



TESIS - SF142502

**PROTOTIPE GENERATOR LISTRIK TENAGA
GELOMBANG PERMUKAAN AIR LAUT 1 WATT
UNTUK MENYUPLAI SISTEM DETEKTOR TSUNAMI
“YONHAPE” DI LAUT**

DISABELLA DAYERA
1114 201 010

DOSEN PEMBIMBING
Dr. YONO HADI PRAMONO, M.Eng

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN OPTIK DAN ELEKTRONIKA
JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2016



THESIS - SF142502

**THE PROTOTYPE OF ELECTRIC GENERATOR OF
SEA WAVE-POWER (1 WATT) FOR SUPPLYING
TSUNAMI DETECTORS SYSTEM “YONOHAPE” IN
THE OCEAN**

DISABELLA DAYERA
NRP. 1114 201 010

SUPERVISOR
Dr. YONO HADI PRAMONO, M.Eng

MAGISTER PROGRAME
OPTOELECTRONIC AND ELECTROMAGNETIC APPLICATION
PHYSICS DEPARTMENT
FACULTY OF MATHEMATICS AND NATURAL SCIENCES
INSTITUTE OF TECHNOLOGY SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2016

Tesis ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Sains (M.Si)

di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :
Disabella Dayera
NRP. 1114201010

Tanggal Ujian : 22 Juni 2016
Periode Wisuda : September 2016

Disetujui oleh :

1. Dr. Yono Hadi Pramono, M.Eng
NIP. 19690904 199203 1 003

(Pembimbing)

2. Dr. Mashuri, M.Si
NIP. 19691216 200501 1 002

(Penguji)

3. Dr. Zaenal Arifin, M.Si
NIP. 19691216 200501 1 002

(Penguji)

Direktur Program Pascasarjana,

Prof. Ir. Djauhar Manfaat, M.Sc, Ph.D

NIP. 19601202 198701 1 001

PROTOTYPE GENERATOR LISTRIK TENAGA GELOMBANG PERMUKAAN AIR LAUT 1 WATT UNTUK MENYUPLAI SISTEM DETEKTOR TSUNAMI “YONOHAPE” DI LAUT

Nama : Disabella Dayera
NRP : 1114 201 010
Pembimbing : Dr. Yono Hadi Pramono, M.Eng

Prototipe generator listrik tenaga gelombang permukaan air laut 1 watt untuk menyuplai sistem detektor tsunami “YONOHAPE” di laut telah berhasil dirancang bangun dengan metode yang digunakan adalah metode *Onshore* dan *Offshore*. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui karakteristik dari daya mekanik bandul dan mengetahui karakteristik kondisi gelombang laut terhadap daya listrik yang dihasilkan serta efisiensi daya pada prototipe generator listrik. Sistem pembangkit listrik yang dibuat menggunakan prinsip gerak harmonik sederhana dari sebuah bandul yang menghasilkan energi gerak rotasi untuk memutar generator sehingga menghasilkan daya listrik dimana tenaga gerak bandul berasal dari tenaga gelombang laut. Komponen penting dalam penelitian ini adalah ponton dan bandul. Ponton yang dirancang mengikuti standar “YONOHAPE” dengan model datar yang memiliki 3 kisi dengan ukuran 144 cm x 94 cm. Bandul yang dirancang dengan arah vertikal memiliki massa dan panjang lengan yang konstan.

Hasil yang diperoleh dari pengujian menggunakan metode *Onshore* berupa daya listrik sebesar 11,45 watt pada sudut simpangan sebesar 90 derajat dan menghasilkan persamaan garis adalah $y = 0,1465x - 1,1472$. Persamaan tersebut yang digunakan untuk mengetahui estimasi daya listrik pada metode *Offshore*. Berdasarkan hasil perhitungan daya listrik pada metode *Offshore*, prototipe generator listrik yang dirancang mulai bekerja pada sudut simpangan 17 derajat pada kondisi gelombang eksitasi dengan amplitudo 3 cm dan periode 0,9s untuk menghasilkan daya listrik sebesar 1,3 watt. Adapun hasil daya listrik maksimum adalah sebesar 3,7 watt. Nilai efisiensi alat maksimum sebesar 20,73, sehingga hasil rancang bangun prototipe generator listrik tenaga gelombang permukaan laut dianggap mampu untuk beroperasi menyuplai alat detektor tsunami.

Kata Kunci : Gerak Harmonik Sederhana, *Renewable Energy*, PLTGL-SB, Daya Listrik, *Flywheel*, Generator.

THE PROTOTYPE OF SEA WAVE POWER ELECTRIC GENERATOR, 1 WATT, TO SUPPLY THE TSUNAMI DETECTORS SYSTEM “YONOHAPE” IN THE OCEAN

Name : Disabella Dayera
NRP : 1114 201 010
Supervisor : Dr. Yono Hadi Pramono, M.Eng

The prototype of sea wave power electric generator, 1 watt, to supply the tsunami detectors system “YONOHAPE” in the ocean have been successfully designed using methods of Onshore and Offshore. The aim of this research was to know the characteristics of mechanical pendulum resources and know the karakteristik conditions of ocean waves against the generated electrical power and power efficiency on the prototype power generator. The system of the power plant are made using the principle of simple harmonic motion of a pendulum motion energy of rotation to rotate generators to produce electricity where the energy comes from power pendulum motion of ocean waves. An important component in this study is pontoon and pendulum. Pontoon designed to follow the standard "YONOHAPE" with a flat model has 3 grid with size 144 cm x 94 cm. Pendulum designed with vertical direction has the mass and length of the arm is a constant.

The results obtained from testing method using electrical power in the form of Onshore 11.45 watts on the corner junction of 90 degrees and produces the equation of a line is $y = 0,1465x - 1.1472$. The equation used to find out the electrical power estimation method on Offshore. Based on the results of calculation of electrical power on the Offshore method, prototype power generator designed began working at the angle of junction 17 degrees on the conditions of wave excitation with an amplitude of 3 cm and a period of 0,9s to generate electric power of 1.3 watt. As for the results of maximum power is 3.7 watts. The value of the maximum tool efficiency of 20.73, so results architecture prototype wave power generator the sea level is considered capable of operating supplies detectors tool of the tsunami.

Keywords : Simple Harmonic Motion, Renewable Energy, PLTGL-SB, The Current Electric, Flywheel And Generator.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Batasan Masalah	4
1.5 Manfaat Penelitian	5
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	
2.1 Sejarah Perkembangan Energi Gelombang Laut	7
2.2 Gelombang Air Laut	10
2.3 Energi dan Daya Gelombang Laut	12
2.4 Keseimbangan Benda dalam Fluida	14
2.5 Osilasi	15
2.5.1 Gerak Harmonik Sederhana	15
2.5.2 Bandul	17
2.5.3 Momen Inersia	18
2.5.4 Kerja dan Daya pada Gerak Rotasi Bandul	19
2.6 Daya Listrik	21
2.6.1 Harga Efektif Arus dan Tegangan	22
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	
3.1 Prosedur Penelitian	23

3.1.1 Tahap Persiapan	23
3.1.2 Tahap Perancangan	25
3.1.3 Tahap Pengujian	28
3.1.4 Tahap Pengambilan Data	30
3.2 Analisa dan Pengolahan Data	33
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	
4.1 Metode ONSHORE	37
4.1.1 Pengaruh Variabel terhadap Daya Bandul	37
4.1.2 Pengaruh Variabel terhadap Daya Listrik	39
4.2 Metode OFFSHORE	41
4.2.1 Pengaruh Variabel terhadap Daya Gelombang	41
4.2.2 Pengaruh Variabel terhadap Osilasi Bandul	42
4.2.3 Pengaruh Variabel terhadap Daya Listrik	45
4.3 Effisiensi Prototipe Generator	52
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1 Kesimpulan	53
5.2 Saran	53
DAFTAR PUSTAKA	55
LAMPIRAN	59
BIOGRAFI PENULIS	85

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Tata Letak Buoy Navigasi	8
Gambar 2.2	Shoreline OWC	9
Gambar 2.3	Gelombang yang disebabkan oleh Angin	11
Gambar 2.4	Sketsa defenisi Gelombang	11
Gambar 2.5	Penurunan Energi Gelombang.....	12
Gambar 2.6	Tiga Kondisi Kesetimbangan	14
Gambar 2.7	Gerakan Ayunan Bandul	16
Gambar 2.8	Skema Bandul Fisis	17
Gambar 2.9	Momen Inersia diputar diujung Batang Pejal	19
Gambar 2.10	Momen Inersia setiap Benda	19
Gambar 2.11	Sebuah Gaya Tangensial	20
Gambar 2.12	Masukan Daya P	21
Gambar 3.1	Dimensi dan Komponen Elektrik bandul	24
Gambar 3.2	<i>Part Assembly</i> dan Geometri Ponton Datar	25
Gambar 3.3	Ponton Datar	26
Gambar 3.4	Hasil Rancang Bandul Arah Vertikal	27
Gambar 3.5	Hasil Rancang Bangun Prototipe Generator Listrik	28
Gambar 3.6	Mekanisme Kerja Prototipe Generator	29
Gambar 3.7	Digital Multimeter UX-369C	30
Gambar 3.8	Diagram Alir Pengambilan Data	32
Gambar 3.9	Sketsa Bandul	33
Gambar 3.10	Contoh Pengolahan Data Simpangan Sudut Bandul	34
Gambar 3.11	Diagram Alir Penelitian	35
Gambar 4.1	Hubungan Torsi dan Sudut Simpangan Bandul	38
Gambar 4.2	Hubungan Torsi dan Daya Mekanik Bandul	39
Gambar 4.3	Hubungan Daya Listrik dengan Sudut Simpangan Bandul	40
Gambar 4.4	Hubungan Daya Gelombang dengan Ketinggian Gelombang ..	41
Gambar 4.5	Osilasi dari Bandul dengan Perubahan Periode Gelombang Uji ke-1	42

Gambar 4.6	Osilasi dari Bandul dengan Perubahan Periode Gelombang Uji ke-2	43
Gambar 4.7	Osilasi dari Bandul dengan Perubahan Periode Gelombang Uji ke-3	44
Gambar 4.8	Grafik Tegangan AC Fungsi Waktu Uji Ke-1	46
Gambar 4.9	Grafik Tegangan AC Fungsi Waktu Uji Ke-2	47
Gambar 4.10	Grafik Tegangan AC Fungsi Waktu Uji Ke-3	48
Gambar 4.11	Grafik Tegangan AC Fungsi Waktu Uji Ke-4	49
Gambar 4.12	Grafik Tegangan AC Fungsi Waktu Uji Ke-5	50
Gambar 4.13	Grafik Tegangan AC Fungsi Waktu Uji Ke-6	51
Gambar 4.14	Grafik Perbandingan Effisiensi Variasi	52

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Spesifikasi Ukuran Ponton	25
Tabel 3.2	Spesifikasi Ukuran Bandul	27
Tabel 3.3	Contoh Tabel Data Pengukuran	31
Tabel 4.1	Hasil Perhitungan Daya Listrik	46

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A	Data Hasil Pengukuran Sudut Simpangan Osilasi dari Bandul	59
Lampiran B	Data Hasil Pengukuran Tegangan Output Prototipe Generator Listrik	65
Lampiran C	Gambar Pengambilan Data Metode Onshore dengan Variasi Sudut Simpangan Bandul	71
Lampiran D	Pengolahan Data Video Osilasi dari Bandul pada Metode Onshore	75
Lampiran E	Perhitungan Daya Bandul dan Daya Listrik Metode Onshore	76
Lampiran F	Perhitungan Daya Gelombang, Daya Bandul dan Daya Listrik Metode Offshore	78

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pemanfaatan energi listrik adalah kunci untuk pertumbuhan ekonomi dan peningkatan standar hidup masyarakat, terutama di negara-negara berkembang. Meningkatnya permintaan energi listrik dan dampak lingkungan dari penggunaan bahan bakar fosil merupakan topik utama yang mendorong kita menuju teknologi terbarukan (Behrouzi et al., 2016). Pemakaian energi listrik dapat dilihat secara langsung baik di lingkungan rumah tangga, di sekolah, rumah sakit dan industri-industri. Berdasarkan Hukum Kekekalan Energi yang berbunyi “ energi tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan tapi hanya dapat berubah bentuk” (Young, 2002), hal ini dapat dilihat dalam memenuhi kebutuhan manusia dimana beberapa bentuk energi listrik yang diubah menjadi bentuk energi lainnya antara lain: energi listrik yang diubah menjadi energi cahaya (misalnya lampu), energi panas (misalnya setrika, kompor dan ketel), energi bunyi (misalnya telepon dan radio) dan gesekan (misalnya kipas angin) (Suryatmo, 2014). Sumber pembangkit energi listrik menurut sumbernya dapat dibedakan menjadi 2 (dua) yaitu sumber energi dapat diperbaharui (*Renewable energy*) (misalnya air laut, angin, sinar matahari dan lain-lain) dan yang kedua adalah sumber energi tidak dapat diperbaharui (*Non-Renewable Energy*) (misalnya energi fosil). Keuntungan utama dari energi terbarukan (*Renewable energy*) adalah bahwa energi ini bebas dari polusi dan karbon langsung emisi. Dimana, perhatian dunia saat ini yaitu pada isu pemanasan global yang disebabkan oleh emisi karbon, oleh sebab itu ada upaya kebijakan substansial untuk meningkatkan penetrasi terbarukan (Stram, 2016).

Secara umum, energi dari laut dapat dibagi menjadi enam jenis berdasarkan lokasi dan karakteristiknya yaitu gelombang laut, pasang surut, arus pasang surut, arus air laut, energi termal lautan, dan salinitas gradien (Uihlein dan Magagna, 2016). Indonesia memiliki beberapa sumber energi alternatif potensial termasuk energi gelombang laut, yang disebabkan oleh perbedaan suhu antara permukaan air dan dasar laut (Adinurani et al., 2014). Menggunakan energi gelombang laut

dapat dikatakan selain dapat diperoleh secara gratis sehingga biaya operasinya cenderung lebih rendah daripada pembangkit lainnya, bersifat kontinyu dan ramah lingkungan.

Beberapa penelitian yang dilakukan mengenai pemanfaatan energi gelombang laut bukan lagi hal yang baru dan telah banyak dikembangkan misalnya; (Adinurani et al., 2014) dengan jurnal yang berjudul *Study on Wave Energy into Electricity in the South Coast of Yogyakarta, Indonesia*. Dalam penelitian yang dilakukan, penulis melakukan studi mengenai potensi energi gelombang air laut di Pantai Selatan Yogyakarta sebagai energi alternatif, dimana hasil yang diperoleh yaitu adanya potensi energi gelombang laut yang besar dengan rata-rata ketinggian gelombang berkisar 2 - 3,5 m , sehingga adapun beberapa instrumen penting seperti instalasi pipa, desain sistem turbin, sistem roda gigi, dan sistem generator untuk memaksimalkan konversi energi gelombang menjadi energi listrik sebesar 3,9 kW. (Isnaini R, 2016) dengan judul penelitian yang dilakukan adalah analisis karakteristik osilasi pendulum pada PLTGL-SB menggunakan metode eksperimen, dimana dirancang bangun sebuah prototipe ponton 1:10 berbentuk silinder dengan cadik simetri di kedua sisinya dengan beberapa variasi yang dilakukan untuk menghasilkan simpangan pendulum yang besar sehingga diperoleh daya keluaran yang besar. (Enferad et al., 2009) dengan judul jurnal *New method for converting sea wave energy*. Dalam tulisannya dibahas mengenai desain, simulasi dan perhitungan jumlah energi gelombang laut yang diserap *wave energy converter* (WEC) dengan optimal. Begitu pula, (Rudianto, 2013) dengan judul penelitian yaitu Analisa Gerakan Pendulum dengan Bentuk Juring Lingkaran pada Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut - Sistem Bandulan pada Pengujian *Off-Shore*, dalam penelitian ini dirancang bangun dan dianalisa pengaruh bentuk ponton segi delapan terhadap gerakan bandul dengan bentuk jurig lingkaran arah horisontal yang memiliki potensi besar untuk dimanfaatkan sebagai PLTGL.

Kajian literatur diatas memberikan ide untuk merancang sebuah prototipe pembangkit listrik yang mampu untuk menyerap energi dari gelombang laut, dimana beberapa instrumen penting yang mempengaruhi adalah design ponton, bandul dan sistem generator yang digunakan untuk memaksimalkan konversi

energi gelombang menjadi energi listrik. Didalam penelitian ini dirancang bangun sebuah prototipe generator listrik tenaga gelombang permukaan air laut yang dapat menghasilkan daya listrik sebesar 1 watt untuk menyuplai komponen elektrik pada alat detektor tsunami YONOHAPE di laut. Prototipe detektor tsunami “YONOHAPE” merupakan sistem pelampung di atas permukaan air laut yang dilengkapi dengan perangkat komunikasi optik maupun WIFI ke daratan. Detektor ini bisa mengukur amplitudo gelombang tsunami sampai pada ketinggian 150 meter (Manuhutu, 2015).

Ponton yang menggunakan sistem bandul adalah salah satu alat yang digunakan untuk mengkonversi dari energi laut menjadi energi listrik (Anarki and Arief, 2016) dimana, memanfaatkan fenomena fisika yang dikenal dengan sebutan Gerak Harmonik Sederhana (GHS) pada sebuah bandul. Fungsi bandul dalam prototipe ini sebagai motor penggerak untuk memutar *flywheel* yang terhubung pada generator sehingga menghasilkan energi listrik, sedangkan daya osilasi bandul berasal dari daya gelombang permukaan air laut.

Agar prototipe generator listrik yang dirancang menghasilkan daya listrik yang optimal yaitu memiliki daya guna atau efisiensi yang besar, maka dilakukan variasi berupa sudut simpangan bandul dan variasi kondisi gelombang eksitasi berupa amplitudo dan periode gelombang sebagai parameter yang mempengaruhi daya listrik yang dihasilkan.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dikemukakan, maka rumusan masalah pada penelitian ini adalah :

1. Bagaimana merancang mekanisme prototipe generator listrik sistem bandul yang berosilasi secara optimal akibat tenaga gelombang permukaan air laut terhadap daya listrik yang dihasilkan?
2. Bagaimana pengaruh perubahan periode dan amplitudo gelombang permukaan air laut terhadap daya listrik yang dihasilkan?
3. Bagaimana pengaruh daya osilasi dari bandul terhadap daya listrik yang dihasilkan?
4. Bagaimana perbandingan data hasil pengukuran dengan teori yang ada?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan perumusan masalah, maka tujuan dari penelitian ini adalah untuk:

1. Merancang prototipe generator listrik tenaga gelombang permukaan air laut dengan daya listrik yang dihasilkan sebesar 1 watt skala laboratorium.
2. Mengetahui karakteristik parameter gelombang permukaan air laut terhadap daya listrik optimal yang dihasilkan oleh prototipe generator listrik yang dirancang.
3. Mendapatkan karakteristik parameter osilasi bandul dengan arah vertikal terhadap daya listrik optimal yang dihasilkan oleh prototipe generator listrik yang dirancang.
4. Mengetahui efisiensi dari prototipe generator listrik tenaga gelombang permukaan air laut sistem bandul.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Prototipe generator listrik yang dirancang yaitu menggunakan prinsip gerak harmonik sederhana dari bandul fisis dengan arah ayunan vertikal, massa dan panjang lengan bandul yang konstan.
2. Simulasi gelombang air laut yang digunakan dalam penelitian ini dilakukan di *Towing tank* Laboratorium Hidrodinamika, dengan jenis gelombang *regular*, arah gelombang 90 derajat dari muka ponton, dengan variasi yang dilakukan adalah amplitudo dan periode gelombang dengan mengabaikan gangguan lain seperti halnya gesekan pada dinding tangki dan tidak membahas secara detail mengenai karakteristik gelombang air laut.
3. Dimensi pelampung atau ponton yang digunakan dalam penelitian ini yaitu standar YONOHAPE tanpa melakukan simulasi gerak ponton dan perhitungan *lossing* energi yang terjadi akibat eksitasi gelombang pada ponton yang ditransmisikan pada bandul.
4. Daya listrik yang dihasilkan prototipe generator listrik yang dirancang adalah skala laboratorium.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini diharapkan dapat :

1. Dapat memberikan suplai energi listrik pada peralatan elektrik didalam sistem detektor tsunami.
2. Dalam skala besar, dapat memberikan sumbangan teknologi *renewable energy* pemanfaatan gelombang permukaan air laut.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 2

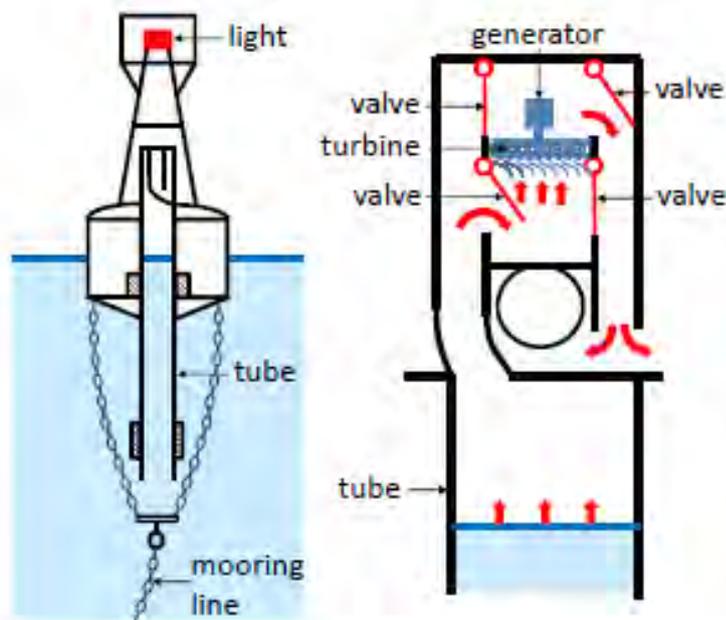
KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

Potensi Indonesia dalam menghasilkan sumber energi alternatif sangatlah berpeluang besar, salah satunya adalah dengan menciptakan energi alternatif dari gelombang air laut dimana ketersediaannya di Indonesia sangat melimpah. Indonesia sebagai negara kepulauan mempunyai lebih dari 3700 pulau dan wilayah pantai sepanjang 80.000 km. (Triatmodjo, 1999).

