



TUGAS AKHIR - TM141585

**ANALISA PERBANDINGAN ENERGI LISTRIK YANG
DIHASILKAN MEKANISME PLTGL SISTEM PONTON
PERAHU *SINGLE* DAN *TRIPLE* PENDULUM
VERTIKAL DENGAN VARIASI MASSA PENDULUM**

**EFRAIM ROMBE
NRP. 2112 106 029**

**Dosen Pembimbing
Dr. Wiwiek Hendrowati, ST., MT.**

**JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015**



TUGAS AKHIR - TM141585

**ANALISA PERBANDINGAN ENERGI LISTRIK YANG
DIHASILKAN MEKANISME PLTGL SISTEM PONTON
PERAHU *SINGLE* DAN *TRIPLE* PENDULUM
VERTIKAL DENGAN VARIASI MASSA PENDULUM**

**EFRAIM ROMBE
NRP. 2112 106 029**

**Dosen Pembimbing
Dr. Wiwiek Hendrowati, ST., MT.**

**JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015**



FINAL PROJECT - TM141585

COMPARATIVE ANALYSIS OF ELECTRICAL ENERGY WHICH GENERATED BY SWPP MECHANISM BOAT PONTOON SYSTEM SINGLE AND TRIPLE VERTICAL PENDULUM WITH VARIATIONS OF PENDULUM MASS

EFRAIM ROMBE
NRP. 2112 106 029

Academic Supervisor
Dr. Wiwiek Hendrowati, ST., MT.

MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2015



FINAL PROJECT - TM141585

**COMPARATIVE ANALYSIS OF ELECTRICAL
ENERGY WHICH GENERATED BY SWPP
MECHANISM BOAT PONTOON SYSTEM SINGLE
AND TRIPLE VERTICAL PENDULUM WITH
VARIATIONS OF PENDULUM MASS**

**EFRAIM ROMBE
NRP. 2112 106 029**

**Academic Supervisor
Dr. Wiwiek Hendrowati, ST., MT.**

**MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2015**

**ANALISA PERBANDINGAN ENERGI LISTRIK YANG
DIHASILKAN MEKANISME PLTGL SISTEM PONTON
PERAHU *SINGLE* DAN *TRIPLE* PENDULUM VERTIKAL
DENGAN VARIASI MASSA PENDULUM**

TUGAS AKHIR

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

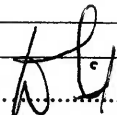
Oleh :

EFRAIM ROMBE

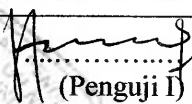
Nrp. 2112 106 029

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

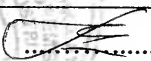
1. Dr. Wiwiek Hendrowati ST., MT
(NIP. 197004121997032003)


.....
(Pembimbing)

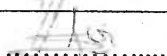
2. Dr.Eng Harus Laksana Guntur ST., M.Eng
(NIP. 197505111999031001)


.....
(Penguji I)

3. Ir. J. Lubi
(NIP.195106031976031002)


.....
(Penguji II)

4. Moch. Solichin ST., MT
(NIP.2100201405003)


.....
(Penguji III)

**SURABAYA
JULI 2015**

**ANALISA PERBANDINGAN ENERGI LISTRIK YANG
DIHASILKAN MEKANISME PLTGL SISTEM PONTON
PERAHU *SINGLE* DAN *TRIPLE* PENDULUM VERTIKAL
DENGAN VARIASI MASSA PENDULUM**

Nama Mahasiswa : Efraim Rombe
NRP : 2112.106.029
Jurusan : Teknik Mesin FTI – ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Wiwiek Hendrowati, ST., MT.

ABSTRAK

Keadaan geografis Indonesia sangat memungkinkan untuk memanfaatkan energi gelombang laut sebagai energi alternatif terbarukan yang digunakan sebagai pembangkit listrik.

Penelitian ini membahas tentang mekanisme Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut (PLTGL) dengan tipe Ponton Perahu tipe *Single* dan *Triple* Pendulum Vertikal (PPSPV & PPTPV) dengan variasi massa yang dibuat dalam skala laboratorium. Gelombang air yang datang akan menggerakkan ponton perahu kemudian mekanisme pendulum yang terdapat pada ponton perahu akan ikut bergerak dan menggerakkan generator yang terhubung dengan mekanisme pendulum. Variasi massa *single* pendulum 170gr, 200gr dan 225gr, variasi massa *triple* pendulum 125gr, 150gr dan 175gr dengan dua massa penyeimbang 25gr dan variasi massa triple pendulum 75gr, 100gr dan 175gr dengan dua massa penyeimbang 50gr.

Hasil dari penelitian ini adalah voltase listrik yang dihasilkan tipe *Single* Pendulum (PPSPV) lebih besar dibandingkan dengan tipe *Triple* Pendulum (PPTPV) yaitu sebesar 0.0178 V pada massa 225 gram (0.225 kg). Pada variasi massa penyeimbang, massa penyeimbang yang lebih kecil menghasilkan voltase yang lebih besar yaitu 0.0156 V pada massa total 225 gram, sedangkan pada massa penyeimbang yang lebih besar menghasilkan voltase sebesar 0.014 V pada massa total yang sama.

Kata Kunci : Mekanisme PLTGL, Ponton Perahu, *Single* Pendulum Vertikal, *Triple* Pendulum Vertikal, Massa Pendulum.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

COMPARATIVE ANALYSIS OF ELETRICAL ENERGY WHICH GENERATED BY SWPP MECHANISM BOAT PONTOON SYSTEM SINGLE AND TRIPLE VERTICAL PENDULUM WITH VARIATIONS OF PENDULUM MASS

Student Name : Efraim Rombe
NRP : 2112.106.029
Department : Teknik Mesin FTI – ITS
Advisor : Dr. Wiwiek Hendrowati, ST., MT.

ABSTRACT

Indonesian geographical situation extremely allows to harness wave energy as a renewable alternative energy that is used as a power plant.

This study discusses the mechanism of Sea Wave Power Plants (PLTGL) with the type of pontoon boat types Single and Triple Pendulum Vertical (PPSPV & PPTPV) with mass variations made in the laboratory scale. Water coming wave will drive the pontoon boat then the pendulum mechanism contained in the pontoon boat will also move and drive a generator that is connected with the mechanism of single pendulum mass pendulum Variasi 170gr, 200gr and 225gr, 125gr pendulum triple mass variations, 150gr and 175gr with two balancing masses 25gr and variations of triple pendulum mass 75gr, 100gr and 175gr with two balancing masses 50gr.

Results from this study is the electrical voltage generated type Single Pendulum (PPSPV) is greater than the type Triple Pendulum (PPTPV) that is equal to 0.0178 V at mass 225 grams (0.225 kg). On the counterweight mass variation, the smaller the mass balance produces a larger voltage is 0.0156 V at a total mass of 225 grams, while the larger the mass balance produces a voltage of 0.014 V at the same total mass.

Keywords: Mechanism PLTGL, Pontoon Boat, Single Pendulum Vertical, Vertical Triple Pendulum, Pendulum Mass.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Segala Kemuliaan hanya bagi Allah, oleh karena anugerah-Nya penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini. Penulis sangat menyadari bahwa keberhasilan dalam penulisan tugas akhir ini tak lepas dari dukungan dan bantuan berbagai pihak. Melalui kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah banyak membantu dan mendukung baik secara moral maupun material dalam proses penyelesaian tugas akhir ini, antara lain:

1. Ibu Dr. Wiwiek Hendrowati, ST., MT. selaku dosen pembimbing tugas akhir dan dosen wali yang selalu memberikan saran, motivasi, dan ilmu-ilmu yang sangat bermanfaat bagi penulis. Terima kasih atas kesabarannya selama membimbing penulis.
2. Ibunda tercinta Ester Kedang dan Ayahanda tercinta Mesak Rombe yang senantiasa memberikan dorongan semangat dan moral bagi penulis untuk terus berusaha dan semangat menuntut ilmu semoga Allah selalu memberikan anugerah-Nya.
3. Bapak Dr. Eng. Harus Laksana Guntur, ST., M.Eng , Ir. J. Lubi, dan Moch Solichin, ST., MT selaku dosen penguji proposal tugas akhir dan tugas akhir penulis, terima kasih atas saran-saran yang telah diberikan.
4. Bapak Ir. Bambang Pramujati, MSc.Eng. PhD selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin yang telah memberikan motivasi dan dukungan kepada penulis untuk segera menyelesaikan studinya.
5. Seluruh Dosen dan karyawan jurusan Teknik Mesin ITS.
6. Saudara-saudaraku Yansen Rombe, Esra Rombe, Hendra Rombe, Ronald Tandiyuk, Roland Tandiyuk, Astri Natalia dan Octavianus Tandiyuk yang selalu mendoakan dan menyemangati dalam menyelesaikan tugas akhir ini.

7. My Lovely Abygael Burgan Runtung yang selalu mendoakan dan selalu memberi semangat bagi penulis selama mengerjakan tugas akhir ini.
8. Sahabat-sahabatku di Manato Andarias, Jegar, Wanto, Julius, Randi dan Zetprianus yang selalu memberi semangat bagi penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
9. Rekan – rekan tim Ocean Wave Energy Amiruddin, Akbar, Andri, Adit, Bang Irvan dan Esa yang sama – sama berjuang dan saling bahu membahu menyelesaikan Tugas akhir ini.
10. Rekan - rekan lintas jalur Teknik Mesin ITS angkatan tahun 2012 Genap, yang senantiasa memberikan semangat dan bantuan ketika penulis membutuhkan, terima kasih atas bantuannya dan mari kita jaga persahabatan dan persaudaraan yang telah berjalan.
11. Teman-teman lab. Sistem Dinamis dan Vibrasi terima kasih atas doa dan dukungannya.
12. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan oleh penulis.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penyusunan tugas akhir ini, oleh karena itu saran dan masukan dari semua pihak sangat penulis harapkan. Penulis berharap semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat dan berguna bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

Surabaya, Juli 2015

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang Masalah	1
1.2. Perumusan Masalah	2
1.3. Batasan Masalah	3
1.4. Tujuan Penelitian	3
1.5. Manfaat hasil Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1. Tinjauan Pustaka	5
2.1.1. PLTGL – SB Model Vertikal Oleh Zamrisyaf	5
2.1.2. PLTGL – SB oleh Mukhtasor dkk	6
2.1.3. PLTGL Sistem Ponton – Bandul Vertikal oleh Eva Sofiana	7
2.1.4. PLTGL – SP oleh Andromeda Yori	9
2.2. Dasar Teori	11
2.2.1. Gelombang Laut	11
2.2.2. Getaran	14
2.2.3. Pendulum	15
2.2.4. <i>Gear Box</i>	18
2.2.5. Generator	18
BAB III METODE PENELITIAN	21
3.1. Tahapan Penelitian	21
3.1.1. <i>Flow chart</i> Penelitian	21
3.1.2. Penjelasan <i>Flow chart</i> Penelitian	22
3.2. Rancangan Mekanisme	25
3.2.1. Rancangan Teoritis	25

3.3. Pengujian	37
3.3.1. Peralatan Pengujian	37
3.3.2. <i>Flowchart</i> Pengujian	39
3.3.3. Penjelasan <i>Flowchart</i> Pengujian	43
3.3.4. Lembar Data Pengujian	44
BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN.....	45
4.1. Data dan Spesifikasi Pengujian.....	45
4.1.1. Gelombang	45
4.1.2. Mekanisme	45
4.2. Analisa dan Pembahasan Teoritis	46
4.3. Analisa dan Pembahasan Pengujian.....	53
4.3.1. Pengaruh Massa Pendulum terhadap Energi Listrik yang Dihasilkan.....	55
4.3.2. Pengaruh Jumlah Pendulum terhadap Energi Listrik yang Dihasilkan.....	57
4.4. Pembahasan	59
4.4.1. Analisa Variasi Massa dengan Panjang Lengan Tetap	99
4.5. Perbandingan Teoritis dan Eksperimen.....	62
4.6. Aplikasi PLTGL Sistem Ponton Perahu – Pendulum Vertikal.....	63
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	65
5.1. Kesimpulan.....	65
5.2. Saran.....	65
DAFTAR PUSTAKA	67

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1.	Spesifikasi motor DC	37
Tabel 3.2.	Data hasil pengujian.....	44
Tabel 4.1.	Hasil perhitungan secara teoritis	51
Tabel 4.2.	Nilai voltase <i>root mean square</i> pada variasi massa pendulum.....	59
Tabel 4.3	Hasil perhitungan skala lab dan skala rill.....	64

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut – Sistem Bandulan (PLTGL – SB).....	5
Gambar 2.2.	Prototype PLTGL – SB yang telah terpasang di laut	7
Gambar 2.3.	PLTGL Sistem Ponton – Bandul Vertikal	8
Gambar 2.4.	Grafik Pengaruh Panjang Lengan Terhadap Energi Listrik Berupa Tegangan.....	9
Gambar 2.5.	PLTGL <i>Single</i> Pendulum	9
Gambar 2.6.	Grafik Pengaruh Massa Pendulum Terhadap Energi Listrik Berupa Daya	10
Gambar 2.7.	Grafik Pengaruh Panjang Lengan Pendulum Terhadap Energi Listrik Berupa Daya	11
Gambar 2.8.	Gelombang Air Laut.....	12
Gambar 2.9.	Benda Mengapung terkena gerak naik turun air laut	13
Gambar 2.10.	<i>Compound</i> Pendulum	15
Gambar 2.11.	Amplitudo gelombang	17
Gambar 2.12.	Kumpulan berputar didalam suatu medan magnet pada generator.....	19
Gambar 3.1.	<i>Flowchart</i> penelitian.....	22
Gambar 3.2.	Model sederhana PLTGL sistem ponton – tiga pendulum vertikal dan PLTGL sistem pontoon – satu pendulum vertikal.....	23
Gambar 3.3.	Bagian – bagian model PLTGL ponton – tiga pendulum vertikal	25
Gambar 3.4.	Ponton	26
Gambar 3.5.	Titik – titik dan arah gaya yang terjadi saat ponton tanpa beban pendulum dan tanpa dipengaruhi gaya gelombang	27
Gambar 3.6.	Analisa gaya pada ponton dengan tiga pendulum vertikal.....	27

Gambar 3.7.	<i>Free body diagram</i> ponton dan pendulum pada kesetimbangan dinamis pada mekanisme tiga pendulum.....	29
Gambar 3.8.	Analisa gaya pada pontoon dengan satu pendulum vertikal.....	31
Gambar 3.9.	<i>Free body diagram</i> pontoon dan pendulum pada kesetimbangan dinamis pada mekanisme satu pendulum.....	32
Gambar 3.10.	Sketsa lengan pendulum.....	33
Gambar 3.11.	Sketsa massa pendulum.....	33
Gambar 3.12.	<i>Free body diagram</i> ponton dan pendulum....	34
Gambar 3.13.	Sketsa dari poros.....	35
Gambar 3.14.	Sketsa roda gigi pembalik.....	36
Gambar 3.15.	Generator.....	37
Gambar 3.16.	Kolam simulator gelombang laut.....	38
Gambar 3.17.	Model mekanisme PLTGL pontoon – tiga pendulum vertikal dan PLTGL ponton – satu pendulum vertikal.....	39
Gambar 3.18.	<i>Digital storage oscilloscope</i>	39
Gambar 3.19.	<i>Flowchart</i> pengujian <i>single</i> pendulum.....	40
Gambar 3.20.	<i>Flowchart</i> pengujian <i>triple</i> pendulum dengan massa penyeimbang 25 gram.....	41
Gambar 3.21.	<i>Flowchart</i> pengujian <i>triple</i> pendulum dengan massa penyeimbang 50 gram.....	42
Gambar 3.22.	Pengujian mekanisme pada kolam simulator.....	43
Gambar 4.1.	Grafik perbandingan hasil perhitungan torsi out secara teoritis.....	51
Gambar 4.2.	Grafik perbandingan hasil perhitungan frekuensi natural secara teoritis.....	52
Gambar 4.3.	Grafik perbandingan hasil perhitungan daya maksimum secara teoritis.....	52
Gambar 4.4.	PLTGL Sistem Ponton Perahu – Pendulum Vertikal.....	54

Gambar 4.5.	Data hasil eksperimen yang terekam oleh <i>oscilloscope</i>	54
Gambar 4.6.	Grafik tegangan vs waktu akibat pengaruh variasi massa pada sistem <i>single</i> pendulum.....	55
Gambar 4.7.	Grafik tegangan vs waktu akibat pengaruh variasi massa pada sistem <i>triple</i> pendulum (25).....	56
Gambar 4.8.	Grafik tegangan vs waktu akibat pengaruh variasi massa pada sistem <i>triple</i> pendulum (50).....	56
Gambar 4.9.	Grafik perbandingan tegangan vs waktu akibat pengaruh jumlah pendulum.....	58
Gambar 4.10.	Grafik pengaruh massa pendulum berupa voltase	60
Gambar 4.11.	Grafik pengaruh massa pendulum berupa daya	61
Gambar 4.12.	Grafik daya teoritis vs eksperimen	62

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pada zaman sekarang ini, kebutuhan akan energi semakin meningkat. Hal ini membuat pemerintah Indonesia harus memiliki strategi dalam mengembangkan potensi yang dimiliki oleh negara ini. Dengan melihat keadaan geografis Indonesia, maka salah satu potensi energi yang sangat memungkinkan untuk dikembangkan di Indonesia yaitu potensi energi laut seperti energi panas laut, energi pasang surut dan energi gelombang laut. Dari ketiga jenis energi laut tersebut, energi gelombang laut merupakan jenis energi laut yang memiliki potensi teoritis terbesar untuk menghasilkan energi listrik. Energi gelombang laut ini dapat dimanfaatkan sebagai energi penggerak pada mekanisme Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut (PLTGL).

Berdasarkan pengesahan pada tahun 2011, potensi teoritis energi potensial dari gelombang laut (*wave energy*) sebesar 510.000 MW, energi pasang surut (*tidal wave*) sebesar 160.000 MW, dan dari energi panas laut (*ocean thermal wave*) sebesar 57.000 MW. Dari ketiga potensi energi tersebut, dapat dilihat bahwa energi gelombang laut (*wave energy*) merupakan sumber energi yang paling dominan, sehingga teknologi energi baru khususnya dari pemanfaatan gelombang laut (*wave energy*) perlu dikembangkan.

