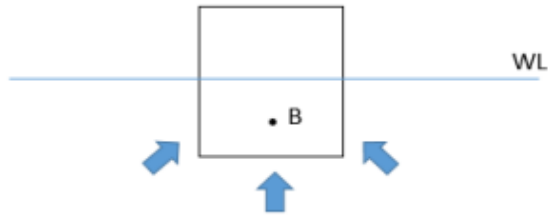
- Titik Berat (*Centre of Gravity*, G)
Titik Berat ialah titik tangkap dari semua gaya-gaya yang bekerja ke bawah. Letak titik G pada benda kosong ditentukan oleh hasil percobaan stabilitas. Perlu diperhatikan bahwa letak titik G tergantung daripada pembagian berat di

benda. Jadi, selama tidak ada berat yang digeser/ditambah/dikurangi titik G tidak akan berubah walaupun benda oleng. Berat pendulum pada penelitian ini sangat kecil jadi dianggap tidak akan mempengaruhi titik gerak ponton.



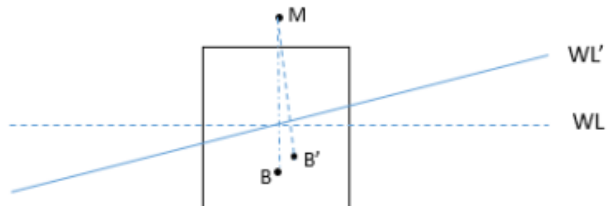
Gambar 2.6 Titik berat G sebuah benda terapung

- Titik Apung (*Centre of Buoyancy*, B)
Titik apung dikenal dengan titik B dari sebuah benda mengapung, merupakan titik tangkap dari resultan gaya-gaya yang menekan keatas dari bagian yang terbenam dalam air. Titik B bukanlah merupakan suatu titik yang tetap, akan tetapi akan berpindah-pindah oleh adanya perubahan sarat dari benda. Dalam stabilitas benda, titik B inilah yang menyebabkan suatu benda mampu untuk tegak kembali setelah mengalami senget (condong). Letak titik B tergantung dari besarnya senget benda (bila senget berubah maka letak titik B akan berpindah).



Gambar 2.7 Titik apung B sebuah benda terapung

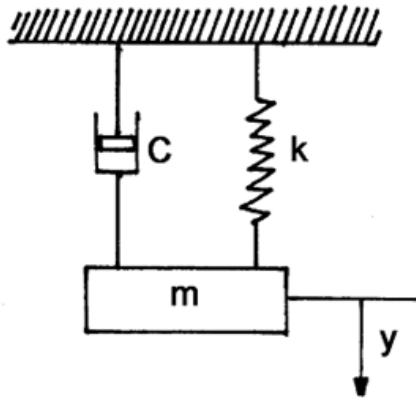
- Titik Metasentris (M)
Titik metasentris dari sebuah benda didefinisikan sebagai sebuah titik semu dari batas dimana titik G tidak boleh melwati atasnya supaya benda tetap memiliki stabilitas yang positif (stabil). Meta artinya berubah-ubah, jadi titik ini dapat berubah letaknya mengikuti besarnya sudut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



Gambar 2.8 Letak titik metasentris M

2.5 Getaran

Getaran adalah gerakan periodik dari sebuah benda atau sistem benda-benda yang berhubungan yang dipindahkan dari sebuah posisi kesetimbangan. Secara umum, ada 2 jenis getaran, yaitu getaran bebas dan getaran paksa. Getaran bebas terjadi apabila gerakan dipertahankan oleh gaya gravitasi atau gaya pemulih elastis seperti gerakan mengayun sebuah pendulum. Dengan kata lain, sistem mengalami getaran karena bekerjanya gaya-gaya yang ada dalam sistem itu sendiri tanpa dipengaruhi oleh gaya-gaya dari luar. Sedangkan, getaran paksa terjadi disebabkan oleh gaya dari luar sistem, dengan kata lain sistem mengalami getaran karena rangsangan gaya luar dan dipaksa untuk bergetar. Ilustrasi sederhana untuk menjelaskan getaran adalah melalui sistem pegas yang ujungnya diberi beban, seperti gambar dibawah ini.



Gambar 2.9 Sistem pegas-damper dengan beban

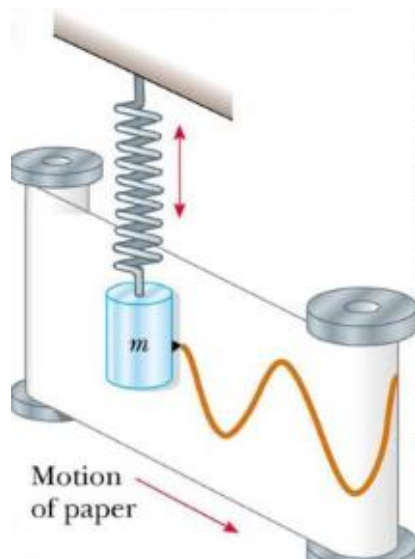
Jika tidak ada gaya yang diberikan pada beban, maka dapat dikatakan bahwa tidak ada getaran yang terjadi pada sistem dan sistem berada pada keadaan kesetimbangan. Apabila diberikan gaya keatas pada beban maka akan menyebabkan kompresi pada pegas yang akan membalik gerak beban ke bawah sehingga terjadi getaran, dan apabila gaya pada

beban tersebut dilepaskan maka beban tersebut akan bergerak ke bawah melewati posisi kesetimbangan sampai pada suatu titik gerakan pegas tersebut berhenti.

Setiap benda bergetar memiliki karakteristik getaran, karakteristik getaran ini meliputi:

- Frekuensi
- Periode
- *Displacement*
- *Velocity*
- Akselerasi
- Fase

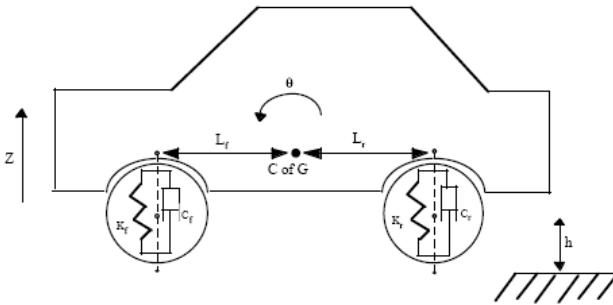
Karakteristik getaran dapat digambarkan dengan memplotkan gerakan beban terhadap waktu seperti gambar dibawah ini.



Gambar 2.10 Plot sinyal getaran terhadap waktu

2.6 Persamaan Lagrange

Persamaan Lagrange memberikan cara yang sistematis untuk merumuskan persamaan gerak dari sistem mekanik atau sistem structural yang fleksibel dengan derajat kebebasan yang banyak. Dengan menggunakan persamaan Lagrange, solusi dari persamaan diferensial getaran dengan derajat kebebasan yang banyak dapat didapatkan. Pendekatan scalar diperoleh dengan adanya nilai skalar dari energi kinetik dan energi potensial untuk masing-masing koordinat umum. Sebagai contoh adalah pada sistem suspensi mobil dibawah ini.



Gambar 2.11 Sistem Suspensi

Koordinat umum dari sistem diatas yaitu z dan θ , setelah didapatkan energy kinetic dan energy potensial dari masing-masing koordinat umum, maka solusi dari persamaan diferensial getaran pada sistem suspensi mobil ini dapat diperoleh menggunakan persamaan Lagrange,

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{p}} - \frac{\partial T}{\partial p} + \frac{\partial U}{\partial p} + \frac{\partial DE}{\partial \dot{p}} = Q \quad (2.1)$$

Dimana:

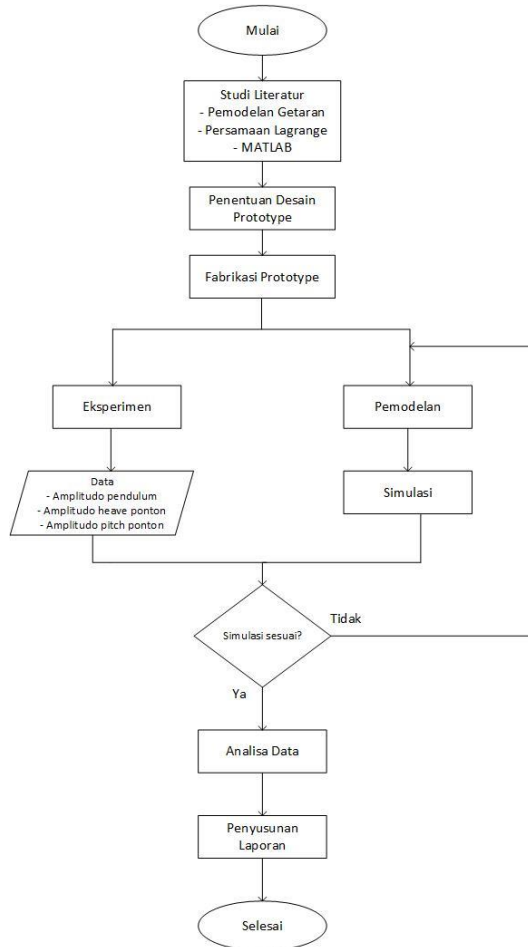
- T = Energi kinetik sistem
- U = Energi potensial sistem
- DE = Energi redaman sistem

Q = Gaya luar
p = koordinat umum

“halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menjelaskan tentang langkah-langkah yang dilakukan untuk mencapai tujuan penelitian. *Flowchart* dari penelitian ini adalah sebagai berikut.