2.1 Sejarah Perkembangan Energi Gelombang Laut

Yoshio Masuda (1925-2009) seorang perwira angkatan laut Jepang, dapat dianggap sebagai bapak teknologi energi gelombang modern, dengan studi di Jepang sejak paruh kedua tahun 1940-an. Masuda mengembangkan pelampung navigasi didukung oleh energi gelombang, dilengkapi dengan turbin udara (Gambar 2.1), yang saat ini disebut sebagai (floating) OWC. Pelampung ini dikomersialisasikan di Jepang sejak tahun 1965 (dan kemudian di Amerika Serikat), dan merupakan perangkat energi gelombang yang berhasil disebarkan ke laut. Masuda navigasi pelampung dilengkapi dengan konvensional turbin air searah, yang membutuhkan sistem meluruskan katup (Gambar 2.1) (Falcão and Henriques, 2016).

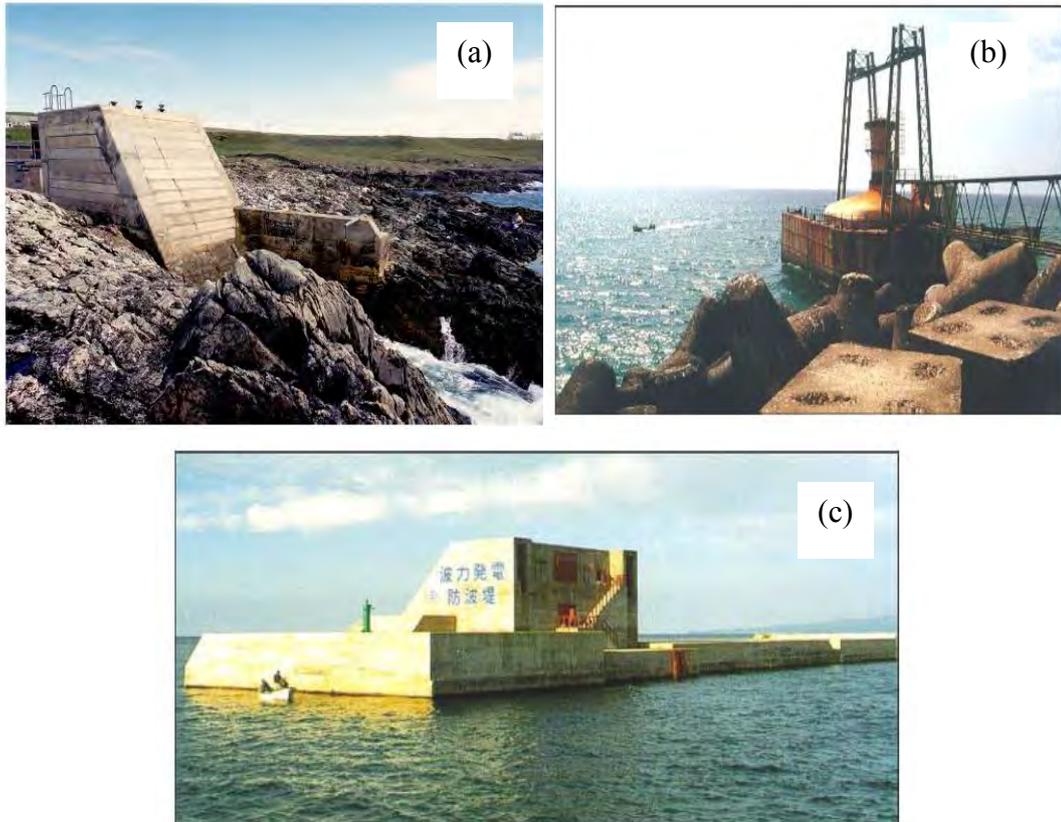
Pada tahun 2013, ada lebih dari seratus proyek di berbagai tahap perkembangan energi gelombang laut, seperti yang diperkirakan oleh beberapa ulasan baru-baru ini (Falcao, 2010; Bahaj, 2011). Ada berbagai macam teknologi energi gelombang. Setiap teknologi menggunakan solusi yang berbeda-beda untuk menyerap energi dari gelombang laut, hal ini tergantung pada kedalaman air dan lokasi (garis pantai, dekat pantai, lepas pantai) (Cruz,2008 ; Falcao, 2010).



Gambar 2.1 Tata letak buoy navigasi Masuda. Bagian kanan memperlihatkan Rincian dari aliran udara melalui turbin dan meluruskan katup.

Sumber : Falcão and Henriques, 2016.

Sejauh ini perkembangan teknologi pemanfaatan energi gelombang laut menghasilkan daya listrik sebesar 10 MW, hal ini menjadi batu lompatan di setiap sektor komersial untuk melakukan penelitian selanjutnya untuk menemukan komponen dasar untuk mengurangi biaya dan meningkatkan kinerja dari teknologi gelombang laut. Teknologi energi gelombang laut terdiri dari sejumlah komponen: 1) struktur dan penggerak utama yang menangkap energi gelombang, 2) *foundation* atau *mooring* menjaga struktur dan penggerak utama di lokasi, 3) sistem *Power Take-off* (PTO) dimana energi mekanik diubah menjadi energi listrik, dan 4) sistem kontrol untuk menjaga dan mengoptimalkan kinerja pada kondisi gelombang tertentu. Secara singkat perkembangan teknologi energi gelombang laut ditunjukkan berturut-turut sebagai berikut :



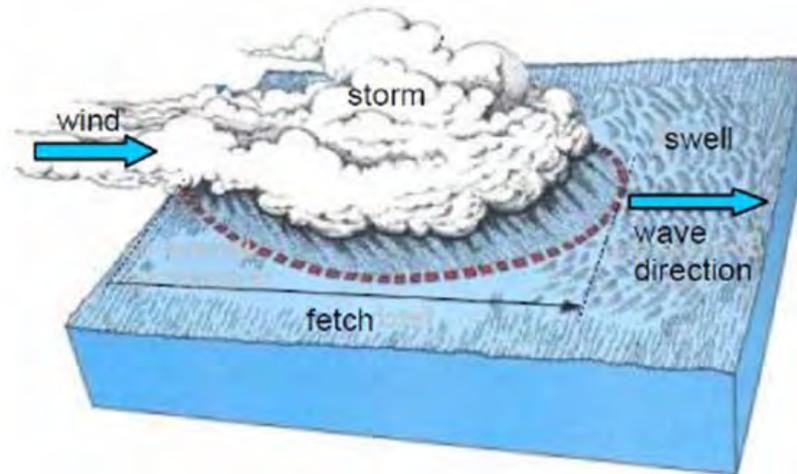
Gambar 2.2 (a) Shoreline OWC, 1991 di Pulau Skotlandia, Islay (75 kW).
 (b) Bottom-standing OWC 1990 di Trivandrum, India Selatan.
 (125 kW). (c) Pembangkit OWC diintegrasikan pemecah
 gelombang di Sakata harbour, Jepang, 1990. Daya Listrik 60 kW.
 Sumber : Falcão and Henriques, 2016.

Indonesia memiliki potensi pengembangan sumber daya kelautan yang sangat besar karena Indonesia adalah negara kepulauan terbesar di dunia (Dahuri, 1996). Salah satu potensi tersebut adalah potensi energi dari gelombang laut (Noerpamungkas dan Ulum, 2015). Pada tahun 2010, studi mengenai pembangkit listrik tenaga gelombang laut sistem bandulan atau yang dikenal dengan singkatan PLTGL-SB sebelumnya telah dilakukan oleh Zamrisyaf, dimana dalam Tahap I yang dilakukan adalah Kerja Laporan, Studi Pemodelan dan Simulasi PLTGL – SB, kerjasama antara Divisi Riset dan Pengembangan Perusahaan Listrik Negara dan Penelitian dan Pengabdian Sosial Institut Teknologi Sepuluh Nopember tahun 2010, dilakukan penelitian tentang PLTGL-SB ditingkatkan dengan menggunakan

ponton sebagai dasar gerakan pendulum. Ponton ditempatkan secara mendatar di atas permukaan air laut. Gelombang laut akan membuat ponton miring datar. Kemiringan ponton datar ini menyebabkan rotate pendulum yang mampu menjadi tenaga gerak untuk memutar generator untuk menghasilkan energi listrik (Noerpamungkas and Ulum, 2015). Dilanjutkan penelitian yang dilakukan (Adinurani et al., 2015) mengenai lokasi potensial pemanfaatan energi gelombang laut di Indonesia yaitu berada pada daerah Selatan Jawa, Papua dan Sumatera Barat dengan kisaran rata-rata ketinggian gelombang mencapai empat meter dan kecepatan arus bisa mencapai 3 m/s di Sulawesi Utara dan mungkin bervariasi dikisaran 0,5 m/s sampai 2 m/s di sebelah barat Pulau Sulawesi seperti Maluku, Papua Barat, Ternate, dan Pulau Seram.

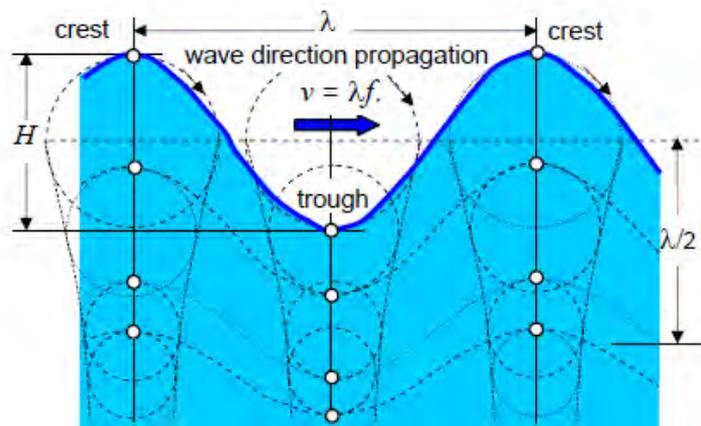
2.2 Gelombang Air Laut

Gelombang merupakan pergerakan naik turunnya air dengan arah tegak lurus permukaan laut yang membentuk kurva atau grafik sinusoidal (Faiqun, 2008). Gelombang di laut dapat dibedakan menjadi beberapa macam yang tergantung pada gaya pembangkitnya. Gelombang tersebut adalah gelombang angin yang dibangkitkan oleh tiupan angin di permukaan laut, gelombang pasang surut dibangkitkan oleh gaya tarik benda-benda langit terutama matahari dan bulan terhadap bumi, gelombang tsunami terjadi karena letusan gunung berapi atau gempa di laut, gelombang yang dibangkitkan oleh kapal yang bergerak, dan sebagainya (Triatmodjo, 1999). Gelombang yang sering terjadi di laut dan cukup penting adalah gelombang angin. Angin di atas lautan mentransfer energinya ke perairan, menyebabkan riak-riak, bukit, hingga kemudian berubah menjadi gelombang, berikut ilustrasikan gelombang yang terbentuk akibat angin ditunjukkan oleh (Gambar 2.3).



Gambar 2.3 Gelombang yang disebabkan oleh Angin. Sumber : Isnaini, 2016

Partikel-partikel air yang tertarik oleh angin membentuk lintasan lingkaran pada masing-masing titik yang mempunyai diameter paling besar pada permukaannya. Semakin dalam letaknya, maka diameternya akan semakin berkurang secara eksponensial. Rangkaian dari gerakan melingkar tersebut nantinya akan membentuk gelombang laut dan perambatannya, Gambar 2.4 menunjukkan sketsa definisi gelombang.



Gambar 2.4 Sketsa Definisi Gelombang. Sumber : Isnaini, 2016

Pada Gambar 2.4 menunjukkan suatu gelombang yang berada pada sistem koordinat x-y. Gelombang menjalar pada arah sumbu x (Triatmodjo, 1999). Beberapa notasi yang digunakan adalah:

- d : kedalaman laut (jarak antara muka air rerata dan dasar laut)
- H : tinggi gelombang = 2a
- a : amplitudo gelombang

L : panjang gelombang, yaitu jarak antara dua gelombang yang berurutan

C : kecepatan rambat gelombang = L/T

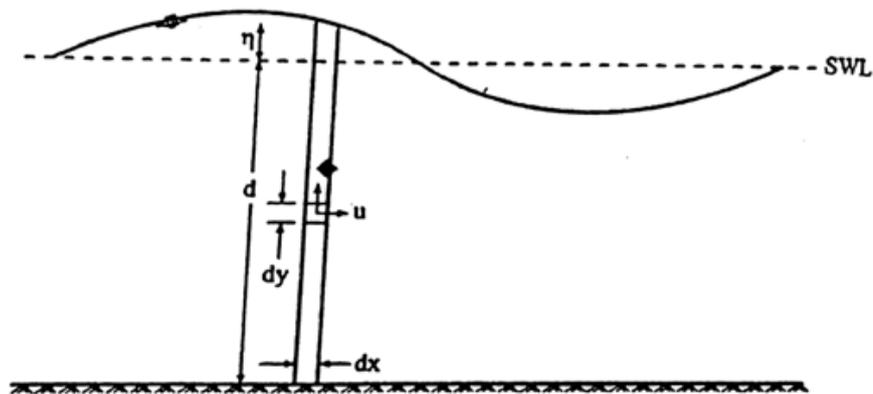
T : Periode gelombang,

σ : frekuensi gelombang = $2\pi/T$

2.3 Energi dan Daya Gelombang Laut

Energi gelombang laut disebabkan oleh perbedaan suhu antara permukaan air dan dasar laut (Adinurani et al., 2014). Energi total gelombang merupakan jumlah dari energi kinetik dan energi potensial gelombang. Energi kinetik adalah energi yang disebabkan oleh kecepatan partikel air karena adanya gerak gelombang. Energi potensial adalah energi yang dihasilkan oleh perpindahan muka air karena adanya gelombang.

Untuk teori gelombang *Airy*, jika energi potensial ditetapkan relatif terhadap muka air diam, dan semua gelombang menjalar dalam arah yang sama, maka komponen energi potensial dan kinetik adalah sama. Untuk menurunkan persamaan energi gelombang, dipandang suatu elemen berukuran dx , dy seperti terlihat pada Gambar 2.5



Gambar 2.5 Penurunan Energi Gelombang. Sumber : Triatmodjo,1999.

$$\begin{aligned} dE_k &= \frac{1}{2} dm V^2 \\ &= \frac{1}{2} \rho (u^2 + v^2) dx dy \end{aligned} \quad (2.1)$$

Energi kinetik dari gelombang adalah

$$E_k = \frac{\rho g H^2 L}{16} \quad (2.2)$$

Apabila energi potensial dari gelombang dikurangi oleh energi potensial dari massa air seperti ditunjukkan pada (Gambar 2.5), akan diperoleh energi potensial yang disebabkan oleh gerak gelombang. Dengan menggunakan dasar laut sebagai referensi, energi potensial yang ditimbulkan oleh satu panjang gelombang tiap satu satuan lebar puncak gelombang E_p adalah

$$E_p = \frac{\rho g H^2 L}{16} \quad (2.3)$$

Jadi, energi kinetik dan potensial adalah sama, dan energi total tiap satu satuan lebar adalah :

$$E = E_k + E_p = \frac{\rho g H^2 L}{8} \quad (2.4)$$

Energi gelombang adalah berubah dari satu titik ke titik yang lain sepanjang satu panjang gelombang, dan energi rerata satu satuan luas adalah

$$\bar{E} = \frac{\rho g H^2}{8} \quad (2.5)$$

Daya gelombang adalah energi gelombang tiap satu satuan waktu yang menjalar dalam arah penjarangan gelombang. Daya gelombang dapat ditulis sebagai hasil kali gaya yang bekerja pada bidang vertikal yang tegak lurus penjarangan gelombang dengan kecepatan partikel melintasi bidang tersebut (Triatmodjo, 1999). Untuk satu satuan lebar, daya gelombang rerata adalah :

$$P = \frac{\rho g H^2}{8} v \quad (2.6)$$

Menurut Kim Nielsen, hubungan antara panjang gelombang dan kecepatan dapat didekati dengan sebuah nilai, yaitu :

$$L = 1,56 T^2 \quad (2.7)$$

Dimana, L adalah panjang gelombang (m) dan T adalah periode (s).

Adapun kecepatan gelombang datang (C) :

$$C = \frac{L}{T} \quad (2.8)$$

Sehingga persamaan (2.6) menjadi

$$P = \frac{\rho g H^2 L}{8 T} \quad (2.9)$$

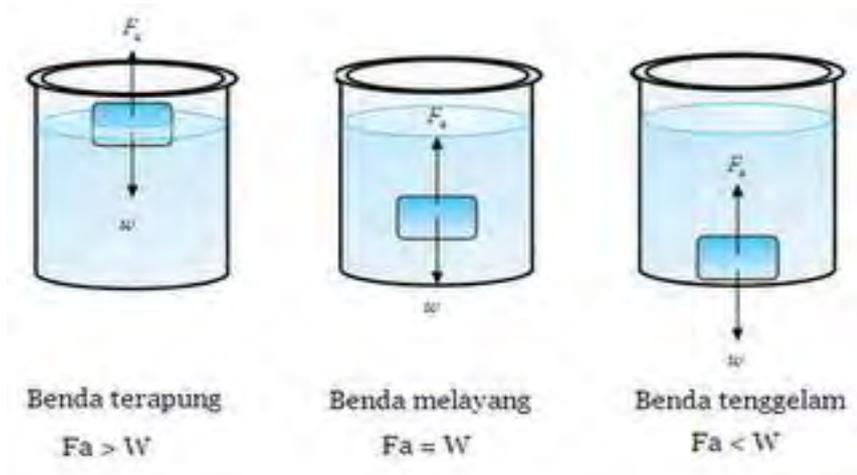
Dengan P adalah daya gelombang (J/s), ρ adalah masa jenis medium, L adalah panjang gelombang, C adalah kecepatan gelombang dan T adalah periode gelombang (Winawang, 2014).

2.4 Kesetimbangan Benda dalam Fluida

Benda-benda yang dimasukkan pada fluida tampaknya mempunyai berat yang lebih kecil dari pada saat berada di luar fluida tersebut. Pada benda terendam dalam zat cair diam terdapat

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

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



Gambar 2.6 Tiga Kondisi Kesetimbangan. Sumber : Isnaini, 2016

Pada Gambar 2.6 memperlihatkan tiga kondisi kesetimbangan suatu benda di dalam suatu fluida, dimana F_a adalah gaya apung dan W adalah berat benda

yang dipengaruhi gaya gravitasi bumi. Secara matematis dapat ditulis hubungan gaya apung dan berat benda adalah sebagai berikut :

$$W = m_b \times g \quad (2.10)$$

Dengan, W adalah berat benda (joule), m_b adalah massa benda dan g adalah percepatan gravitasi. Adapun persamaan gaya apung adalah :

$$F_a = m \times g \quad (2.11)$$

Berdasarkan persamaan (2.11) m merupakan massa fluida yang dipindahkan oleh benda berkaitan dengan massa jenis ρ (Kg/ m^3) dan volume benda V (m^3) dengan persamaan :

$$m = \rho \times V \quad (2.12)$$

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

- $F_a > W$: benda akan terapung
- $F_a < W$: benda akan tenggelam
- $F_a = W$: benda melayang (Isnaini, 2016).

2.5 Osilasi

Osilasi terjadi bila sebuah sistem diganggu dari posisi kesetimbangan stabilnya. Karakteristik gerak osilasi yang paling dikenal adalah gerak tersebut bersifat periodik, yaitu berulang-ulang (Young, 2002).

2.5.1 Gerak Harmonik Sederhana

Setiap gerak yang berulang dalam selang waktu yang sama disebut gerak periodik. Bila suatu benda bergerak bolak balik terhadap suatu titik tertentu, maka benda tersebut dinamakan bergetar, atau benda tersebut bergetar (vibrasi). Dalam ilmu fisika dasar, terdapat beberapa kasus bergetar, diantaranya adalah gerak harmonik sederhana. Gerak Harmonik Sederhana (GHS) adalah gerak periodik dengan lintasan yang selalu sama panjang (Sarojo,A.G, 2002). GHS terjadi karena adanya gaya pemulih (*restoring force*), dinamakan gaya pemulih karena gaya ini selalu melawan perubahan posisi benda agar kembali ke titik setimbang. Gerak harmonik sederhana (GHS) dapat merupakan gerak yang tergantung pada bentuk

lintasan, dibawah pengaruh gaya atau berputar dibawah pengaruh momen gaya atau kopel yaitu gerak linier dan angular.

Parameter-parameter dalam getaran :

- Amplitudo

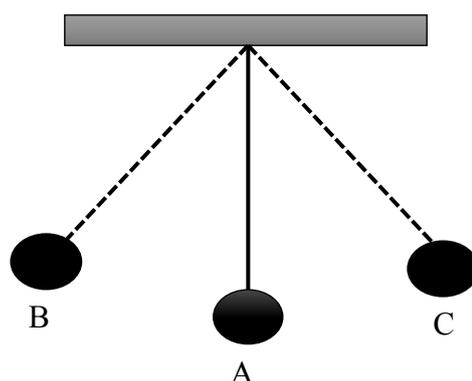
Amplitudo adalah besarnya simpangan maksimum dari gerakan. Amplitudo juga dapat didefinisikan sebagai jarak terjauh dari garis kesetimbangan dalam gelombang sinusoide dihitung dari kedudukan seimbang (Gambar 2.7). Massa pendulum yang bergerak bolak balik dari titik A menuju titik B melalui titik kesetimbangannya (*rest position*). Titik A dan titik B adalah simpangan maksimum dari getaran pendulum, maka jarak A menuju B adalah amplitude getaran bandul.

- Periode (T)

Periode suatu sistem yang bergetar adalah waktu yang diperlukan untuk melakukan satu getaran lengkap. Waktu ini adalah waktu total untuk melakukan gerak bolak-balik. Satuan SI untuk Periode (T) adalah detik (s).