Teknologi Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut – Sistem Pendulum salah satunya dikembangkan oleh Bapak Zamrisyaf SY dari Badan Penelitian dan Pengembangan Ketenagalistrikan PT. Perusahaan Listrik Negara (Persero) bekerjasama dalam Pengabdian Masyarakat Institut Teknologi Sepuluh Nopember pada tahun 2010. Penelitian ini menggunakan ponton sebagai landasan Bergeraknya sebuah pendulum. Energi gelombang laut mengakibatkan pendulum berputar dan menimbulkan energi listrik. Penelitian dalam skala lab juga telah dilakukan oleh Hermawan Agung Primadani dan

Andromeda yang menggunakan pendulum horisontal, sedangkan penelitian dengan menggunakan *single* pendulum vertikal telah dilakukan oleh Eva Sofiana. Hasil dari penelitian PLTGL *single* pendulum ini adalah putaran yang dihasilkan pendulum sangat kecil dan mempunyai periode yang rendah. Sedangkan generator membutuhkan putaran yang tinggi dan kontinu untuk menghasilkan energi listrik yang optimal. Maka dari itu, pada penelitian ini dilakukan Re-desain mekanisme PLTGL dengan ponton perahu yang menggunakan *triple* pendulum. Gelombang laut yang mengenai ponton akan menyebabkan massa pendulum vertikal bergerak. Gerakan pendulum tersebut dihubungkan ke generator sehingga generator menghasilkan listrik. Oleh karena generator membutuhkan gerakan yang searah maka diperlukan suatu mekanisme pembalik putaran berupa rangkaian roda gigi yang nantinya juga akan menyearahkan dan meningkatkan putaran poros yang terhubung ke generator.

1.2. Perumusan Masalah

Dari latar belakang diatas, maka diperlukan penelitian lebih lanjut tentang mekanisme Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut dengan tipe ponton perahu dalam skala laboratorium. Gelombang air yang datang akan menggerakkan ponton perahu sehingga miring. Kemiringan tersebut menyebabkan massa pendulum bergerak. Dengan adanya tiga pendulum yang saling menyeimbangkan maka diharapkan gerakan atau putaran atau osilasi pendulum semakin cepat. Selain itu gerakan bolak balik pendulum akan disearahkan oleh roda gigi pembalik. Putaran yang cepat dan searah akan diteruskan ke generator dan diubah menjadi energi listrik.

Pada penelitian ini dititik beratkan pada pengaruh massa dan panjang lengan terhadap energi listrik yang dihasilkan. Dimana massa dan panjang lengan akan mempengaruhi besarnya momen yang digunakan untuk memutar generator. Selain itu juga membandingkan energi listrik yang dihasilkan oleh mekanisme PLTGL *Single* Pendulum dan *Triple* Pendulum

Vertikal. Dari uraian tersebut, maka permasalahan pada penelitian ini yaitu:

1. Bagaimana merancang bangun Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut Sistem Ponton Perahu – *Triple* Pendulum Vertikal.
2. Bagaimana pengaruh perubahan massa pendulum terhadap energi listrik yang dihasilkan.
3. Bagaimana perbandingan energi listrik yang dihasilkan oleh PLTGL Sistem Ponton Perahu – *Single* Pendulum Vertikal dan PLTGL Sistem Ponton Perahu – *Triple* Pendulum Vertikal.

1.3. Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam tugas akhir ini yaitu :

1. Sistem ponton perahu dan pendulum merupakan sistem dengan *single degree of freedom*.
2. Massa pendulum dibuat dalam tiga variasi.
3. Seluruh massa yang bergerak dianggap kaku, sehingga defleksi massa akibat elastisitas diabaikan karena sangat kecil.
4. Gerakan gelombang terhadap ponton dari satu arah saja.
5. Gesekan – gesekan yang terjadi pada poros dan mekanisme tidak diperhitungkan.
6. Gerakan pendulum disebabkan oleh gelombang air pada simulator kolam air laut.

1.4. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Untuk mendapatkan energi listrik yang dihasilkan dengan variasi massa pendulum.
2. Membandingkan energi listrik yang dihasilkan oleh mekanisme PLTGL *Single* Pendulum dan *Triple* Pendulum Vertikal.

1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Terhadap pengembangan bidang ilmu dan teknologi, penelitian ini dapat menyempurnakan penelitian – penelitian lain mengenai PLTGL dengan tipe pontoon yang sudah ada.
2. Terhadap masyarakat, penelitian ini menyediakan sumber energi terbaru.
3. Terhadap peneliti, penelitian ini menyediakan data hubungan antara panjang lengan dan massa pendulum terhadap energi listrik yang dihasilkan pada alat PLTGL Sistem Ponton Perahu dengan Tiga Pendulum Vertikal.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

Pemanfaatan gelombang laut sebagai sumber energi terbarukan telah dilakukan oleh beberapa Negara seperti Amerika, Prancis, Rusia, China Kanada, Korea, Malaysia, Jepang dan Indonesia. Hal ini dibuktikan dengan adanya hasil riset dan peralatan berteknologi yang tercipta untuk pengembangan energi laut.

2.1.1 PLTGL – SB Model Vertikal oleh Zamrisyaf

Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut – Sistem Bandulan (PLTGL – SB) adalah salah satu pembangkit listrik yang memanfaatkan gelombang laut sebagai sumber energinya. Ini berdasarkan penelitian Zamrisyaf, pegawai pusat penelitian dan pengembangan pada PT. Perusahaan Listrik Negara (Persero) sejak tahun 2002. Temuan zamrisyaf ini telah mendapatkan penyempurnaan lewat kerjasama dengan Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya, diantaranya telah menghasilkan ukuran – ukuran ponton, berat bandul dan panjang lengan bandul serta daya dan putaran yang dihasilkan.



Gambar 2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut-Sistem Bandulan (PLTGL - SB)
(Asosiasi Energi Laut Indonesia – ASELI, 2007)

Cara kerja PLTGL – SB ini dengan menggunakan ponton yang berfungsi sebagai kapal pengangkut yang terintegrasi dengan generator. Untuk menghasilkan putaran generator yang maksimal, bandul dibantu dengan alat transmisi *double-flywheel* dan diintegrasikan dengan bantuan rantai. Setiap gerakan air laut akan menggoyangkan bandul sehingga menggerakkan *double-flywheel* untuk memutar generator untuk menghasilkan listrik. Zamrisyaf mengubah energi gelombang laut menjadi energi listrik melalui perantara energi gerak bandulan yang nantinya akan menggerakkan roda gila. Pada akhirnya, roda gila menggerakkan generator dan menghasilkan listrik.

Pada tahap awal, potensi maksimal dari satu unit PLTGL sekitar 125 kW hingga 300 kW. Berdasarkan pada perhitungan, berat bandul 10 kg, panjang lengan bandul 2 m, periode gelombang laut rata – rata 3 detik mencapai ketinggian 1.5 m, daya yang dihasilkan satu set bandul sekitar 25.5 kW. Pembangkit ini pernah diuji coba pada tahun 2007 di pantai Ulak Karang Padang dan diperkirakan mampu menghasilkan listrik sebesar 300 watt meskipun belum bisa dikatakan berhasil.

2.1.2 PLTGL – SB oleh Mukhtasor dkk

Teknologi pembangkit listrik menggunakan energi gelombang laut yang dikaji pada penelitian ini adalah teknologi Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut – Sistem Bandulan (PLTGL – SB). Teknologi ini telah dipatenkan oleh Zamrisyaf dengan nomor paten P00200200854 dengan melakukan kerjasama bersama Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS). Pengamatan gerakan bandul pada PLTGL – SB ini telah dilakukan, baik secara horisontal maupun secara vertikal dimana bandul tersebut diletakkan di atas ponton. Lokasi pengamatan adalah perairan sekitar pelabuhan Telaga Biru, Tanggungbung, Jawa Timur. Pada uji coba tersebut, rata – rata gerak bandul terjadi antara 5 – 20 rpm. Gerakan bandul ini dipengaruhi oleh besar kecilnya gelombang laut. Hasil pengamatan gerakan bandul ini dibandingkan dengan spesifikasi generator yang digunakan,

yaitu memiliki putaran antara 50 – 250 rpm dan dapat mencapai daya 500 – 5000 watt (0.5 – 5 kW).

Pada gambar 2.2 menunjukkan prototype PLTGL – SB yang sudah terpasang dilokasi uji lapangan sejak awal tahun 2013. Hasil pengamatan di lapangan menunjukkan bahwa bandul vertikal lebih cepat merespon atau lebih mudah menghasilkan gerakan – gerakan dibandingkan dengan bandul horisontal. Pada kondisi tinggi gelombang 0.5 – 1.5 meter, bandul vertikal sudah mampu menghasilkan gerakan bolak – balik dengan periode laut sembarang. Sedangkan pada bandul horisontal membutuhkan tinggi gelombang lebih dari 2 meter dengan syarat periode gelombang antara 5 – 15 detik.

Pada bandul horisontal, semakin cepat periode gelombang laut maka gerakan rotasi bandul horisontal selesai menempuh satu putaran atau satu periode sudah ada momentum baru dari gelombang laut sehingga menyebabkan gerakan rotasi bandul berhenti. Dari hasil pengamatan tersebut, maka bandul vertikal menjadi pilihan pada kegiatan penelitian ini.

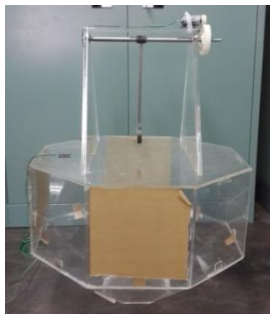


Gambar 2.2 Prototype PLTGL-SB yang telah terpasang dilaut
(Mukhtasor, Rudi Walujo Prastianto dkk. 2013)

2.1.3 PLTGL Sistem Ponton – Bandul Vertikal oleh Eva Sofiana

PLTGL ini menggunakan ponton dengan sistem bandulan vertikal, dimana energi potensial yang dihasilkan oleh gelombang laut akan menggerakkan ponton kemudian gerakan ponton inilah

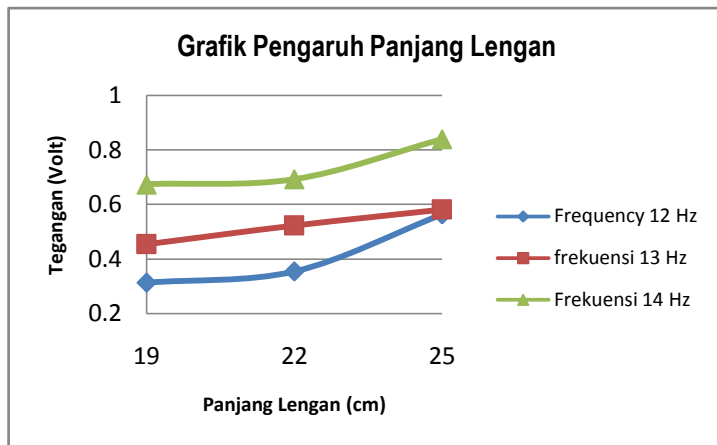
yang nantinya akan menggerakkan bandul untuk memutar generator. Pada mekanisme ini, generator yang di gunakan yaitu generator AC.



Gambar 2.3 PLTGL Sistem Ponton – Bandul Vertikal
(Eva Sofiana. 2015)

Prinsip kerja dari PLTGL ini adalah energi dari gelombang laut akan menggerakkan ponton dan kemudian gerakan yang terjadi pada ponton akan menyebabkan pendulum bergerak. Gerakan pendulum inilah yang nantinya akan memutar generator sehingga nantinya generator dapat menghasilkan energi listrik. Percobaan PLTGL – Sistem Bandul Vertikal ini dilakukan dalam skala lab pada kolam buatan. Gambar 2.4 adalah hasil percobaan PLTGL – Sistem Bandul Vertikal dengan variasi panjang lengan pendulum dimana V adalah tegangan listrik yang dihasilkan dari percobaan.

Dari data grafik tersebut dapat dilihat bahwa tegangan listrik terbesar 0.8394 volt dihasilkan pada panjang lengan 0.25 meter dan massa sebesar 0.15497 kg, hasil tersebut didapat dengan frekuensi tetap sebesar 1,4 Hz.



Gambar 2.4 Grafik Pengaruh Panjang Lengan Terhadap Energi Listrik Berupa Tegangan

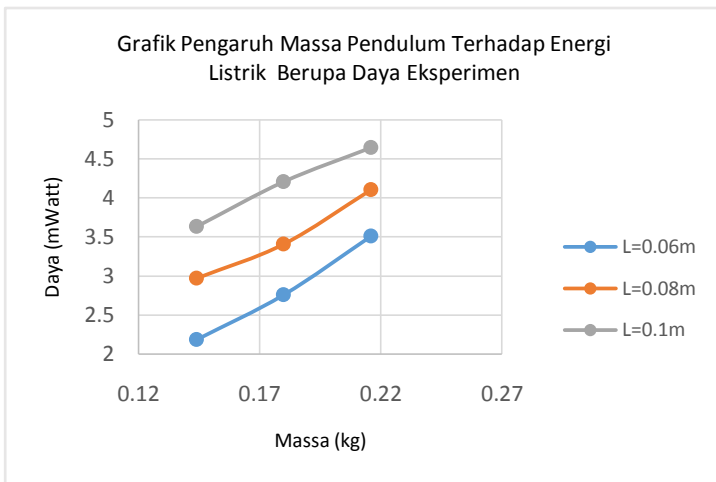
2.1.4 PLTGL – SP oleh Andromeda Yori

PLTGL ini menggunakan ponton dengan sistem *single* pendulum, dimana energi potensial yang dihasilkan oleh gelombang laut akan menggerakkan ponton kemudian gerakan ponton inilah yang nantinya akan memutar pendulum untuk memutar generator. Berikut ini merupakan gambar dari mekanisme PLTGL – SP.

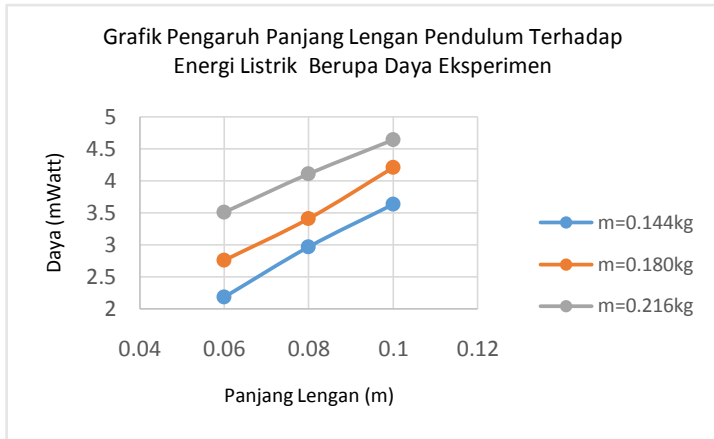


Gambar 2.5 PLTGL *Single Pendulum*
(Andromeda Yori. 2015)

Prinsip kerja dari PLTGL – SP ini adalah energi dari gelombang laut akan menggerakkan ponton dan kemudian gerakan yang terjadi pada ponton akan menyebabkan pendulum berputar. Gerakan pendulum inilah yang nantinya akan memutar generator namun sebelumnya akan melewati rangkaian roda gigi yang menghubungkan batang pendulum dan generator sehingga nantinya generator dapat menghasilkan energi listrik. Percobaan PLTGL – SP ini dilakukan dalam skala lab pada kolam buatan. Gambar 2.6 dan 2.7 adalah hasil percobaan PLTGL – SP dengan variasi massa pendulum dan panjang lengan pendulum dimana P adalah daya listrik yang dihasilkan dari percobaan.



Gambar 2.6 Grafik Pengaruh Massa Pendulum Terhadap Energi Listrik Berupa Daya



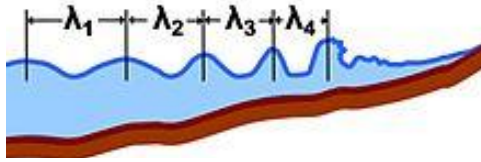
Gambar 2.7 Grafik Pengaruh Panjang Lengan Pendulum Terhadap Energi Listrik Berupa Daya
(Andromeda Yori. 2015)

Dari data grafik tersebut dapat dilihat bahwa daya listrik terbesar 4.646 watt dihasilkan pada panjang lengan 0.1 meter dan massa sebesar 0.216 kg, hasil tersebut didapat dengan frekuensi tetap sebesar 1.8 Hz dan amplitudo tetap sebesar 3.5 cm.

2.2. Dasar Teori

2.2.1 Gelombang Laut

Gelombang laut adalah pergerakan naik dan turunnya air dengan arah tegak lurus pada permukaan air laut yang membentuk kurva ataupun grafik sinusoidal. Bentuk gelombang sinusoidal memiliki karakteristik panjang gelombang yang lebih besar dari tinggi gelombangnya saat di laut sedangkan ketika mendekati daerah pantai maka panjang gelombang menjadi lebih kecil dari tinggi gelombangnya seperti pada Gambar 2.8 berikut ini.



Gambar 2.8 Gelombang Air Laut.
<http://id.wikipedia.org/wiki/Gelombang>

Gelombang pada air laut terjadi akibat beberapa fenomena seperti benda yang bergerak pada atau dekat permukaan sehingga terjadi gelombang dengan perioda kecil, angin yang merupakan sumber penyebab utama gelombang lautan, gangguan seismik yang menyebabkan terjadinya gelombang pasang atau tsunami, medan gravitasi bumi dan bulan menyebabkan gelombang pasang yang tinggi.