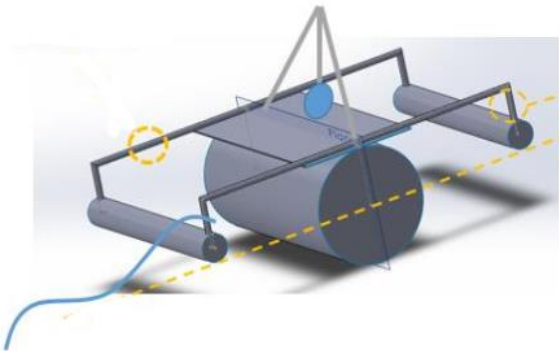
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.1 Studi Literatur

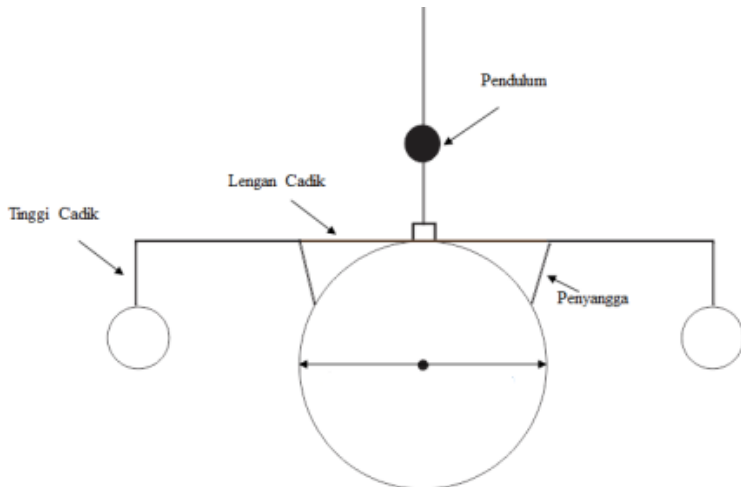
Studi literatur dimaksud untuk membangun pemahaman awal hingga detail mengenai topik tugas akhir, yakni tentang prinsip kerja dari PLTGL-SB, pemahaman tentang kestabilan suatu bangunan terapung, pemahaman tentang teori getaran dan persamaan Lagrange yang digunakan untuk memodelkan gerakan dari *prototype* yang telah dibuat, serta pengambilan data mulai dari ukuran gelombang yang diciptakan untuk digunakan pada eksperimen sampai dengan frekuensi beserta *setting* alatnya.

3.2 Penentuan Desain Prototype

Prototype PLTGL-SB yang didesain memiliki beberapa bagian, antara lain body utama ponton, pendulum, penyangga, dan cadik. Satu silinder besar yang memiliki panjang 32 cm dengan jari-jari 16.5 cm dan dua buah silinder kecil (cadik) sebagai penyeimbang yang memiliki panjang 32 cm dengan diameter 4 cm. Bentuk pendulum yang diteliti adalah pendulum vertikal. Ponton dengan bentuk seperti yang disebutkan tadi yang dibuat pemodelan matematisnya menggunakan metode Lagrange, disimulasikan menggunakan perangkat lunak Matlab, dan diamati respon gerak akibat gaya eksitasi dari gelombang yang datang. Lebih jelasnya, desain *prototype* dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 3.2 Gambar *prototype* dalam 3D



Gambar 3.3 Desain ponton tampak depan

Spesifikasi dari desain ponton yang akan diuji dan disimulasikan yaitu sebagai berikut:

Tabel 3.1 Geometri *prototype*

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 g/cm ³
Tinggi Jukung	1.5 cm
Panjang Plat	32 cm
Lebar Plat	17 cm
Massa Jenis Plat	1.2 g/cm ³
Tinggi Tiang Pendulum	2.75 cm (dari plat)
Tiang Lengan Pendulum	23 cm

3.3 Fabrikasi Prototype

Setelah ditentukan desain ponton, maka *prototype* dapat difabrikasi sesuai dengan spesifikasi desain pada gambar 3.2.

3.4 Pemodelan

Pemodelan matematis digunakan untuk menganalisa nilai respon getaran pada sistem bandul-ponton. Persamaan gerak didapatkan dengan menggunakan persamaan Lagrange. Persamaan gerak didapat dengan mensimultankan gerak 2 *degrees of freedom* ponton (*roll* dan *heave*) dan 1 *degree of freedom* pendulum.

Sebagaimana telah disebutkan pada bab 2 metode pencarian persamaan gerak menggunakan metode Lagrange, yaitu meninjau sistem dari segi energi kinetik dan energi potensial sistem. Persamaan matematisnya adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} & \left(\frac{2}{3} \cdot m_3 \cdot l_2^2 + M \cdot R^2 + 2 \cdot m_2 \cdot l_2^2 + m_1 \cdot l_1^2 \right) \cdot \frac{d^2}{dt^2} \theta(t) + l_2 \cdot \\ & k_1 [(y(t) + l_2 \cdot \theta(t)) - h_1(t)] + l_2 \cdot k_2 [(y(t) + l_2 \cdot \theta(t)) - \\ & h_2(t)] + l_2 \cdot c_1 \left[\left(\frac{d}{dt} y(t) + l_2 \cdot \frac{d}{dt} \theta(t) \right) - \frac{d}{dt} h_1(t) \right] + l_2 \cdot \\ & c_2 \left[\left(\frac{d}{dt} y(t) + l_2 \cdot \frac{d}{dt} \theta(t) \right) - \frac{d}{dt} h_2(t) \right] - m_1 \cdot l_1 \cdot \frac{d}{dt} \alpha(t) + m_1 \cdot g \cdot \\ & l_1 (\alpha(t) - \theta(t)) = 0 \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} & (M + 2 \cdot m_2) \cdot \frac{d^2}{dt^2} y(t) + c_1 \left[\left(\frac{d}{dt} y(t) + l_2 \cdot \frac{d}{dt} \theta(t) \right) - \frac{d}{dt} h_1(t) \right] + \\ & c_2 \left[\left(\frac{d}{dt} y(t) + l_2 \cdot \frac{d}{dt} \theta(t) \right) - \frac{d}{dt} h_2(t) \right] + k_1 [(y(t) + l_2 \cdot \theta(t)) - \\ & h_1(t)] + k_2 [(y(t) + l_2 \cdot \theta(t)) - h_2(t)] + (M + m_2)g = 0 \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} & m_1 \cdot l_1^2 \cdot \frac{d^2}{dt^2} \alpha(t) - m_1 \cdot l_1 \cdot \frac{d}{dt} \theta(t) + m_1 \cdot g \cdot l_1 (\alpha(t) - \\ & \theta(t)) = 0 \end{aligned} \quad (3.3)$$

Persamaan (3.1), Persamaan (3.2), dan Persamaan (3.3) menggambarkan respon sistem utama yaitu *roll* (θ), *heave* (y), dan osilasi bandul (α). Dimana M adalah massa ponton, m_1 adalah massa pendulum, m_2 adalah massa silinder kecil (jukung), m_2 adalah massa pendulum, l_1 adalah panjang lengan pendulum, l_2 adalah jarak ponton ke jukung, k_1 dan k_2 adalah konstanta redaman air, c_1 dan c_2 adalah redaman air, sedangkan h_1 dan h_2 adalah gaya dari air.

3.5 Simulasi

Model matematis yang telah didapat akan disimulasikan menggunakan perangkat lunak MATLAB Simulink dengan membuat permodelan berdasarkan persamaan matematis yang telah diturunkan pada sub bab 3.4, dan hasil respon yang didapat akan digunakan untuk dibandingkan dengan hasil dari eksperimen. Gelombang input h_1 dan h_2 pada simulasi ini merupakan gelombang reguler dengan tinggi gelombang dan periode gelombang yang divariasikan (dapat dilihat pada lampiran tabel variasi). Berikut ini adalah parameter-parameter yang diinputkan pada simulasi:

Tabel 3.2 Parameter-parameter Simulasi

R	16.5 cm
m_1	Berubah sesuai tabel variasi (lampiran)
m_2	205.6 gram
m_3	57 gram
M	1496 gram
l_1	106.7 gram
l_2	Berubah sesuai tabel variasi (lampiran)
g	9.8 m/s ²

Pada tahap simulasi ini terdapat 54 variasi dengan 2 variasi tinggi gelombang, 3 variasi periode gelombang, 3 variasi panjang lengan cadik, dan 3 variasi massa pendulum. Tabel

variasi simulasi secara lengkap dapat dilihat pada halaman lampiran.