- Frekuensi (f)

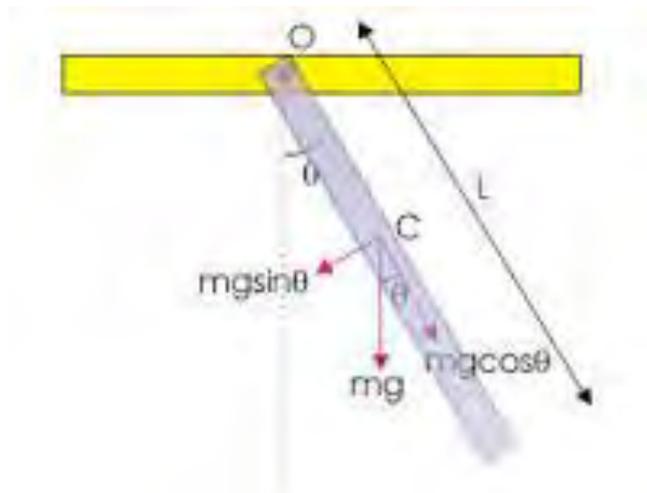
Frekuensi adalah jumlah getaran yang dilakukan dalam waktu satu detik. Karena t adalah waktu untuk melakukan satu getaran, maka $f = 1/T$. Satuan SI untuk frekuensi adalah putaran (cycle) per detik, atau *hertz* (Hz).



Gambar 2.7 Gerakan Ayunan pada Bandul

2.5.2 Bandul

Contoh gerak osilasi yang terkenal ialah gerak osilasi bandul. Gerak bandul merupakan gerak harmonik sederhana hanya jika amplitudo geraknya kecil (Tipler, 1991). Sembarang benda tegar yang digantungkan sehingga benda dapat berayun dalam bidang vertikal terhadap sumbu yang melalui benda tersebut disebut bandul fisis (Halliday, 1996). Bandul fisis ini berupa sebuah benda tegar yang diayunkan pada suatu sumbu ayun tertentu lihat Gambar 2.8. titik sumbu ayun pada benda sering dinamakan *Pivot* (titik O pada Gambar 2.8).



Gambar 2.8 Skema Bandul Fisis.

Dimana; Titik O adalah sumbu bandul, C adalah pusat massa, L adalah panjang benda, yang menyebabkan bandul berayun adalah torsi atau momen gaya, yaitu

$$\tau = m g l \sin\theta \quad (2.13)$$

Dengan m adalah massa benda tegar, g percepatan gravitasi dan I adalah jarak sumbu putar terhadap pusat masa benda tegar. Seperti pada kasus bandul sederhana, bila simpangan bandul kecil, maka $\sin \theta \approx \theta$.

Periode getaran bandul tersebut adalah

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}} \quad (2.14)$$

Dan frekuensi adalah

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{L}} \quad (2.15)$$

selanjutnya untuk menghitung kecepatan sudut yaitu

$$\omega = 2\pi f \quad (2.16)$$

Dengan ω merupakan kecepatan sudut putar bandul (rad/s).

Menurut persamaan 2.14 makin panjang tali, makin besar periode dimana periode tidak bergantung pada massa. Hal ini berlaku karena gaya pemulih berbanding lurus dengan massa. Perhatikan bahwa periode dan frekuensi tidak bergantung pada amplitudo osilasi, segi umum gerak harmonik sederhana (Tipler, 1991). Percepatan gravitasi dengan mudah dapat diukur dengan menggunakan bandul. Secara matematis dapat ditulis sebagai berikut :

$$g = 4 \pi^2 \cdot L/T^2 \quad (2.17)$$

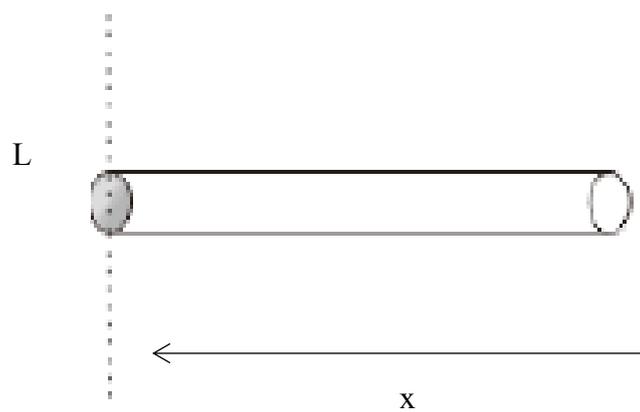
berdasarkan Persamaan 2.17 bila amplitudo getaran tidak kecil, gerak bandul bersifat periodik, namun tidak harmonik sederhana. Periode sedikit memiliki ketergantungan pada amplitudo (Tipler, 1991).

2.5.3 Momen Inersia

Momen inersia memiliki konsep yang sama dengan konsep masa yaitu suatu besaran yang merupakan karakteristik suatu benda dan berpengaruh dalam menentukan gerak benda. Misalnya : jika suatu benda diberi gaya maka percepatan benda tersebut sangat tergantung dari masa benda, semakin besar masa benda semakin kecil percepatan. Tetapi jika suatu benda diberi suatu gaya yang menyebabkan benda itu berputar lihat Gambar 2.9, percepatan putar benda tersebut sangat tergantung oleh suatu besaran, besaran inilah yang kita sebut momen inersia. Semakin besar momen inersia benda itu semakin lambat ia berputar. Berbeda dengan massa yang tidak tergantung dimana ia berada, momen inersia sangat tergantung pada letak pusat putaran benda. Momen inersia didefinisikan sebagai :

$$I = mr^2 \quad (2.18)$$

Momen Inersia suatu batang silinder, tergantung dimana batang itu diputar. Jika diputar diujung batang (lihat Gambar 2.9)

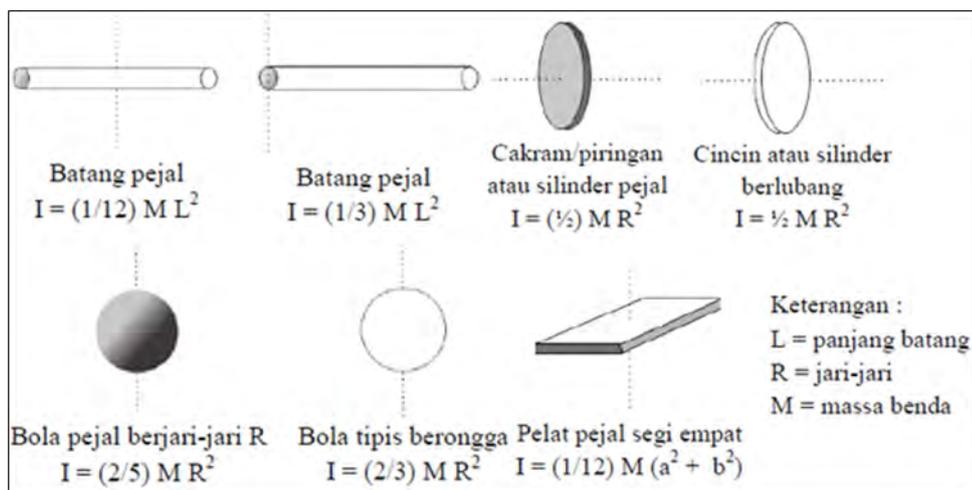


Gambar 2.9 Momen Inersia diputar diujung Batang Pejal

$$I = \int_0^L \frac{M}{L} x^2 dx \quad (2.19)$$

$$= \frac{1}{3} ML^2 \quad (2.20)$$

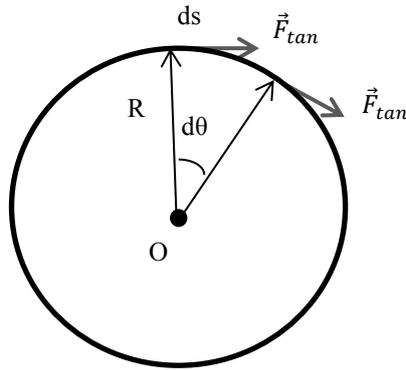
Dimana, I adalah momen inersia, M adalah masa benda dan L adalah panjang batang. Berikut momen inersia beberapa benda :



Gambar 2.10 Momen Inersia setiap Benda

2.5.4 Kerja dan Daya pada Gerak Rotasi Bandul

Ketika mengayuh pedal sepeda, ada gaya yang diberikan pada benda yang berputar dan melakukan kerja terhadapnya. Kerja yang bekerja pada benda dapat dinyatakan dengan torsi dan percepatan sudut (Young, 2002).



Gambar 2.11 Sebuah gaya tangensial yang bekerja pada sebuah benda berputar sedang melakukan kerja. Sumber : Young, 2002.

Anggaplah sebuah gaya tangensial \vec{F}_{tan} bekerja seperti pada Gambar 2.11 sejauh sudut $d\theta$ yang sangat kecil pada sumbu-tetap dalam suatu interval dt yang sangat kecil. Kerja dW yang dilakukan oleh gaya \vec{F}_{tan} ketika titik pada Gambar 2.11 bergeser sejauh ds adalah $dW = F_{tan} ds$. Jika $d\theta$ diukur dalam radian maka $dS = R d\theta$ dan

$$dW = F_{tan} R d\theta \quad (2.21)$$

Karena $F_{tan} R$ adalah torsi τ yang disebabkan oleh gaya \vec{F}_{tan} , maka

$$dW = \tau d\theta \quad (2.22)$$

Ketika torsi yang bekerja pada sebuah benda tegar yang berputar, energi kinetik akan berubah dengan jumlah yang sama dengan kerja yang dilakukan. Diketahui hubungan torsi dan momen inersia secara matematis adalah $\tau = I\alpha$, dengan menggunakan persamaan ini, diasumsikan bahwa benda bersifat tegar sehingga momen inersia I adalah konstan dapat ditulis sebagai berikut :

$$\tau d\theta = I \omega d\omega \quad (2.23)$$

Perubahan energi kinetik rotasi benda tegar sama dengan kerja yang diberikan oleh gaya-gaya yang berasal dari luar benda.

Hubungan daya dan kerja yang dilakukan oleh sebuah torsi yang bekerja pada benda yang berputar dengan selang waktu dt selama terjadinya perpindahan sudut dapat ditulis sebagai berikut:

$$\frac{dW}{dt} = \tau \frac{d\theta}{dt} \quad (2.24)$$

Namun, dW/dt adalah laju dalam melakukan kerja, atau daya P , dan $d\theta/dt$ adalah kecepatan sudut ω , sehingga

$$P = \tau\omega \quad (2.25)$$

Ketika sebuah torsi τ (terhadap sumbu putar) bekerja pada sebuah benda yang berputar dengan kecepatan sudut ω , dayanya (laju melakukan kerja) adalah hasil kali dari τ (N.m) dan ω (rad/s) (Young, 2002).

2.6 Daya Listrik

Daya listrik merepresentasikan laju perubahan energi yang dihasilkan oleh sebuah perangkat listrik, dari suatu bentuk energi ke bentuk energi lainnya (Bishop, 2004). Hubungan energi dan daya listrik dapat dilihat pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12 Masukan daya P untuk bagian rangkaian antara a dan b $P=V_{ab} I$.

Sumber : Young, 2003.

Pada Gambar 2.12 menyatakan sebuah elemen rangkaian dengan selisih potensial $V_a - V_b = V_{ab}$ diantara terminal-terminal dan arus I yang lewat melalui rangkaian itu dalam arah dari a menuju b . Elemen ini dapat berupa sebuah resistor, sebuah aki, atau apa saja; rinciannya tidak penting. Sewaktu muatan lewat melalui elemen rangkaian itu, medan listrik melakukan kerja pada muatan tersebut. Kerja dW yang dilakukan pada muatan ini adalah

$$\frac{dW}{dt} = P = (V_R)_{ef} \cdot I_{ef} \quad (2.26)$$

Usaha ini menyatakan energi listrik yang dipindahkan ke dalam elemen rangkaian. Laju perpindahan energi terhadap waktu adalah daya. Daya tersebut dihasilkan oleh tegangan efektif pada resistor akibat arus efektif, sehingga Persamaan 2.245 dapat menyatakan baik laju pengantaran energi ke sebuah elemen

rangkaian atau laju penarikan energi dalam elemen tersebut. Satuann V adalah satu volt, atau satu joule per coulumb, dan satuan I adalah satu ampere, atau satu coulumb per detik. Maka satuan VI adalah satu watt, seperti yang seharusnya:

$$(1(\text{J/c}) (1 \text{ C/s}) = 1 \text{ J/s} = 1 \text{ W}.$$

(Young, 2003).

2.6.1 Harga Efektif dan Harga Rata-rata Arus dan Tegangan

Pada dasarnya kegunaan setiap rangkaian listrik adalah untuk menyalurkan daya, yang mana besarnya berbanding lurus dengan hasil kali tegangan dan arusnya (Santoso,dkk. 2013). Secara umum harga efektif selalu dipergunakan untuk menyatakan besar arus dan tegangan. Dalam arus bolak-balik dikenal pengertian arus efektif dan tegangan efektif. Harga efektif dari arus AC (I_{ef}) adalah sama dengan arus searah yang menimbulkan panas yang sama dalam resistor yang sama dalam suatu perioda atau interval waktu yang sama dibanding panas dari arus bolak-balik (Santoso,dkk. 2013).

Harga efektif arus dan tegangan secara matematis dapat ditulis :

$$I_{ef} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad (2.27)$$

$$V_{ef} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad (2.28)$$

Dengan, I_{ef} adalah arus efektif dan V_{ef} adalah tegangan efektif.

BAB 3

METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini dirancang bangun sebuah prototipe generator listrik tenaga gelombang permukaan air laut 1 watt dengan sistem bandul arah vertikal, daya listrik yang dihasilkan prototipe digunakan untuk menyuplai perangkat elektrik pada sistem detektor tsunami YONOHAPE di laut.

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode eksperimen dengan pengujian secara onshore maupun offshore (Rudianto, 2013; Anarki, 2015).

3.1 Prosedur Penelitian

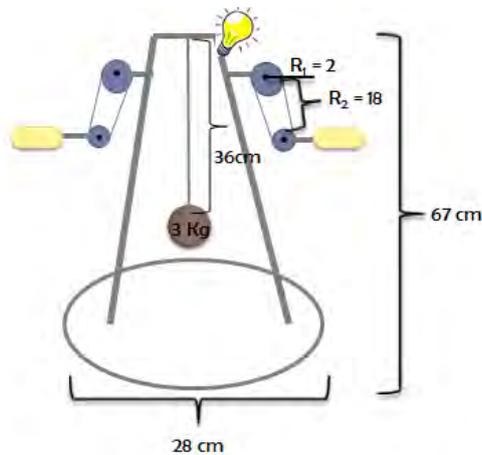
3.1.1 Tahap Persiapan

Dalam penelitian ini dimulai dengan persiapan alat dan bahan serta melakukan spesifikasi alat pada bandul maupun ponton yang digunakan dalam mekanisme prototipe generator listrik sistem bandul.

- **Dimensi Bandul**

Prototipe generator listrik memanfaatkan perilaku dinamika gerak benda yaitu gerak harmonik sederhana pada bandul. Daya yang dihasilkan osilasi bandul ditransmisikan sebagai tenaga penggerak untuk memutar generator sehingga menghasilkan daya listrik. Pembuatan bandul dilakukan berdasarkan analisa hasil pengukuran penelitian sebelumnya mengenai pengaruh panjang lengan bandul, massa bandul serta tinggi tiang penyangga bandul yang memberikan pengaruh signifikan terhadap gerak bandul (Junianto,S. dkk. 2013) (Isnaini, 2016).

Didalam penelitian ini bandul yang dirancang yaitu arah vertikal dengan massa dan panjang lengan bandul adalah konstan, yang dihubungkan dengan perangkat elektrik pada generator.

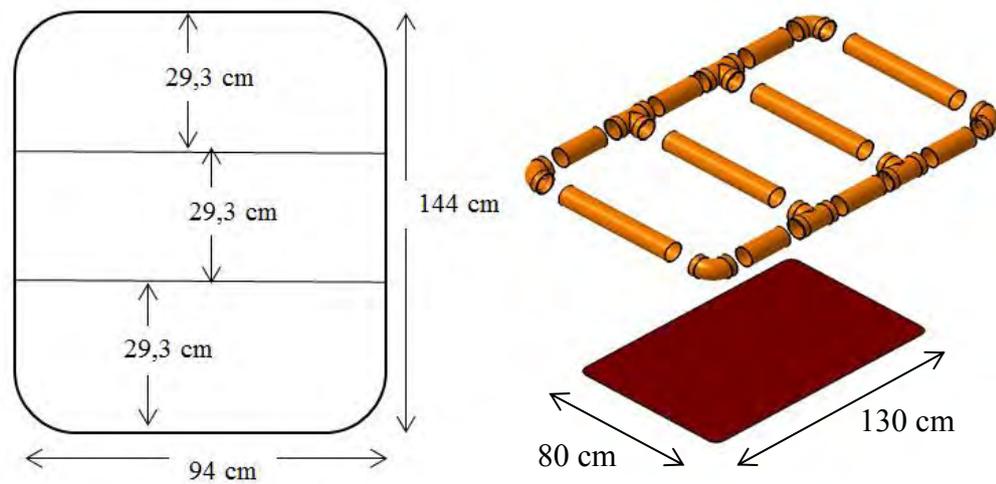


Gambar 3.1 Dimensi & Komponen elektrik Bandul

- **Dimensi Ponton atau Pelampung**

Pelampung atau ponton merupakan alat yang digunakan untuk meningkatkan efisiensi dari eksitasi energi gelombang permukaan air laut. Pergerakan ponton membutuhkan rancangan yang sesuai dalam resonansi gelombang dengan frekuensi tinggi (Kweon, 2013 dalam Isnaini, 2016). Sistem ponton atau pelampung dipilih sebagai solusi untuk menggantikan rakitan drum dalam penelitian sebelumnya sebagai penopang sistem bandul (Guntur, HL, dkk. 2014), bukan hanya sebagai penopang bandul tetapi design yang dirancang dengan harapan dapat menyerap energi atau momentum dari gelombang laut yaitu gerakan rotasi dan translasi (Mustofa, dkk. 2012). Dimensi ponton yang mampu menghasilkan ayunan terbesar pada tinggi gelombang yang terendah, dengan mengacu pada kondisi terburuk tersebut adalah dengan merancang ukuran dimensi ponton yang kecil dan mampu hanya memuat bandul dan peralatan pendukung kelistrikan, pada gelombang terkecil sudah mampu memberikan efek ayunan (Rudianto, dkk. 2013).

Didalam penelitian ini ponton yang dirancang adalah model ponton datar yang memiliki 3 kisi yang berfungsi untuk kestabilan ponton di atas air.



Gambar 3.2 *Part Assembly* dan Geometri Ponton Datar

3.1.2 Tahap Perancangan

Tahap perancangan sistem prototipe Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut (PLTGL) dibagi dalam 2 tahap. Tahap pertama yaitu desain ponton dan tahap kedua yaitu desain bandul.

- **Dimensi Ponton**

Desain ponton yaitu berbentuk datar dengan 3 kisi yang berfungsi sebagai titik kestabilan ponton pada saat terkena gaya eksitasi dari gelombang. Dimensi dalam pembuatan ponton dalam penelitian ini dipakai standar YONOHAPE. Untuk lebih jelas hasil perancangan model ponton dan spesifikasi dimensi ponton adalah sebagai berikut :

Tabel 3.1 Spesifikasi Ukuran Ponton

Item	Besar	Satuan	Keterangan
Panjang	144	centimeter	
Lebar	94	centimeter	
Tinggi	14	centimeter	
Berat	19	kilogram	
Masa Jenis Pipa PVC	1.390	Kg/m ³	
Percepatan Gravitasi	9,8	m/s ²	
Model			Datar

Pada tabel 3.1 merupakan spesifikasi ukuran ponton yang ditentukan dalam penelitian ini dan menjadi variabel-variabel yang diketahui untuk melakukan perhitungan secara teori. Berikut hasil aplikasi perancangan ponton dapat dilihat pada Gambar 3.3 :



(a)



(b)

Gambar 3.3 Ponton Datar (a) tampak samping (b) tampak atas

- **Dimensi Bandul**

Prototipe bandul arah vertikal yang telah dibuat dihubungkan dengan rangkaian listrik untuk menghasilkan gerakan yang digunakan untuk memutar generator terhadap daya listrik yang dihasilkan. Berikut ini adalah spesifikasi dari model pendulum yang telah dibuat :

Tabel 3.2 Spesifikasi Ukuran Bandul

Item	Besar	Satuan	Keterangan
Panjang lengan bandul	0,36	meter	-
Massa Bandul	3	kilogram	pemberat besi
Luas Penampang Penyangga Alat	0,28	meter	komponen alat terbuat dari besi
Tinggi alat	0,67	meter	diukur dari landasan sampai tiang atas
Konstruksi Bandul	18	kilogram	
Model	-	-	<i>Single Bandul</i>
Komponen elektrik	-	-	<i>Dioda Bridge KBU804, dinamo, lampu LED</i>
Flywheel	$R_1 = 2$ & $R_2 = 18$	centimeter	-

Pada Tabel 3.2 merupakan spesifikasi ukuran bandul yang ditentukan pada penelitian dan menjadi variabel-variabel yang diketahui untuk melakukan perhitungan secara teori. Hasil aplikasi perancangan bandul arah vertikal dapat dilihat pada Gambar 3.4 sebagai berikut :



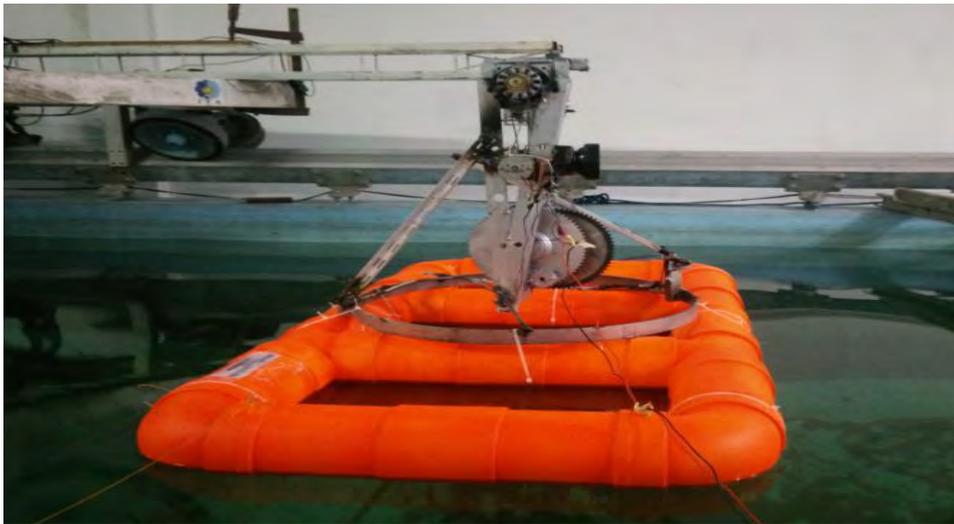
(a)



(b)

Gambar 3.4 Hasil Perancangan Bandul Arah Vertikal (a) tampak atas (b) tampak Samping.