Gaya yang dihasilkan gelombang sebagai berikut.

$$F_w = \frac{P_w}{\lambda} \cdot T$$

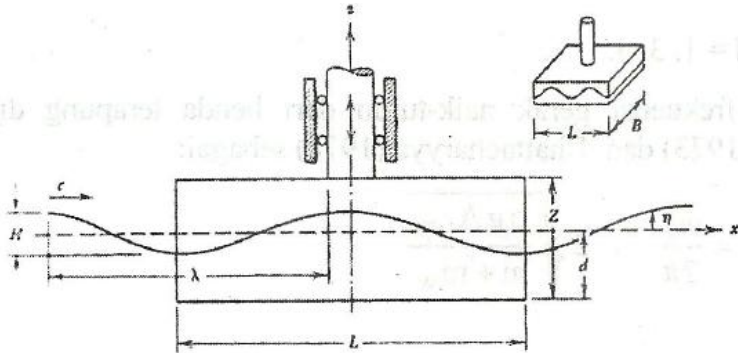
$$\lambda = \sqrt{H^2 \times g} \times \text{periode } (T)$$

$$P_{\text{wave}} = \frac{\rho g^2 H^2 T \cdot b}{32\pi}$$

Dimana,

- P_{wave} = wave power; energy flux
- ρ = massa jenis fluida (kg/m^3)
- g = percepatan gravitasi (9.8 m/s^2)
- H = tinggi gelombang (meter)
- T = periode (second)
- b = lebar ponton (meter)

Berdasarkan definisi gelombang air laut tersebut, maka ketika diletakkan suatu benda dengan mekanisme tertentu diatas air laut akan dihasilkan energi mekanik dan energi kinetik yang nantinya menimbulkan energi listrik. Adapun ilustrasi benda tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.9 berikut ini.



Gambar 2.9 Benda mengapung terkena gerak naik turun air laut.
(Astu Pudjanarsa, Djati Nursuhud. 2007)

Pada gambar 2.9, ditunjukkan suatu benda yang memanfaatkan gerak naik turunnya air laut pada arah vertikal. Gerak naik turun benda mendorong suatu mekanisme alat yang dapat mengubah energi gelombang laut menjadi energi listrik ataupun penggerak mekanisme lain. Besarnya frekuensi gerak naik turun dari benda terapung dijabarkan oleh McCormick (1973) sebagai berikut.

$$f_z = \frac{1}{T_z} = \frac{\omega_z}{2\pi} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\rho g A_{wp}}{m + m_w}}$$

Dimana,

- T_z : periode gerak naik turun
- ω : frekuensi sirkular ($2\pi f$)
- ρ : massa jenis air laut
- m : massa sistem yang bergerak naik turun
- m_w : masa air yang merangsang gerak naik turun
- A_{wp} : luas muka benda yang mengapung

Pengertian dari bangunan apung adalah suatu konstruksi yang mengapung di atas air yang digunakan untuk tujuan tertentu. Contoh dari bangunan apung yang banyak dikenal adalah kapal yang biasa digunakan sebagai sarana angkutan. Ponton juga

merupakan salah satu jenis bangunan apung, tidak memiliki sistem penggerak sehingga gerakannya sangat dipengaruhi oleh gerakan gelombang laut.

Pada bangunan apung, benda mendapat gaya berat dari bumi yang arahnya ke bawah, supaya terapung maka benda harus mendapat gaya apung atau gaya angkat ke atas. Gaya apung harus sama besar dengan gaya berat supaya benda tidak naik atau terbenam di air, sebagaimana hukum Archimides yaitu gaya sama dengan gaya berat air yang dipindahkan.

$$F_A = \rho_a \times V_a \times g$$

Gaya berat air yang dipindahkan (F_A) merupakan perkalian antara volume (V_a), massa jenis air (ρ_a), dan percepatan gravitasi (g). Sehingga apabila kita mengetahui gaya berat suatu bangunan apung, maka bisa dihitung volume benda yang terbenam di air sehingga supaya benda bisa mengapung.

Gaya berat pada bangunan yang terapung dapat dibagi menjadi *lightweight* dan *deadweight*. *Lightweight* merupakan berat komponen yang bersifat tetap, misalnya berat konstruksi, berat seluruh permesinan, berat seluruh peralatan dan perlengkapan, dan lain-lain. Sedangkan *deadweight* merupakan berat komponen yang dapat dipindahkan, misalnya berat muatan, berat bahan bakar dan minyak pelumas dari mesin jika menggunakan mesin, dan berat air (baik air tawar maupun air laut untuk kebutuhan operasional). Oleh karena itu gaya apung besarnya harus sama dengan jumlah berat total antara *lightweight* dan *deadweight* agar bangunan apung dapat mengapung pada syarat yang ditentukan.

2.2.2 Getaran

Getaran adalah gerakan bolak-balik dalam suatu interval waktu tertentu. Getaran berhubungan dengan gerak osilasi benda dan gaya yang berhubungan dengan gerak tersebut. Semua benda yang mempunyai massa dan elastisitas mampu bergetar, jadi kebanyakan mesin dan struktur rekayasa (engineering) mengalami

getaran sampai derajat tertentu dan rancangannya biasanya memerlukan pertimbangan sifat osilasinya.

a.) Getaran Bebas

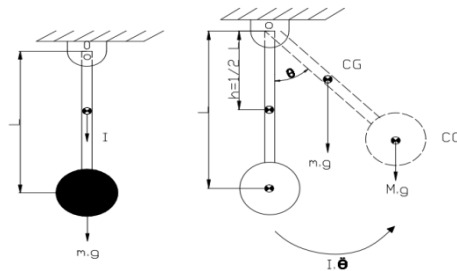
Getaran bebas terjadi jika sistem beresilasi karena bekerjanya gaya yang ada dalam sistem itu sendiri (inherent), dan jika ada gaya luar yang bekerja. Sistem yang bergetar bebas akan bergerak pada satu atau lebih frekuensi naturalnya, yang merupakan sifat sistem dinamika yang dibentuk oleh distribusi massa dan kekuatannya. Semua sistem yang memiliki massa dan elastisitas dapat mengalami getaran bebas atau getaran yang terjadi tanpa rangsangan luar.

b.) Getaran Paksa

Getaran paksa adalah getaran yang terjadi karena rangsangan gaya luar, jika rangsangan tersebut beresilasi maka sistem dipaksa untuk bergetar pada frekuensi rangsangan. Jika frekuensi rangsangan sama dengan salah satu frekuensi natural sistem, maka akan didapat keadaan resonansi dan osilasi besar yang berbahaya mungkin terjadi. Kerusakan pada struktur besar seperti jembatan, gedung ataupun sayap pesawat terbang, merupakan kejadian menakutkan yang disebabkan oleh resonansi. Jadi perhitungan frekuensi natural merupakan hal yang utama.

2.2.3 Pendulum

Compound pendulum yaitu bandul berbentuk batang (rod) yang memiliki massa m dan panjang L .



Gambar 2.10 *Compound pendulum*

Persamaan gerak *compound pendulum*

$$\sum Mo = I\ddot{\theta} \quad (2.6)$$

$$-Mgl \sin \theta - mg \frac{l}{2} \sin \theta = (I_m + I_M)\ddot{\theta} \quad (2.7)$$

Dimana inertia untuk batang (*rod*) dan bandul yaitu

$$I_m = \frac{1}{3} ml^2 \quad (2.8)$$

$$I_M = Ml^2 \quad (2.9)$$

Substitusi Persamaan 2.5 dan 2.6 ke persamaan 2.4.

$$\left(\frac{1}{3} ml^2 + Ml^2\right) \cdot \ddot{\theta} + \left(m \cdot g \cdot l \frac{l}{2} + M \cdot g \cdot l\right) \theta = 0 \quad (2.10)$$

$$\ddot{\theta} + \frac{M + \frac{m}{2}}{M + \frac{m}{3}} \left(\frac{g}{L}\right) \theta = 0 \quad (2.11)$$

Sehingga didapatkan persamaan frekuensi natural *compound pendulum*.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{M + \frac{m}{2}}{M + \frac{m}{3}}} \left(\frac{g}{L}\right) \quad (2.12)$$

Dimana : ω_n = Frequency natural (rad/s)

M = berat Bandul (kg)

m = berat lengan bandul (kg)

g = gaya gravitasi (9.8 m/s²)

L = Panjang lengan bandul (meter)

a) Periode *Compound Pendulum*

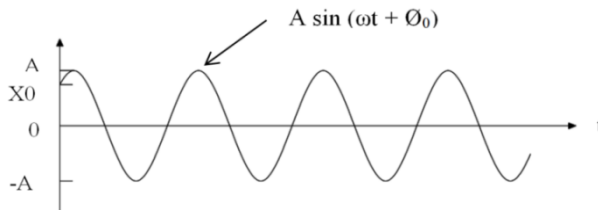
Periode *compound pendulum* tergantung momen inersia disekitar titik pivot, persamaan periode *compound pendulum* sama seperti pendulum sederhana hanya saja *compound pendulum* menggunakan inersia dari batang (rod). Berikut adalah rumus periode *compound pendulum*:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M + \frac{m}{3}}{M + \frac{m}{2}}} \left(\frac{L}{g}\right) \quad (2.13)$$

Jadi semakin panjang lengan yang terpasang maka gerakan bolak balik bandul akan semakin lambat, sehingga akibatnya periode akan semakin besar. Sebaliknya, semakin pendek lengan maka gerakan bolak balik bandul akan semakin cepat sehingga periode akan semakin kecil.

b) Amplitudo Gelombang

Amplitudo (simpangan) adalah pengukuran skalar yang nonnegatif dari besar osilasi suatu gelombang. Amplitudo juga dapat didefinisikan sebagai jarak/simpangan terjauh dari titik kesetimbangan dalam gelombang sinusoidal.



Gambar 2.11 Amplitudo Gelombang
(Singiresu D Rao, 2011)

Secara matematis amplitudo dirumuskan sebagai berikut:

$$X(t) = X \sin \omega t \quad (2.14)$$

Amplitudo dinyatakan oleh jarak naik dan turunnya suatu getaran (osilasi) disimbolkan dengan X dimana nilai penyimpangan (amplitudo) pada grafik bab 4 dinyatakan dalam voltase.

2.2.4 Gear Box

Gearbox adalah salah satu komponen pemindah daya dari satu poros ke poros yang lain. *Gearbox* beberapa fungsi antara lain:

1. Mengubah momen puntir yang akan diteruskan dari satu poros ke poros yang lain.
2. Menghasilkan putaran poros tanpa selip.
3. Dapat meningkatkan atau mengurangi kecepatan putar poros.

Adapun prinsip kerja *gearbox* yaitu dengan menggunakan putaran dari sumber putaran diteruskan ke *input shaft* (poros input), kemudian putaran diteruskan ke *main shaft* (poros utama), torsi atau momen yang ada di *main shaft* diteruskan ke *output shaft* (poros keluaran). Karena adanya perbedaan rasio dari rodagigi tersebut sehingga rpm atau putaran poros keluaran yang di keluarkan berbeda, tergantung dari rpm yang diinginkan.

2.2.5 Generator

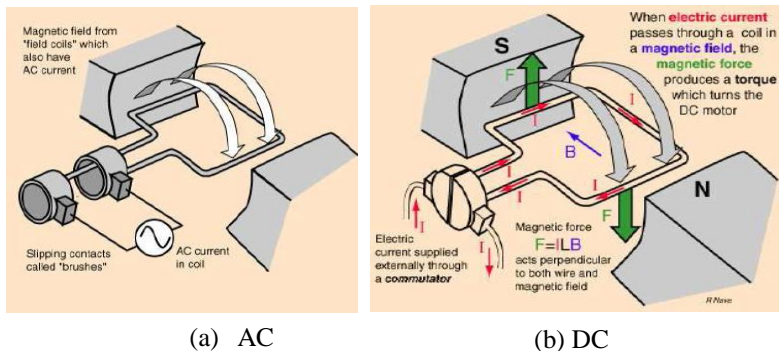
Penerapan dari konsep induksi elektromagnetik digunakan pada dinamo atau generator. Alat ini mengubah energi mekanik atau kinetik menjadi energi listrik. Prinsip kerja dinamo atau generator ada dua macam, antara lain:

1. Kumparan berputar di dalam suatu medan magnet.
2. Magnet berputar di antara beberapa kumparan.

Saat kumparan diputar diantara kutub-kutub magnet sehingga memotong garis-garis medan magnet maka kumparan akan menerima fluks magnet yang besarnya berubah-ubah. Perubahan fluks magnet ini dapat menimbulkan ggl induksi. Pada umumnya berdasarkan arus yang dihasilkan, dinamo atau generator dibedakan menjadi dua macam, yaitu AC (arus bolak -

balik) dan DC (arus searah). Pada sebuah dinamo terdapat bagian yang berputar disebut *rotor*, sedangkan bagian yang diam disebut *stator* dapat dilihat pada Gambar 2.9. Gaya gerak listrik induksi pada dinamo ataupun generator dan juga kuat arus induksinya dapat diperbesar dengan cara sebagai berikut:

1. Mempercepat putaran rotor.
2. Memperbesar jumlah lilitan kumparan.
3. Menggunakan magnet yang kuat.
4. Memasukan inti besi lunak ke dalam kumparan.



Gambar 2.12 Kumparan berputar didalam suatu medan magnet pada generator

Prinsip kerja dinamo atau generator DC sama dengan generator AC. Namun, generator DC arah arus induksinya tidak berubah. Hal ini disebabkan cincin generator DC berupa cincin belah (komutator). Besarnya GGL (Gaya Gerak Listrik) induksi dalam kumparan atau voltase yang dibangkitkan oleh generator adalah sebagai berikut.

$$E_{max} = N \cdot B \cdot A \cdot \omega$$

Dimana,

- N = Jumlah lilitan (buah)
- B = Kuat medan magnet (T)
- A = Luas kumparan (m^2)
- ω = Kecepatan sudut (rad/sec)

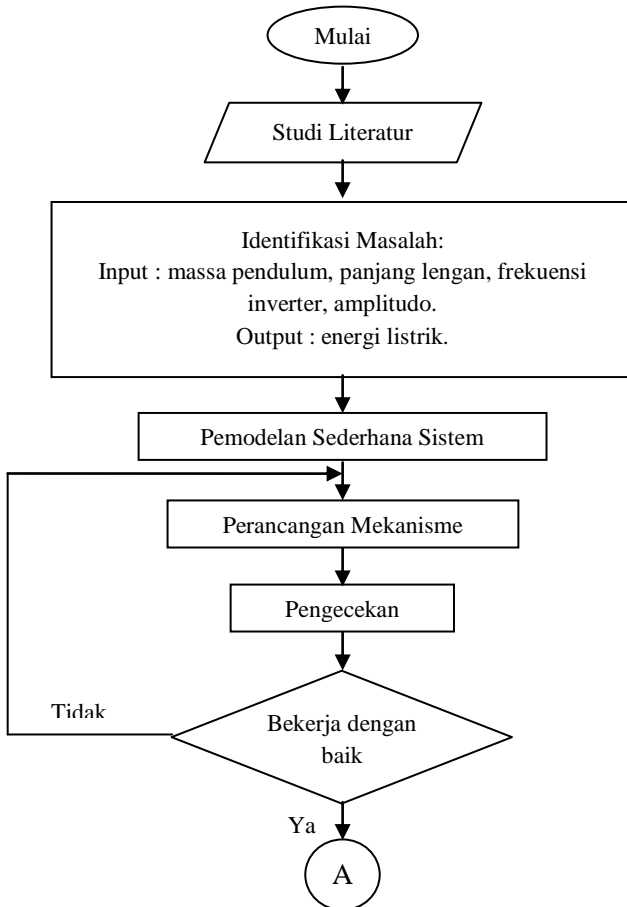
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

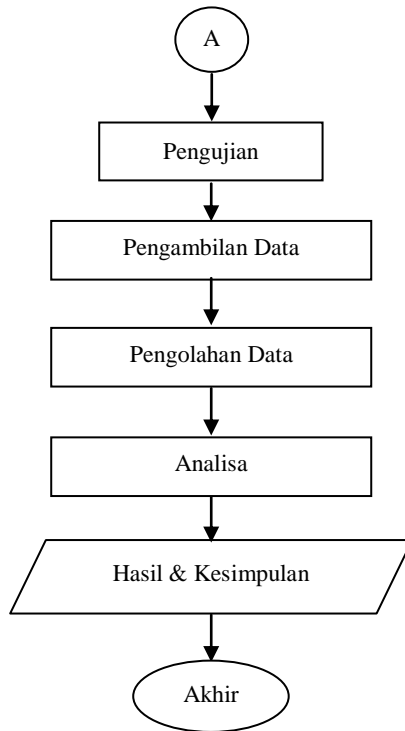
BAB III METODE PENELITIAN

3.1. Tahapan Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan beberapa tahapan yang sesuai dengan prosedur analisa. Prosedur analisa dijelaskan melalui diagram alir (*flow chart*) berikut ini:

3.1.1 *Flow chart* Penelitian





Gambar 3.1 *Flowchart* Penelitian

3.1.2 Penjelasan Flowchart Penelitian

1. *Studi Literatur*

Sebelum dilakukan penelitian, terlebih dahulu dilakukan studi terhadap beberapa literatur dan referensi yang berkaitan dengan getaran *single degree of freedom*, ponton, gerak pendulum, energi gelombang laut, energi listrik dan generator. Literatur yang dipelajari berupa penelitian, jurnal, diktat perkuliahan dan *text book*.

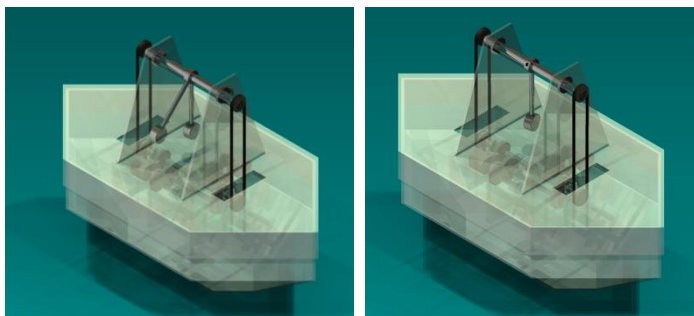
2. *Identifikasi Masalah*

Pada penelitian ini, masalah diidentifikasi menjadi dua yaitu input dan output. Dimana input yang diberikan berupa

frekuensi dan amplitudo gelombang, serta variasi massa pendulum. Variasi massa pendulum 225 gram, 200 gram dan 175 gram (untuk yang tiga pendulum, massa dua pendulum tambahan divariasikan menjadi 50 gram dan 25 gram dan membentuk sudut yang sama besar yaitu 45° dengan jumlah massa total untuk setiap variasi sama dengan massa pada pengujian satu pendulum). Output dari penelitian ini berupa energi listrik yang dilihat dari besarnya voltase yang dihasilkan generator.