3.6 Eksperimen

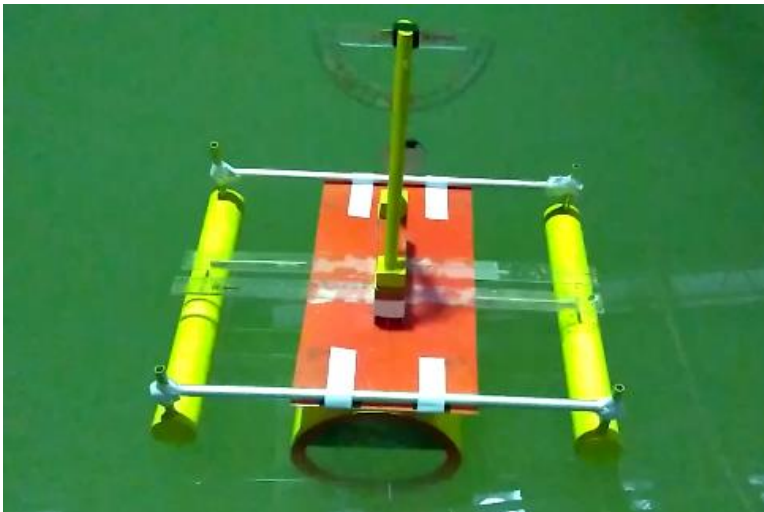
Pada tahap ini dilakukan pengujian *prototype* yang telah dibuat. Pada eksperimen kali ini terdapat 12 variasi dengan 2 variasi amplitudo gelombang, 3 variasi periode gelombang, dan 2 variasi massa pendulum. Gelombang yang digunakan pada pengambilan data ini ialah gelombang reguler. Variasi amplitudo gelombang, periode gelombang, dan massa pendulum dilakukan untuk mengetahui simpangan yang akan dihasilkan pendulum yang akan digunakan untuk memvalidasi hasil simulasi.

Tabel 3.3 Variasi Eksperimen

Variasi	Amplitudo Gelombang	Periode Gelombang	Massa Pendulum
1	20 cm	0.4 s	20 g
2	20 cm	0.6 s	20 g
3	20 cm	0.8 s	20 g
4	40 cm	0,4 s	20 g
5	40 cm	0.6 s	20 g
6	40 cm	0.8 s	20 g
7	20 cm	0,4 s	40 g
8	20 cm	0.6 s	40 g
9	20 cm	0.8 s	40 g
10	40 cm	0,4 s	40 g
11	40 cm	0.6 s	40 g
12	40 cm	0.8 s	40 g

3.7 Pengambilan Data

Pada penelitian kali ini, pengambilan data dilakukan di *flume tank* Laboratorium Energi Lautan Teknik Perkapalan FTK ITS yang memiliki spesifikasi ukuran 20 m x 2.3 m x 2.5 m. Data-data yang diambil adalah amplitudo *roll* dan *heave* dari ponton menggunakan alat yang telah tersedia di laboratorium tersebut, serta video pergerakan pendulum untuk mengetahui simpangannya.



Gambar 3.4 Ponton saat pengambilan data

3.8 Analisa Data

Analisa data dilakukan setelah semua data dari hasil simulasi maupun eksperimen telah didapatkan. Data yang didapatkan dari eksperimen berupa simpangan *heave* dan *roll* dari ponton dan juga rekaman video untuk mengetahui data simpangan pendulum. Hal pertama yang dilakukan adalah mengolah data dari video tersebut untuk mengetahui data simpangan pendulum. Setelah didapatkan data simpangan

pendulum dan ponton, maka dilakukan olah data sehingga diperoleh tabel dan grafik yang dapat mempresentasikan data tersebut. Selain itu, data yang diperoleh dari simulasi berupa data-data simpangan *heave*, *roll*, dan amplitudo pendulum. Nilai-nilai keluaran dari simulasi akan diolah menjadi bentuk tabel dan grafik yang kemudian akan digunakan untuk mencari RMSE (*Root Mean Square Error*).

Selain itu, perlu dilakukan perhitungan daya yang dihasilkan oleh masing-masing kondisi dari simulasi yang dilakukan. Sebelum dicari daya, nilai torsi (τ) harus diketahui terlebih dahulu. Torsi dapat dihitung menggunakan persamaan

$$\tau = mgl \sin\alpha \quad (3.4)$$

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

Selain torsi, kecepatan sudut dari osilasi pendulum juga harus diketahui. Kecepatan sudut sendiri dapat dihitung menggunakan persamaan berikut,

$$\omega = \sqrt{\frac{2gh}{l}} \quad (3.5)$$

dengan g adalah percepatan gravitasi, h adalah perbedaan ketinggian pendulum saat berada pada simpangan α , dan l adalah panjang lengan pendulum. Nilai h sendiri dapat dicari menggunakan persamaan berikut,

$$h = l - l \cos\alpha \quad (3.6)$$

Setelah diketahui nilai torsi dan kecepatan sudut masing-masing kondisi, maka daya dapat dihitung menggunakan persamaan berikut ini,

$$P = \tau\omega \quad (3.7)$$

3.9 Penyusunan Laporan

Setelah semua data selesai diolah, maka penyusunan laporan dilakukan dimana ini merupakan tahap akhir dari pelaksanaan penelitian dan dilakukan sebagai penyampaian hasil dan analisis dari seluruh pelaksanaan 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

Bab IV berisi tentang validasi simulasi, analisa data, dan pembahasan. Analisa data yang dilakukan adalah, pertama analisa gerak ponton terhadap variasi amplitudo gelombang, variasi periode gelombang, dan variasi panjang lengan cadik. Analisa data yang kedua adalah analisa gerak pendulum terhadap variasi amplitudo gelombang, variasi frekuensi gelombang, variasi panjang lengan cadik, dan variasi massa pendulum.

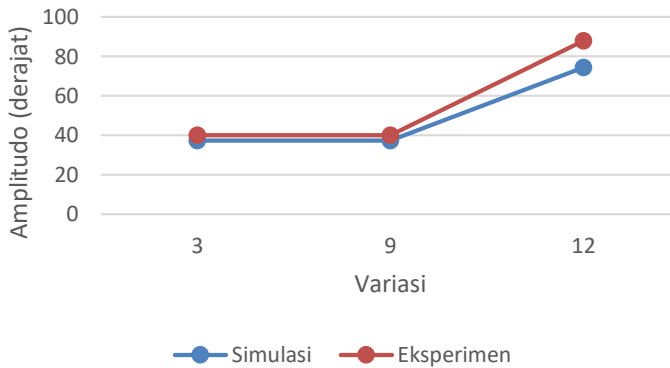
4.1 Validasi Hasil Simulasi

Validasi pada penelitian ini dilakukan dengan menghitung nilai RMSE (*Root Mean Square Error*) simpangan ponton (*roll*) dan gerakan *heave* ponton pada saat terkena gelombang pada saat eksperimen dan pada saat simulasi. Data eksperimen yang digunakan untuk validasi ini adalah data hasil eksperimen pada penelitian yang telah dilakukan oleh Rodhiatul Isnaini. Nilai-nilai RMSE ini dihitung dari variasi 27 (periode gelombang 0.8 s, panjang jukung 413 mm, tinggi cadik 15 mm, 106.7 mm, dan massa pendulum 40 gram) terhadap simulasi yang menggunakan parameter- parameter serupa dari penelitian yang dilakukan oleh Rodhiatul Isnaini.

Nilai RMSE tersebut menjelaskan rata-rata perbedaan nilai data *observed* (eksperimen) dan nilai data *predicted* (simulasi). Nilai RMSE yang didapatkan pada penelitian ini adalah 1.152 cm untuk gerakan *heave* dan 0.039 untuk gerakan *roll*. Artinya apabila pada eksperimen didapatkan nilai *roll* sebesar 1 derajat, maka pada simulasi nilai *roll* yang didapatkan bisa $1+0.039$ derajat ataupun $1-0.039$ derajat.