Setelah masing-masing komponen dari prototipe generator listrik telah dibuat, digabungkan menjadi satu sistem prototipe generator listrik tenaga gelombang laut sistem bandul, yang dapat dilihat hasilnya pada Gambar 3.5 sebagai berikut :

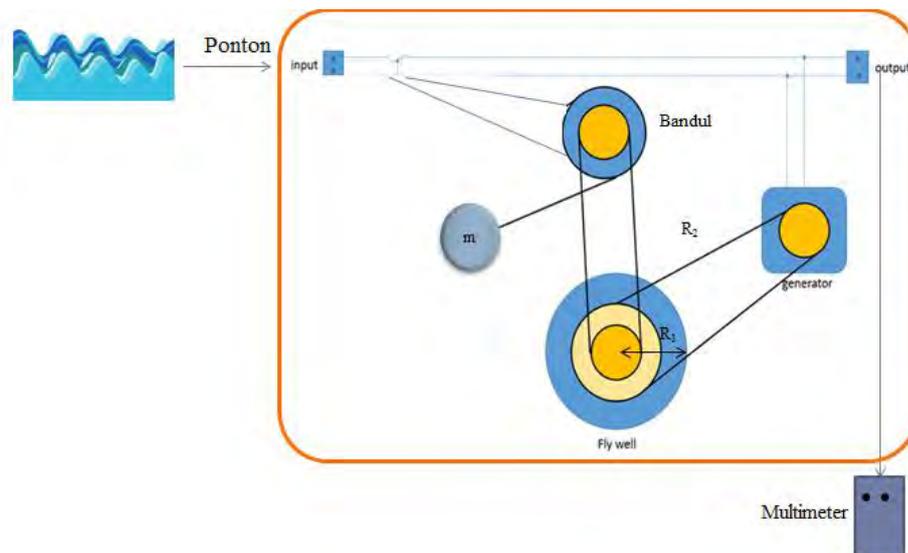


Gambar 3.5 Hasil Rancang Bangun Prototipe Generator Listrik

Diperoleh hasil perhitungan gaya apung sistem sebesar 716,97 joule dan gaya berat yang bekerja sebesar 362,6 joule. Maka, terlihat bahwa nilai gaya apung lebih besar dari gaya beratnya, sehingga mekanisme generator listrik dapat dilakukan uji coba di simulasi gelombang laut di Laboratorium Hidrodinamika karena dapat mengambang di atas air.

3.1.3 Tahap Pengujian

Mekanisme kerja dari prototipe bandul fisis yaitu adanya gerakan ayunan bandul yang ditransmisikan ke dalam gerakan putar untuk menggerakkan dinamo kemudian menghasilkan energi listrik (Novianarenti, dkk. 2013). Untuk lebih jelas mekanisme kerja prototipe generator listrik dapat dilihat pada Gambar 3.6 sebagai berikut :



Gambar 3.6 Mekanisme Kerja Prototipe Generator Listrik

Untuk melakukan pengukuran prototype generator listrik yang telah dirancang yang selanjutnya disebut mekanisme sistem dibutuhkan beberapa peralatan pengujian antara lain :

1. *Towing tank*

Tangki yang digunakan untuk pengujian sistem dibuat dengan skala laboratorium yang hasilnya akan diproyeksikan ke skala lapangan, ukuran panjang, lebar dan kedalaman tangki berturut-turut adalah 50 m, 3 m dan 2 m. mekanisme pembuat gelombang menggunakan alat pembangkit gelombang pada ujung porosnya dengan input berupa amplitudo dan periode gelombang, satuan centimeter.

2. Alat ukur Multimeter digital HELES UX369C.

Multimeter adalah meter listrik yang dapat digunakan untuk mengukur baik tegangan DC maupun tegangan AC, kuat arus DC serta besar tahanan. Dalam penelitian ini digunakan untuk merekam data tegangan bangkitan generator terhadap waktu berupa angka yang dibaca pada layar, (Gambar 3.7).



Gambar 3.7 Digital Multimeter tipe UX-369C

3.1.4 Tahap Pengambilan Data

Didalam tahap ini, pengambilan data pada saat pengukuran terbagi menjadi dua tahap yaitu tahap pertama menggunakan metode onshore dan tahap kedua yaitu menggunakan metode offshore.

Pengujian onshore dilakukan untuk mencari kemampuan putar bandul bila diputar langsung (secara manual dengan tangan) (Rudianto, 2013). Variabel yang divariasikan pada pengujian ini adalah sudut simpangan bandul yaitu $15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ dan 90° , dengan mengamati daya bandul yang dihasilkan mampu untuk memutar generator dan menghasilkan daya listrik. Pengujian onshore prototipe generator listrik dilakukan di laboratorium Optik dan Elektronika, Fisika ITS.

Pengujian off-shore dilakukan untuk menguji seberapa besar pengaruh eksitasi gelombang terhadap daya osilasi pada bandul sehingga dapat menghasilkan daya listrik. Variabel yang divariasikan pada pengujian ini adalah variasi kondisi gelombang berupa amplitudo yang dalam kasus ini dinyatakan dalam *displacement* dan periode gelombang, untuk lebih jelasnya variasi yang dilakukan adalah sebagai berikut :

Variasi amplitudo gelombang dalam penelitian ini ada 3 kondisi yaitu :

- a. Amplitudo $A_1 = 3 \text{ cm}$
- b. Amplitudo $A_2 = 4 \text{ cm}$

c. Amplitudo $A_3 = 5$ cm

Sedangkan variasi periode gelombang pada penelitian ini ada 2 kondisi yaitu :

a. Periode $T_1 = 0,9$ sekon

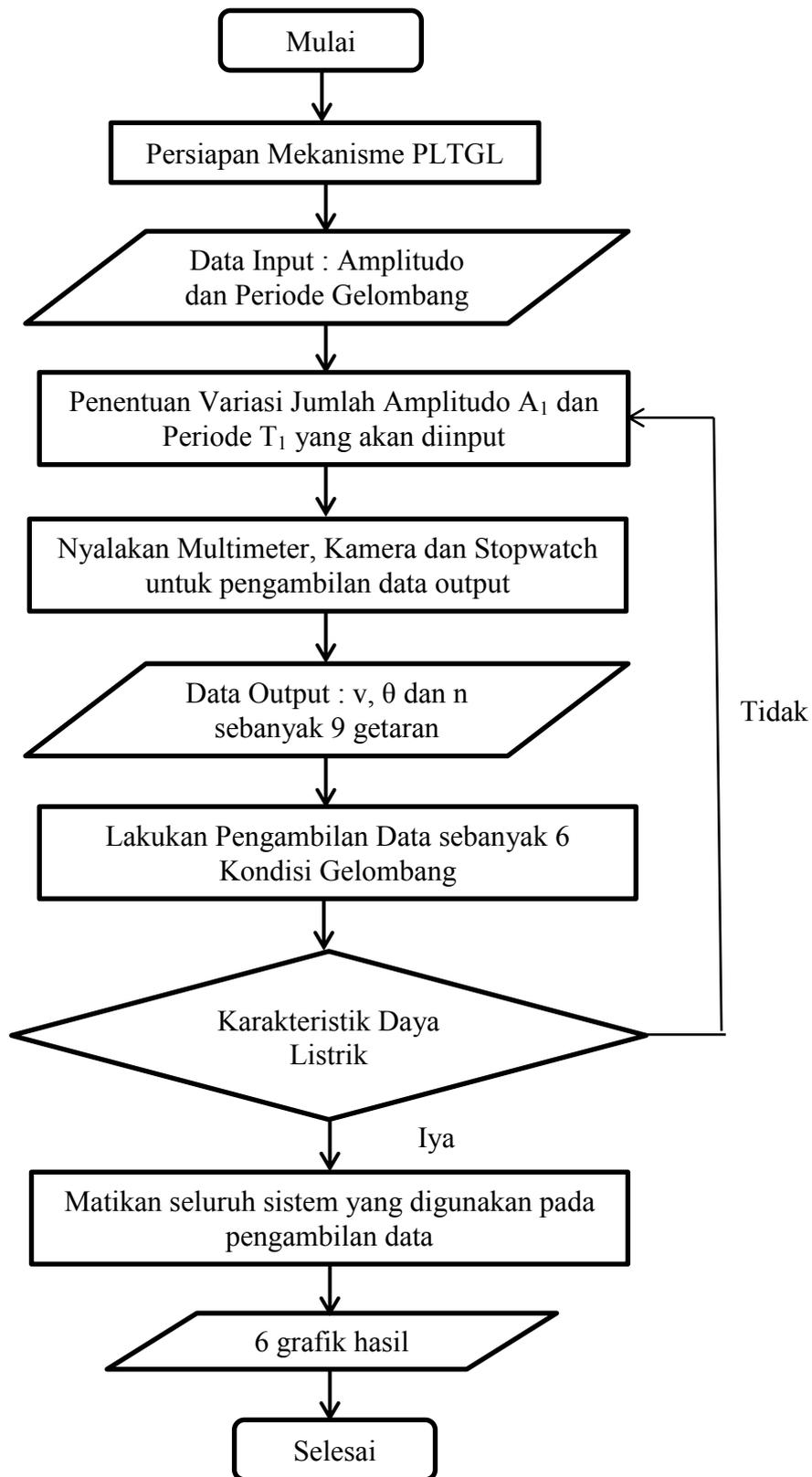
b. Periode $T_2 = 1,5$ sekon

Berikut tabel pengambilan data pengukuran pada metode offshore :

Tabel 3.3 Contoh Tabel Data Pengukuran

Uji Ke-	Amplitudo (cm)	Periode (s)
1	3	0,9
2	4	0,9
3	5	0,9
4	3	1,5
5	4	1,5
6	5	1,5

Pengujian offshore dilakukan di Laboratorium Hidrodinamika, Teknik Perkapalan ITS. Sehingga untuk mencapai tujuan dari penelitian ini maka dilakukan tahapan-tahapan yang ditunjukkan pada diagram alir penelitian sebagai berikut :



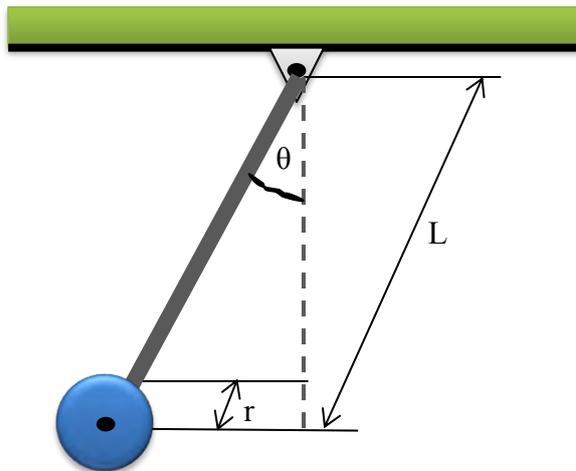
Gambar 3.8 Diagram Alir Pengambilan Data Metode *Offshore*

Hasil yang diperoleh baik metode onshore maupun offshore yaitu berupa video osilasi bandul dan video hasil pengukuran arus dan tegangan bangkitan dari alat ukur multimeter.

3.2 Analisis dan Pengolahan Data

Pada penelitian ini dilakukan analisa parameter-parameter berupa daya mekanik bandul, daya gelombang laut simulasi dan daya listrik yang dihasilkan dari prototipe generator listrik. untuk mengetahui hubungan variabel yang mempengaruhi parameter-parameter tersebut maka ditinjau baik berdasarkan pengukuran dan perhitungan secara teori.

Pengambilan data pada pengujian onshore maupun offshore dengan variasi yang dilakukan, hubungan sudut simpangan bandul dengan daya mekanik bandul secara matematis dapat diketahui menggunakan persamaan (2.25), sebelumnya dapat dilihat sketsa gerak bandul pada Gambar 3.9 :



Gambar 3.9 Sketsa Bandul

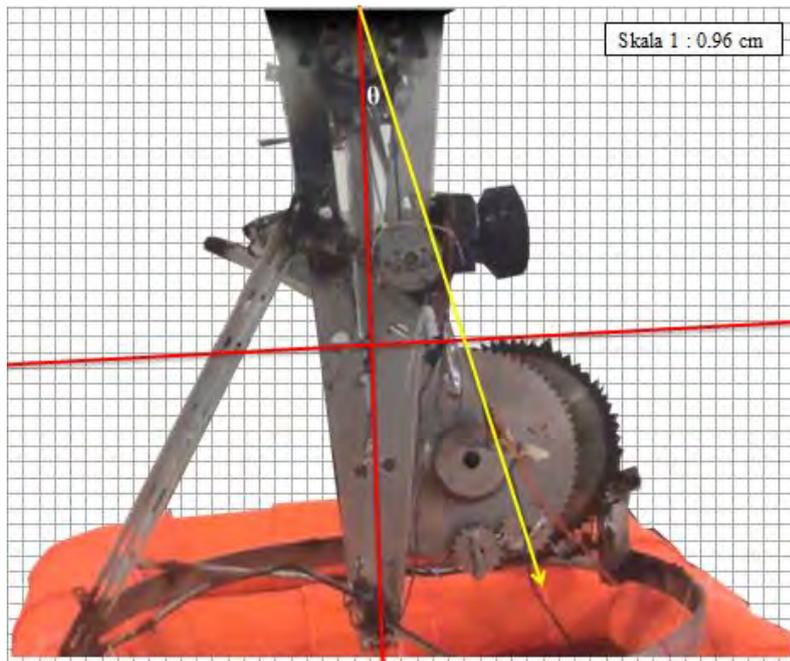
Parameter daya gelombang eksitasi dapat dihitung menggunakan persamaan (2.9) dan parameter daya listrik dapat dihitung menggunakan persamaan (2.26).

Suatu sistem mekanisme alat yang effisiensinya baik yaitu jika *losses* yang dihasilkan adalah kecil, *losses* disini berkaitan dengan daya input dan output dari alat tersebut. Oleh sebab itu, dalam penelitian ini juga dilakukan perhitungan nilai effisiensi prototipe generator listrik. effisiensi prototipe generator listrik pada penelitian ini adalah sebuah besaran yang menunjukkan hubungan antara *supply* daya masuk ke dalam prototipe generator berupa daya mekanik bandul dengan

daya keluaran yang dihasilkan berupa daya listrik. Secara matematis untuk menghitung efisiensi menggunakan persamaan sebagai berikut :

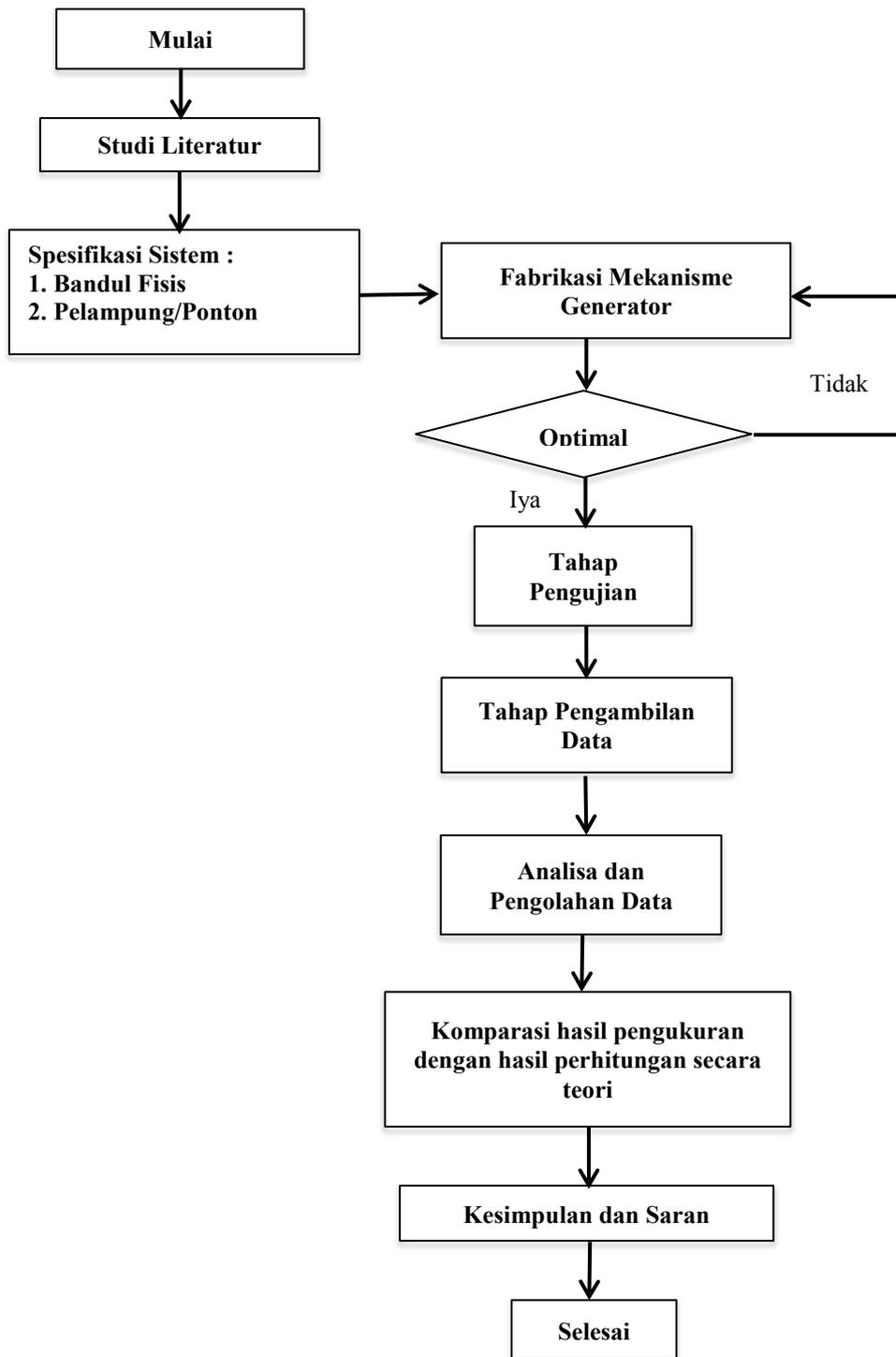
$$Efisiensi = \frac{Daya\ output}{Daya\ input} \times 100\% \quad (3.1)$$

Data yang diperoleh telah disebutkan pada Subbab 3.1.4 diolah menggunakan *Software Corel Video Studio Pro X8* untuk memperoleh data simpangan bandul, contoh pengolahan dan analisa video untuk menghasilkan nilai simpangan sudut bandul dapat dilihat pada (Gambar 3.10). Setelah diperoleh data simpangan pendulum dilakukan perhitungan parameter-parameter getaran berupa frekuensi, periode, kecepatan sudut, torsi dan momen inersia. Setelah itu, untuk data tegangan bangkitan yang dihasilkan diolah menggunakan *Graphical Analysis 3.8.4* dan *Microsoft Excell* yang disajikan dalam bentuk tabel dan grafik yang dapat merepresentasikan data-data tersebut dan dianalisa berdasarkan persamaan yang mengacu pada teori yang ada.



Gambar 3.10 Contoh Pengolahan Data Simpangan Sudut Bandul

Untuk lebih jelasnya prosedur kerja yang dilakukan dalam penelitian ini dapat dilihat pada diagram alir berikut ini :



Gambar 3. 11 Diagram Alir Penelitian

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dianalisa data hasil pengukuran dan perhitungan masing-masing parameter yang dihasilkan dari prototipe generator listrik tenaga gelombang laut hasil simulasi gelombang eksitasi menggunakan metode onshore dan offshore.

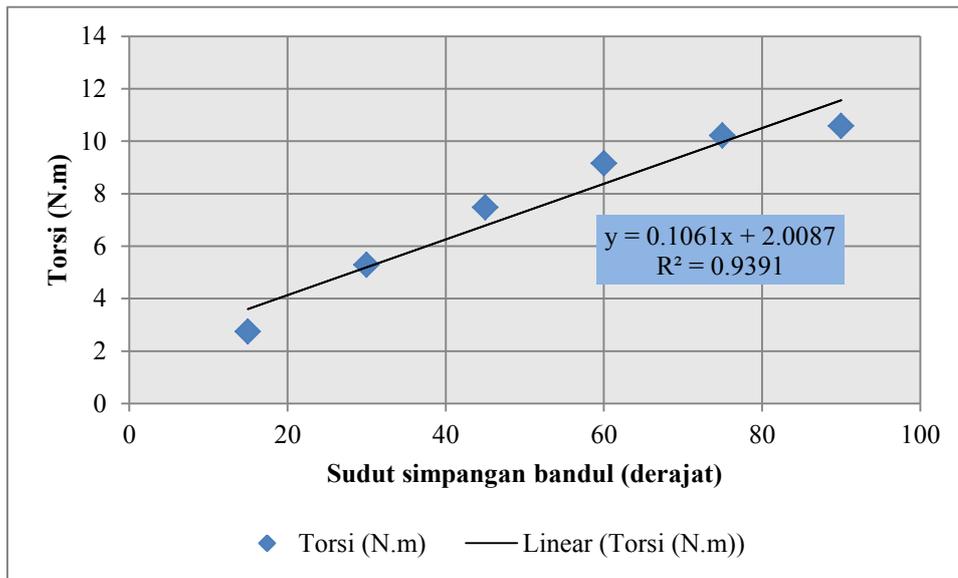
1.1 Metode Onshore

Pengukuran menggunakan metode onshore yang telah disebutkan pada Subbab 3.1.4 bertujuan untuk menganalisa hubungan daya bandul yang dihasilkan berdasarkan variasi sudut simpangan bandul terhadap daya listrik keluaran dari mekanisme prototipe generator.