3. *Pemodelan Sederhana Sistem PLTGL*

Model PLTGL sistem ponton perahu – pendulum yang sebenarnya memiliki bentuk yang lebih kompleks. Sedangkan dalam percobaan ini gerakan gelombang laut disimulasikan dengan kolam berukuran 4.5 m x 1 m x 0.7 m. Pendulum bergerak rotasi bebas terhadap ponton dimana pusat putaran dihubungkan ke generator yang ada di dalam ponton. Visualisasi model sederhana dari PLTGL sistem ponton perahu – pendulum ini dapat dilihat pada gambar 3.2.



Gambar 3.2 Model Sederhana PLTGL sistem ponton perahu – tiga pendulum vertikal dan PLTGL sistem ponton – satu pendulum vertikal

4. *Perancangan Mekanisme*

Proses design dilakukan dengan bantuan software *Autodesk Inventor*, dimana ponton sendiri berbentuk perahu yang memiliki panjang 600 mm, lebar 250 mm dan tinggi 200 mm. Pada ponton berisi roda gigi *one-way* yang berfungsi sebagai pemalik,

bantalan, *gearbox*, dan generator. Ponton ini didesain dengan sudut 45° yang bertujuan agar ponton dapat menyerap energi gelombang laut lebih besar. Dengan adanya ketinggian gelombang laut dan frekuensi tersebut akan mengakibatkan pendulum yang ada diatas ponton akan bergerak rotasi. Karena ujung pangkal poros pendulum dihubungkan dengan poros generator maka generator juga akan ikut berputar untuk menghasilkan voltase. Parameter – parameter yang dapat mempengaruhi voltase yang dihasilkan dari PLTGL ini yaitu :

- a. Bentuk dari ponton
- b. Massa pendulum
- c. Panjang lengan pendulum
- d. Massa total dari ponton perahu dan mekanisme

5. *Manufacturing Model PLTGL*

Setelah ditentukan dimensi dan spesifikasi dari alat dan bahan yang akan digunakan dalam pengujian model mekanisme PLTGL ini, maka dilakukan pencarian alat dan bahan tersebut di pasaran. Untuk beberapa alat yang membutuhkan pengerjaan khusus dilakukan pemesanan dibengkel. Setelah alat dan bahan tersebut tersedia, maka dapat dilakukan perakitan model mekanisme seperti pada gambar 3.2.

6. *Pengujian Model PLTGL*

Pengujian model mekanisme PLTGL ini dimaksudkan untuk memastikan bahwa pembangkit dapat bekerja dengan baik. Jika model mekanisme PLTGL yang sudah dirakit tidak sesuai dengan tujuan maka dilakukan perakitan atau perencanaan ulang.

7. *Pengambilan Data Model PLTGL*

Pengambilan data model mekanisme PLTGL ini memiliki tiga variasi massa pendulum dan tiga variasi panjang lengan pendulum. Pengujian dilakukan dengan ketinggian *stroke* yang sama. Data yang diperoleh dari hasil pengujian model mekanisme PLTGL ini diolah dengan mathLab.

8. *Analisa Hasil Data Model PLTGL*

Analisa dilakukan dengan beberapa variasi, yaitu:

- Pengaruh variasi massa terhadap energi listrik yang dihasilkan.
- Pengaruh variasi pendulum terhadap energi listrik yang dihasilkan.

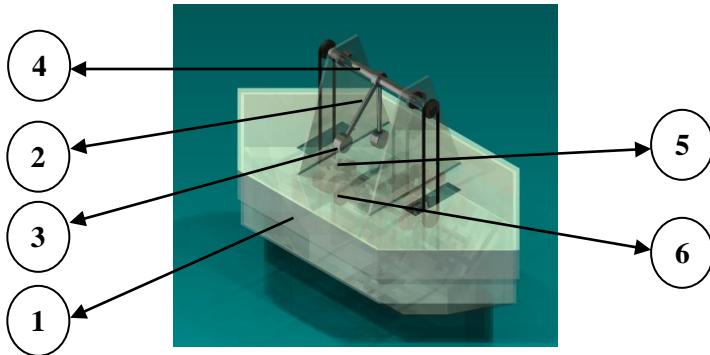
9. *Hasil dan Kesimpulan Model PLTGL*

Dari pengolahan data maka didapatkan hasil pengujian dalam bentuk grafik yang nantinya akan dianalisa dan diambil kesimpulan.

3.2 Rancangan Mekanisme

3.2.1 Rancangan Teoritis

Pada penelitian ini rancangan model mekanisme PLTGL sistem ponton – tiga pendulum vertikal terdiri dari beberapa bagian, yaitu :



Gambar 3.3 Bagian – Bagian Model Mekanisme PLTGL ponton perahu – tiga pendulum vertikal

Pada gambar 3.3 telah ditunjukkan bagian – bagian Model Mekanisme PLTGL ponton – tiga pendulum vertikal. Bagian – bagian tersebut yaitu sebagai berikut :

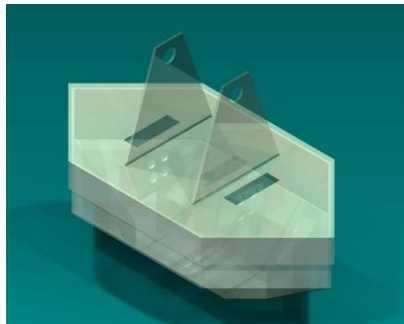
1. Ponton

Ponton adalah suatu jenis kapal dengan lambung datar yang mengapung, digunakan untuk mengangkut barang. Ponton ini digunakan untuk mengangkut semua komponen yang terdapat pada model mekanisme PLTGL ponton – tiga pendulum vertikal. Pada penelitian ini, ponton harus mengapung apabila dibebani mekanisme PLTGL. Ponton didesain stabil dan harus mengapung. Dimensi ponton ditentukan dengan persamaan berikut:

$$L = \frac{1}{4} \lambda \quad (3.1)$$

$$\lambda = \sqrt{H^2 \times g \times periode(T)} \quad (3.2)$$

Bentuk dari Model Mekanisme ponton – tiga pendulum vertikal dibuat seperti pada gambar berikut:



Gambar 3.4 Ponton

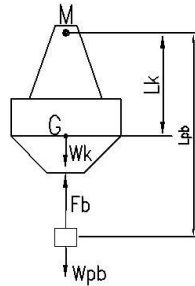
Massa ponton dapat ditentukan dengan menggunakan hukum Archimedes nilai volume air tersebut dapat dicari.

$$F_A = \rho_a \times g \times V_a \quad (3.3)$$

F_A diatas adalah gaya angkat akibat berat ponton. Jadi persamaan (3.3) dapat diganti dengan persamaan berikut :

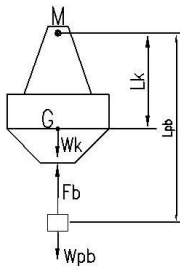
$$m_k \times g = \rho_a \times g \times V_a \quad (3.4)$$

$$m_k = \rho_a \times V_a \quad (3.5)$$

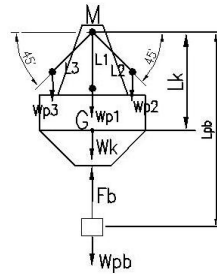


Gambar 3.5 Titik – titik dan arah gaya yang terjadi saat ponton tanpa beban pendulum dan tanpa dipengaruhi gaya gelombang

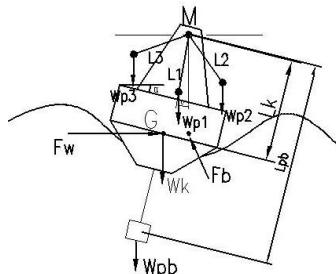
Gambar 3.5 merupakan gambar titik – titik dan arah gaya pada ponton sebelum dibebani oleh pendulum. Pada gambar tersebut terdapat empat titik dan dua gaya statis. Titik tersebut yaitu titik M, G, W dan B.



(a) Keadaan ponton statis tanpa diberi beban massa M



(b) Keadaan ponton statis ketika diberi beban massa M



(c) Keadaan ponton dinamis ketika diberi beban massa M

Gambar 3.6 Analisa gaya pada ponton dengan tiga pendulum vertikal

Gambar 3.6 adalah ilustrasi ponton yang diberi beban tiga pendulum vertikal pada keadaan statis. Yang membedakan gambar 3.5 dengan gambar 3.6 adalah titik G (*center of gravity*) yang bergeser ke arah pendulum itu bergerak. Pergeseran titik G tersebut tidak begitu signifikan. Hal ini dikarenakan perbandingan dari massa ponton sebesar 3,67 kg sedangkan massa pendulum itu sendiri adalah 0,5 kg. Selain itu juga terjadi pergeseran titik B (*bouyancy*) dikarenakan kemiringan ponton. Dari *free body diagram* diatas dapat diperoleh persamaan gaya statis sebagai berikut:

$$\sum F_y = 0 \quad (3.6)$$

$$F_b - W_k - W_{pb} - (W_{p1} + W_{p2} + W_{p3}) - (W_{b1} + W_{b2} + W_{b3}) = 0 \quad (3.7)$$

$$F_b = W_k + W_{pb} + (W_{p1} + W_{p2} + W_{p3}) + (W_{b1} + W_{b2} + W_{b3}) \quad (3.8)$$

$$F_b = (m_k + m_{pb} + m_{p1} + m_{p2} + m_{p3} + m_{b1} + m_{b2} + m_{b3})g \quad (3.9)$$

$$\sum M_M = 0 \quad (3.10)$$

$$W_k \cdot Lk \cdot \sin \theta + W_{pb} \cdot Lpb \cdot \sin \theta + W_{p1} \cdot l1 \cdot \sin \theta + W_{p3} \cdot l3 \cdot \cos (45 - \theta) - W_{p2} \cdot l2 \cdot \cos (45 + \theta) + W_{b1} \cdot \frac{l1}{2} \cdot \sin \theta + W_{b3} \cdot \frac{l3}{2} \cdot \cos (45 - \theta) - W_{b2} \cdot \frac{l2}{2} \cdot \cos (45 + \theta) = 0 \quad (3.11)$$

$$W_k \cdot Lk \cdot \sin \theta + W_{pb} \cdot Lpb \cdot \sin \theta + W_{p1} \cdot l1 \cdot \sin \theta + W_{p3} \cdot l3 \cdot (\cos 45 \cdot \cos \theta + \sin 45 \cdot \sin \theta) - W_{p2} \cdot l2 \cdot (\cos 45 \cdot \cos \theta - \sin 45 \cdot \sin \theta) + W_{b1} \cdot \frac{l1}{2} \cdot \sin \theta + W_{b3} \cdot \frac{l3}{2} \cdot (\cos 45 \cdot \cos \theta + \sin 45 \cdot \sin \theta) - W_{b2} \cdot \frac{l2}{2} \cdot (\cos 45 \cdot \cos \theta - \sin 45 \cdot \sin \theta) = 0 \quad (3.12)$$

$$W_k \cdot Lk \cdot \sin \theta + W_{pb} \cdot Lpb \cdot \sin \theta + W_{p1} \cdot l1 \cdot \sin \theta + W_{p3} \cdot l3 \cdot \cos 45 \cdot \cos \theta + W_{p3} \cdot l3 \cdot \sin 45 \cdot \sin \theta - W_{p2} \cdot l2 \cdot \cos 45 \cdot \cos \theta + W_{p2} \cdot l2 \cdot \sin 45 \cdot \sin \theta + W_{b1} \cdot \frac{l1}{2} \cdot \sin \theta + W_{b3} \cdot \frac{l3}{2} \cdot \cos 45 \cdot \cos \theta + W_{b3} \cdot \frac{l3}{2} \cdot \sin 45 \cdot \sin \theta - W_{b2} \cdot \frac{l2}{2} \cdot \cos 45 \cdot \cos \theta + W_{b2} \cdot \frac{l2}{2} \cdot \sin 45 \cdot \sin \theta = 0 \quad (3.13)$$

$$W_k \cdot Lk \cdot \sin \theta + W_{pb} \cdot Lpb \cdot \sin \theta + W_{p1} \cdot l1 \cdot \sin \theta + W_{p2} \cdot l2 \cdot \sin 45 \cdot \sin \theta + W_{p2} \cdot l2 \cdot \sin 45 \cdot \sin \theta + W_{b1} \cdot \frac{l1}{2} \cdot \sin \theta + W_{b2} \cdot \frac{l2}{2} \cdot \sin 45 \cdot \sin \theta + W_{b2} \cdot \frac{l2}{2} \cdot \sin 45 \cdot \sin \theta = 0 \quad (3.14)$$

$$\left(\frac{(m_k + m_{pb} + m_{p1} + m_{p2} + m_{p3} + m_{b1} + m_{b2} + m_{b3})g}{\cos \alpha} \right) \sin \alpha = F_w \quad (3.25)$$

$$\frac{F_w}{\sin \alpha} = \left(\frac{(m_k + m_{pb} + m_{p1} + m_{p2} + m_{p3} + m_{b1} + m_{b2} + m_{b3})g}{\cos \alpha} \right) \quad (3.26)$$

Dari gambar 3.7 tersebut diperoleh persamaan gaya dinamis pendulum seperti berikut ini:

$$\Sigma M_M = J_{sys} \cdot \ddot{\theta} \quad (3.27)$$

$$-W_{p1} \cdot l1 \cdot \sin \theta - W_{p3} \cdot l3 \cdot \cos (45 - \theta) + W_{p2} \cdot l2 \cdot \cos (45 + \theta) - W_{b1} \cdot \frac{l1}{2} \cdot \sin 0 - W_{b3} \cdot \frac{l3}{2} \cdot \cos (45 - \theta) + W_{b2} \cdot \frac{l2}{2} \cdot (45 + \theta) = (J_{p1} + J_{p2} + J_{p3} + J_{b1} + J_{b2} + J_{b3})\ddot{\theta} \quad (3.28)$$

$$(J_{p1} + J_{p2} + J_{p3} + J_{b1} + J_{b2} + J_{b3})\ddot{\theta} + W_{p1} \cdot l1 \cdot \sin \theta + W_{p3} \cdot l3 \cdot (\cos 45 \cdot \cos \theta + \sin 45 \cdot \sin \theta) - W_{p2} \cdot l2 \cdot (\cos 45 \cdot \cos \theta - \sin 45 \cdot \sin \theta) + W_{b1} \cdot \frac{l1}{2} \cdot \sin \theta + W_{b3} \cdot \frac{l3}{2} \cdot (\cos 45 \cdot \cos \theta + \sin 45 \cdot \sin \theta) - W_{b2} \cdot \frac{l2}{2} \cdot (\cos 45 \cdot \cos \theta - \sin 45 \cdot \sin \theta) = 0 \quad (3.29)$$

$$(J_{p1} + J_{p2} + J_{p3} + J_{b1} + J_{b2} + J_{b3})\ddot{\theta} + W_{p1} \cdot l1 \cdot \sin \theta + W_{p3} \cdot l3 \cdot \cos 45 \cdot \cos \theta + W_{p3} \cdot l3 \cdot \sin 45 \cdot \sin \theta - W_{p2} \cdot l2 \cdot \cos 45 \cdot \cos \theta + W_{p2} \cdot l2 \cdot \sin 45 \cdot \sin \theta + W_{b1} \cdot \frac{l1}{2} \cdot \sin \theta + W_{b3} \cdot \frac{l3}{2} \cdot \cos 45 \cdot \cos \theta + W_{b3} \cdot \frac{l3}{2} \cdot \sin 45 \cdot \sin \theta - W_{b2} \cdot \frac{l2}{2} \cdot \cos 45 \cdot \cos \theta + W_{b2} \cdot \frac{l2}{2} \cdot \sin 45 \cdot \sin \theta = 0 \quad (3.30)$$

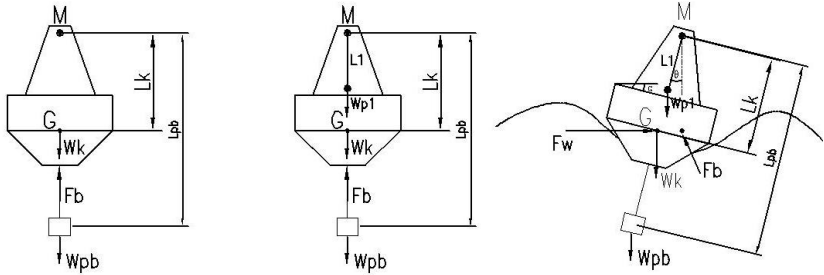
$$(J_{p1} + J_{p2} + J_{p3} + J_{b1} + J_{b2} + J_{b3})\ddot{\theta} + W_{p1} \cdot l1 \cdot \sin \theta + W_{p3} \cdot l3 \cdot \sin 45 \cdot \sin \theta + W_{p2} \cdot l2 \cdot \sin 45 \cdot \sin \theta + W_{b1} \cdot \frac{l1}{2} \cdot \sin \theta + W_{b3} \cdot \frac{l3}{2} \cdot \sin 45 \cdot \sin \theta + W_{b2} \cdot \frac{l2}{2} \cdot \sin 45 \cdot \sin \theta = 0 \quad (3.31)$$

$$(J_{p1} + J_{p2} + J_{p3} + J_{b1} + J_{b2} + J_{b3})\ddot{\theta} + W_{p1} \cdot l1 \cdot \sin \theta + 2W_{p2} \cdot l2 \cdot \sin 45 \cdot \sin \theta + W_{b1} \cdot \frac{l1}{2} \cdot \sin \theta + 2W_{b2} \cdot \frac{l2}{2} \cdot \sin 45 \cdot \sin \theta = 0 \quad (3.32)$$

$$(J_{p1} + J_{p2} + J_{p3} + J_{b1} + J_{b2} + J_{b3})\ddot{\theta} + W_{p1} \cdot l1 + 2W_{p2} \cdot l2 \cdot \sin 45 + W_{b1} \cdot \frac{l1}{2} + 2W_{b2} \cdot \frac{l2}{2} \cdot \sin 45 \sin \theta = 0 \quad (3.33)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{(W_{p1} \cdot l1 + 2W_{p2} \cdot l2 \cdot \sin 45 + W_{b1} \cdot \frac{l1}{2} + 2W_{b2} \cdot \frac{l2}{2} \cdot \sin 45)}{(J_{p1} + J_{p2} + J_{p3} + J_{b1} + J_{b2} + J_{b3})}} \quad (3.34)$$