Tabel 4.1 Perbandingan Simulasi dan Eksperimen

Variasi	Simulasi (derajat)	Eksperimen (derajat)	Error (%)
3	37.19	40	7.02
9	37.19	40	7.02
12	74.31	88	15.54
Error rata-rata			9.86

**Gambar 4.1** Perbandingan Simulasi dan Eksperimen

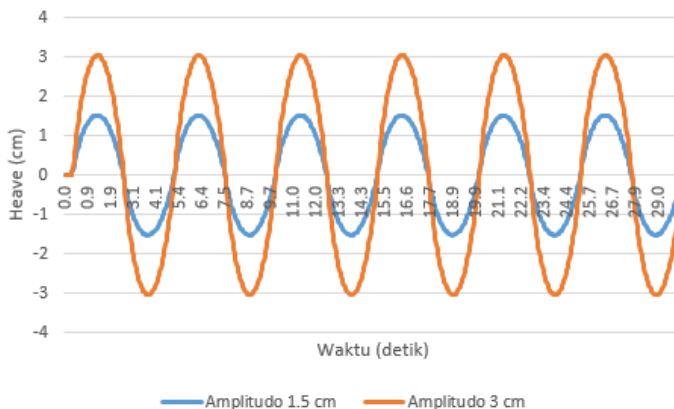
Validasi simpangan pendulum eksperimen dan simulasi dilakukan pada amplitudo gelombang 20 cm, periode gelombang 0.8 s, dan massa pendulum 40 gram. Besar simpangan maksimal pendulum hasil simulasi adalah 37.19° dan besar simpangan maksimal pendulum saat eksperimen adalah 40° dengan rata-rata error sebesar 9.86%. Nilai error rata-rata tersebut menjelaskan perbedaan nilai data eksperimen dan simulasi kurang dari 10% maka simulasi sudah mendekati kondisi eksperimen sehingga dapat digunakan untuk melakukan simulasi pada variasi tinggi gelombang, periode gelombang, panjang lengan jukung ponton, dan massa pendulum.

4.2 Pengaruh Variabel Terhadap Gerakan Ponton

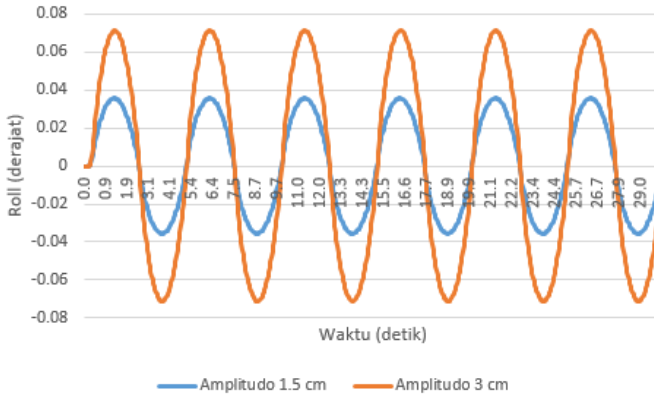
Respon gerak ponton didapat dari model matematik yang telah diturunkan pada sub bab 3.4 dan disimulasikan menggunakan perangkat lunak Matlab. Dengan menurunkan persamaan gerak untuk ponton maka diplot grafik respon ponton berupa gerakan *heave* dan *roll*-nya. Analisa gerak ponton dilakukan berdasarkan variasi amplitudo gelombang, yaitu 1.5 cm dan 2 cm, variasi periode gelombang, yaitu 0.8 s, 1 s, dan 1.2 s, variasi lengan cadik yaitu 495 mm, 505 mm, dan 515 mm yang disimulasikan menggunakan gelombang regular. Rincian variasi simulasi dapat dilihat pada halaman lampiran.

4.2.1 Gerak Ponton Variasi Amplitudo Gelombang

Pada analisa ini akan dijelaskan hasil gerak ponton dengan variasi amplitudo gelombang 1.5 cm dan 3 cm yang menggunakan parameter-parameter periode gelombang 0.8 s, panjang lengan cadik 515 mm, dan massa pendulum 100 gram yang mengacu pada variasi 9 dan variasi 36 simulasi.



Gambar 4.2 Respon Heave Variasi Amplitudo



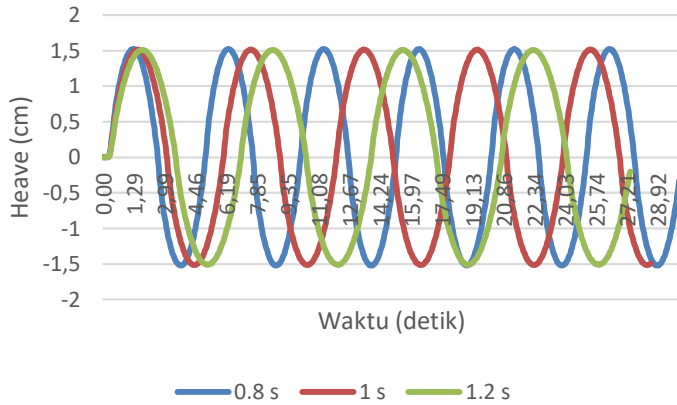
Gambar 4.3 Respon Roll Variasi Amplitudo

Dilihat pada variasi 9 dan 36 simulasi terlihat grafik yang menggambarkan hubungan waktu terhadap gerakan *heave* dan *roll* dengan 2 variasi amplitudo gelombang. Berdasarkan hasil simulasi, didapatkan data bahwa semakin besar amplitudo gelombang yang diberikan maka gerakan *heave* dan *roll* semakin besar, hal ini diakibatkan karena apabila tinggi gelombang yang diberikan semakin besar, gerakan naik turun ponton akan mengikuti gerakan gelombang yang diberikan, demikian juga dengan sudut *roll* yang dialami oleh ponton, ponton akan menyesuaikan dengan tinggi gelombang yang diberikan. Amplitudo gelombang 1.5 cm mempunyai nilai *heave* maksimal sebesar 1.52 cm, dan nilai *roll* maksimal sebesar 0.035529°. Sedangkan apabila diberikan gelombang sebesar 3 cm maka nilai *heave* maksimal akan bernilai 3.046 cm, dan nilai *roll* maksimal sebesar 0.071049034°.

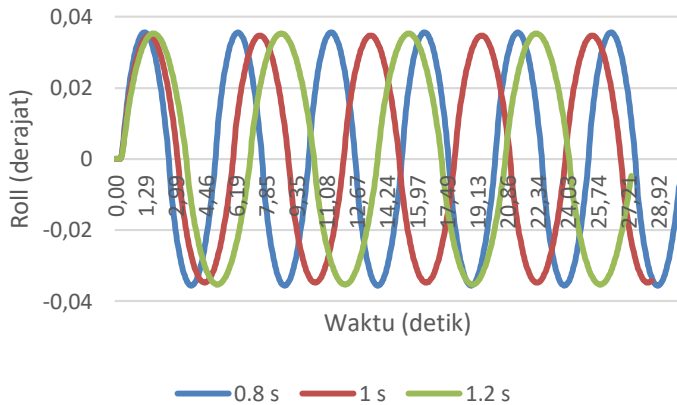
4.2.2 Gerak Ponton Variasi Periode Gelombang

Pada analisa ini akan dijelaskan hasil gerak ponton dengan variasi frekuensi gelombang 0.8 s, 1 s, dan 1.2 s yang disimulasikan menggunakan gelombang amplitudo 1.5 cm

dengan parameter panjang lengan cadik dan massa pendulum tetap yaitu 515 mm dan 40 gram yang dibuat tetap. Gambar 4.4 dan Gambar 4.5 merupakan respon gerakan ponton yang terjadi akibat perubahan variasi periode gelombang yang datang.



Gambar 4.4 Respon Heave Variasi Periode Gelombang



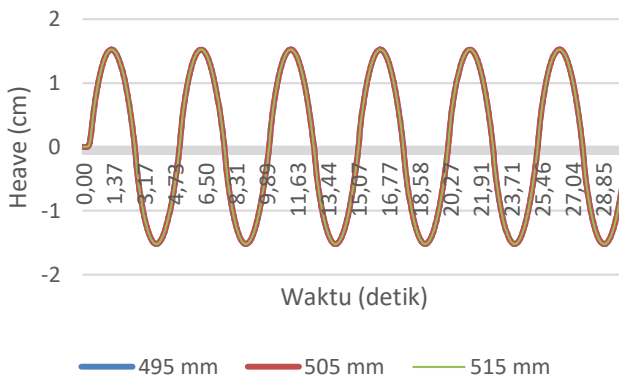
Gambar 4.5 Respon Roll Variasi Periode Gelombang

Pada variasi 7, variasi 13, dan variasi 25 simulasi terlihat grafik yang menggambarkan hubungan waktu terhadap gerakan *heave* dan *roll* dengan 3 variasi periode gelombang. Semakin besar periode gelombang maka nilai maksimal gerakan *heave* dan *roll* akan mengalami penurunan walaupun penurunannya tidak terlalu signifikan. Selain itu, perbedaan periode juga mempengaruhi waktu ponton untuk mencapai nilai *heave* dan *roll* maksimumnya.