1.1.1 Pengaruh Variabel terhadap Daya Bandul

Prototipe generator listrik yang dirancang memiliki dimensi ukuran untuk setiap masing-masing komponen yang dapat dilihat pada Subbab 3.1.2 sebagai parameter yang diketahui untuk melakukan perhitungan. Penentuan parameter bandul yaitu dengan massa bandul 3 kg, panjang lengan 36 cm dan variasi yang dilakukan yaitu sudut simpangan awal sebesar 90°, 75°, 60°, 45°, 30° dan 15°. Dalam kasus ini, dengan mengabaikan gaya gesekan yang terjadi pada saat osilasi dan mengasumsikan bahwa sudut simpangan bandul terbatas dapat bergerak maksimum pada $\frac{1}{2}$ putaran atau 90 derajat. Adapun input dari osilasi bandul berupa torsi dan kecepatan sudut yang dapat dihitung menggunakan Persamaan (2.13) dan (2.16). Hasil perhitungan nilai torsi dan kecepatan sudut digunakan untuk mengetahui daya bandul menggunakan persamaan (2.25), dimana hasil perhitungan daya bandul dapat dilihat pada Lampiran E.

Semakin besar sudut bandul yang terbentuk maka semakin besar pula nilai torsi yang dihasilkan (Hadi and Fitri, 2014). Hal ini dapat dilihat pada grafik hubungan torsi dan simpangan bandul sebagai berikut :

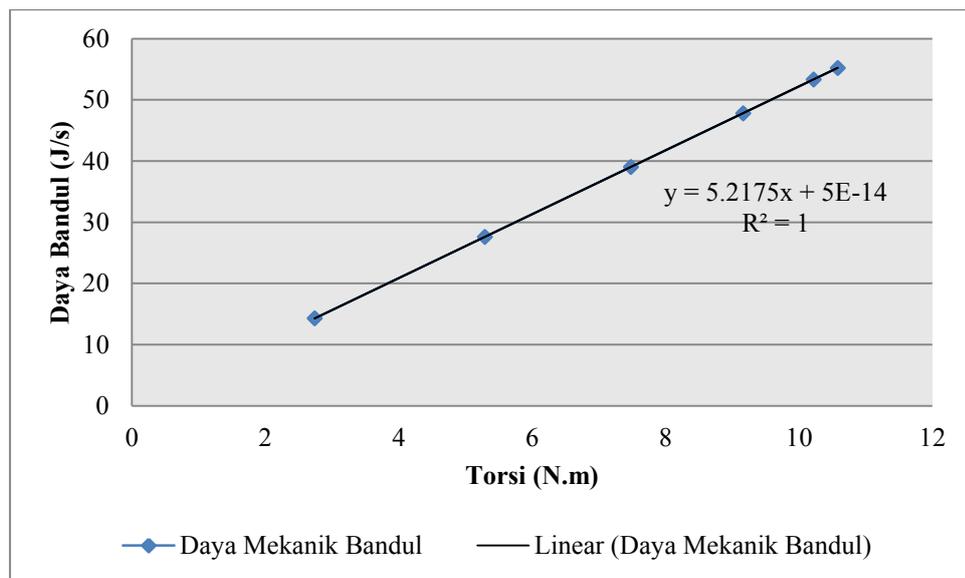


Gambar 4.1 Hubungan Torsi dan Sudut simpangan Bandul

Pada Gambar 4.1 dapat dilihat bahwa hubungan torsi dan sudut simpangan bandul membentuk grafik linier, yang berarti bahwa semakin besar sudut simpangan bandul maka torsi yang dihasilkan semakin besar yang membuat bandul memiliki kemampuan untuk melakukan gerak rotasi, adapun hasil momen gaya atau torsi yang dihasilkan maksimum pada sudut simpangan 90 derajat yaitu sebesar 10,58 N.m dan minimum pada sudut 15 derajat yaitu sebesar 2,74 N.m. Persamaan garis yang dihasilkan berdasarkan grafik pada Gambar 4.1 yaitu $y = 0,1061x + 2,0087$ dimana variabel y menyatakan torsi dan variabel x menyatakan sudut simpangan bandul dalam satuan derajat. Akurasi data pengukuran dapat dilihat dari hubungan parameter torsi dan sudut simpangan membentuk nilai regresi sebesar 0,9391 untuk 6 sampel. Setelah mengetahui besarnya torsi yang dihasilkan, maka dilakukan analisa momen inersia dari bandul yang berkaitan dengan gaya gesek yang bekerja pada bandul. Pada persamaan (2.15) menyatakan bahwa frekuensi bandul bergantung pada panjang lengan bandul, dalam penelitian ini panjang lengan bandul adalah konstan, sehingga nilai momen inersia dan kecepatan sudut yang dihasilkan juga adalah konstan. Hubungan torsi dan momen inersia secara matematis yaitu $\tau = I\alpha$, semakin kecil momen inersia suatu benda maka semakin cepat benda tersebut berputar, adapun hasil perhitungan momen inersia menggunakan Persamaan (2.20) yaitu sebesar $0,1764 \text{ kg.m}^2$, dengan momen inersia bandul yang konstan maka dapat dihitung nilai kecepatan sudut

bandul yaitu sebesar 5,5 rad/s. berdasarkan hasil yang diperoleh bahwa nilai momen inersia dan kecepatan sudut bandul adalah konstan maka memperlihatkan bahwa bandul yang digunakan adalah termasuk benda fisis atau tegar.

Setelah diperoleh nilai torsi dan kecepatan putar bandul sebagai parameter diketahui untuk melakukan perhitungan daya mekanik bandul. Adapun perhitungan daya mekanik bandul adalah dengan menggunakan persamaan (2.25). Hubungan daya bandul dengan torsi adalah sebagai berikut :



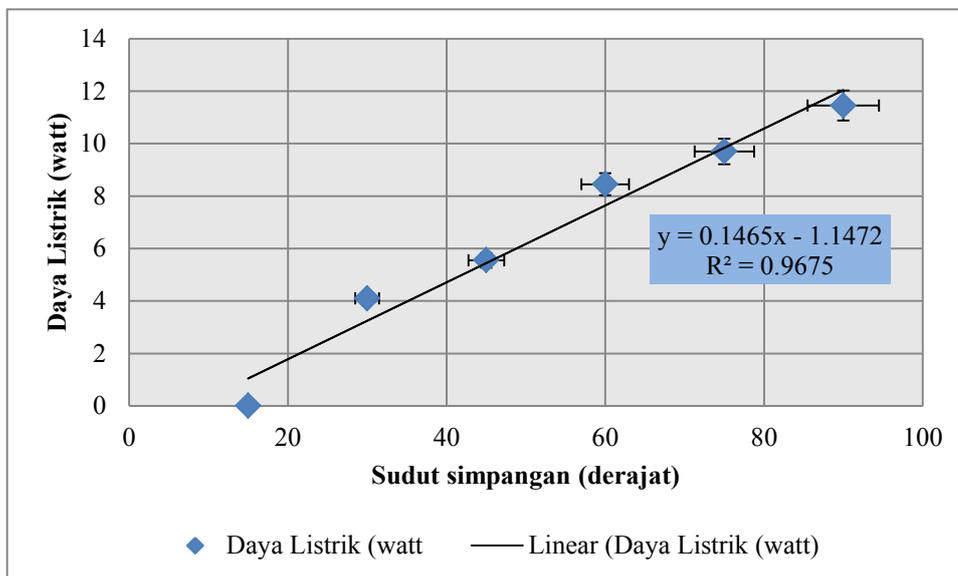
Gambar 4.2 Hubungan Torsi dan Daya Mekanik Bandul.

Pada Gambar 4.2 hubungan torsi dan daya mekanik bandul memperlihatkan grafik linier, berdasarkan persamaan (2.25) menyatakan bahwa semakin besar nilai torsi maka daya mekanik bandul semakin besar hal ini ditunjukkan pada Gambar 4.3 bahwa nilai daya mekanik bandul terbesar yaitu sebesar 5,22 J/s dan daya mekanik bandul minimum sebesar 14,29 J/s. Daya mekanik dari bandul ini yang digunakan untuk memutar generator sehingga menghasilkan daya listrik, untuk lebih jelasnya data hasil perhitungan daya bandul dapat dilihat pada Lampiran E.

1.1.2 Pengaruh Variabel terhadap Daya Listrik

Pengambilan data tegangan dan arus pada penelitian ini merupakan nilai efektif untuk setiap parameter. Hasil yang diperoleh diolah menggunakan persamaan (2.26) untuk mendapatkan daya listrik yang dihasilkan dari mekanisme

prototipe generator listrik. Berikut grafik hubungan sudut simpangan bandul dan daya listrik yang dihasilkan mekanisme prototipe generator listrik sistem bandul :



Gambar 4.3 Hubungan Daya Listrik dengan Sudut Simpangan Bandul

Pada Gambar 4.3 memperlihatkan pengaruh perubahan sudut simpangan bandul yang membentuk grafik linier terhadap daya listrik, hal ini berarti bahwa semakin besar sudut simpangan bandul maka daya mekanis bandul yang dihasilkan juga besar, daya mekanik bandul ini yang digunakan untuk memutar dinamo untuk menghasilkan daya listrik. Daya listrik yang dihasilkan prototipe merupakan hasil perkalian arus efektif terhadap tegangan efektif, dimana dapat kita lihat dari grafik diatas bahwa nilai daya listrik terbesar pada sudut 90 derajat yaitu sebesar 55,2 watt dan mengalami penurunan daya listrik ketika sudut simpangan bandul semakin kecil. Pada prototipe generator listrik ini dirancang menggunakan dua dinamo ampere dimana pada sudut 30 derajat merupakan sudut yang minimum untuk dapat beroperasi dimana daya mekanik bandul yang dihasilkan mampu memutar dinamo untuk menghasilkan daya listrik minimum sebesar 4,1 watt hal ini menjadi acuan dalam menganalisa sudut simpangan bandul yang dihasilkan akibat eksitasi gelombang pada metode offshore yang akan dibahas selanjutnya.

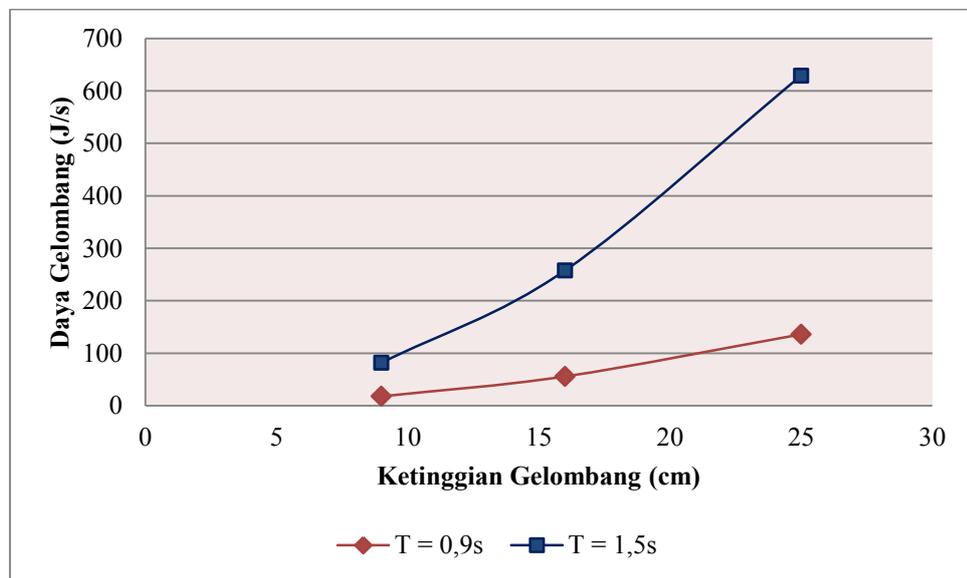
1.2 Metode Offshore

Pengukuran menggunakan metode offshore yang telah disebutkan pada Subbab 3.1.4 bertujuan untuk menganalisa pengaruh eksitasi simulasi tenaga gelombang laut terhadap daya listrik yang dihasilkan mekanisme prototipe generator listrik sistem bandul. Variasi yang dilakukan dalam metode offshore tidak memperhatikan respon gerak ponton, dengan asumsi yang diambil bahwa gerak ponton ketika menerima eksitasi tenaga gelombang yaitu gerakannya naik turun dimana arah gelombang datang tegak lurus muka ponton datar.

1.2.1 Pengaruh Variabel terhadap Daya Gelombang

Penentuan parameter gelombang dalam pengujian prototipe generator listrik di *towing tank* yaitu pada kedalaman air 1,8 m dengan variasi kondisi gelombang yang telah dibahas pada Subbab (3.1.4).

Secara teoritis kondisi variasi gelombang terhadap daya gelombang laut dapat dihitung menggunakan Persamaan (2.9). Hasil perhitungan daya gelombang air laut dapat dilihat pada Lampiran F. Berikut grafik hubungan Daya gelombang dengan kuadrat amplitudo gelombang.



Gambar 4.4 Hubungan Daya Gelombang dengan Ketinggian Gelombang Air Laut di *Towing tank*.

Pada Gambar 4.4 memperlihatkan bahwa daya gelombang laut berdasarkan fungsi amplitudo kuadrat, merupakan grafik linier, yang berarti daya energi

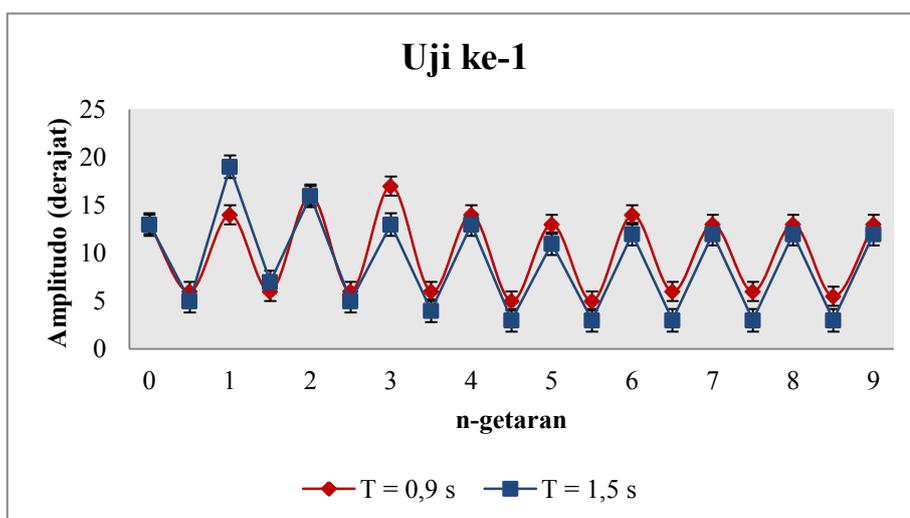
gelombang laut bertambah terhadap amplitudo kuadrat gelombang secara linier. Hal ini dapat dilihat pada ketinggian gelombang 25 cm dan periode gelombang sebesar 1,5 sekon menghasilkan daya gelombang laut maksimum hasil simulasi sebesar 628,8 J/s.

Jenis gelombang yang digunakan dalam penelitian ini yaitu jenis gelombang reguler dimana untuk arah datangnya gelombang, massa gelombang dan kecepatan gelombang adalah konstan, pada kenyataannya dilapangan yang dijumpai adalah gelombang irreguler, dimana arah datang gelombang dari berbagai arah yang dapat memberikan pengaruh terhadap besar kecilnya daya gelombang air laut.

1.2.2 Pengaruh Variabel terhadap Osilasi Bandul

Pengukuran dilakukan dengan arah osilasi bandul yaitu arah vertikal, arah ayunan bandul tegak lurus dengan arah datangnya gelombang, massa bandul yang digunakan sebesar 3 kg, panjang lengan 36 cm dan banyaknya getaran atau osilasi yang ditinjau selama pengukuran sebanyak 9 getaran. Data hasil pengukuran berupa video rekaman osilasi bandul yang diolah selanjutnya untuk mendapatkan nilai sudut simpangan bandul yang dihasilkan akibat eksitasi tenaga gelombang setiap variasi, data hasil pengukuran dapat dilihat pada Lampiran A . Berikut hasil pengolahan data pengukuran masing-masing variasi :

- Uji ke-1 dengan Amplitudo 3 cm

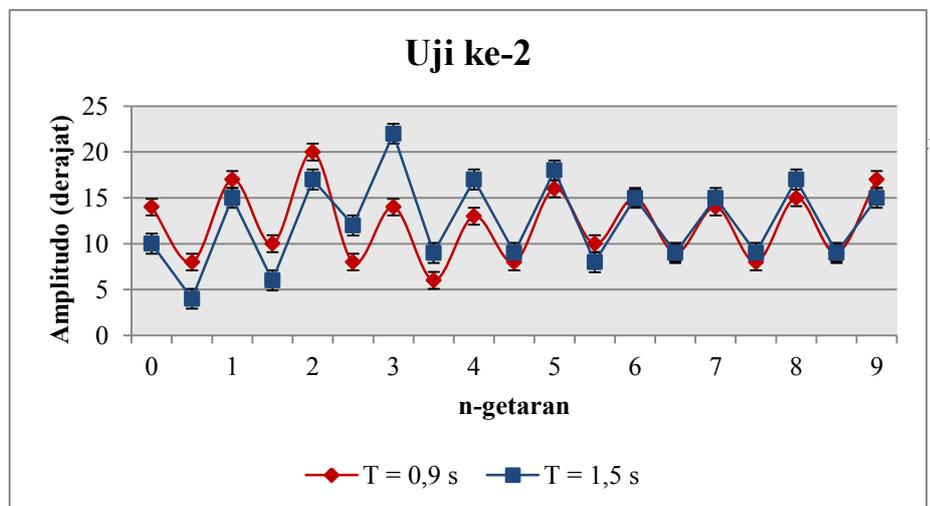


Gambar 4.5 Osilasi dari Bandul dengan Perubahan Periode Gelombang Uji Ke-1.

Dari Gambar 4.5 dapat dilihat adanya beberapa puncak dan lembah karakterisasi dari eksitasi daya gelombang pada sistem bandul. Pada uji ke-1 dapat dilihat memiliki panjang gelombang sebesar 6 panjang gelombang (λ) dan bandul berosilasi dengan sudut simpangan terbesar pada masing-masing periode eksitasi 0,9s dan 1,5s berturut-turut yaitu 17 derajat dan 19 derajat.

Hasil perhitungan kecepatan gerak bandul pada periode eksitasi natural yaitu 0,9s dan 1,5 s diperoleh nilai periode rata-rata bandul berturut-turut sebesar 1,2711s dan 2,150s. Hasil tersebut berpengaruh terhadap kecepatan gerak bandul, dimana berdasarkan hasil perhitungan diperoleh kecepatan gerak bandul rata-rata pada periode eksitasi 0,9s yaitu sebesar 4,94 rad/s sedangkan pada periode eksitasi 1,5 s yaitu sebesar 2,92 rad/s, Besarnya kecepatan sudut yang dicapai bandul saat berayun juga dapat dilihat dari kemiringan garis masing-masing periode gelombang eksitasi, untuk lebih jelasnya data hasil perhitungan dapat dilihat pada Lampiran F.

- Uji ke-2 dengan Amplitudo 4 cm

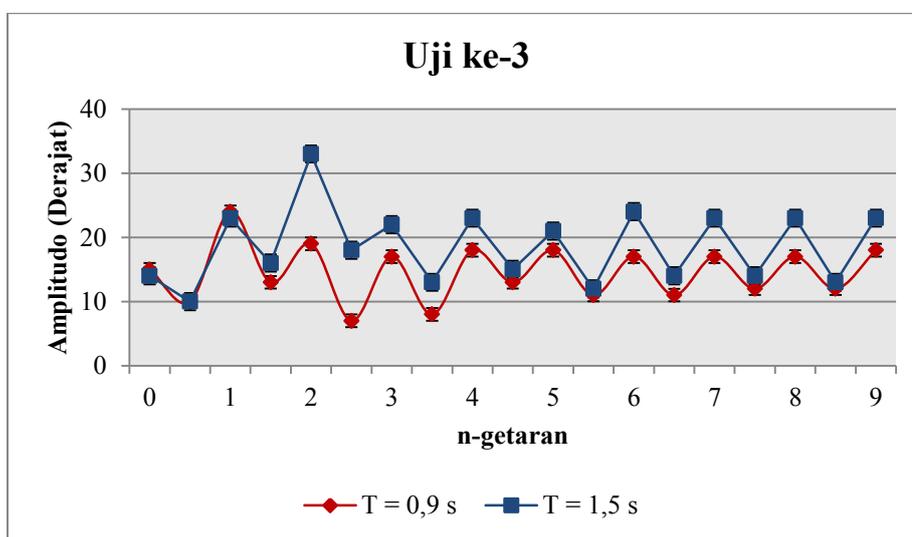


Gambar 4.6 Osilasi dari Bandul dengan Perubahan Periode Gelombang Uji Ke-2.

Dari Gambar 4.6 dapat dilihat adanya beberapa puncak dan lembah karakterisasi dari eksitasi daya gelombang pada sistem bandul. Pada uji ke-2 dapat dilihat memiliki panjang gelombang sebesar 6 panjang gelombang (λ) dan bandul berosilasi dengan sudut simpangan terbesar pada masing-masing periode eksitasi 0,9s dan 1,5s berturut-turut yaitu 20 derajat dan 22 derajat.

Hasil perhitungan kecepatan gerak bandul pada periode eksitasi natural yaitu 0,9s dan 1,5 s diperoleh nilai periode rata-rata bandul berturut-turut sebesar 1,273 s dan 2,130s. Hasil tersebut berpengaruh terhadap kecepatan gerak bandul, dimana berdasarkan hasil perhitungan diperoleh kecepatan gerak bandul rata-rata rata pada periode eksitasi 0,9 s yaitu sebesar 4,932 rad/s sedangkan pada periode eksitasi 1,5 s yaitu sebesar 2,948 rad/s. Besarnya kecepatan sudut yang dicapai bandul saat berayun juga dapat dilihat dari kemiringan garis masing-masing periode gelombang eksitasi, untuk lebih jelasnya data hasil perhitungan dapat dilihat pada Lampiran F.

- Uji ke-3 dengan Amplitudo 5 cm



Gambar 4.7 Osilasi dari Bandul dengan Perubahan Periode Gelombang Uji Ke-3

Dari Gambar 4.7 dapat dilihat adanya beberapa puncak dan lembah karakterisasi dari eksitasi daya gelombang pada sistem bandul. Pada uji ke-3 dapat dilihat memiliki panjang gelombang sebesar 6 panjang gelombang (λ) dan bandul berosilasi dengan sudut simpangan terbesar pada masing-masing periode eksitasi 0,9s dan 1,5s berturut-turut yaitu 24 derajat dan 33 derajat.