Untuk PLTGL sistem ponton – satu pendulum vertikal dapat dilihat pada gambar berikut ini:



- (c) Keadaan ponton statis ketika diberi beban massa M
 (b) Keadaan ponton dinamis ketika diberi beban massa M
 (a) Keadaan ponton statis ketika tanpa diberi beban massa M

Gambar 3.8 Analisa gaya pada ponton dengan satu pendulum vertikal

Gambar 3.8 adalah ilustrasi ponton yang diberi beban satu pendulum vertikal pada keadaan statis. Dari *free body diagram* diatas dapat diperoleh persamaan gaya statis sebagai berikut:

$$\sum F_y = 0 \quad (3.35)$$

$$F_b - W_k - W_{pb} - W_{p1} - W_{b1} = 0 \quad (3.36)$$

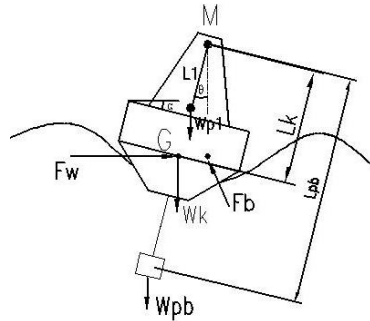
$$F_b = W_k + W_{pb} + W_{p1} + W_{b1} \quad (3.37)$$

$$F_b = (m_k + m_{pb} + m_{p1} + m_{b1})g \quad (3.38)$$

$$\sum M_M = 0 \quad (3.39)$$

$$W_k \cdot L_k \cdot \sin \theta + W_{pb} \cdot L_{pb} \cdot \sin \theta + W_{p1} \cdot L1 \cdot \sin \theta + W_{b1} \cdot \frac{L1}{2} \cdot \sin \theta = 0 \quad (3.40)$$

$$(m_k \cdot L_k \cdot \sin \theta + m_{pb} \cdot L_{pb} \cdot \sin \theta + m_{p1} \cdot L1 \cdot \sin \theta + m_{b1} \cdot \frac{L1}{2} \cdot \sin \theta) g = 0 \quad (3.41)$$



Gambar 3.9 *Free body diagram* ponton dan pendulum pada kesetimbangan dinamis pada mekanisme satu pendulum

Dari gambar 3.9 dapat diperoleh gaya dinamis untuk ponton yaitu sebagai berikut:

$$\sum F_y = 0 \quad (3.42)$$

$$F_b \cdot \cos \alpha - W_k - W_{pb} - W_{p1} - W_{b1} = 0 \quad (3.43)$$

$$F_b \cdot \cos \alpha = W_k + W_{pb} + W_{p1} + W_{b1} \quad (3.44)$$

$$F_b \cdot \cos \alpha = (m_k + m_{pb} + m_{p1} + m_{b1})g \quad (3.45)$$

$$F_b = \frac{(m_k + m_{pb} + m_{p1} + m_{b1})g}{\cos \alpha} \quad (3.46)$$

$$\sum F_x = 0 \quad (3.47)$$

$$F_w - F_b \cdot \sin \alpha = 0 \quad (3.48)$$

$$F_b \cdot \sin \alpha = F_w \quad (3.49)$$

Substitusikan pers. (3.46) ke pers. (3.49) :

$$\left(\frac{(m_k + m_{pb} + m_{p1} + m_{b1})g}{\cos \alpha} \right) \sin \alpha = F_w \quad (3.50)$$

$$\frac{F_w}{\sin \alpha} = \left(\frac{(m_k + m_{pb} + m_{p1} + m_{b1})}{\cos \alpha} \right) \quad (3.51)$$

Dari gambar 3.9 tersebut diperoleh persamaan gaya dinamis pendulum seperti berikut ini:

$$\Sigma M_M = J_{sys} \cdot \ddot{\theta} \quad (3.52)$$

$$-W_{p1} \cdot L1 \cdot \sin \theta - W_{b1} \cdot \frac{L1}{2} \cdot \sin \theta = (J_{p1} + J_{b1})\ddot{\theta} \quad (3.53)$$

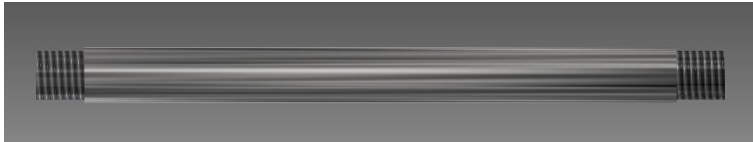
$$(J_{p1} + J_{b1})\ddot{\theta} + W_{p1} \cdot L1 \cdot \sin \theta + W_{b1} \cdot \frac{L1}{2} \cdot \sin \theta = 0 \quad (3.54)$$

$$(J_{p1} + J_{b1})\ddot{\theta} + (W_{p1} \cdot L1 + W_{b1} \cdot \frac{L1}{2})\sin \theta = 0 \quad (3.55)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{W_{p1} \cdot L1 + W_{b1} \cdot \frac{L1}{2}}{J_{p1} + J_{b1}}} \quad (3.56)$$

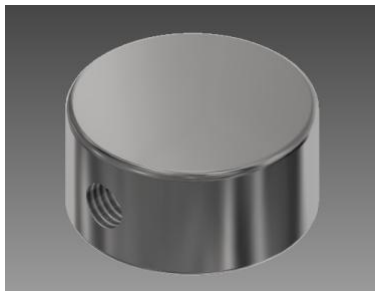
2. Lengan Pendulum

Lengan pendulum merupakan komponen penghubung antara pendulum dan poros utama. Dalam penelitian ini panjang lengan pendulum yaitu sebesar 80mm dengan diameter tetap yaitu 6mm. Bentuk dari lengan pendulum ini dapat dilihat pada gambar 3.10 berikut ini.

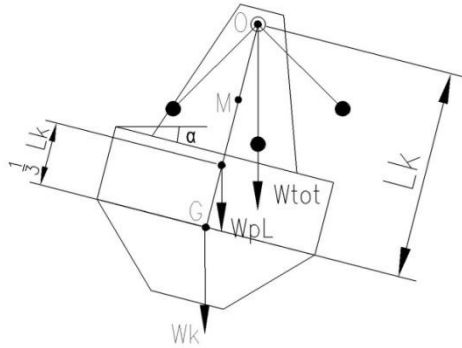


Gambar 3.10 Sketsa lengan pendulum

3. Beban Pendulum



Gambar 3.11 Sketsa Massa Pendulum



Gambar 3.12 *Free Body Diagram* ponton dan pendulum

Keterangan:

$$W_{tot} = 3W_{pendulum} + 3W_{lengan}$$

$$W_{pl} = W \text{ plat penyangga}$$

$$W_k = W \text{ kapal (W Ponton)}$$

$$GM = \text{jarak titik metasentris}$$

$$Lk = \text{tinggi titik putar pendulum}$$

$$\text{Sudut } \alpha = \text{sudut kemiringan kapal (ponton)}$$

Untuk menentukan beban pendulum dapat dilakukan dengan perumusan seperti berikut ini:

$$\sum M_M = 0 \quad (3.57)$$

$$-W_k \cdot GM \cdot \sin \alpha - W_{pl} \left(GM - \frac{1}{3} Lk \right) \cdot \sin \alpha = W_{tot} (Lk - GM) \cdot \sin \alpha$$

$$\sin \alpha \quad (3.58)$$

Berapapun nilai α tidak akan mempengaruhi, maka $\sin \alpha$ dicoret.

$$-W_k \cdot GM - W_{pl} \cdot GM + W_{pl} \cdot \frac{1}{3} Lk = W_{tot} Lk - W_{tot} GM \quad (3.59)$$

Jika W_{pl} sangat kecil maka,

$$-W_k \cdot GM = W_{tot} Lk - W_{tot} GM \quad (3.60)$$

$$(W_{tot} - W_k) \cdot GM = W_{tot} \cdot Lk \quad (3.61)$$

$$\frac{GM}{Lk} = \frac{W_{tot}}{(W_{tot} - W_k)} \quad (3.62)$$

Karena titik metasentris tidak diketahui, maka $\frac{GM}{Lk}$ divariasikan 2 dan 3, sehingga $W_{pendulum}$ dapat dicari.

$$\frac{GM}{Lk} = \frac{2}{1} = \frac{W_{tot}}{(W_{tot} - W_k)} \quad (3.63)$$

$$2W_{tot} - 2W_k = W_{tot} \quad (3.64)$$

$$W_{tot} = 2W_k \quad (3.65)$$

$$\frac{GM}{Lk} = \frac{3}{1} = \frac{W_{tot}}{(W_{tot} - W_k)} \quad (3.66)$$

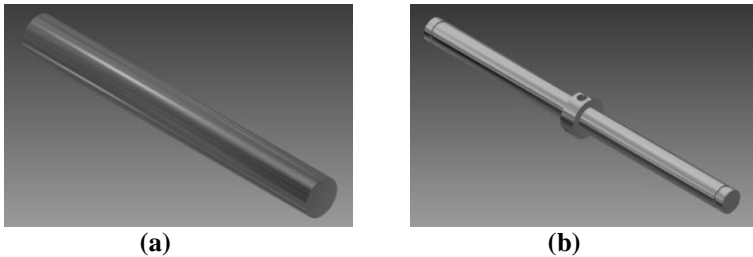
$$3W_{tot} - 3W_k = W_{tot} \quad (3.67)$$

$$2W_{tot} = 3W_k \quad (3.68)$$

$$W_{tot} = \frac{3}{2}W_k \quad (3.69)$$

4. Poros

Poros yang digunakan pada model mekanisme PLTGL Ponton – Tiga Pendulum Vertikal ini berjumlah delapan untuk poros roda gigi dan satu poros untuk poros utama. Poros ini dibuat dengan bahan aluminium bertujuan untuk meminimalkan gaya berat akibat dari massa yang berlebih dari massa mekanisme. Bentuk dari porosnya yaitu seperti Gambar 3.13.



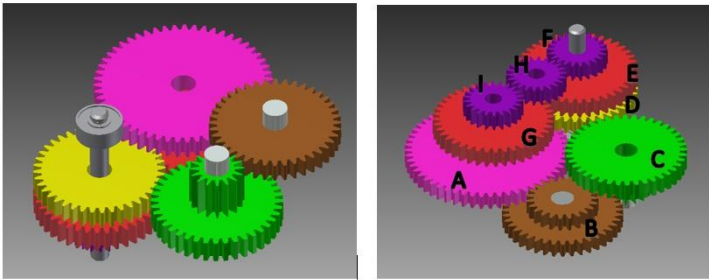
Gambar 3.13 Sketsa dari poros

Pada gambar terlihat ada dua jenis poros. Poros (a) digunakan sebagai poros rangkaian roda gigi. Nantinya poros ini berjumlah delapan. Poros (b) digunakan sebagai poros utama dimana nantinya lengan pendulum akan terhubung dengan poros ini pada bagian tengah poros. Pada kedua ujung poros utama ini nantinya akan terpasang masing – masing satu sprocket untuk

mentransmisikan putaran dari poros utama ke rangkaian roda gigi yang ada di dalam ponton.

5. Roda Gigi Pembalik

Roda gigi yang digunakan dalam model mekanisme ini terbuat dari bahan plastik dengan jumlah enam buah untuk setiap rangkaian roda gigi yang terhubung ke satu generator. Roda gigi ini dipasang bertujuan untuk menyearahkan putaran dari pendulum yang putarannya berubah-ubah. Putaran pendulum yang berubah-ubah ini terbentuk akibat ketidakstabilan ponton yang terhempas oleh kekuatan gelombang. Gambar 3.14 adalah sketsa roda gigi yang dipakai pada mekanisme ini.



Gambar 3.14 Sketsa roda gigi pembalik

Roda gigi A adalah roda gigi utama yang tersambung dengan poros utama. Pasangan roda gigi A adalah roda gigi B dan C sebagai pembesar ratio putaran. Pasangan roda gigi C adalah roga gigi D sebagai penerus putaran ke poros yang terpasang juga roda gigi E dan F, dimana roda gigi E dan F sebagai *one-way gear*. Roda gigi E dan F penyearah dari putaran poros utama yang arah putarannya berubah-ubah. Putaran roda gigi E dilanjutkan roda gigi G, dimana dimensi kedua roda gigi E dan G harus sama. Dan roda gigi F berpasangan dengan roda gigi H dan roda gigi H berpasangan dengan roda gigi I. Dimana roda gigi F,H dan I memiliki dimensi yang sama. Roda gigi I dan G dipasang pada poros yang meneruskan ke gearbox generator.

Untuk menentukan ukuran-ukuran dari roda gigi tersebut dengan cara mencari luasan dari ponton terlebih dahulu. Setelah luas dari ponton tersebut didapat kemudian mencari roda gigi plastik yang sudah ada dipasaran.

6. Generator

Generator yang digunakan pada penelitian model mekanisme ini adalah motor DC yang putarannya dibalik. Motor DC tersebut nantinya dihubungkan dengan poros output putaran yang sudah disearahkan oleh *one-way gear*.

MODEL	VOLTAGE		NO LOAD		AT MAXIMUM EFFICIENCY				STALL			
	OPERATING RANGE	NOMINAL	SPEED	CURRENT	SPEED	CURRENT	TORQUE		OUTPUT	TORQUE		CURRENT
			r/min	A	r/min	A	mNm	gcm	W	mNm	gcm	A
RF-300FA-12350	1.5~6.0	3V CONSTANT	3500	0.022	2830	0.093	0.48	4.9	0.14	2.51	26	0.39

Tabel 3.1. Spesifikasi motor DC

Motor DC pada model mekanisme ini dapat dilihat pada gambar 3.15 berikut ini.



Gambar 3.15 Generator

3.3 Pengujian

3.1.1 Peralatan Pengujian

Untuk melakukan studi eksperimental pada model mekanisme PLTGL sistem ponton – tiga pendulum vertikal dan PLTGL sistem ponton – satu pendulum vertikal ini dibutuhkan beberapa peralatan pengujian.

1. Kolam Simulator Gelombang Laut

Kolam merupakan media untuk dilakukannya pengujian terhadap model mekanisme PLTGL sistem ponton – tiga pendulum vertikal dan PLTGL sistem ponton – satu pendulum vertikal ini dimana pada kolam tersebut dapat dihasilkan gelombang yang merupakan sumber utama dalam membangkitkan listrik melalui mekanisme yang dirancang. Kolam yang digunakan seperti Gambar 3.16 dibawah ini.



Gambar 3.16 Kolam Simulator Gelombang Laut

2. Model Mekanisme PLTGL

Dalam dilakukannya pengujian tentunya menggunakan mekanisme yang telah dirancang yakni model mekanisme PLTGL Ponton – Tiga Pendulum Vertikal seperti Gambar 3.17 dimana pada model mekanisme ini terdiri atas komponen utama yakni ponton yang terkena gelombang laut mengakibatkan pendulum berputar dan diteruskan ke *gearbox* sebelum masuk ke generator, sehingga dapat menghasilkan listrik.



Gambar 3.17 Model Mekanisme PTGL Ponton – *Triple* Pendulum Vertikal dan PTGL Ponton – *Single* Pendulum Vertikal

3. *Digital Storage Oscilloscope*

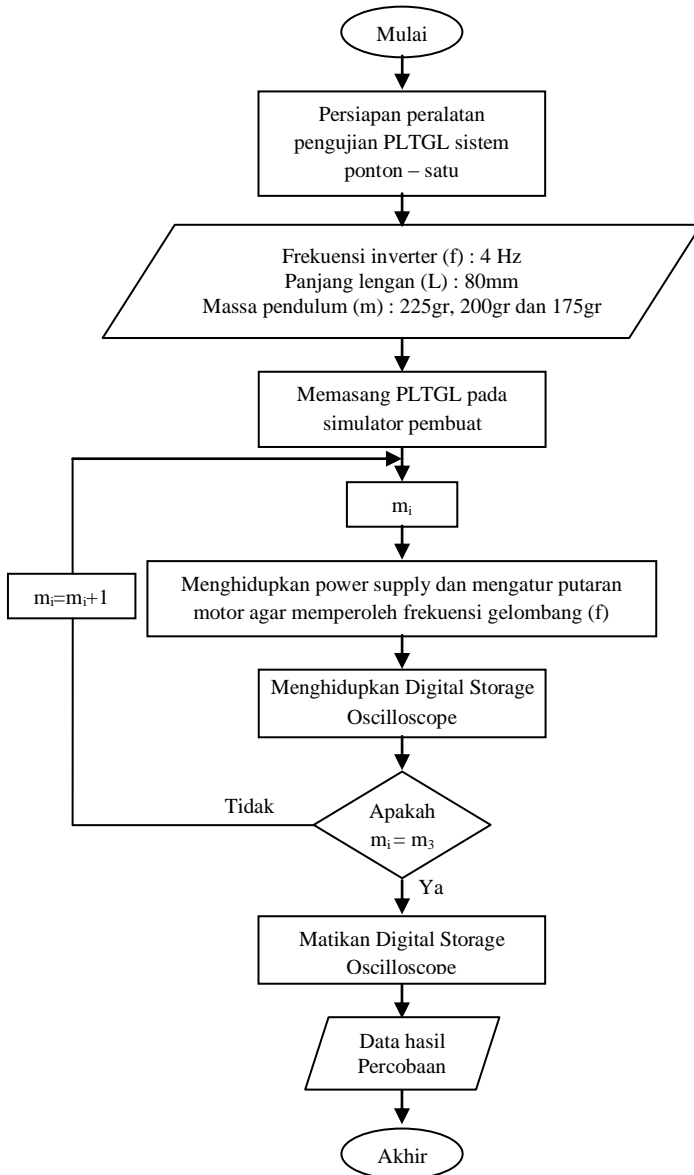
Untuk merekam data pada pengujian ini digunakan *Digital Storage Oscilloscope* dengan merk UNI-T UT2062C, keluaran dari alat ini ialah data tegangan yang dihasilkan oleh model mekanisme ini. Data tersebut berupa grafik voltase bangkitan induksi elektromagnetik terhadap waktu. *Digital Storage Oscilloscope* dapat dilihat pada Gambar 3.18.