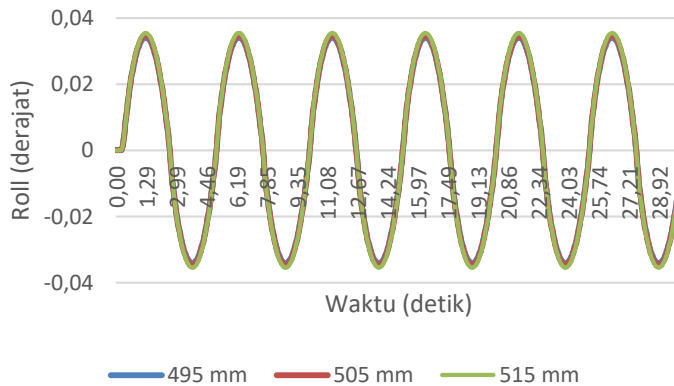
Semakin besar periode gelombang memang mengakibatkan sudut *roll* semakin kecil, namun tidak demikian dengan kecepatan *roll* yang terjadi. Semakin besar periode gelombang, maka kecepatan *roll* akan semakin besar pula (Michael Karsten, 2012). Itulah mengapa ponton pada periode variasi 1.2 s mencapai nilai *roll* maksimum lebih cepat.

4.2.3 Gerak Ponton Variasi Panjang Lengan Cadik

Pada analisa ini akan dijelaskan hasil gerak ponton dengan variasi panjang lengan cadik 495 mm, 505 mm, dan 515 mm yang disimulasikan pada gelombang dengan amplitudo 1.5 cm menggunakan parameter-parameter periode gelombang 0.8 s, dan massa pendulum 100 gram yang dibuat tetap.



Gambar 4.6 Respon Heave Variasi Panjang Lengan Cadik



Gambar 4.7 Respon Roll Variasi Panjang Lengan Cadik

Pada variasi 3, variasi 6, dan variasi 9 simulasi terlihat grafik yang menggambarkan hubungan waktu terhadap gerakan *heave* dan *roll* dengan 3 variasi panjang lengan cadik. Nilai *heave* tidak terpengaruh dengan bertambah panjangnya lengan cadik, namun penambahan panjang lengan cadik dengan interval 10 mm hanya berpengaruh kecil sekali pada respon gerakan *roll*, dapat dilihat pada trend respon yang berhimpit antar 3 variasi simulasi yang dilakukan. Menurut penelitian yang dilakukan oleh D.R. Berret dan C.B Barras (1999) dengan memperbesar lebar kapal (dalam hal ini adalah dengan memperpanjang lengan cadik) maka kapal akan menjadi lebih stabil (nilai *roll* semakin kecil).

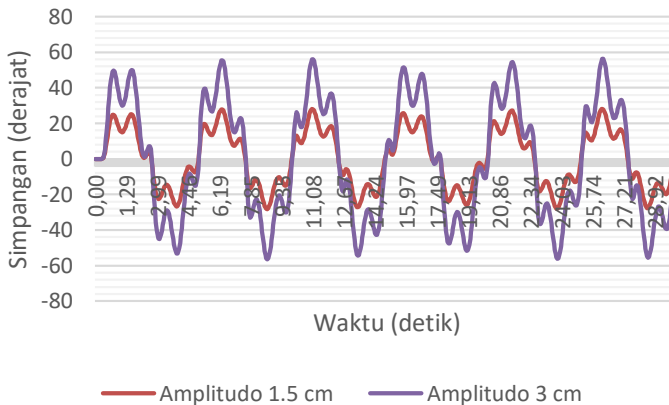
4.3 Pengaruh Perubahan Variabel Terhadap Gerakan Pendulum

Respon gerak ponton didapat dari model matematik 2 derajat kebebasan ponton dan 1 derajat kebebasan pendulum yang telah diturunkan pada sub bab 3.4 dan disimulasikan menggunakan perangkat lunak Matlab. Dengan menurunkan

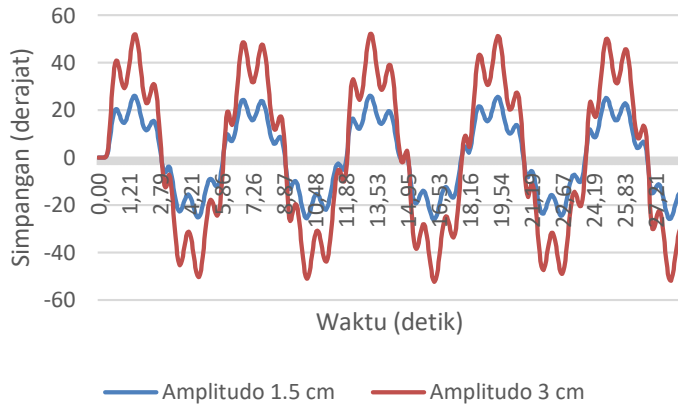
persamaan gerak untuk ponton maka diplot grafik respon pendulum berupa simpangan pendulum. Analisa gerak pendulum dilakukan berdasarkan variasi amplitudo gelombang, yaitu 1.5 cm dan 2 cm, variasi periode gelombang, yaitu 0.8 s, 1 s, dan 1.2 s, variasi lengan cadik yaitu 495 mm, 505 mm, dan 515 mm, massa pendulum 40 gram, 70 gram, dan 100 gram yang disimulasikan menggunakan gelombang regular. Rincian variasi simulasi dapat dilihat pada halaman lampiran.

4.3.1 Gerak Pendulum Variasi Amplitudo Gelombang

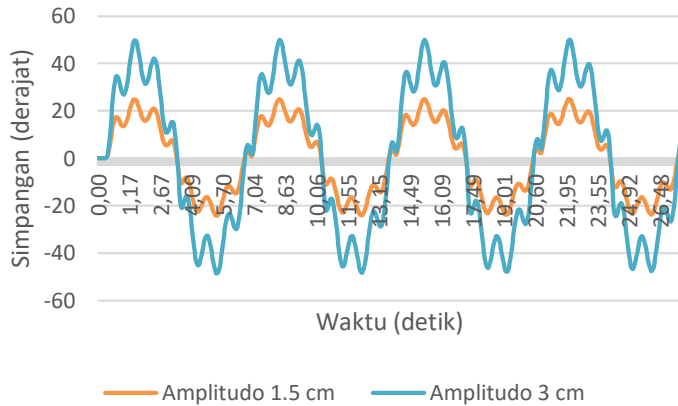
Pada subbab ini akan dijelaskan mengenai pengaruh perubahan amplitudo gelombang yang datang terhadap gerak pendulum yang terjadi, dapat dilihat pada Gambar 4.8, Gambar 4.9, dan Gambar 4.10 bahwa perubahan amplitudo gelombang akan mempengaruhi besarnya simpangan maksimal yang dialami oleh pendulum.



Gambar 4.8 Respon Pendulum Variasi Amplitudo Gelombang saat $T=0.8$ s



Gambar 4.9 Respon Pendulum Variasi Amplitudo Gelombang saat $T=1$ s



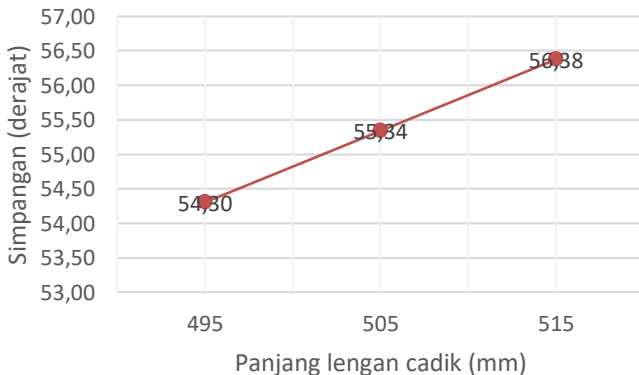
Gambar 4.10 Respon Pendulum Variasi Amplitudo Gelombang saat $T=1.2$ s

Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan pada variasi yang diubah-ubah amplitudo gelombang datangnya, maka dapat terlihat hubungan antara amplitudo gelombang datang

dan respon simpangan pendulumnya. Pada gambar 4.7, gambar 4.8, dan gambar 4.9 dapat disimpulkan bahwa semakin besar amplitudo gelombang datang, maka simpangan yang terjadi pada pendulum juga semakin besar.