Hasil perhitungan kecepatan gerak bandul pada periode eksitasi natural yaitu 0,9s dan 1,5 s diperoleh nilai periode rata-rata bandul berturut-turut sebesar 1,354 s dan 2,138s. Hasil tersebut berpengaruh terhadap kecepatan gerak bandul, dimana berdasarkan hasil perhitungan diperoleh kecepatan gerak bandul rata-rata rata pada periode eksitasi 0,9 s yaitu sebesar 4,636 rad/s sedangkan pada periode eksitasi 1,5 s yaitu sebesar 2,938 rad/s dengan masing-masing frekuensi berturut-

turut yaitu 0,7383 Hz dan 0,4678 Hz. Besarnya kecepatan sudut yang dicapai bandul saat berayun juga dapat dilihat dari kemiringan garis masing-masing periode gelombang eksitasi, untuk lebih jelasnya data hasil perhitungan dapat dilihat pada Lampiran F.

Menurut Noerpamungkas menyatakan bahwa, semakin tinggi amplitudo dan frekuensi gelombang eksitasi semakin besar respon gerak dan daya mekanis bandul (Noerpamungkas and Ulum, 2015). Dari grafik osilasi bandul yang telah dibahas diatas, diperoleh bahwa nilai sudut simpangan bandul terbesar hasil eksitasi gelombang yaitu pada uji ke-3 dengan karakteristik kondisi gelombang yaitu pada amplitudo 5 cm dan periode 1,5 s sebesar 33 derajat. Maka selanjutnya, berdasarkan hasil perhitungan daya gelombang pada metode onshore dan diperoleh persamaan garis untuk nilai daya listrik maka dilakukan estimasi daya listrik yang dihasilkan oleh mekanisme prototipe generator listrik pada metode offshore. Keberhasilan dalam penelitian ini yaitu prototipe generator listrik yang dirancang dapat menghasilkan energi listrik sebesar 1 watt skala laboratorium dengan standar karakteristik energi gelombang laut tertentu yang akan dibahas selanjut pada pengaruh variabel terhadap daya listrik yang dihasilkan pada metode offshore.

1.2.3 Pengaruh Variabel terhadap Daya Listrik

Peningkatan amplitudo gelombang memberikan daya bangkitan listrik yang semakin besar (Kurniawan et al., 2014). Hal ini dapat dilihat berdasarkan grafik osilasi bandul yang telah diperoleh pada Subbab 4.2.2, dimana untuk mengestimasi daya listrik berdasarkan metode offshore yaitu dengan melakukan perhitungan menggunakan persamaan daya listrik yang dihasilkan pada metode onshore yaitu dengan persamaan $y = 0,1465x - 1,1472$. Berikut hasil perhitungan daya listrik pada metode offshore yang dapat dilihat pada Tabel 4.1 sebagai berikut :

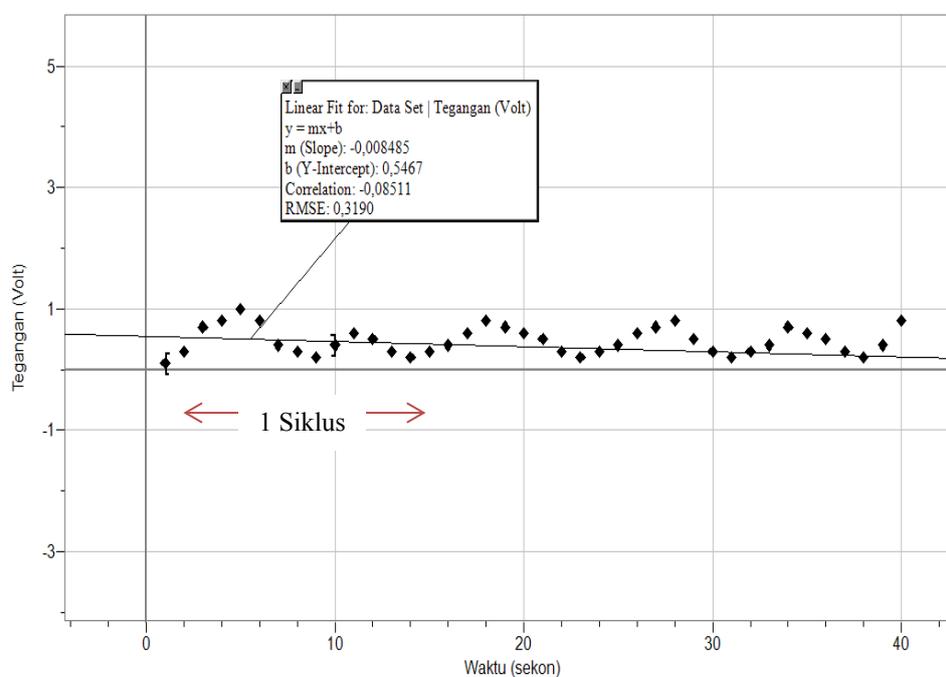
Tabel 4.1 Hasil perhitungan daya listrik hasil pengukuran metode offshore

Uji ke-	θ_{\max} (derajat)	P_{Listrik} (watt)
1	17	1,3433
2	20	1,7828
3	24	2,3688
4	19	1,6363
5	22	2,0758
6	33	3,6873

Berdasarkan Tabel 4.1 nilai θ_{\max} merupakan sudut simpangan maksimum untuk setiap variasi uji (derajat) dan P_{Listrik} merupakan daya listrik (watt). Hasil perhitungan menunjukkan bahwa untuk menghasilkan daya listrik sebesar 1 watt, karakteristik energi gelombang yaitu pada amplitudo gelombang 3 cm dan periode 0,9s telah menghasilkan daya listrik sebesar 1,3 watt.

Hal ini didukung oleh hasil pengukuran tegangan bangkitan dari prototipe generator listrik dalam bentuk grafik untuk setiap variasi uji. Berikut hasil dan pembahasan tegangan bangkitan dari prototipe generator listrik sistem bandul :

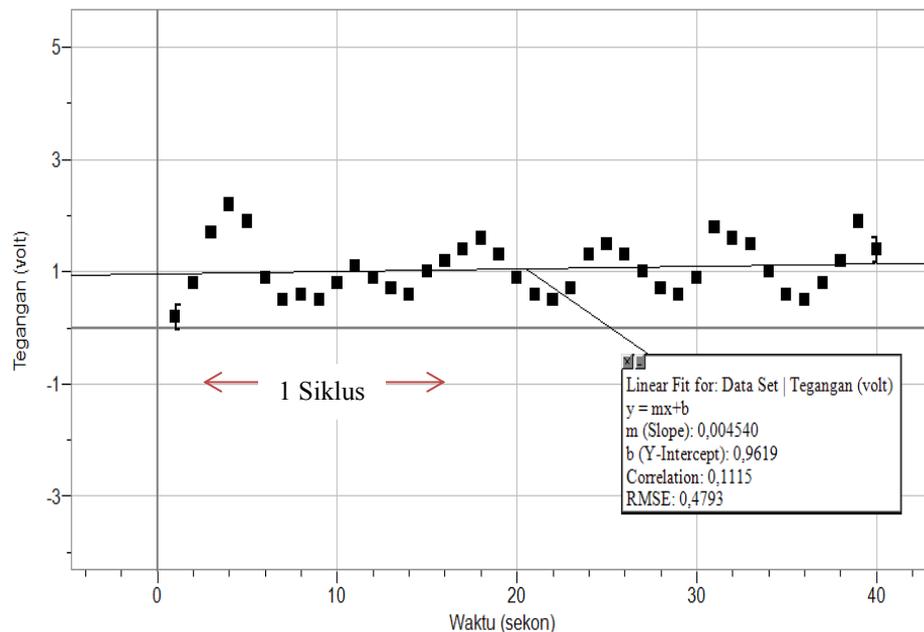
- Uji ke-1 dengan amplitudo 3 cm dan periode 0,9s



Gambar 4.8 Grafik Tegangan AC Fungsi Waktu Uji ke-1

Pengambilan data pengukuran tegangan bangkitan dilakukan selama 40 detik. Hasil yang diperoleh berdasarkan Gambar 4.8 tegangan minimum yaitu sebesar 0,1 volt dan maksimum sebesar 1 volt. Berdasarkan persamaan (2.8) nilai tegangan efektif yang dihasilkan yaitu sebesar 0,71 volt, sebagaimana pada Tabel uji nilai tegangan (lihat Lampiran F, pada Tabel F.4) diperoleh nilai error pada *actual* dan *true* data berturut-turut yaitu sebesar 1,65 dan 0,80 dengan nilai standar deviasi yang dihasilkan sebesar 0,2216. Untuk lebih jelasnya hasil perhitungan nilai error pengukuran tegangan bangkitan dapat dilihat pada Lampiran F.

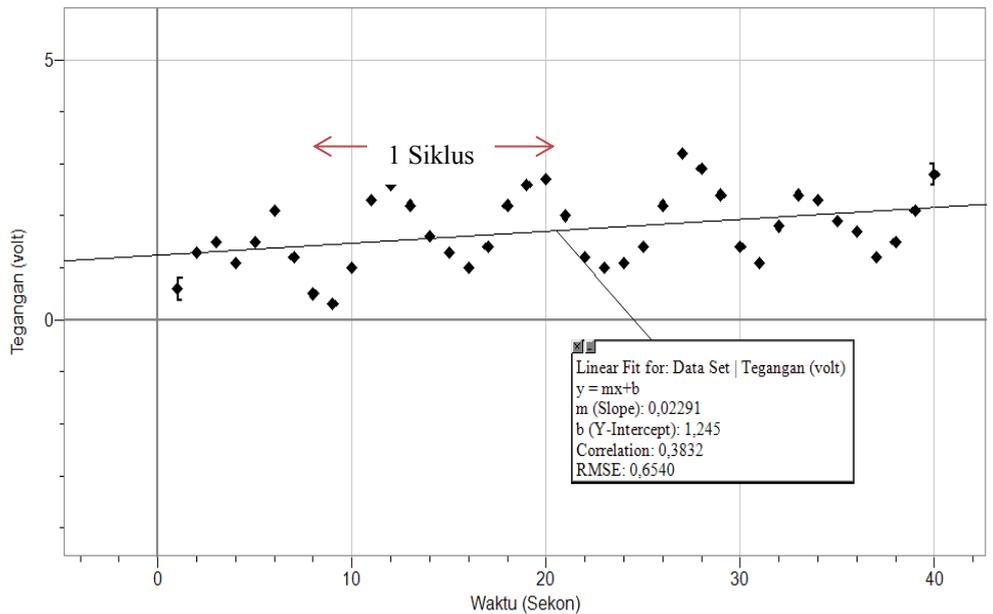
- Uji ke-2 dengan amplitudo 4 cm dan periode 0,9s



Gambar 4.9 Grafik Tegangan AC Fungsi Waktu Uji ke-2

Pengambilan data pengukuran tegangan keluaran dilakukan selama 40 detik, Hasil yang diperoleh berdasarkan Gambar 4.9 yaitu tegangan minimum yaitu sebesar 0,2 volt dan maksimum sebesar 2,2 volt. Berdasarkan persamaan (2.8) nilai tegangan efektif yang dihasilkan yaitu sebesar 1,56 volt, sebagaimana pada Tabel uji nilai tegangan (lihat Lampiran F, pada Tabel F.4) diperoleh nilai error pada *actual* dan *true* data berturut-turut yaitu sebesar 1,65 dan 0,80 dengan nilai standar deviasi yang dihasilkan sebesar 0,4761. Untuk lebih jelasnya hasil perhitungan nilai error pengukuran tegangan bangkitan dapat dilihat pada Lampiran F.

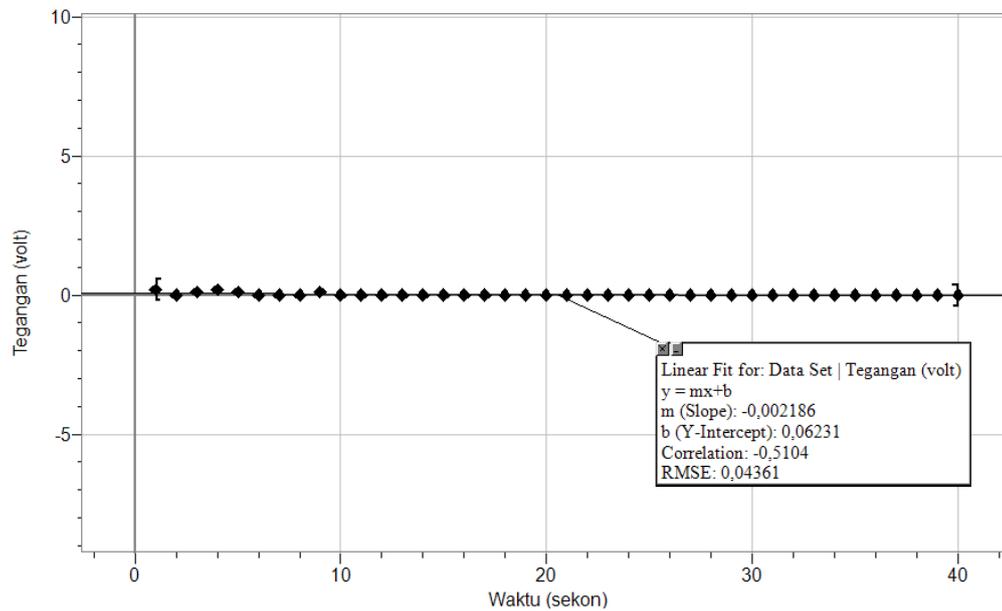
- Uji ke-3 dengan amplitudo 5 cm dan periode 0,9s



Gambar 4.10 Grafik Tegangan AC Fungsi Waktu Uji ke-3

Pengambilan data pengukuran tegangan keluaran dilakukan selama 40 detik, Hasil yang diperoleh berdasarkan Gambar 4.10 yaitu tegangan minimum yaitu sebesar 0,3 volt dan maksimum sebesar 3,2 volt. Berdasarkan persamaan (2.8) nilai tegangan efektif yang dihasilkan yaitu sebesar 2,26 volt, sebagaimana pada Tabel uji nilai tegangan (lihat Lampiran F, pada Tabel F.4) diperoleh nilai error pada *actual* dan *true* data berturut-turut yaitu sebesar 1,65 dan 0,80 dengan nilai standar deviasi yang dihasilkan sebesar 0,6989. Untuk lebih jelasnya hasil perhitungan nilai error pengukuran tegangan bangkitan dapat dilihat pada Lampiran F.

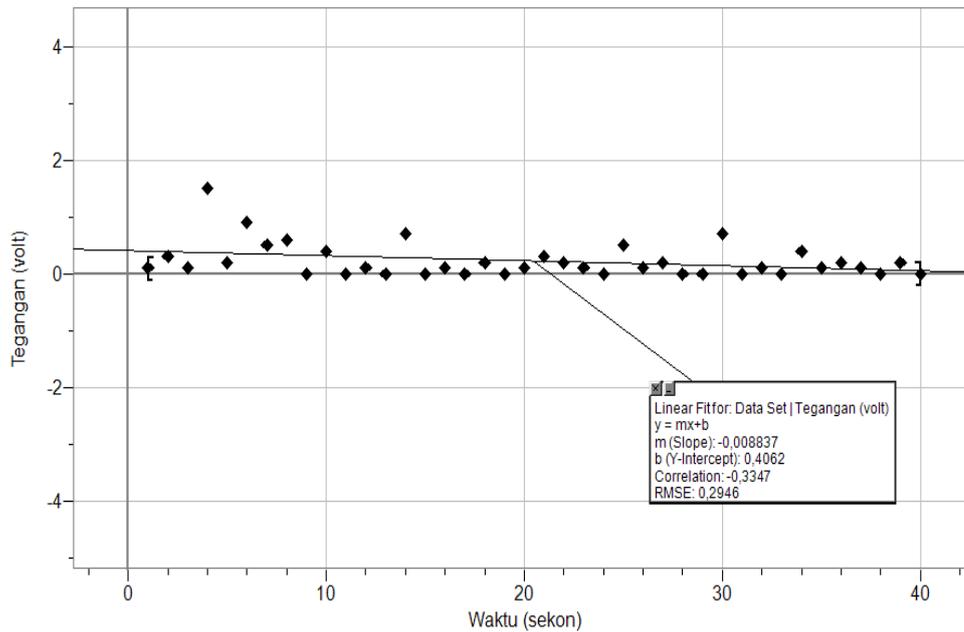
- Uji ke-4 dengan amplitudo 3 cm dan periode 1,5 s



Gambar 4.11 Grafik Tegangan AC Fungsi Waktu Uji ke-4

Pengambilan data pengukuran tegangan keluaran dilakukan selama 40 detik, Hasil yang diperoleh berdasarkan Gambar 4.11 yaitu tegangan minimum yaitu sebesar 0 dan maksimum sebesar 0,2 volt. Berdasarkan persamaan (2.8) nilai tegangan efektif yang dihasilkan yaitu sebesar 0,14 volt, sebagaimana pada Tabel uji nilai tegangan (lihat Lampiran F, pada Tabel F.4) diperoleh nilai error pada *actual* dan *true* data berturut-turut yaitu sebesar 1,65 dan 0,80 dengan nilai standar deviasi yang dihasilkan sebesar 0,050. Untuk lebih jelasnya hasil perhitungan nilai error pengukuran tegangan bangkitan dapat dilihat pada Lampiran F.

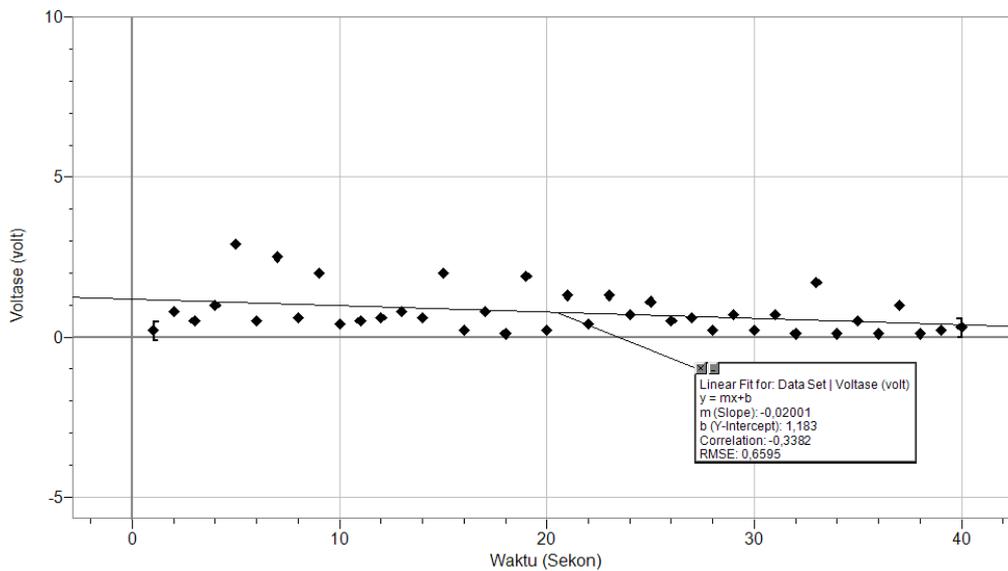
- Uji ke-5 dengan amplitudo 4 cm dan periode 1,5 s



Gambar 4.12 Grafik Tegangan AC Fungsi Waktu Uji ke-5

Pengambilan data pengukuran tegangan keluaran dilakukan selama 40 detik, Hasil yang diperoleh berdasarkan Gambar 4.12 yaitu tegangan minimum yaitu sebesar 0 dan maksimum sebesar 2 volt. Berdasarkan persamaan (2.8) nilai tegangan efektif yang dihasilkan yaitu sebesar 1,41 volt, sebagaimana pada Tabel uji nilai tegangan (lihat Lampiran F, pada Tabel F.4) diperoleh nilai error pada *actual* dan *true* data berturut-turut yaitu sebesar 1,65 dan 0,80 dengan nilai standar deviasi yang dihasilkan sebesar 0,3086. Untuk lebih jelasnya hasil perhitungan nilai error pengukuran tegangan bangkitan dapat dilihat pada Lampiran F.

- Uji ke-6 dengan amplitudo 5 cm dan periode 1,5 s



Gambar 4.13 Grafik Tegangan AC Fungsi Waktu Uji ke-6

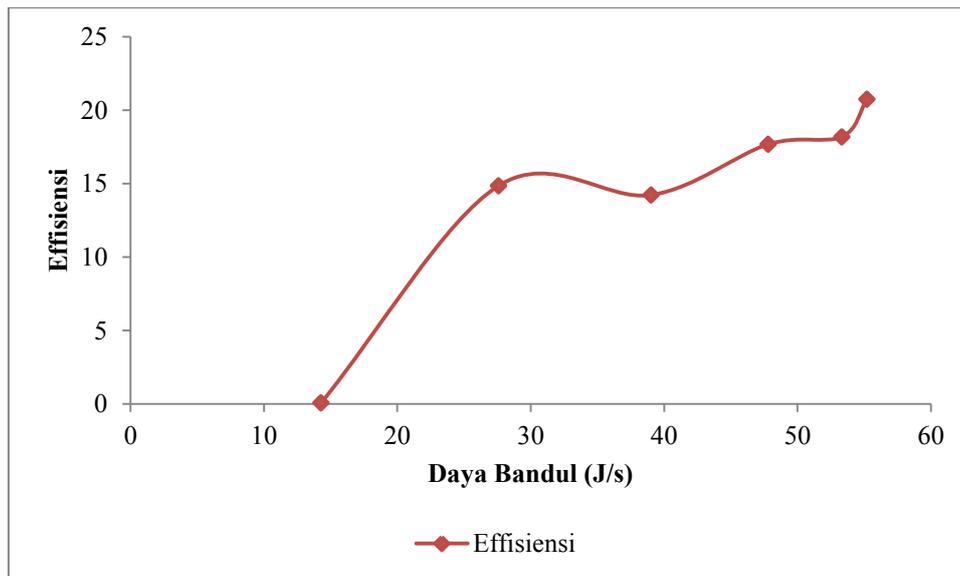
Pengambilan data pengukuran tegangan keluaran dilakukan selama 40 detik, Hasil yang diperoleh berdasarkan Gambar 4.13 yaitu tegangan minimum yaitu sebesar 0,1 dan maksimum sebesar 3 volt. Berdasarkan persamaan (2.8) nilai tegangan efektif yang dihasilkan yaitu sebesar 2,12 volt, sebagaimana pada Tabel uji nilai tegangan (lihat Lampiran F, pada Tabel F.4) diperoleh nilai error pada *actual* dan *true* data berturut-turut yaitu sebesar 1,65 dan 0,80 dengan nilai standar deviasi yang dihasilkan sebesar 0,6917. Untuk lebih jelasnya hasil perhitungan nilai error pengukuran tegangan bangkitan dapat dilihat pada Lampiran F.