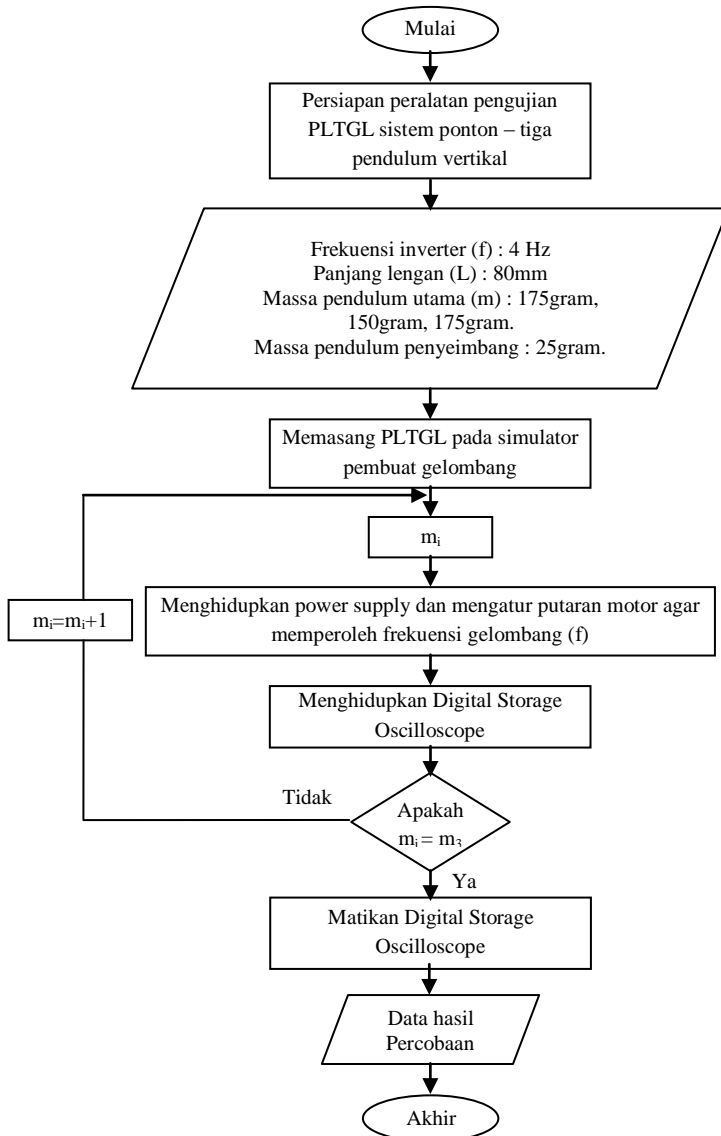
Gambar 3.18 *Digital Storage Oscilloscope*

3.3.2 *Flowchart* Pengujian

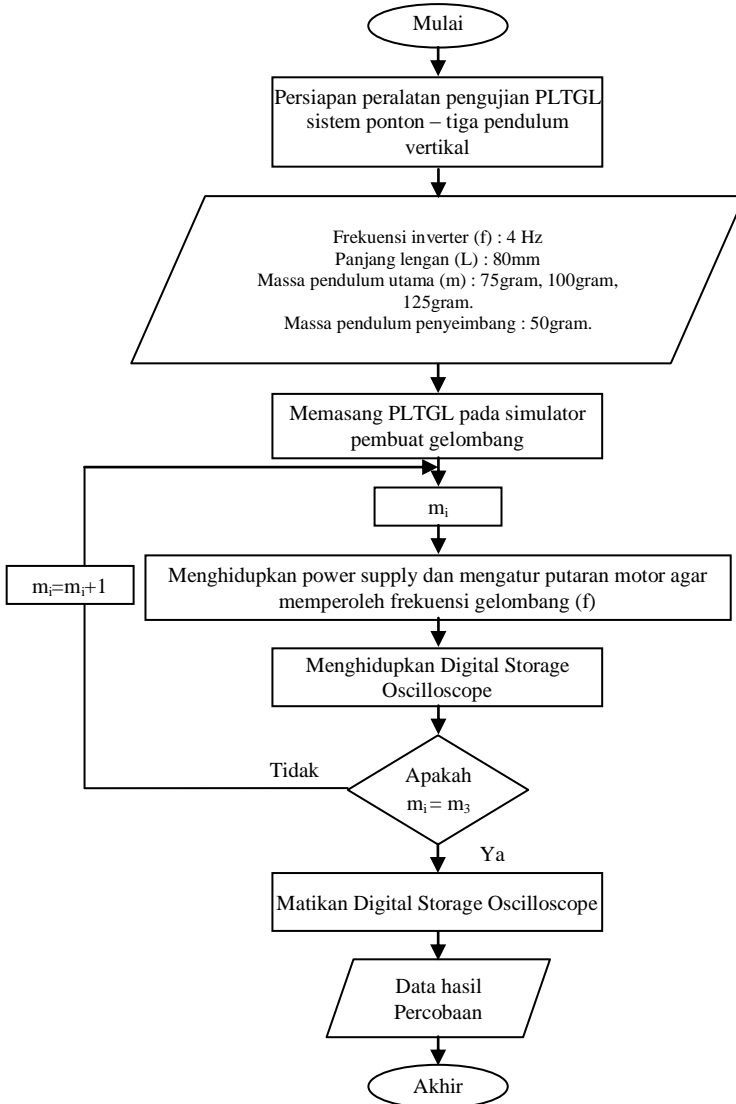
Langkah-langkah dalam mengambil data pengujian Model Mekanisme PTGL – PPSPV & PPTPV dapat disajikan dalam bentuk diagram alir seperti berikut ini.



Gambar 3.19 Flowchart Pengujian Single Pendulum



Gambar 3.20 *Flowchart* Pengujian *Triple* Pendulum dengan Massa Penyeimbang 25 gram



Gambar 3.21 *Flowchart* Pengujian *Triple* Pendulum dengan Massa Penyeimbang 50 gram

3.3.3 Penjelasan *Flowchart* Pengujian

1. Persiapan

Tahapan yang paling awal adalah memasang model mekanisme ke mekanisme simulator gelombang. Ponton diikat di sisi kiri dan sisi kanan agar ponton tidak ikut bergerak terbawa gerakan gelombang air. Kabel dari generator dihubungkan dengan probe pada *Oscilloscope* kemudian menyalakan *Oscilloscope*nya. Mempersiapkan data-data yang akan diambil dengan variasi massa pendulum sebesar : 225 gr, 200 gr dan 175 gr untuk satu pendulum, variasi massa pendulum sebesar : 125 gr, 150 gr dan 175 gr untuk tiga pendulum dengan massa penyeimbang sebesar 25 gr dan variasi massa pendulum sebesar 75 gr, 100 gr dan 125 gr untuk tiga pendulum dengan massa penyeimbang sebesar 50 gr.

2. Pengujian

Menyeting power supply agar putaran motor menghasilkan gelombang air dengan frekuensi inverter 4 Hz. Pengujian ini dimulai dari panjang lengan 80 mm dengan frekuensi inverter 4 Hz dan massa sebesar 175 gr sampai dengan frekuensi inverter 4 Hz dan massa sebesar 225 gr. Setelah menjalankan mekanisme pembangkit gelombang maka data dari hasil setiap variasi pengujian ini di simpan pada *flashdisk* yang terhubung dengan *oscilloscope*.



Gambar 3.22 Pengujian mekanisme pada kolam simulator

3. Pengolahan Data

Setelah data dari pengujian diperoleh, tahapan yang selanjutnya adalah melakukan pengolahan data yang diperoleh dari *Oscilloscope* agar hasil yang didapat menginterpretasikan apakah ada pengaruh dari amplitudo dan frekuensi terhadap energi listrik yang dihasilkan.

3.3.4 Lembar Data Pengujian

Lembar data hasil pengujian digunakan untuk mencatat data voltase bangkitan yang dihasilkan oleh generator pada model mekanisme ini. Besar voltase bangkitan tersebut dapat dilihat pada layar *oscilloscope*. Pada data terdapat tiga variasi massa pendulum (m). Lembar data hasil pengujian tersebut dapat dilihat pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Data hasil pengujian

f (Hz)	L (mm)	m (kg)	V (volt)
0.4	Satu Pendulum	0.175	
		0.200	
		0.225	
	Tiga Pendulum (penyeimbang = 25 gram)	0.125	
		0.150	
		0.175	
	Tiga Pendulum (penyeimbang = 50 gram)	0.075	
		0.100	
		0.125	

BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

4.1 Data dan Spesifikasi Pengujian

4.1.1 Gelombang

Frekuensi gelombang	= 0.4 Hz
Amplitudo	= 0.012 m
Tinggi gelombang	= 0.024 m
Panjang gelombang	= 0.1878 m

4.1.2 Mekanisme

Berikut ini merupakan data dan spesifikasi dari mekanisme yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu:

a. Ponton

Panjang	= 0.6 m
Lebar	= 0.25 m
Tinggi ponton	= 0.2 m
Tinggi dudukan pendulum	= 0.2 m

b. Pendulum

Massa untuk sistem *single* pendulum = 0.175 kg, 0.2 kg dan 0.225 kg

Massa untuk sistem *triple* pendulum (penyeimbang 25 gram) = 0.125 kg, 0.15 kg dan 0.175 kg

Massa untuk sistem *triple* pendulum (penyeimbang 50 gram) = 0.075 kg, 0.1 kg dan 0.125 kg

c. Lengan Pendulum

Panjang lengan	= 0.08 m
Diameter lengan	= 6×10^{-3} m

d. Roda Gigi

Diameter RG 1	= 56 mm
Diameter RG 2	= 17 mm
Diameter RG 3	= 41 mm
Diameter RG 4	= 25 mm

Diameter RG 5 / RG 6 = 49 mm
 Diameter RG 7 / RG 8 / RG 9 = 41 mm

e. Generator
 Model = RF-300FA-12350

4.2 Analisa dan Pembahasan Teoritis

Pada analisa teoritis digunakan persamaan dasar seperti yang telah dijelaskan pada BAB 2 yaitu, persamaan 2.3 mengenai daya yang dibangkitkan oleh gelombang air laut. Adapun persamaan daya gelombang laut adalah sebagai berikut.

$$P_W = \frac{\rho g^2 H^2 T}{32\pi}$$

Dimana,

P_{wave} = wave power

H = tinggi gelombang
(meter)

ρ = massa jenis fluida
(kg/m^3)

T = periode

g = percepatan
gravitasi (9.8 m/s^2)

Sedangkan persamaan untuk mencari besar daya listrik adalah sebagai berikut.

$P_e = P_{mekanik}$

$V \times I = \text{Torsi} \times \omega$

Dimana,

T = torsi yang dihasilkan
pendulum

P_m = daya mekanik

P_e = daya elektrik

g = gaya gravitasi

I = arus

P = daya

Untuk mengetahui dan membandingkan energi bangkitan yang dihasilkan dari model mekanisme PLTGL Sistem Ponton Perahu – Pendulum Vertikal ini diperlukan contoh perhitungan.

Contoh perhitungan ini bertujuan untuk menjelaskan energi yang dihasilkan dalam penelitian ini dan membandingkan hasil perhitungan daya bangkitan gelombang laut dengan daya hasil dari eksperimental.

ρ	= 996,95 kg/m ³	H	= 0.024 meter
f_{inv}	= 4 Hz	π	= 3.1416
f gel	= 0.4 Hz	g	= 9.81 m/s ²
T	= 2.5 sec	b	= 0,25 meter
A	= 0.012 meter		

a) Daya gelombang laut (P_W)

$$P_W = \frac{\rho \times g^2 \times H^2 \times periode \times b}{32 \times \pi}$$

$$P_W = \frac{996.95 \frac{kg}{m^3} \times (9.81 \frac{m}{s^2})^2 \times (0.024m)^2 \times 2.5 \text{ sec} \times 0.6 \text{ m}}{32 \times 3.1416} = 0,8246 \text{ Watt}$$

b) *Power* yang dihasilkan (P_{eks})

$$P_{eks} = V_{eks} \times I_{eks}$$

$$P_{eks} = 0.178V \times 0.00028mA = 0.004984mW$$

c) Efisiensi Mekanisme

$$\text{Efisiensi (\%)} = \frac{P_{eks}}{P_{wave}} \times 100$$

$$\text{Efisiensi (\%)} = 0.0006 \%$$

Selain contoh perhitungan diatas, masih ada beberapa contoh perhitungan yang dilakukan pada penelitian ini. Pada perhitungan berikut ini, ada beberapa persamaan yang digunakan seperti yang telah dijelaskan pada BAB 3. Untuk menghitung torsi pada sistem *single* pendulum digunakan persamaan 3.40 dan pada sistem *triple* pendulum digunakan persamaan 3.16. Untuk menghitung frekuensi natural di gunakan persamaan 3.56 untuk sistem *single* pendulum dan persamaan 3.34 untuk sistem

triple pendulum.

Persamaan yang digunakan untuk sistem *triple* pendulum yaitu :

$$\tau = \left(W_k \cdot Lk + W_{pb} \cdot Lpb + W_{p1} \cdot l1 + 1,4142 W_{p2} \cdot l2 + W_{b1} \cdot \frac{l1}{2} + 1,4142 W_{b2} \cdot \frac{l2}{2} \right) \cdot \sin \theta \quad (4.4)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{(W_{p1} \cdot l1 + 2W_{p2} \cdot l2 \cdot \sin 45 + W_{b1} \cdot \frac{l1}{2} + 2W_{b2} \cdot \frac{l2}{2} \cdot \sin 45)}{(J_{p1} + J_{p2} + J_{p3} + J_{b1} + J_{b2} + J_{b3})}} \quad (4.5)$$

Persamaan yang digunakan untuk *single* pendulum yaitu:

$$\tau = W_k \cdot Lk \cdot \sin \theta + W_{pb} \cdot Lpb \cdot \sin \theta + W_{p1} \cdot L1 \cdot \sin \theta + W_{b1} \cdot \frac{L1}{2} \cdot \sin \theta \quad (4.6)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{W_{p1} \cdot L1 + W_{b1} \cdot \frac{L1}{2}}{J_{p1} + J_{b1}}} \quad (4.7)$$

Dimana,

τ	= Torsi	Lpb	= panjang lengan pemberat
ω_n	= frekuensi natural	$L1$	= panjang lengan pendulum 1
W_k	= berat ponton	$L2$	= panjang lengan pendulum 2
W_{pb}	= berat pemberat	J_{p1}	= inersia pendulum 1
W_{p1}	= berat pendulum 1	J_{p2}	= inersia pendulum 2
W_{p2}	= berat pendulum 2	J_{p3}	= inersia pendulum 3
W_{b1}	= berat batang 1	J_{b1}	= inersia batang 1
W_{b2}	= berat batang 2	J_{b2}	= inersia batang 2
Lk	= jarak titik berat ponton ke titik metasentris	J_{b3}	= inersia batang 3

Untuk mengetahui besar daya maksimum yang dihasilkan dari model mekanisme PLTGL Sistem Ponton Perahu – Pendulum Vertikal ini diperlukan contoh perhitungan. Contoh

perhitungan ini bertujuan untuk menjelaskan energi yang dihasilkan dalam penelitian ini dan membandingkan hasil perhitungan daya maksimum secara teoritis dengan daya hasil dari eksperimen.