4.3.2 Efek Perubahan Panjang Lengan Cadik

Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan pada variasi yang diubah variabel panjang lengan cadiknya, dapat dilihat pengaruh perubahan panjang lengan cadik terhadap nilai simpangan maksimal pendulum pada gambar 4.9. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa ponton yang memiliki panjang lengan cadik 495 mm memiliki simpangan maksimal 54.30 derajat, ponton berlengan cadik 505 mm memiliki simpangan maksimal 55.34 derajat, dan ponton berlengan cadik 515 mm memiliki simpangan maksimal sebesar 56.38 derajat. Sehingga dapat disimpulkan bahwa dengan bertambahnya panjang lengan cadik, maka akan semakin besar nilai simpangan maksimum pendulum yang terjadi.

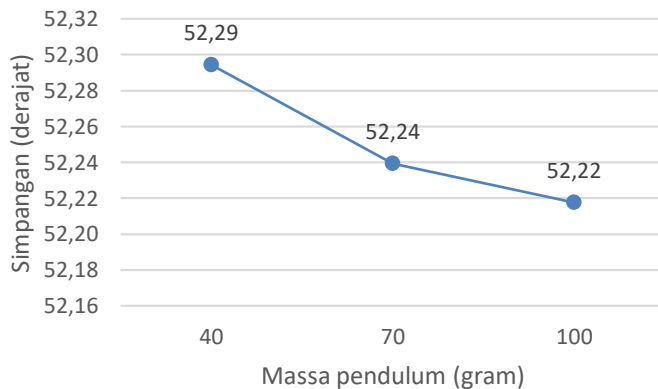


Gambar 4.11 Perubahan Panjang Lengan Cadik Terhadap Simpangan Maksimal Pendulum

Menurut penelitian yang telah dilakukan oleh D.R. Berret dan C.B Barras (1999), dengan memperbesar lebar kapal (dalam hal ini adalah dengan memperpanjang lengan cadik) maka kapal akan menjadi lebih stabil. Karena kapal lebih stabil maka simpangan maksimal pendulum yang terjadi dapat semakin besar sehingga daya yang dihasilkan oleh PLTGL-SB dapat semakin besar pula dengan tidak lagi khawatir sistem ini akan terbalik dan rusak.

4.3.3 Efek Perubahan Massa Pendulum

Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan pada variasi yang diubah variabel massa pendulumnya, dapat dilihat pengaruh perubahan massa pendulum terhadap nilai simpangan maksimal pendulum pada gambar 4.12. Pada suatu sistem pendulum sederhana, massa akan berbanding terbalik dengan besarnya amplitudo pendulum. Hal inilah yang terjadi pada simulasi yang telah dilakukan, dapat dilihat pada *trend* menurun penambahan massa terhadap amplitudo pendulum yang terjadi.

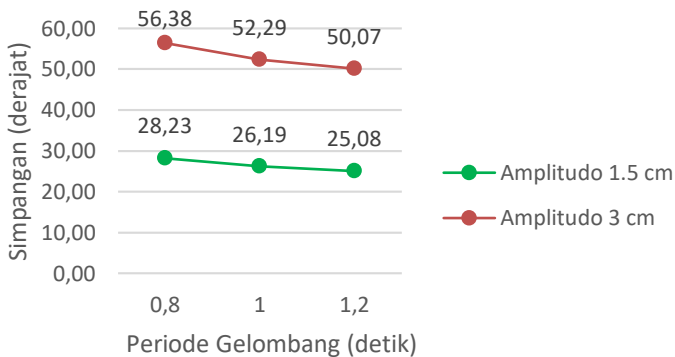


Gambar 4.12 Perubahan Massa Pendulum Terhadap Simpangan Maksimal Pendulum

Jika dilihat dari gambar 4.12 dapat diketahui bahwa penambahan massa pendulum akan mengurangi besar simpangan maksimal yang dialami pendulum. Amplitudo maksimal pendulum saat bermassa 40 gram bernilai 52.29° , saat pendulum bermassa 70 gram simpangan maksimalnya akan bernilai 52.24° , sedangkan saat pendulum bermassa 100 gram simpangan maksimalnya akan bernilai 52.22° . Semakin besar massa yang digunakan sebagai pendulum akan mengakibatkan kecepatan pendulum semakin cepat saat berputar, hal ini dikarenakan jarak tempuh linear yang dibutuhkan massa untuk melakukan satu putaran penuh lebih pendek, maka dari itu akan mengakibatkan simpangan maksimum yang dialami lebih kecil pula.

4.3.4 Efek Perubahan Periode Gelombang

Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan terhadap variasi yang diubah periode gelombangnya, maka dapat dilihat pengaruh efek penambahan periode gelombang terhadap gerakan simpangan pendulum.

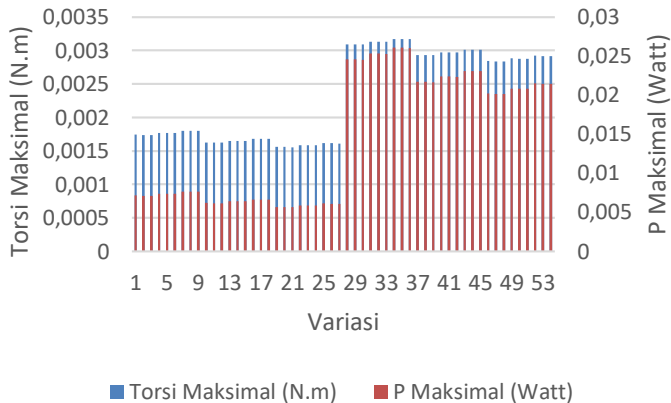


Gambar 4.13 Perubahan Periode Gelombang terhadap Simpangan Maksimal Pendulum

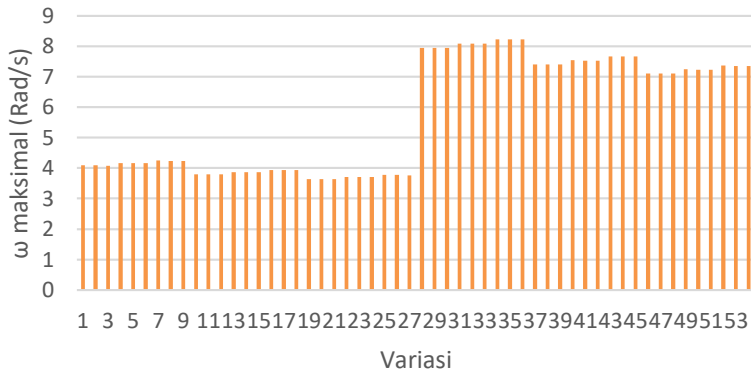
Semakin besar periode yang diberikan maka simpangan maksimal pada simpangan pendulum akan semakin kecil dapat dilihat pada *trend* menurun perubahan periode gelombang terhadap simpangan maksimum pendulum pada gambar 4.13. Semakin besar periode gelombang memang mengakibatkan sudut *roll* semakin kecil, namun tidak demikian dengan kecepatan *roll* yang terjadi. Semakin besar periode gelombang, maka kecepatan *roll* akan semakin besar pula (Michael Karsten, 2012). Dengan kecepatan yang semakin besar ini, maka jarak yang ditempuh suatu pendulum dalam melakukan satu putaran akan semakin kecil sehingga mengakibatkan nilai simpangan maksimalnya juga kecil.

4.4 Perhitungan Torsi dan Daya

Berdasarkan langkah-langkah yang telah dijelaskan sebelumnya pada sub-bab 3.8 maka didapatkan nilai torsi, kecepatan sudut, dan daya maksimal dari masing-masing variasi simulasi yang telah dilakukan sebagaimana Gambar 4.14 dan Gambar 4.15 dibawah ini.



Gambar 4.14 Torsi dan Daya Maksimal yang Dihasilkan pada Setiap Variasi



BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Sesuai dengan tujuan awal dari penelitian ini, yaitu mengetahui cara merancang model sistem gerak pendulum pada Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut – Sistem Bandul (SB) dan mengetahui bentuk respon terbaik yang dihasilkan, maka dari hasil analisis data dan pembahasan pada bab sebelumnya, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut ini:

1. Perancangan model sistem gerak pendulum pada PLTGL – SB ini dapat dirancang dengan menurunkan persamaan-persamaan energi kinetik dan energi potensial yang dialami oleh setiap komponen pada sistem ponton menggunakan metode persamaan Lagrange.
2. Respon gerak pendulum yang paling baik untuk sistem PLTGL – SB ini adalah yang memiliki nilai simpangan pendulum yang paling besar.
3. Nilai simpangan terbesar didapat saat kombinasi variabel-variabel berikut ini besar amplitudo 3 cm, periode gelombang sebesar 0.8 s, panjang lengan cadik sebesar 515 mm, dan massa pendulum sebesar 40 gram dengan nilai pendulum maksimal 56.37 derajat
4. Daya maksimal yang dapat dihasilkan oleh sistem PLTGL-SB adalah sebesar 0.026 Watt dan torsi terbesar adalah 0.031 N.m.