Berdasarkan hasil pengukuran nilai tegangan bangkitan diperoleh bahwa dengan bertambahnya amplitudo gelombang maka tegangan bangkitan yang dihasilkan prototipe semakin meningkat. Nilai tegangan maksimum yang dihasilkan dengan variasi uji yang diberikan diperoleh sebesar 3,2 volt pada uji ke 3 yaitu pada amplitudo 5 cm dan periode 0,9s dimana hasil perhitungan nilai error sebesar 1,41.

1.3 Effisiensi Prototipe Generator

Effisiensi yang dihitung dalam penelitian ini yaitu melihat perilaku sistem antara input dari gelombang air laut ke ponton datar, selanjutnya bandul dan diteruskan ke generator untuk menghasilkan listrik.

Untuk mengetahui effisiensi dari variasi kondisi gelombang pada prototipe PLTGL ini maka dilakukan perhitungan terhadap daya listrik dan daya gelombang yang dihasilkan dan di analisa ke dalam grafik effisiensi.



Gambar 4.14 Grafik Perbandingan Effisiensi Variasi

Pada Gambar 4.14 menunjukkan detail grafik effisiensi variasi daya mekanik bandul dan daya listrik yang dihasilkan prototipe generator listrik sistem bandul dimana semakin besar daya mekanik bandul dalam hal ini variasi sudut simpangan bandul yang diperbesar menghasilkan daya listrik yang terbesar. Berdasarkan Gambar 4.14 nilai effisiensi terbesar dengan sudut simpangan bandul sebesar 90 derajat yaitu 20,73 dan nilai effisiensi terkecil dengan sudut simpangan bandul 15 derajat yaitu 0,06. Nilai effisiensi dapat dihitung dengan persamaan (3.1).

LAMPIRAN A
DATA HASIL PENGUKURAN SUDUT SIMPANGAN OSILASI DARI
BANDUL

Tabel A.1 Data Hasil Pengukuran Tegangan Bangkitan Uji ke-1

Uji ke-1				
n	Waktu (s)	Selang waktu (s)	θ	Kemiringan garis
0	27,27	1,27	13	-4,105629676
	28,22		6	-0,754788749
1	29,06	1,27	14	0,03998001
	29,19		6	1,250949837
2	30,03	1,28	16	0,806451613
	30,17		6	1,851851852
3	30,30	1,27	17	-0,590216155
	31,14		6	-1,925767662
4	31,28	1,28	14	-1,247359012
	32,12		5	-0,850920573
5	32,26	1,28	13	0
	33,10		5	0,629326463
6	33,23	1,27	14	0,572737686
	34,07		6	-0,342752346
7	34,20	1,26	13	-0,143085674
	35,03		6	-0,14382705
8	35,17	1,26	13	-0,33383546
	36,00		5,5	-0,918251901
9	36,13		13	-3,543522997
Total Waktu		11,44	Max Data θ	17

Tabel A.2 Data Hasil Pengukuran Tegangan Bangkitan Uji ke-2

Uji ke-2				
n	waktu (s)	Selang Waktu (s)	θ	Kemiringan garis
0	4,09	1,27	14	1,839378238
	4,22		8	2,49133528
1	5,06	1,27	17	1,714688519
	5,19		10	0,510204082
2	6,04	1,28	20	-1,633683777
	6,18		8	-2,944392647
3	7,02	1,28	14	-1,98374265
	7,16		6	-0,659680913
4	8,00	1,28	13	1,667507139
	8,14		8	6,314391314
5	8,27	1,27	16	1,740383549
	9,11		10	-0,267337565
6	9,24	1,27	15	1,740383549
	10,07		9	-0,918160826
7	10,21	1,27	14	-0,572935182
	11,04		8	0,630011455
8	11,18	1,27	15,00	1,030927835
	12,01		9	0,896953476
9	12,15		17	-1,668468468
Total waktu		11,46	Max Data θ	20

Tabel A.3 Data Hasil Pengukuran Tegangan Bangkitan Uji ke-3

Uji ke-3				
n	Waktu (s)	Selang waktu (s)	θ	Kemiringan garis
0	28,03	1,27	15	3,668853595
	28,15		10	5,923832046
1	29,00	2,00	24	2,063440266
	29,15		13	-2,851851852
2	30,00	1,28	19	-4,935150112
	30,15		7	-4,859930136
3	30,28	1,28	17	0,250913653
	31,12		8	1,461440345
4	31,26	1,28	18	2,949398938
	32,10		13	0,512820513
5	32,24	1,26	18	-1,031516264
	33,07		11	-0,921358766
6	33,20	1,29	17	-0,22821394
	34,04		11	0,114547537
7	34,19	1,26	17	0,590878699
	35,01		12	0,311552247
8	35,15	1,27	17	0,495811154
	35,28		12	1,270621824
9	37,10		18	2,297760719
Total waktu		12,19	Max Data θ	24

Tabel A.4 Data Hasil Pengukuran Tegangan Bangkitan Uji ke-4

Uji ke-4				
n	Waktu (s)	Selang waktu (s)	θ	Kemiringan garis
0	19,21	2,13	13	1,561132186
	20,14		5	1,789118412
1	21,04	2,12	19	1,231840194
	21,26		7	-0,446428571
2	22,16	2,15	16	-1,035736995
	23,09		5	-1,304457225
3	24,01	2,23	13	-0,893980952
	24,27		4	-0,393337896
4	25,17	2,16	13	-0,575411878
	26,09		3	-0,689181231
5	27,03	2,14	11	-0,145546373
	27,26		3	0,40423223
6	28,17	2,15	12	0,11148272
	29,11		3	0,040160643
7	30,02	2,14	12	0
	30,26		3	0
8	31,18	2,13	12	0,040355125
	32,10		3	0,302221852
9	33,01		12,00	-0,799973479
Total Waktu		19,35	Max Data θ	19

Tabel A.5 Data Hasil Pengukuran Tegangan Bangkitan Uji ke-5

Uji ke-5				
n	waktu (s)	Selang waktu (s)	θ	Kemiringan garis
0	17,19	2,16	10	-2,61905661
	18,13		4	1,08965389
1	19,05	2,11	15	1,764401915
	19,25		6	2,134727765
2	20,16	2	17	2,303050465
	21,07		12	0,870592815
3	21,27	2,13	22	-55035,212
	22,21		9	-0,566202252
4	23,10	2,19	17	-0,160164257
	24,07		9	0,206756692
5	24,29	2,15	18	-0,654080854
	25,22		8	-0,890746862
6	26,14	2,13	15	-0,0653002
	27,07		9	0,07674685
7	27,27	2,17	15	0,256657484
	28,22		9	0,534759358
8	29,14	2,13	17	0
	30,06		9	-1,140710228
9	30,27	2,11	15,00	-1,307189542
Total Waktu		21,28	Max Data θ	22

Tabel A.6 Data Hasil Pengukuran Tegangan Bangkitan Uji ke-6

Uji Ke-6				
n	waktu (s)	Selang waktu (s)	θ	Kemiringan garis
0	16,16	2,14	14	-2,617126311
	17,18		10	3,340952823
1	18,00	2,10	23	4,276795449
	18,19		16	2,308774276
2	19,10	2,12	33	0,52161122
	20,02		18	-1,228427613
3	20,22	2,16	22	-2,320419901
	21,17		13	-0,884407767
4	22,08	2,13	23	0,193419474
	23,00		15	-0,92770995
5	23,21	2,16	21	-1,141167654
	24,16		12	0,660891205
6	25,07	2,14	24	1,066920325
	25,29		14	-0,146012321
7	26,21	2,14	23	-0,077421562
	27,14		14	-0,130202385
8	28,05	2,15	23	-0,30383121
	29,00		13	-0,548575315
9	29,20	2,15	23	-1,723940435
Total Waktu		21,39	Max Data θ	33

LAMPIRAN B
DATA HASIL PENGUKURAN TEGANGAN OUTPUT PROTOTIPE
GENERATOR LISTRIK

Tabel B.1 Data Hasil Pengukuran Tegangan Bangkitan Uji ke-1

Uji ke-1 (40 detik)			
No	V (volt) AC	No	V (volt) AC
1	0,1	21	0,5
2	0,3	22	0,3
3	0,7	23	0,2
4	0,8	24	0,3
5	1	25	0,4
6	0,8	26	0,6
7	0,4	27	0,7
8	0,3	28	0,8
9	0,2	29	0,5
10	0,4	30	0,3
11	0,6	31	0,2
12	0,5	32	0,3
13	0,3	33	0,4
14	0,2	34	0,7
15	0,3	35	0,6
16	0,4	36	0,5
17	0,6	37	0,3
18	0,8	38	0,2
19	0,7	39	0,4
20	0,6	40	0,8

Tabel B.2 Data Hasil Pengukuran Tegangan Bangkitan Uji ke-2

Uji Ke-2 (40 detik)			
No	V (volt) AC	No	V (volt) AC
1	0,2	21	0,6
2	0,8	22	0,5
3	1,7	23	0,7
4	2,2	24	1,3
5	1,9	25	1,5
6	0,9	26	1,3
7	0,5	27	1
8	0,6	28	0,7
9	0,5	29	0,6
10	0,8	30	0,9
11	1,1	31	1,8
12	0,9	32	1,6
13	0,7	33	1,5
14	0,6	34	1
15	1	35	0,6
16	1,2	36	0,5
17	1,4	37	0,8
18	1,6	38	1,2
19	1,3	39	1,9
20	0,9	40	1,4

Tabel B.3 Data Hasil Pengukuran Tegangan Bangkitan Uji ke-3

Uji Ke-3 (40 detik)			
No	V (volt) AC	No	V (volt) AC
1	0,6	21	2
2	1,3	22	1,2
3	1,5	23	1
4	1,1	24	1,1
5	1,5	25	1,4
6	2,1	26	2,2
7	1,2	27	3,2
8	0,5	28	2,9
9	0,3	29	2,4
10	1	30	1,4
11	2,3	31	1,1
12	2,6	32	1,8
13	2,2	33	2,4
14	1,6	34	2,3
15	1,3	35	1,9
16	1	36	1,7
17	1,4	37	1,2
18	2,2	38	1,5
19	2,6	39	2,1
20	2,7	40	2,8

Tabel B.4 Data Hasil Pengukuran Tegangan Bangkitan Uji ke-4

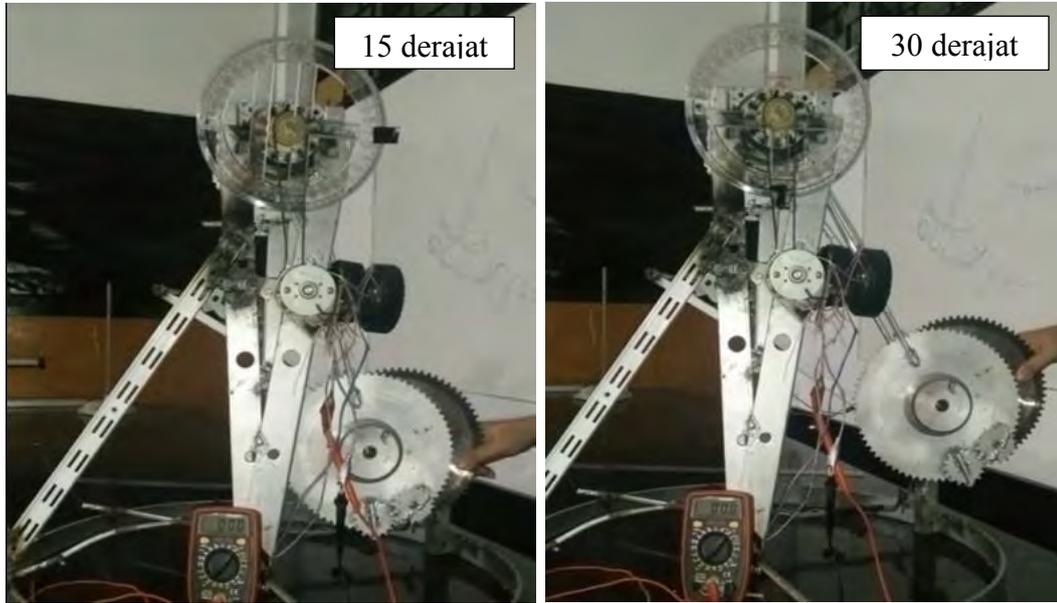
Uji ke-4 (40 detik)			
No	V (volt) AC	No	V (volt) AC
1	0,2	21	0
2	0	22	0
3	0,1	23	0
4	0,2	24	0
5	0,1	25	0
6	0	26	0
7	0	27	0
8	0	28	0
9	0,1	29	0
10	0	30	0
11	0	31	0
12	0	32	0
13	0	33	0
14	0	34	0
15	0	35	0
16	0	36	0
17	0	37	0
18	0	38	0
19	0	39	0
20	0	40	0

Tabel B.5 Data Hasil Pengukuran Tegangan Bangkitan Uji ke-5

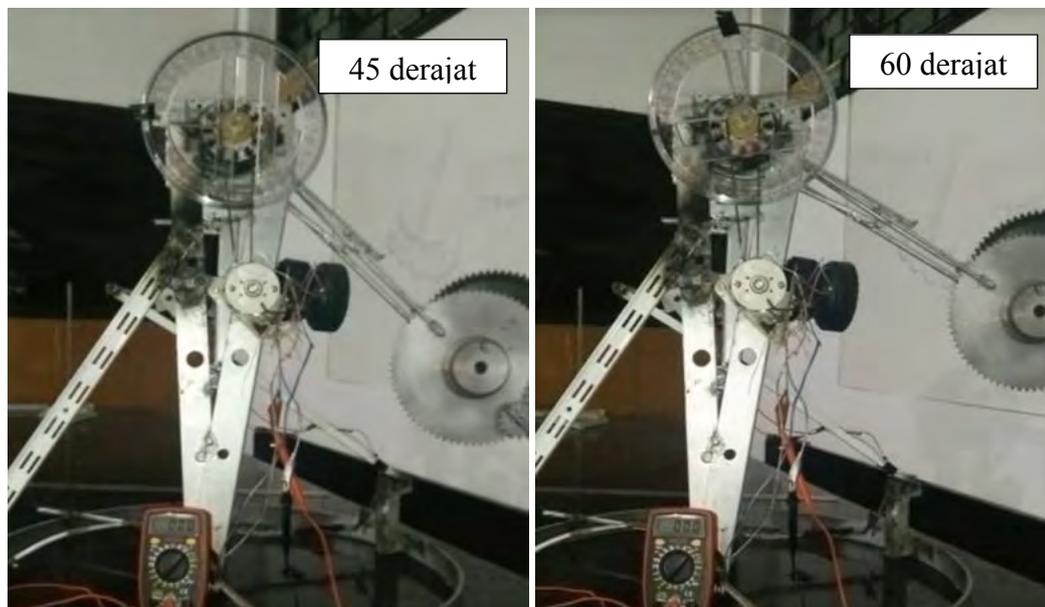
Uji ke-5 (40 detik)			
No	V (volt) AC	No	V (volt) AC
1	0,1	21	0,3
2	0,3	22	0,2
3	0,1	23	0,1
4	1,5	24	0
5	0,2	25	0,5
6	0,9	26	0,1
7	0,5	27	0,2
8	0,6	28	0
9	0	29	0
10	0,4	30	0,7
11	0	31	0
12	0,1	32	0,1
13	0	33	0
14	0,7	34	0,4
15	0	35	0,1
16	0,1	36	0,2
17	0	37	0,1
18	0,2	38	0
19	0	39	0,2
20	0,1	40	0

Uji ke-6 (40 detik)			
No	V (volt) AC	No	V (volt) AC
1	0,2	21	1,3
2	0,8	22	0,4
3	0,5	23	1,3
4	1	24	0,7
5	2,9	25	1,1
6	0,5	26	0,5
7	2,5	27	0,6
8	0,6	28	0,2
9	2	29	0,7
10	0,4	30	0,2
11	0,5	31	0,7
12	0,6	32	0,1
13	0,8	33	1,7
14	0,6	34	0,1
15	2	35	0,5
16	0,2	36	0,1
17	0,8	37	1
18	0,1	38	0,1
19	1,9	39	0,2
20	0,2	40	0,3

LAMPIRAN C
GAMBAR PENGAMBILAN DATA METODE ONSHORE DENGAN
VARIASI SUDUT SIMPANGAN BANDUL

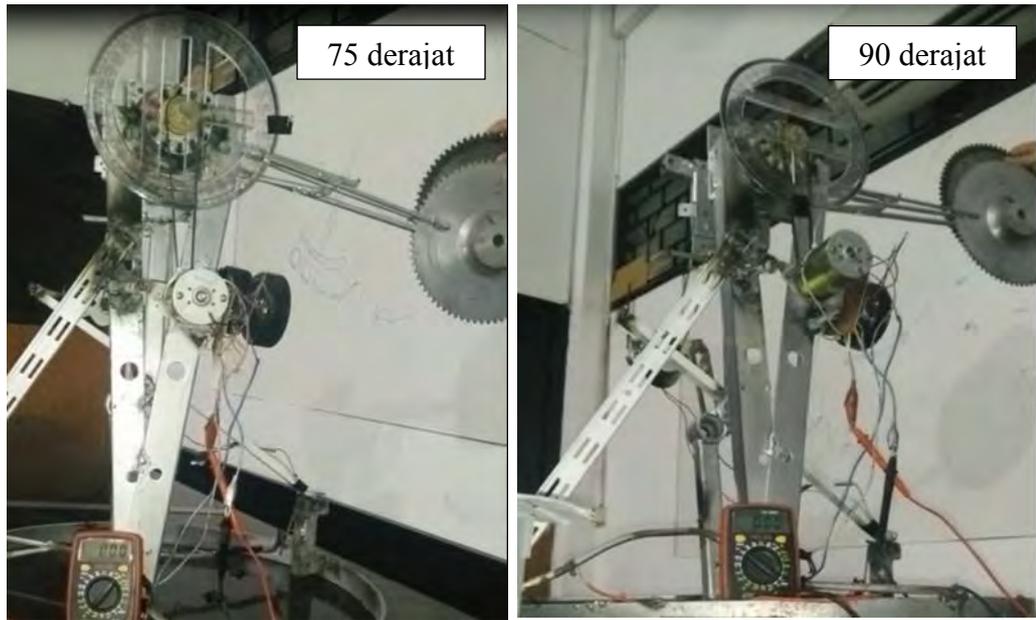


Gambar C.1 Variasi Simpangan Sudut 15 derajat dan 30 derajat



Gambar C.2 Variasi Simpangan Sudut 45 derajat dan 60 derajat

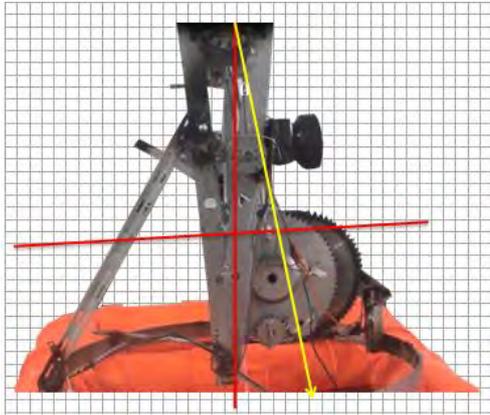
“Halaman ini sengaja dikosongkan”



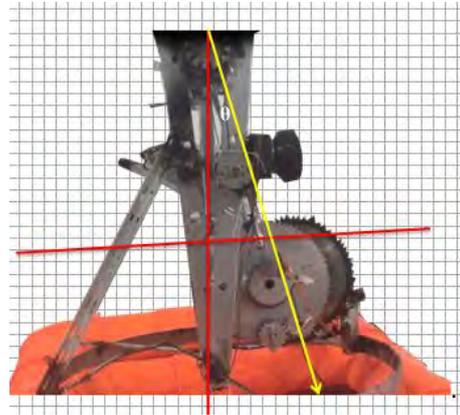
Gambar C.3 Variasi Simpangan Sudut 75 derajat dan 90 derajat

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

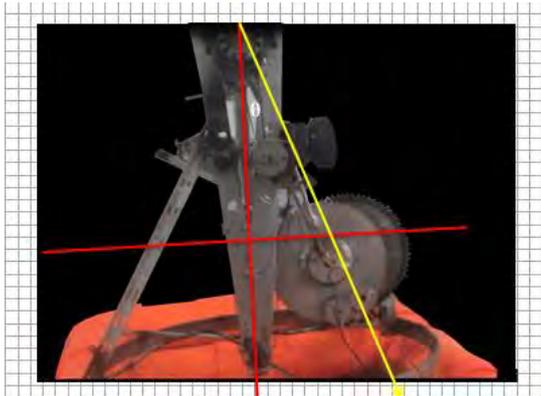
LAMPIRAN D
PENGOLAHAN DATA VIDEO OSILASI DARI BANDUL PADA
METODE OFFSHORE



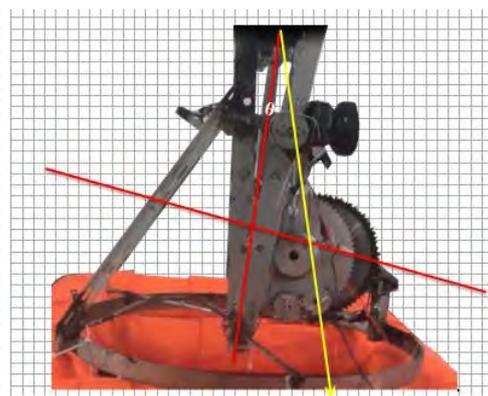
Gambar D.1 Uji ke-1 Amplitudo 3 cm dan Periode 0,9s.