Contoh perhitungan untuk sistem *single* pendulum yaitu seperti berikut :

Diketahui,

$$\begin{aligned}
 W_k &= 58.016 \text{ N} & Lpb &= 470 \text{ mm} = 0.470 \text{ m} \\
 W_{pb} &= 15.386 \text{ N} & L1 &= 80 \text{ mm} = 0.080 \text{ m} \\
 W_{p1} &= 1.715 \text{ N} & J_{p1} &= 1.12 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^2 \\
 W_{b1} &= 0,1740 \text{ N} & J_{b1} &= 3.797 \times 10^{-5} \text{ Kg.m} \\
 Lk &= 259 \text{ mm} = 0.259 \text{ m}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \tau &= W_k \cdot Lk \cdot \sin \theta + W_{pb} \cdot Lpb \cdot \sin \theta + W_{p1} \cdot L1 \cdot \sin \theta + \\
 &\quad W_{b1} \cdot \frac{L1}{2} \cdot \sin \theta \\
 \tau &= (58.016 \text{ N} \cdot 0.259 \text{ m} \cdot \sin 10^\circ) + (15.386 \text{ N} \cdot 0.470 \text{ m} \cdot \\
 &\quad \sin 10^\circ) + (1.715 \text{ N} \cdot 0.08 \text{ m} \cdot \sin 10^\circ) + (0.1740 \text{ N} \cdot \\
 &\quad \frac{0.08 \text{ m}}{2} \cdot \sin 10^\circ) \\
 \tau &= (1.9544 \text{ Nm}) + (1.2557) + (0.0238 \text{ Nm}) + (0.0012 \text{ Nm}) \\
 \tau &= 3.2351 \text{ Nm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \omega_n &= \sqrt{\frac{W_{p1} \cdot L1 + W_{b1} \cdot \frac{L1}{2}}{J_{p1} + J_{b1}}} \\
 \omega_n &= \sqrt{\frac{(1.715 \text{ N} \cdot 0.08 \text{ m}) + (0.1740 \text{ N} \cdot \frac{0.08 \text{ m}}{2})}{(1.12 \times 10^{-3} + 3.797 \times 10^{-5}) \text{ kg.m}^2}} \\
 \omega_n &= 11.1489 \text{ rad/s}
 \end{aligned}$$

Contoh perhitungan untuk sistem *triple* pendulum yaitu seperti berikut:

$$\begin{aligned}
 W_k &= 58.016 \text{ N} & W_{p2} &= 0.245 \text{ N} \\
 W_{pb} &= 15.386 \text{ N} & W_{b1} &= W_{b2} = 0.1740 \text{ N} \\
 W_{p1} &= 1.225 \text{ N} & Lk &= 259 \text{ mm} = 0.259 \text{ m}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Lpb &= 470 \text{ mm} = 0.470 \text{ m} & J_{p2} = J_{p3} &= 1.6 \times 10^{-4} \text{ kg.m}^2 \\
 L1 &= 80 \text{ mm} = 0.08 \text{ m} & J_{b1} &= J_{b2} = J_{b3} = 3.797 \times \\
 L2 &= 80 \text{ mm} = 0.08 \text{ m} & & 10^{-5} \text{ Kg.m}^2 \\
 J_{p1} &= 8 \times 10^{-4} \text{ kg.m}^2 & &
 \end{aligned}$$

$$\tau = \left(W_k \cdot Lk + W_{pb} \cdot Lpb + W_{p1} \cdot l1 + 1,4142 W_{p2} \cdot l2 + W_{b1} \cdot \frac{l1}{2} + 1,4142 W_{b2} \cdot \frac{l2}{2} \right) \cdot \sin \theta$$

$$\begin{aligned}
 \tau &= \left((58.016 \text{ N} \cdot 0.259 \text{ m}) + (15.386 \text{ N} \cdot 0.47 \text{ m}) + \right. \\
 &\quad (1.225 \text{ N} \cdot 0.08 \text{ m}) + (1,4142 \cdot 0.245 \text{ N} \cdot 0.08 \text{ m}) + \\
 &\quad \left. \left(0.1740 \text{ N} \cdot \frac{0.08 \text{ m}}{2} \right) + \left(1,4142 \cdot 0.1740 \text{ N} \cdot \frac{0.08 \text{ m}}{2} \right) \right) \cdot \\
 &\quad \sin 10^\circ
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \tau &= \\
 &\quad \left((11.2551 \text{ Nm}) + (7.2314) + (0.098 \text{ Nm}) + \right. \\
 &\quad \left. (0.0277 \text{ Nm}) + (0.0069 \text{ Nm}) + (0.0098 \text{ Nm}) \right) \cdot \sin 10^\circ
 \end{aligned}$$

$$\tau = 3.2348 \text{ Nm}$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{(W_{p1} \cdot l1 + 2W_{p2} \cdot l2 \cdot \sin 45 + W_{b1} \cdot \frac{l1}{2} + 2W_{b2} \cdot \frac{l2}{2} \cdot \sin 45)}{(J_{p1} + J_{p2} + J_{p3} + J_{b1} + J_{b2} + J_{b3})}}$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{(1.225 \text{ N} \cdot 0.08 \text{ m}) + (2 \cdot 0.245 \text{ N} \cdot 0.08 \text{ m} \cdot \sin 45) + (0.1740 \text{ N} \cdot \frac{0.08 \text{ m}}{2}) + (2 \cdot 0.1740 \text{ N} \cdot \frac{0.08 \text{ m}}{2} \cdot \sin 45)}{(8 \times 10^{-4}) + (2 \times (1.6 \times 10^{-4})) + 3(3.797 \times 10^{-5}) \text{ kg.m}^2}}$$

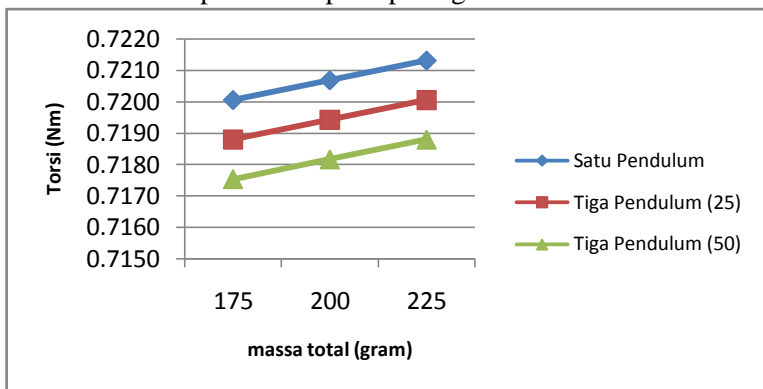
$$\omega_n = 10.7488 \text{ rad/s}$$

Berikut ini merupakan tabel hasil perhitungan secara teoritis.

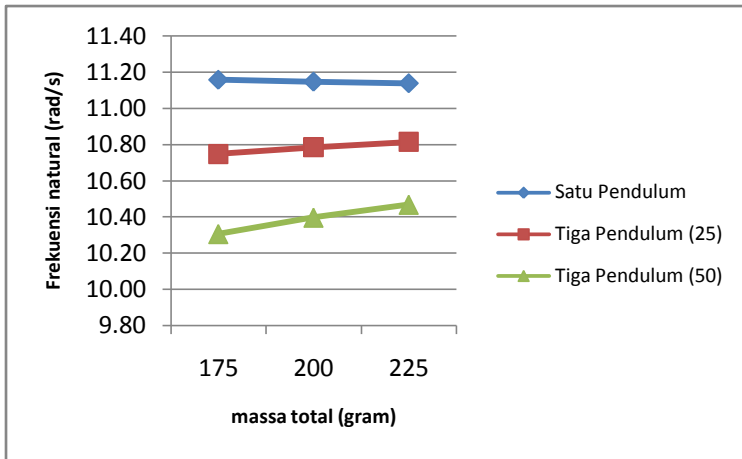
Tabel 4.1 Hasil perhitungan secara teoritis

Pendulum		m1 (kg)	m2 = m3 (kg)	Torsi Poros Utama (Nm)	Torsi Poros Out (Nm)	Frekuensi natural (rad/s)	Daya Maximum (watt)
1		0.175	0	3.8900	0.7201	11.1583	8.0347
		0.2	0	3.8934	0.7207	11.1474	8.0338
		0.225	0	3.8968	0.7213	11.1388	8.0347
3	massa penyeimbang 25 gram	0.125	0.025	3.8832	0.7188	10.7488	7.7263
		0.15	0.025	3.8866	0.7194	10.7859	7.7597
		0.175	0.025	3.8900	0.7201	10.8153	7.7877
3	massa penyeimbang 50 gram	0.075	0.05	3.8764	0.7175	10.3069	7.3956
		0.1	0.05	3.8798	0.7182	10.3971	7.4669
		0.125	0.05	3.8832	0.7188	10.4682	7.5245

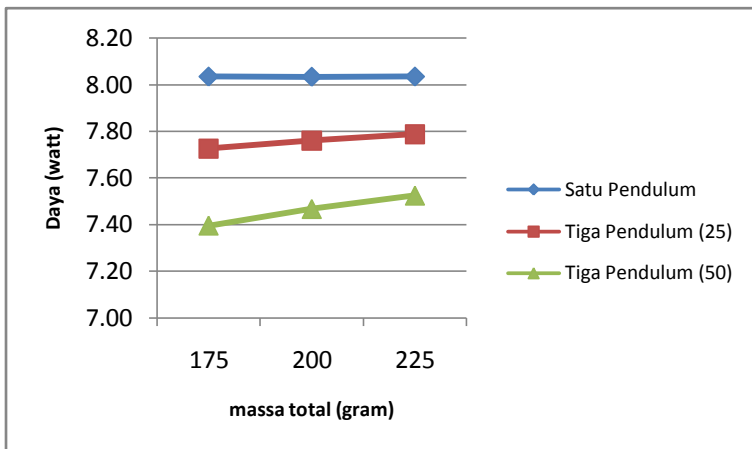
Adapun tabel 4.1 di atas merupakan tabel hasil perhitungan secara teoritis. Adapun bentuk grafik dari tabel tersebut diatas dapat dilihat pada pada gambar berikut ini.



Gambar 4.1 Grafik perbandingan hasil perhitungan torsi out secara teoritis



Gambar 4.2 Grafik perbandingan hasil perhitungan frekuensi natural secara teoritis



Gambar 4.3 Grafik perbandingan hasil perhitungan daya maksimum secara teoritis

Dari ketiga gambar tersebut terlihat bahwa terdapat tiga grafik berwarna biru, merah dan hijau. Grafik berwarna biru merupakan grafik yang didapat dari perhitungan secara teoritis pada sistem *single* pendulum dan diberi nama grafik “Satu Pendulum”. Grafik berwarna merah merupakan grafik yang didapat dari perhitungan secara teoritis pada sistem *triple* pendulum dengan massa penyeimbang sebesar 25 gram dan diberi nama grafik “Tiga Pendulum (25)”. Grafik berwarna hijau merupakan yang didapat dari perhitungan secara teoritis pada sistem *triple* pendulum dengan massa penyeimbang sebesar 50 gram dan diberi nama grafik “Tiga Pendulum (50)”.

Pada gambar 4.1 *trendline* yang terbentuk pada ketiga grafik tersebut adalah sama, yaitu torsi yang diperoleh dari hasil perhitungan teoritis semakin mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya beban massa pada pendulum. Pada gambar 4.2 *trendline* yang terbentuk pada ketiga grafik tersebut berbeda. Untuk sistem *single* pendulum, frekuensi natural hasil perhitungan teoritis cenderung mengalami penurunan sedangkan untuk kedua sistem *triple* pendulum, frekuensi natural hasil perhitungan teoritis mengalami peningkatan. Pada gambar 4.3 *trendline* yang terbentuk pada ketiga grafik tersebut adalah sama, yaitu daya maksimum hasil perhitungan teoritis semakin mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya beban massa pada pendulum.

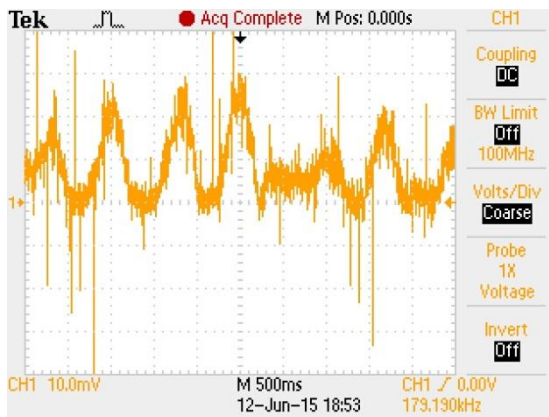
4.3 Analisa dan Pembahasan Pengujian

Pada analisa eksperimen ini akan ditampilkan data – data yang diperoleh saat melakukan eksperimen. Adapun data – data yang diperoleh berupa nilai voltase dan bentuk gelombang yang terekam di dalam *oscilloscope*. Adapun ponton yang merupakan PLTGL Sistem Ponton Perahu – Pendulum Vertikal ini ditampilkan pada gambar 4.4.



Gambar 4.4 PLTGL Sistem Ponton Perahu – Pendulum Vertikal

Pengujian dan pengambilan data dilakukan dengan menggunakan *oscilloscope*. Hasil dari *oscilloscope* akan menunjukkan nilai dari voltase atau daya bangkitan yang dihasilkan pada model mekanisme PLTGL Sistem Ponton Perahu – Pendulum Vertikal dapat dilihat pada gambar 4.5. Data yang dihasilkan oleh *oscilloscope* tidak berupa voltase efektif karena terdapat *noise* (getaran di luar sistem) saat pengambilan data, sehingga dilakukan proses *smoothing* dan *filter* dengan menggunakan *software* Matlab.

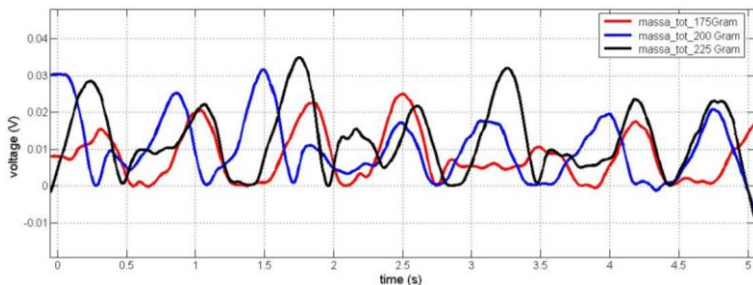


Gambar 4.5 Data hasil eksperimen yang terekam oleh *oscilloscope*

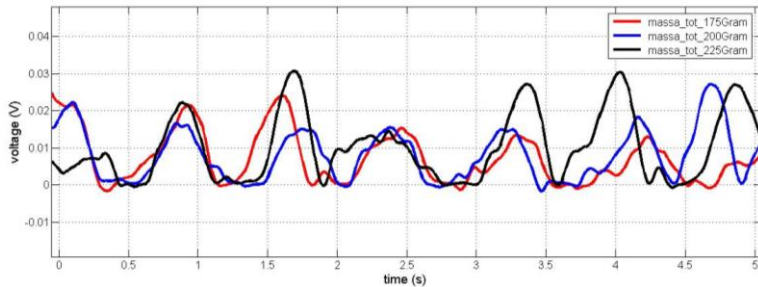
Dari gambar 4.5 terlihat bahwa terdapat beberapa *noise* yang terbaca pada layar *oscilloscope*, namun pengambilan data dapat dilakukan dengan menggunakan metode *single seq*. Pada gambar 4.5 terlihat hasil rekaman metode *single seq* gelombang yang dihasilkan tidak terputus. Data yang diperoleh kemudian dipindahkan ke *matlab* untuk di filter dengan menggunakan *filter design and analysis tool*. Data yang telah difilter dengan *fdtool* kemudian di smoothing dengan menggunakan *curve fitting tool* agar grafik yang diperoleh dari *Oscilloscope* lebih mudah dianalisis. Dari curva yang didapat dengan menggunakan *curve fitting tool* pada *matlab*, nilai RMS (*root mean square*) juga diperoleh. Nilai RMS ini dibandingkan dengan daya gelombang yang kemudian dihitung efisiensi mekanisme PLTGL Sistem Ponton Perahu – Pendulum Vertikal.

4.3.1 Pengaruh Massa Pendulum terhadap Energi Listrik yang Dihasilkan

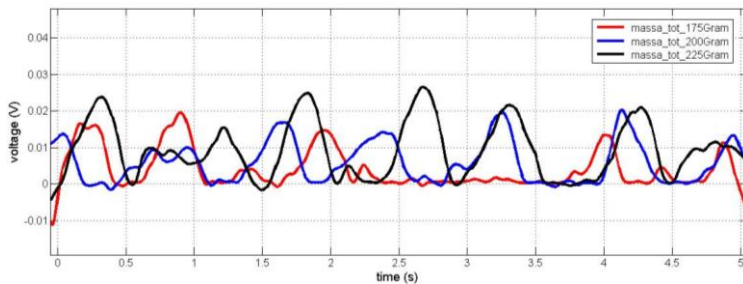
Pengaruh variasi massa pendulum pada PLTGL Sistem Ponton Perahu – Pendulum Vertikal dengan panjang lengan tetap yaitu sepanjang 8 cm, amplitudo tetap sebesar 1.2 cm dan frekuensi tetap sebesar 0.4 Hz, dapat dilihat pada gambar berikut ini. Dimana interval yang digunakan pada *oscilloscope* sumbu x 10 mV dan sumbu y 500 ms.



Gambar 4.6 Grafik tegangan vs waktu akibat pengaruh variasi massa pada sistem *single* pendulum



Gambar 4.7 Grafik tegangan vs waktu akibat pengaruh variasi massa pada sistem *triple* pendulum (25)



Gambar 4.8 Grafik tegangan vs waktu akibat pengaruh variasi massa pada sistem *triple* pendulum (50)

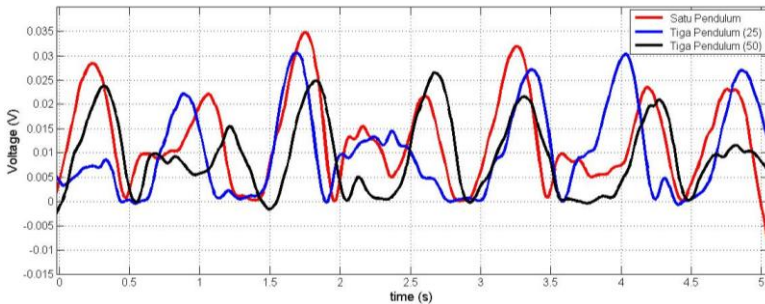
Pada gambar terlihat grafik yang menggambarkan hubungan antara waktu dan tegangan hasil dari pergerakan ponton dan pendulum dengan 3 variasi massa pada panjang lengan 8 cm. Grafik berwarna merah diberi nama “massa_tot_175Gram” yang berarti menggambarkan pola grafik tegangan yang dihasilkan dengan menggunakan massa total 175 gram dan panjang lengan 8 cm pada kisaran waktu 0-5 detik. Grafik berwarna biru diberi nama “massa_tot_200Gram” yang berarti menggambarkan pola grafik tegangan yang dihasilkan dengan menggunakan massa total 200 gram dan panjang lengan 8 cm pada kisaran waktu 0 - 5 detik. Grafik berwarna hitam diberi nama “massa_tot_225Gram” yang berarti menggambarkan pola grafik tegangan yang

dihasilkan dengan menggunakan massa total 225 gram dan panjang lengan 8 cm pada kisaran waktu 0 - 5 detik.

Dari ketiga grafik tersebut diatas, dapat dilihat bahwa semakin besar massa pendulum yang diberikan maka voltase yang dihasilkan semakin besar pula. Hal ini disebabkan karena semakin besar massa pendulum semakin besar pula torsi yang dihasilkan pada poros. Besarnya torsi ini akan berpengaruh terhadap voltase bangkitan generator. Semakin besar torsi maka voltase bangkitan dari generator juga semakin besar. Hal ini dapat dilihat dari vrms masing-masing pengujian. Pada pengujian *single* pendulum, pada saat massa sebesar 175 gram vrms sebesar 0,0119 volt, massa 200 gram vrms sebesar 0,0149 volt, dan massa 225 gram vrms sebesar 0,0178 volt. Pada pengujian *triple* pendulum dengan massa penyeimbang 25 gram, pada saat massa sebesar 125 gram vrms sebesar 0,0113 volt, massa total 150 gram vrms sebesar 0,0121 volt, dan massa total 175 gram vrms sebesar 0,0156 volt. Pada pengujian *triple* pendulum dengan massa penyeimbang 50 gram, pada saat massa sebesar 75 gram vrms sebesar 0,0081 volt, massa total 100 gram vrms sebesar 0,0095 volt, dan massa total 125 gram vrms sebesar 0,0140 volt.