5.2 Saran

Penelitian ini masih perlu dikembangkan lebih lanjut, maka saran yang diberikan pada penelitian ini antara lain :

1. Derajat kebebasan ponton perlu diperluas (ditambah gerak terhadap sumbu yang lain) agar pemodelan matematik untuk mendapatkan respon gerakan ponton sesuai dengan keadaan sebenarnya.
2. Sebaiknya sebelum mengganti variasi saat eksperimen, ponton diperiksa terlebih dahulu apakah terjadi kebocoran atau tidak.

DAFTAR PUSTAKA

- Dukkipati, R. V. (2007). Solving Vibration Analysis Problems Using MATLAB. In R. V. Dukkipati, *Solving Vibration Analysis Problems Using MATLAB*. New Delhi: New Age International Publisher.
- Handito, R. (2012). *Perancangan Sistem Guidance untuk Membangun Autopilot Kapal PKR KRI Kelas Sigma*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Hatch, M. R. (2001). Vibration Simulation Using MATLAB and ANSYS. In M. R. Hatch, *Vibration Simulation Using MATLAB and ANSYS*. London: Chapman & Hall/CRC.
- Isnaini, R. (2016). *Analisa Karakteristik Osilasi Pendulum pada PLTGL-SB*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Lehmann, M. (2017). Ocean wave energy in the United States: Current status and future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 1300–1313.
- Mustofa, Y. B. (2012). Analisa Gerakan Ponton Model Tripod untuk Energi Gelombang Sistem Bandulan. *Jurnal Teknis ITS*, 1, G203-G206.
- Nirmalasari, P. R. (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, 1-6.

- Noerpamoengkas, A. (2015). Pemodelan Pengaruh Frekuensi dan Amplitudo Eksitasi terhadap Respon Gerak dan Daya Mekanis Pendulum Vertikal pada Konverter Energi Gelombang Laut. *Seminar Nasional Sains dan Teknologi Terapan, III*, 201-210.
- Novianarenti, E. (2013). Penentuan Parameter Bandul Matematis untuk Memperoleh Energi Maksimum dengan Gelombang dalam Tangki. *JURNAL TEKNIK POMITS*, 2, B-122-B-127.
- Pecher, A. (2016). Handbook of Ocean Wave Energy. In A. Pecher, *Handbook of Ocean Wave Energy* (pp. 189-194). Aalborg: Springer International Publishing.
- Rijcke, M. D. (2013). *Theseus*. Retrieved December 20, 2017, from http://www.theseusproject.eu/wiki/Wave_energy_converters#cite_note-15
- Safitri, Y. (2016). *Analisa Respon Gerak Ponton dan Pendulum Vertikal pada Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut Sistem Bandul (PLTGL-SB)*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

LAMPIRAN A – Variasi Simulasi

No	Amplitudo (cm)	Periode (s)	Panjang lengan (l ₂) (mm)	Massa pendulum (m ₁) (g)
1	1.5	0.8	495	40
2	1.5	0.8	495	70
3	1.5	0.8	495	100
4	1.5	0.8	505	40
5	1.5	0.8	505	70
6	1.5	0.8	505	100
7	1.5	0.8	515	40
8	1.5	0.8	515	70
9	1.5	0.8	515	100
10	1.5	1	495	40
11	1.5	1	495	70
12	1.5	1	495	100
13	1.5	1	505	40
14	1.5	1	505	70
15	1.5	1	505	100
16	1.5	1	515	40
17	1.5	1	515	70
18	1.5	1	515	100
19	1.5	1.2	495	40
20	1.5	1.2	495	70
21	1.5	1.2	495	100
22	1.5	1.2	505	40
23	1.5	1.2	505	70
24	1.5	1.2	505	100
25	1.5	1.2	515	40
26	1.5	1.2	515	70
27	1.5	1.2	515	100

Lanjutan

No	Amplitudo (cm)	Periode (s)	Panjang lengan (l ₂) (cm)	Massa pendulum (m ₁) (g)
28	3	0.8	495	40
29	3	0.8	495	70
30	3	0.8	495	100
31	3	0.8	505	40
32	3	0.8	505	70
33	3	0.8	505	100
34	3	0.8	515	40
35	3	0.8	515	70
36	3	0.8	515	100
37	3	1	495	40
38	3	1	495	70
39	3	1	495	100
40	3	1	505	40
41	3	1	505	70
42	3	1	505	100
43	3	1	515	40
44	3	1	515	70
45	3	1	515	100
46	3	1.2	495	40
47	3	1.2	495	70
48	3	1.2	495	100
49	3	1.2	505	40
50	3	1.2	505	70
51	3	1.2	505	100
52	3	1.2	515	40
53	3	1.2	515	70
54	3	1.2	515	100

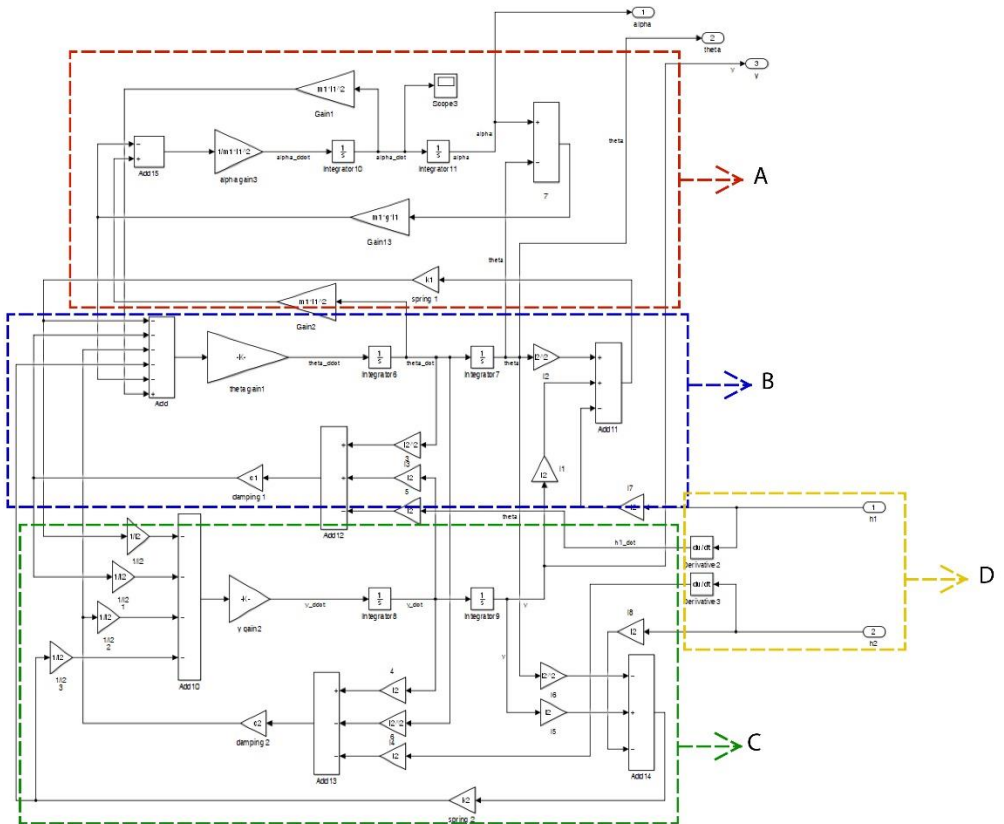
LAMPIRAN B – Hasil Simulasi

No	Heave Y (cm)		Roll θ (derajat)		Amplitude α (derajat)	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
1	-1.523	1.523	-0.034	0.034	-27.180	27.190
2	-1.523	1.523	-0.034	0.034	-27.149	27.160
3	-1.523	1.523	-0.034	0.034	-27.117	27.112
4	-1.523	1.523	-0.035	0.035	-27.699	27.710
5	-1.523	1.523	-0.035	0.035	-27.668	27.679
6	-1.523	1.523	-0.035	0.035	-27.636	27.631
7	-1.523	1.523	-0.036	0.036	-28.217	28.228
8	-1.523	1.523	-0.036	0.036	-28.186	28.197
9	-1.523	1.523	-0.036	0.036	-28.153	28.148
10	-1.515	1.515	-0.034	0.034	-25.263	25.223
11	-1.515	1.515	-0.034	0.034	-25.226	25.201
12	-1.515	1.515	-0.034	0.034	-25.182	25.176
13	-1.515	1.515	-0.035	0.035	-25.746	25.706
14	-1.515	1.515	-0.035	0.035	-25.708	25.683
15	-1.515	1.515	-0.035	0.035	-25.664	25.657
16	-1.515	1.515	-0.035	0.035	-26.228	26.186
17	-1.515	1.515	-0.035	0.035	-26.189	26.164
18	-1.515	1.515	-0.035	0.035	-26.144	26.137
19	-1.511	1.511	-0.034	0.034	-23.428	24.154
20	-1.511	1.511	-0.034	0.034	-23.385	24.125
21	-1.511	1.511	-0.034	0.034	-23.342	24.087
22	-1.511	1.511	-0.035	0.035	-23.876	24.616
23	-1.511	1.511	-0.035	0.035	-23.832	24.587
24	-1.511	1.511	-0.035	0.035	-23.788	24.548
25	-1.511	1.511	-0.035	0.035	-24.323	25.077
26	-1.511	1.511	-0.035	0.035	-24.278	25.046
27	-1.511	1.511	-0.035	0.035	-24.233	25.007