4.3.2 Pengaruh Jumlah Pendulum terhadap Energi Listrik yang Dihasilkan

Pengaruh jumlah pendulum pada PLTGL Sistem Ponton Perahu – Pendulum Vertikal dengan panjang lengan tetap yaitu sepanjang 8 cm, amplitudo tetap sebesar 1.2 cm dan frekuensi tetap sebesar 0.4 Hz, dapat dilihat pada gambar berikut ini. Dimana interval yang digunakan pada *oscilloscope* sumbu x 10 mV dan sumbu y 500 ms.



Gambar 4.9 Grafik perbandingan tegangan vs waktu akibat pengaruh variasi jumlah pendulum

Pada gambar terlihat grafik yang menggambarkan perbandingan hubungan antara waktu dan tegangan hasil dari pergerakan ponton dan pendulum. Grafik berwarna merah diberi nama “Satu Pendulum” yang berarti menggambarkan pola grafik tegangan yang dihasilkan dengan menggunakan satu pendulum dengan massa total 225 gram dan panjang lengan 8 cm pada kisaran waktu 0-5 detik. Grafik berwarna biru diberi nama “Tiga Pendulum (25)” yang berarti menggambarkan pola grafik tegangan yang dihasilkan dengan menggunakan tiga pendulum dengan massa total 225 gram (massa penyeimbang masing – masing 25 gram dan massa utama 175 gram) dan panjang lengan 8 cm pada kisaran waktu 0 - 5 detik. Grafik berwarna hitam diberi nama “Tiga Pendulum (50)” yang berarti menggambarkan pola grafik tegangan yang dihasilkan dengan menggunakan massa total 225 gram (massa penyeimbang masing – masing 50 gram dan massa utama 125 gram) dan panjang lengan 8 cm pada kisaran waktu 0 - 5 detik.

Dari grafik pada gambar 4.9 dapat dilihat pengaruh jumlah pendulum terhadap voltase bangkitan dari generator. Pengujian ini dilakukan pada massa total sebesar 225 gram. Dapat dilihat bahwa untuk sistem *single* pendulum memiliki vrms sebesar 0,0178 volt, untuk sistem *triple* pendulum dengan massa penyeimbang sebesar 25 gram memiliki vrms sebesar 0,0156 volt,

untuk sistem *triple* pendulum dengan massa penyeimbang sebesar 50 gram memiliki v_{rms} sebesar 0,0140 volt.

4.4 Pembahasan

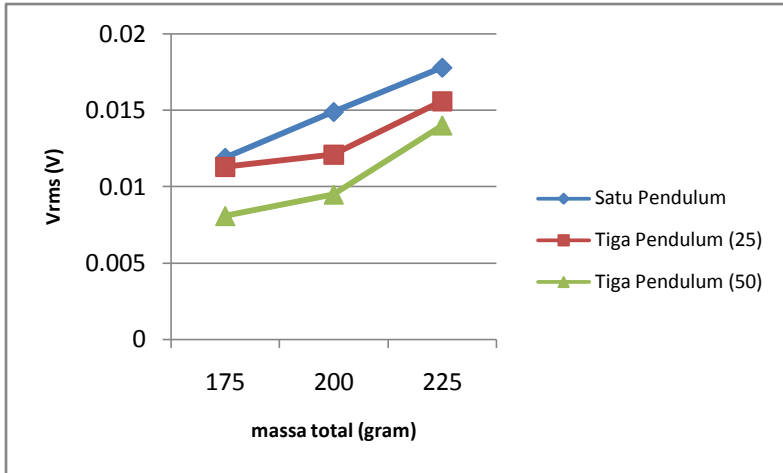
4.4.1 Analisa Variasi Massa dengan Panjang Lengan Tetap

Nilai voltase dari variasi massa dengan panjang lengan tetap ditampilkan dalam bentuk tabel 4.2 sebagai berikut.

Tabel 4.2 Nilai voltase *Root Mean Square* pada variasi massa pendulum

F	Pendulum		Massa	V_{rms} (V)	P eks (mW)
0.4	1		175	0.0119	0.004046
			200	0.0149	0.004619
			225	0.0178	0.004984
0.4	3	massa penyeimbang 25 gram	125	0.0113	0.003277
			150	0.0121	0.003267
			175	0.0156	0.003744
0.4	3	massa penyeimbang 50 gram	75	0.0081	0.002025
			100	0.0095	0.00209
			125	0.014	0.00252

Adapun tabel 4.2 di atas merupakan tabel nilai tegangan rata-rata hasil eksperimen. Dimana memiliki bentuk grafik yang berbeda-beda sesuai dengan data terekam pada *oscilloscope*. Adapun bentuk grafik voltase dapat dilihat pada pada gambar 4.10 berikut ini.

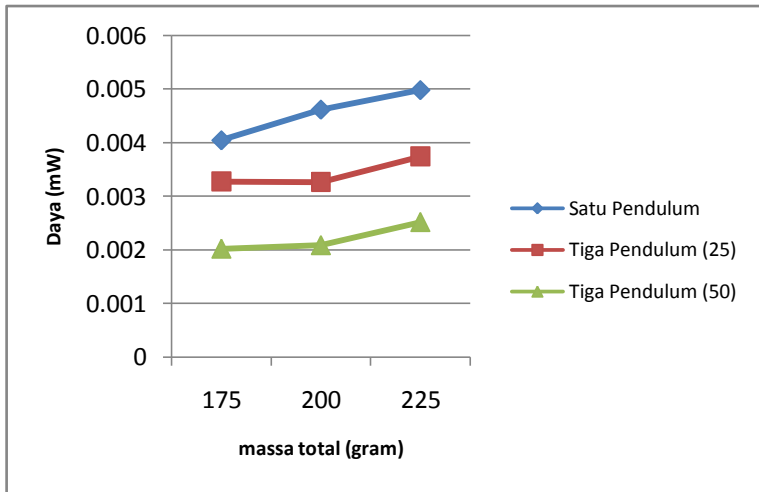


Gambar 4.10 Grafik pengaruh massa pendulum berupa voltase

Pada gambar 4.10 *trendline* yang terbentuk pada ketiga grafik di atas adalah sama, yaitu voltase semakin mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya beban massa pada pendulum. Jika dilihat dari grafik, pada ketiga sistem pendulum tersebut voltase yang terbesar yaitu pada massa total 225 gram. Hal ini disebabkan karena jika besar massa semakin bertambah maka besarnya torsi juga semakin meningkat. Peningkatan torsi ini juga akan menyebabkan voltase bangkitan dari generator semakin meningkat. Dari grafik tersebut juga dapat dilihat bahwa voltase terbesar dihasilkan oleh sistem *single* pendulum pada massa total 225 gram. Hal ini disebabkan karena beban massa pendulum terpusat pada satu titik dimana hal ini akan menyebabkan torsi semakin besar sehingga saat torsi semakin besar maka voltase bangkitan dari generator juga semakin besar.

Jika melihat dari *trendline* grafik tersebut di atas, maka hal ini sesuai dengan perhitungan teoritis bahwa besar nilai voltase sebanding dengan nilai massa pendulum. Sehingga semakin besar nilai massanya, maka nilai voltase pun akan

semakin besar. Karena semakin besar massa, torsi yang dihasilkan semakin besar maka voltase yang dihasilkan semakin besar.



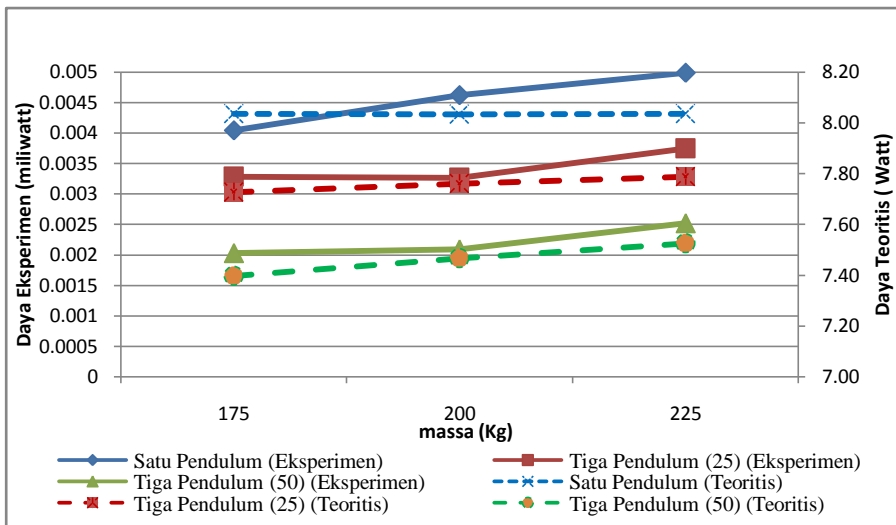
Gambar 4.11 Grafik pengaruh massa pendulum berupa daya

Pada gambar 4.11 *trendline* yang terbentuk pada ketiga grafik di atas adalah sama, yaitu daya semakin mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya beban massa pada pendulum. Jika dilihat dari grafik, pada ketiga sistem pendulum tersebut daya terbesar yaitu pada massa total 225 gram. Hal ini disebabkan karena jika besar massa semakin bertambah maka besarnya torsi juga semakin meningkat. Peningkatan torsi ini juga akan menyebabkan voltase bangkitan dari generator semakin meningkat. Dengan meningkatnya voltase bangkitan, maka daya yang dihasilkan juga akan semakin meningkat. Dari grafik tersebut juga dapat dilihat bahwa daya terbesar dihasilkan oleh sistem *single* pendulum pada massa total 225 gram. Hal ini disebabkan karena beban massa pendulum terpusat pada satu titik dimana hal ini akan menyebabkan torsi semakin besar sehingga saat torsi semakin besar maka voltase bangkitan dari generator

juga semakin besar sehingga berpengaruh terhadap daya yang juga akan semakin meningkat.

Jika melihat dari trendline grafik tersebut di atas, maka hal ini sesuai dengan perhitungan teoritis bahwa besar nilai daya sebanding dengan nilai massa pendulum. Sehingga semakin besar nilai massanya, maka nilai daya pun akan semakin besar. Karena semakin besar massa, torsi yang dihasilkan semakin besar maka voltase yang dihasilkan semakin besar sehingga daya juga semakin besar.

4.5 Perbandingan Teoritis dan Eksperimen



Gambar 4.12 Grafik daya teoritis vs eksperimen

Pada gambar 4.12 diatas ditampilkan grafik perbandingan antara daya berdasarkan perhitungan teoritis dan daya yang dihasilkan dari eksperimen. Dalam grafik tersebut sumbu x mewakili massa total tiap percobaan sedangkan sumbu y mewakili daya.

Secara teoritis, dengan bertambahnya massa pendulum

akan mengakibatkan torsi semakin besar. Dengan bertambah besarnya torsi akan menyebabkan voltase bangkitan juga akan semakin bertambah. Dengan bertambahnya voltase bangkitan maka daya yang dihasilkan juga akan semakin bertambah.

Jika dilihat dari *trendlinenya*, maka ada kesesuaian antara *trendline* dari daya yang didapatkan dari hasil eksperimen dengan daya yang didapatkan dari hasil perhitungan secara teoritis. Dimana dengan bertambahnya massa pendulum maka daya yang dihasilkan juga akan semakin besar. Jika dilihat daya hasil eksperimen memiliki nilai yang lebih kecil jika dibandingkan dengan daya hasil perhitungan secara teoritis. Hal ini bisa saja disebabkan akibat terjadinya losses pada rangkaian roda gigi, losses pada hubungan chain dan sprocket, penggunaan frekuensi pada saat pengujian sangat kecil jika dibandingkan dengan frekuensi natural dari sistem serta penggunaan generator DC dengan kapasitas kecil.

4.6 Aplikasi PLTGL Sistem Ponton Perahu – Pendulum Vertikal

Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut metode Ponton Perahu – Pendulum Vertikal ini disimulasikan pada pembangkit gelombang skala lab yang dapat menghasilkan frekuensi gelombang air sebesar < 1 Hz. Untuk amplitudo yang disimulasikan dapat mencapai ketinggian 0,024 m. Sedangkan kondisi riil, ketinggian gelombang laut pada laut Jawa memiliki ketinggian hingga 1 m dan frekuensi gelombang laut 0,21 Hz.

Skala perbandingan yang digunakan dalam perhitungan berikut ini yaitu 1:10. Berikut ini merupakan tabel hasil perhitungan skala lab dan skala riil.

Tabel 4.3 Hasil perhitungan skala lab dan skala riil

Mekanisme dalam skala lab					Mekanisme dalam skala riil			
Pendulum	Massa Penyeimbang (Kg)	Massa (Kg)	Panjang Lengan (m)	P eks (mW)	Massa Penyeimbang (Kg)	Massa (Kg)	Panjang Lengan (m)	P (W)
1	0	0.175	0.08	0.0040	0	1.75	0.8	2.8097
		0.2	0.08	0.0046		2	0.8	3.2076
		0.225	0.08	0.0050		2.25	0.8	3.4611
3	0.025	0.125	0.08	0.0033	0.25	1.25	0.8	2.2757
		0.15	0.08	0.0033		1.5	0.8	2.2688
		0.175	0.08	0.0037		1.75	0.8	2.6000
3	0.05	0.075	0.08	0.0020	0.5	0.75	0.8	1.4063
		0.1	0.08	0.0021		1	0.8	1.4514
		0.125	0.08	0.0025		1.25	0.8	1.7500

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari analisa dan pembahasan pada PLTGL Sistem Ponton Perahu – Pendulum Vertikal dengan variasi massa dan jumlah pendulum didapat kesimpulan sebagai berikut:

1. Nilai daya terbesar untuk variasi massa pada massa 225 gram pada sistem *single* pendulum yaitu sebesar 0.004984mWatt.
2. Nilai daya terbesar untuk variasi jumlah pendulum yaitu pada sistem *single* pendulum dengan massa 225 gram yaitu 0.004984mWatt.
3. Berdasarkan eksperimen yang dilakukan, PLTGL Sistem Ponton Perahu – *Sinlge* Pendulum Vertikal menghasilkan daya yang lebih besar dibandingkan PLTGL Sistem Ponton Perahu – *Triple* Pendulum Vertikal.

5.2 Saran

Adapun beberapa saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya guna mendapatkan hasil yang lebih baik yaitu:

1. Perlu dilakukan penyempurnaan pada mekanisme rangkaian roda gigi yang meneruskan putaran dari poros utama pendulum ke generator karena hal ini akan sangat berpengaruh terhadap besar kecilnya energi listrik yang dihasilkan.
2. Perlu dilakukan penyempurnaan pada desain ponton yang digunakan pada mekanisme PLTGL ini.
3. Pada proses pengujian, gunakan frekuensi gelombang yang mendekati frekuensi natural dari sistem untuk membuktikan daya maksimum yang dapat dicapai oleh mekanisme apakah sudah sesuai antara perhitungan

teoritis dan hasil eksperimen.

4. Perlu dilakukan penyempurnaan pada teknik pengikatan ponton supaya menghasilkan data yang lebih akurat.

DAFTAR PUSTAKA

- Anonim. 2010. 17 Desember. "World Energy Council". **International Ocean Energy Workshop**. Surabaya : Grand Palace Hotel.
- Anonim. 2014. 17 Februari. **Pelayaran Sungai dan Danau / Dasar – Dasar Kapal**, <URL: http://id.wikibooks.org/wiki/Pelayaran_Sungai_dan_Danau/Dasar-dasar_Kapal>.
- Balitbang Ketenagalistrikan PLN dan LPPM ITS. 2010. **Studi Pemodelan dan Simulasi Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut – Sistem Bandulan (PLTGL-SB)**, <URL: http://aseli.co/index.php?option=com_content&view=article&id=70:art-pltg-sb&catid=40:cat-article&Itemid=53>.
- Mukhtasor, Prof. Dr., 2013. 17 Desember. "Ocean Energy Policy and Development in Indonesia". **International Ocean Energy Workshop**. Surabaya : Grand Palace Hotel.
- Rao, Singiresu D. 2011. **Mechanical Vibration 5th Edition**. USA : University of Miami.
- Yori, Andromeda. 2015. **Pengaruh Variasi Massa dan Panjang Lengan Pendulum Terhadap Energi Listrik Yang Dihasilkan (Desain Ulang) Model Mekanisme Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut Metode Ponton Single Pendulum**. Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

BIODATA PENULIS



Efraim Rombe dilahirkan di Soroako, Luwu Timur, Sulawesi Selatan pada tanggal 21 April 1991. Penulis merupakan anak keempat dari delapan bersaudara anak pasangan Mesak Rombe dan Ester Kedang.

Penulis memulai pendidikan dasar di SDN 142 Inpres Gandangbatu dan lulus pada tahun 2003, lalu melanjutkan studi ke SMPN 1 Malili dan lulus pada tahun 2006, kemudian melanjutkan studi ke SMKN 1 Malili dengan bidang keahlian Teknik Komputer dan Jaringan, lulus pada tahun 2009. Setelah masa studi SMK selesai, penulis melanjutkan studi ke program Diploma III di Akademi Teknik Soroako (ATS) dengan program studi Perawatan dan Perbaikan Mesin dan mengambil konsentrasi Gambar dan Perancangan Mekanik, lulus pada tahun 2012. Pada awal tahun 2013 penulis melanjutkan program sarjana di jurusan Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) dan mengambil bidang studi Desain. Keinginan untuk selalu belajar dan mengamalkan ilmu yang diperoleh selama kuliah mendorong penulis untuk mengambil Tugas Akhir dengan judul “Analisa Perbandingan Energi Listrik yang Dihasilkan Mekanisme PLTGL Sistem Ponton Perahu *Single* dan *Triple* Pendulum Vertikal dengan Variasi Massa Pendulum”. Harapan penulis agar ilmu yang telah didapatkan dapat berguna untuk agama, bangsa dan negara. Penulis dapat dihubungi melalui e-mail berikut : efraimrombe.91@gmail.com