Lanjutan

No	Heave Y (cm)		Roll θ (derajat)		Amplitude α (derajat)	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
28	-3.046	3.046	-0.069	0.069	-54.393	54.304
29	3.046	3.046	0.069	0.069	54.310	54.301
30	3.046	3.046	0.068	0.068	54.223	54.265
31	-3.046	3.046	-0.070	0.070	-55.433	55.342
32	3.046	3.046	0.070	0.070	55.349	55.340
33	3.046	3.046	0.070	0.070	55.260	55.303
34	-3.046	3.046	-0.071	0.071	-56.470	56.377
35	-3.046	3.046	-0.071	0.071	-56.384	56.374
36	3.046	3.046	0.071	0.071	56.294	56.337
37	-3.030	3.030	-0.068	0.068	-50.474	50.371
38	-3.030	3.030	-0.068	0.068	-50.352	50.318
39	3.030	3.030	0.068	0.068	50.310	50.297
40	-3.030	3.030	-0.070	0.070	-51.439	51.334
41	-3.030	3.030	-0.069	0.069	-51.315	51.280
42	3.030	3.030	0.069	0.069	51.272	51.259
43	3.030	3.030	0.071	0.071	52.401	52.294
44	-3.030	3.030	-0.071	0.071	-52.275	52.239
45	3.030	3.030	0.071	0.071	52.231	52.217
46	3.021	3.021	0.068	0.068	46.884	48.232
47	-3.021	3.021	-0.068	0.068	-46.814	48.169
48	3.021	3.021	0.068	0.068	46.744	48.153
49	3.021	3.021	0.069	0.069	47.781	49.155
50	-3.021	3.021	-0.069	0.069	-47.710	49.090
51	-3.021	3.021	-0.069	0.069	-47.638	49.074
52	3.021	3.021	0.071	0.071	48.674	50.074
53	-3.021	3.021	-0.071	0.071	-48.602	50.008
54	-3.021	3.021	-0.070	0.070	-48.529	49.992

LAMPIRAN C – SIMULINK Matlab



Blok A merupakan blok yang dibuat untuk mendapatkan data simulasi nilai simpangan pendulum (α) yang dihitung berdasarkan Persamaan 3.3 yang telah diturunkan menggunakan metode persamaan Lagrange pada bab III sub bab Pemodelan.

Sedangkan blok B merupakan blok untuk mendapatkan data simulasi nilai simpangan *roll* (θ) dari ponton. Blok ini dibuat berdasarkan Persamaan 3.1.

Blok C merupakan blok untuk mendapatkan data simulasi gerak *heave* (y) dari ponton. Blok ini dibuat berdasarkan Persamaan 3.2 yang telah diturunkan pada sub bab 3.4, dan blok D merupakan input berupa gelombang laut yang dapat diatur tinggi gelombang dan periode gelombangnya.

LAMPIRAN D – Kecepatan Sudut, Torsi, dan Daya yang dihasilkan

No	kecepatan (rad/s)	Torsi (N.m)	Daya maksimal (watt)
1	4.0903	0.0017	0.0071
2	4.0858	0.0017	0.0071
3	4.0788	0.0017	0.0071
4	4.1670	0.0018	0.0074
5	4.1624	0.0018	0.0074
6	4.1553	0.0018	0.0073
7	4.2434	0.0018	0.0076
8	4.2387	0.0018	0.0076
9	4.2315	0.0018	0.0076
10	3.7994	0.0016	0.0062
11	3.7962	0.0016	0.0062
12	3.7924	0.0016	0.0061
13	3.8708	0.0017	0.0064
14	3.8675	0.0017	0.0064
15	3.8637	0.0016	0.0064
16	3.9420	0.0017	0.0066
17	3.9386	0.0017	0.0066
18	3.9347	0.0017	0.0066
19	3.6408	0.0016	0.0057
20	3.6365	0.0016	0.0057
21	3.6308	0.0016	0.0056
22	3.7094	0.0016	0.0059
23	3.7050	0.0016	0.0059
24	3.6992	0.0016	0.0059
25	3.7777	0.0016	0.0061
26	3.7732	0.0016	0.0061
27	3.7673	0.0016	0.0061

Lanjutan

No	Kecepatan (rad/s)	Torsi (N.m)	Daya maksimal (watt)
28	7.9411	0.0031	0.0246
29	7.9407	0.0031	0.0246
30	7.9358	0.0031	0.0245
31	8.0810	0.0031	0.0253
32	8.0807	0.0031	0.0253
33	8.0758	0.0031	0.0253
34	8.2199	0.0032	0.0261
35	8.2195	0.0032	0.0261
36	8.2146	0.0032	0.0260
37	7.4051	0.0029	0.0217
38	7.3978	0.0029	0.0217
39	7.3949	0.0029	0.0217
40	7.5372	0.0030	0.0224
41	7.5298	0.0030	0.0224
42	7.5269	0.0030	0.0224
43	7.6683	0.0030	0.0231
44	7.6608	0.0030	0.0231
45	7.6578	0.0030	0.0230
46	7.1099	0.0028	0.0202
47	7.1011	0.0028	0.0201
48	7.0990	0.0028	0.0201
49	7.2375	0.0029	0.0208
50	7.2285	0.0029	0.0208
51	7.2264	0.0029	0.0208
52	7.3643	0.0029	0.0215
53	7.3551	0.0029	0.0215
54	7.3529	0.0029	0.0214

LAMPIRAN E – Dokumentasi Eksperimen



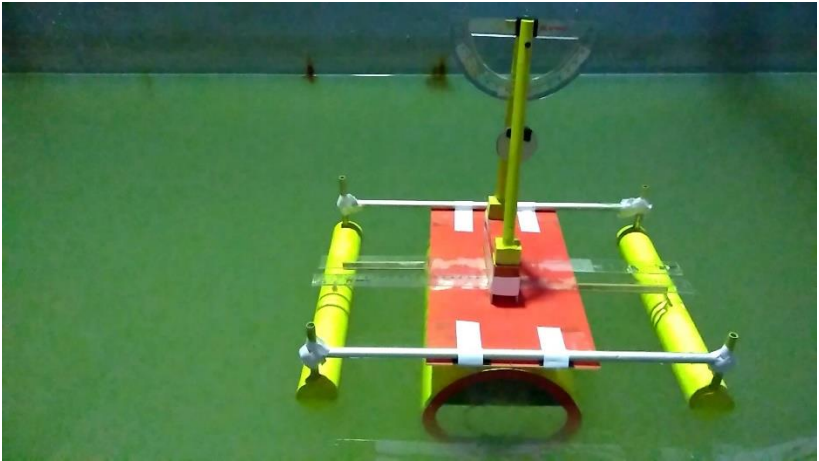
Gambar 1. Pembangkit Gelombang pada *Flume Tank*



Gambar 2. *Flume Tank*



Gambar 3. Ponton sebelum masuk air



Gambar 4. Ponton saat masuk air

BIOGRAFI PENULIS



Penulis lahir pada tanggal 15 Mei 1996 di Tulungagung, Jawa Timur. Penulis menempuh pendidikan di SDN Mojosongo V Surakarta (2003-2009), SMPN 4 Surakarta (2009-2012), dan SMAN 1 Surakarta (2012-2014). Penulis melanjutkan studinya di S-1 Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Bidang minat yang diambil penulis saat di Teknik Fisika adalah Rekayasa Energi dan Pengkondisian Lingkungan. Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif sebagai asisten Laboratorium Fisika Rekayasa dan pengurus LDJ Teknik Fisika. Pengalaman *internship* penulis adalah merancang *prototype* yang digunakan untuk memonitoring temperatur *turbocharger* pada mesin gas pembangkit listrik tipe GE JGS 620 GS-N.L yang digunakan di PT. WIKA PLTMG 20 MW Rengat, Riau. Penulis dapat dihubungi melalui *e-mail* wisnoedarma@gmail.com