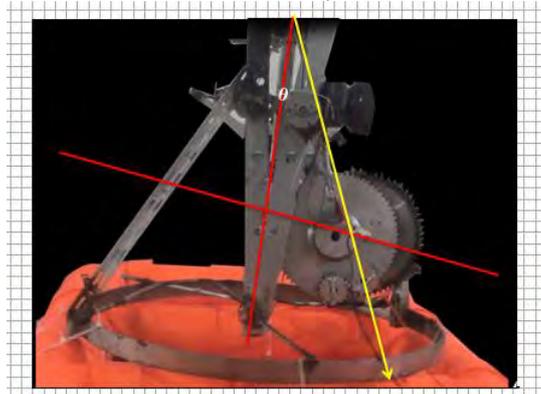
Gambar D.2 Uji ke-2 Amplitudo 4 cm dan Periode 0,9s.



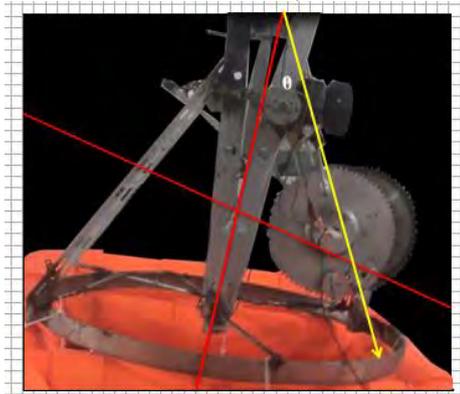
Gambar D.3 Uji ke-3 Amplitudo 5 cm dan Periode 0,9s.



Gambar D.4 Uji ke-4 Amplitudo 3 cm dan Periode 1,5s.



Gambar D.5 Uji ke-5 Amplitudo 5 cm dan Periode 1,5s.



Gambar D.6 Uji ke-6 Amplitudo 5 cm dan Periode 1,5s.

LAMPIRAN E
PERHITUNGAN DAYA BANDUL DAN DAYA LISTRIK METODE
ONSHORE

1. Perhitungan Daya Bandul

Perhitungan daya bandul menggunakan persamaan (2.25), dimana nilai massa, panjang lengan bandul, dan gravitasi bumi merupakan nilai yang konstan. Berikut hasil perhitungan nilai daya pada bandul dalam metode Onshore.

Tabel E.1 Hasil Perhitungan Daya Bandul

θ (derajat)	τ (N.m)	I (Kg.m ²)	ω (rad/s)	P_{Bandul} (J/s)
90	10,584	0,1296	5,217492	55,2219348
75	10,22336733	0,1296	5,217492	53,3403367
60	9,166025833	0,1296	5,217492	47,823666
45	7,484016949	0,1296	5,217492	39,0477982
30	5,292002057	0,1296	5,217492	27,6109781
15	2,739336809	0,1296	5,217492	14,2924677

Keterangan :

- θ : Sudut simpangan bandul (derajat)
- τ : Torsi (N.m)
- ω : Kecepatan sudut (rad/s)
- P_{Bandul} : Daya Bandul (J/s)

2. Perhitungan Daya Listrik

Daya listrik yang dihasilkan prototipe generator listrik dihitung menggunakan Persamaan (2.26), dimana nilai untuk arus dan tegangan setiap variasi diambil nilai maksimum dari data. Berikut hasil perhitungan daya listrik :

Tabel E.2 Hasil Perhitungan Daya Listrik

θ (derajat)	V_{ef} (volt)	I_{ef} (Ampere)	$P_{Listrik}$ (watt)
90	16,19274529	0,707106781	11,45
75	13,71787156	0,707106781	9,7
60	11,9501046	0,707106781	8,45
45	7,848885271	0,707106781	5,55
30	5,798275606	0,707106781	4,1
15	1,979898987	0,004666905	0,00924

Keterangan :

θ : Sudut simpangan bandul (derajat)

V_{ef} : Tegangan Efektif (Volt)

I_{ef} : Arus Efektif (Ampere)

$P_{Listrik}$: Daya Listrik (watt)

LAMPIRAN F
PERHITUNGAN DAYA GELOMBANG, DAYA BANDUL DAN DAYA
LISTRIK METODE OFFSHORE

1. Perhitungan Daya Gelombang

Perhitungan daya gelombang menggunakan persamaan (2.9), berikut hasil perhitungan daya gelombang :

Tabel F.1 Data Hasil Perhitungan Daya Gelombang Simulasi

Uji Ke-	H (m)	L (m)	C (m/s)	P _{gel} (J/s)
1	0,09	1,2636	1,404	17,60345168
2	0,16	1,2636	1,404	55,63560038
3	0,25	1,2636	1,404	135,8291025
4	0,09	3,51	2,34	81,4974615
5	0,16	3,51	2,34	257,572224
	0,25	3,51	2,34	628,8384375

Keterangan :

- H : Ketinggian gelombang (m)
- L : Panjang Gelombang (m)
- C : Kecepatan gelombang (m/s)
- P_{gel} : Daya Gelombang (J/s)

2. Perhitungan Daya Bandul

Dalam metode *Offshore* hanya melihat respon gerak bandul akibat eksitasi gelombang laut, dimana input data yang diperoleh yaitu nilai periode rata-rata dan kecepatan sudut bandul. Hasil yang diperoleh dikomparasikan dengan periode input gelombang eksitasi. Berikut data hasil perhitungan nilai periode rata-rata dan kecepatan sudut :

Tabel F.2 Hasil Perhitungan Periode, Frekuensi dan Kecepatan Sudut Rata-rata Bandul (Metode Offshore)

Uji Ke-	n	Waktu (sekon)	T = t/n	f = 1/T	ω (rad/sekon)
1	9	11,44	1,271	0,787	4,940559441
2	9	11,46	1,273	0,785	4,931937173
3	9	12,19	1,354	0,738	4,636587367
4	9	19,35	2,150	0,465	2,920930233
5	9	19,17	2,130	0,469	2,948356808
6	9	19,24	2,138	0,468	2,937629938

Keterangan :

Perhitungan rata-rata bandul berdasarkan jumlah getaran yang ditinjau sebanyak 9 (sembilan) getaran. T adalah periode bandul (s), f adalah frekuensi (Hz) dan ω adalah kecepatan sudut (rad/s).

3. Perhitungan Tegangan bangkitan

Berdasarkan hasil pengukuran tegangan bangkitan yang diperoleh pada metode onshore, diolah untuk digunakan menjadi acuan pengukuran pada metode offshore.

Tabel F.3 Hasil perhitungan Tegangan efektif

θ (derajat)	V _{maks} (volt)	V _{efektif} (volt)
17	1,00	0,70710678
20	2,20	1,55563492
24	3,20	2,2627417
19	0,20	0,14142136
22	2,00	1,41421356
33	3,00	2,12132034

Pada **Tabel F.3** nilai V_{maksimum} merupakan tegangan maksimum yang diperoleh dari pengolahan data pengukuran tegangan pada **Lampiran A**, sedangkan V_{efektif} merupakan tegangan efektif yang diperoleh dari hasil perhitungan menggunakan persamaan (2.28).

Pada **Tabel F.4** merupakan tabel uji nilai tegangan bangkitan, dimana hasil pengukuran yang diperoleh pada pengujian offshore di komparasikan dengan tabel tersebut, sehingga diperoleh nilai error yang dihasilkan baik *actual* maupun *true* data tegangan bangkitan dari prototipe generator listrik tenaga gelombang laut. Berikut tabel hasil komparasi nilai tegangan bangkitan secara pengukuran dan teori secara berturut-turut :

Tabel F.4 Tabel Uji Nilai Tegangan Bangkitan Metode Onshore

θ (derajat)	Actual	True output	error
15	1,979899	2,5149	0,535001
16	2,168299	2,7033	0,535001
17	2,356699	2,8917	0,535001
18	2,545099	3,0801	0,535001
19	2,733499	3,2685	0,535001
20	2,921899	3,4569	0,535001
21	3,110299	3,6453	0,535001
22	3,298699	3,8337	0,535001
23	2,979899	4,0221	1,042201
24	3,168299	4,2105	1,042201
25	3,356699	4,3989	1,042201
26	3,545099	4,5873	1,042201
27	3,733499	4,7757	1,042201
28	3,921899	4,9641	1,042201
29	4,110299	5,1525	1,042201
30	4,298699	5,3409	1,042201
31	3,979899	5,5293	1,549401
32	4,168299	5,7177	1,549401
33	4,356699	5,9061	1,549401
34	4,545099	6,0945	1,549401
35	4,733499	6,2829	1,549401

Keterangan :

Actual Data : Nilai tegangan maksimum pengukuran tiap variasi

True Output : Nilai tegangan maksimum perhitungan tiap variasi

Error : Actual Data – True Data

Berikut hasil pengukuran akurasi data nilai tegangan bangkitan metode offshore :

Tabel. F.5 Hasil Pengukuran Tegangan Bangkitan Metode *Offshore*

θ (derajat)	Actual	true output	error
17	0,71	1,24	0,54
20	1,56	2,09063592	0,54
24	2,26	2,7977427	0,54
19	0,14	0,67642236	0,54
22	1,41	1,94921456	0,54
33	2,12	2,65632134	0,54

Keterangan :

Actual Data : Nilai tegangan Efektif Pengukuran tiap Variasi

True Output : Nilai tegangan Efektif Perhitungan tiap Variasi (Actual + error pada tabel uji).

Error : Actual Data – True Data

Pada **Tabel F.5** merupakan hasil pengolahan data pengukuran dan teori yang dihasilkan pada metode offshore, selanjutnya hasil tersebut di komparasikan dengan tabel Uji (lihat **Tabel F.3**) untuk mendapatkan nilai error dalam pengukuran, nilai error yang diperoleh dapat juga menyatakan respon daya listrik akibat daya yang diberikan dari bandul. Berikut hasil komparasi nilai tegangan pengukuran dan perhitungan secara teori :

Tabel F.6 Hasil Komparasi Nilai Tegangan Pengukuran dan Perhitungan

Uji ke-	θ (derajat)	Error Actual Data	Error True Data
1	17	1,649592219	0,801064
2	20	1,366264081	1,366264
3	24	0,9055573	1,412757
4	19	2,592077644	2,592078
5	22	1,884485438	1,884485
6	33	2,235378656	3,249779

Keterangan :

Actual Data : Nilai Error Tegangan Efektif Pengukuran Tiap Variasi
(Actual data pengukuran – Actual Data Tabel Uji)

True Output : Nilai Error Tegangan Efektif Perhitungan Tiap Variasi
(True data pengukuran – True Data Tabel Uji)

Error : Actual Data – True Data

4. Perhitungan Daya Listrik

Tabel F.7 Data Hasil Perhitungan Nilai Daya Listrik

Uji ke-	θ_{\max} (derajat)	P_{Listrik} (watt)
1	17	1,3433
2	20	1,7828
3	24	2,3688
4	19	1,6363
5	22	2,0758
6	33	3,6873

Hasil perhitungan daya listrik berdasarkan persamaan garis dari metode onshore yang dihasilkan yaitu $y = 0,1465x - 1,1472$, dimana y adalah daya listrik dan x merupakan sudut simpangan bandul, berikut contoh perhitungan daya listrik :

$$\begin{aligned} \text{Daya listrik} &= 0,1465 \times 17 - 1,1472 \\ &= 1,3433 \text{ watt} \end{aligned}$$

5. Perhitungan efisiensi

Perhitungan nilai efisiensi alat menggunakan persamaan (3.1), Hasil perhitungan nilai efisiensi dari prototipe generator listrik tenaga gelombang laut adalah sebagai berikut :

Tabel F.8 Hasil Perhitungan Nilai Efisiensi

P_{Bandul} (watt)	P_{Listrik} (watt)	efisiensi (%)
55,2219348	11,5	0,208250581
53,3403367	9,7	0,181851121
47,823666	8,5	0,17773627
39,0477982	5,55	0,142133494
27,6109781	4,1	0,148491661
14,2924677	0,00924	0,000646494

Contoh perhitungan nilai efisiensi :

$$\text{Efisiensi} = \frac{11,5}{55,2219348} \times 100\%$$

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, didapatkan beberapa kesimpulan yang menjawab tujuan dari penelitian ini, yaitu:

1. Telah berhasil dirancang bangun prototipe generator listrik tenaga gelombang permukaan air laut sistem bandul yang terdiri dari dua komponen utama yaitu ponton atau pelampung jenis datar dan bandul fisis arah vertikal.
2. Adapun parameter kondisi gelombang berupa amplitudo dan periode gelombang yang divariasikan dimana hasil yang diperoleh menyatakan bahwa semakin besar daya gelombang eksitasi maka semakin besar daya listrik yang dihasilkan. Hal ini terlihat dari nilai daya listrik maksimum yang diperoleh yaitu sebesar 3,7 watt yang diukur pada ketinggian gelombang 25 cm dan periode 1,5s . Untuk menghasilkan daya sebesar 1 watt, prototipe generator listrik sistem bandul pada kondisi gelombang dengan ketinggian gelombang 9 cm dan periode 0,9s sudah optimal bekerja dan menghasilkan daya listrik sebesar 1,3 watt.
3. Adapun respon bandul terhadap variasi parameter gelombang membentuk grafik linier. Hal ini dapat dilihat dari sudut simpangan maksimum bandul yang dihasilkan sebesar 33 derajat pada ketinggian gelombang eksitasi sebesar 10 cm dan periode gelombang eksitasi sebesar 1,5s.
4. Effisiensi prototipe generator listrik sistem bandul yang dirancang maksimum sebesar 20,73.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil dari penelitian ini, disarankan untuk penelitian ini untuk kelanjutan pengembangan :

1. Pembuatan konstruksi bandul menggunakan pengatur panjang lengan bandul sehingga dapat disesuaikan dengan karakteristik gelombang daerah tertentu.
2. Melakukan analisa respon gerak ponton sehingga dapat mengetahui daya yang berasal dari ponton ke bandul dan dapat dihitung *lossing* energi yang terjadi.
3. Dalam pengambilan data arus dan tegangan keluaran dari prototipe generator listrik menggunakan alat ukur yang lebih akurat.
4. Arah datang gelombang pada ponton yang digunakan dalam penelitian ini yaitu 90 derajat dari muka ponton, dapat dilakukan variasi yang akan mempengaruhi osilasi bandul.
5. Pengambilan data dilakukan secara kontinyu dengan mengabaikan sisa riak gelombang pada *towing tank* yang belum benar-benar hilang. Pada penelitian selanjutnya, disarankan pengambilan data pada variasi selanjutnya dilakukan dengan kondisi air di *towing tank* sudah benar-benar hilang.

DAFTAR PUSTAKA

- Adinurani, P.G., Nindita, A., Setyo Yudhanto, A., Sasmito, A., Irhas, and Suryaningih, R. (2014). Study on Wave Energy into Electricity in the South Coast of Yogyakarta, Indonesia. *Energy Procedia* 47, 149–155.
- Adinurani, P.G., Nindita, A., Mel, M., Outhred, H., Elcome, C., Vincevica-Gaile, Z., Kuan, L.K., Setyobudi, R.H., Purba, N.P., Kelvin, J., et al. (2015). Suitable Locations of Ocean Renewable Energy (ORE) in Indonesia Region – GIS Approached. *Energy Procedia* 65, 230–238.
- Anarki, H.R., and Arief, I.S. (2016). Analisa Kinerja Bandul Vertikal dengan Model Plat pada PLTGL. *J. Tek. ITS* 4, B119–B123.
- Bahaj, A.S. (2011), “Generating Electricity from the Oceans”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, pp. 3399-3416.
- Basu, S., dkk., (2013), “Pulsed Magnetic Field Measurement Outside Finite Length Solenoid: Experimental Results & Mathematical Verification”, *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, Vol. 5, issue. 10, hal. 371-378.
- Behrouzi, F., Nakisa, M., Maimun, A., and Ahmed, Y.M. (2016). Global renewable energy and its potential in Malaysia: A review of Hydrokinetic turbine technology. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 62, 1270–1281.
- Cruz, J. (2008), *Ocean Wave Energy*, Springer, Heidelberg.
- Dahuri, R, dkk. (1996). Pengelolaan Sumber Daya Wilayah Pesisir dan Lautan Secara terpadu, Pradnya Paramita, hal 1, Jakarta.
- Dharmawan, D.A, (2015), *Studi eksperimen dan Analisa Energi listrik yang dihasilkan mekanisme pembangkit listrik tenaga gelombang laut tipe pengungkit dengan variasi panjang kawat kumparan dan jumlah lilitan*, Skripsi., Teknik Mesin-Fakultas Teknik Industri, Institut Teknologi Sepuluh November, Surabaya.
- Dosen Fisika Jurusan Fisika FMIPA-ITS, (2009), *FISIKA 1 dan 2*, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Penerbit Yayasan Pembina Jurusan Fisika (YANASIKA), Surabaya.
- Enferad, E., Farsadi, M., and Enferad, S. (2009). New method for converting sea wave energy. In International Conference on Electrical and Electronics Engineering, 2009. ELECO 2009, p. I-44-I-48.

- Faiqun., (2008), *Gelombang Laut (Ocean Wave)*.
<http://faiqun.edublogs.org/2008/04/13/gelombang-laut/> [20 Mei 2015].
- Falcão, A.F.O., and Henriques, J.C.C. (2016). Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: A review. *Renew. Energy* 85, 1391–1424.
- Gabriel. J.F., (2001), *Fisika Lingkungan*, Penerbit Hipokrates, Jakarta.
- Giancoli, Douglas C., (2001), *Fisika Jilid I dan II (Terjemahan)*, Penerbit Erlangga, Jakarta.
- Goldstein, H., Poole, C., (2001), *Classical Mechanics 3rd edition*. Addison-Wesley. New York
- Guntur, H.L., Hendrowati, W., Mukhtasor, Prastianto, R.W., Arif, I.S., Setiyawan, H., (2014), Studi Eksperimen Karakteristik Putaran Single Dan Triple Pendulum Pada Simulator Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut-Sistem Pendulum. *Artic. Semin. Nasional Teknik Mesin* 9 14 Agustus 2014 Surabaya.
- Hadi, S.P., and Fitri, S. purwono (2014). Simulasi Aliran Fluida (Minyak) Pada Hydraulic Wave Energy Converter Menggunakan Pendekatan CFD (Computational Fluid Dynamics). *J. Tek. ITS* 3, G134–G137.
- Halliday, D dan Resnick, R., (1996), *Fisika-Teori Jilid 2*, Penerbit Erlangga, Jakarta.
- Irasari P., Idayanti N., (2009). “Aplikasi Magnet Permanen BaFe₁₂O₁₉ dan NdFeB Pada Generator Magnet Permanen Kecepatan Rendah Skala Kecil”, *Jurnal Sains Materi Indonesia*, Vol.11, hal. 38-41.
- IRENA (International Renewable Energy Agency) (2014), *Wave Energy Technology Brief*, IRENA Ocean Energy Technology Brief 4. International Renewable Energy Agency. E-mail: RKempener@irena.org atau secretariat@irena.org.
- Isnaini, R. (2016). *Analisis Karakteristik Osilasi Pendulum Pada Pltgl-SB*, SKRIPSI, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Junianto, S., Walujo, R., Wardhana, W., (2013), "Analisis Gerakan Bandul akibat Gerakan Ponton pada Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut sistem Bandulan", *Jurnal Teknik, POMITS* 2, Surabaya.
- Kurniawan, L., Sarwito, S., and Kusuma, I. (2014). Studi Perancangan Prototype Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut Tipe Salter Duck. *J. Tek. POMITS* 3, 76–79.

- Manuhutu, L. (2015), *Analisa Ketinggian Permukaan Air Laut Berbasis Tekanan Atmosfer Untuk Detektor Tsunami, Tesis Magister.*, Jurusan Fisika-Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya .
- Muljadi, dkk., (2015), "Preparation and characterization of 5 wt.% epoxy resin bonded magnet NdFeB for micro generator application", *Energy Procedia* , Vol.68, hal. 282-287, ELSEVIER, doi:10.1016/j.egypro.2015.03.257, Banten, Indonesia.
- Musharraf, M., Khan, I. U., Khan, N., (2014), "Design of an Oscillating Coil Pendulum Energy Generating System", *Procedia Computer Science*, Vol. 32, hal. 639-646, doi:10.1016/j.procs.2014.05.471, Pakistan.
- Noerpamungkas, A., and Ulum, M. (2015). *Pemodelan Pengaruh Frekuensi dan Amplitudo Eksitasi terhadap Respon Gerak dan Daya Mekanis Pendulum Vertikal pada Konverter Energi Gelombang Laut. Semin. Nas. Sains Dan Teknol. Terap. III 2015 201–208.*
- Nasir, A., dkk., (2005), *Peralihan sistem energi: dari konvensional menuju sistem energi modern*, Penerbit BAKORNAS LTMI PB HMI, Jakarta.
- Novianarenti, E., Susatio, Y., and Hantoro, R. (2013). *Penentuan Parameter Bandul Matematis untuk Memperoleh Energi Maksimum dengan Gelombang dalam Tangki. J. Tek. POMITS 2, 122–127.*
- RUDIANTO (2013). *Analisa Gerakan Pendulum Dengan Bentuk Juring Lingkaran Pada Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut- Sistem Bandulan Pada Pengujian Offshore. Pap. Present. Mar. Eng. RSSP 531324 Rud 2014.*
- Sarojo, A.G, (2002), *Seri Fisika Dasar Mekanika - Edisi Pertama*, Penerbit Salemba Teknika, ISBN: 979-9549-09-4, Jakarta.
- Sastriawisesa, Y., dkk. (2013), "Pengaturan Tegangan dan Frekuensi Generator Induksi Tiga Fasa Penguatan Sendiri Menggunakan *Voltage Source Inverter* dan *Electronic Load Controller*", *Jurnal Teknik POMIT*, Vol. 1, No.1, hal. 1-6, Surabaya.
- Stram, B.N. *Key challenges to expanding renewable energy. Energy Policy.*
- Suryatmo, F. (2014). *Dasar-dasar Teknik Listrik* (Jakarta: Rineka Cipta).
- Sulasno, (2009), *Teknik konversi energi listrik dan sistem pengaturan*, Graha Ilmu, Yogyakarta.

- Tipler. P., (1991), *Fisika untuk Sains dan Teknik Edisi Ketiga Jilid 1*. Jakarta : Erlangga
- Triatmojo, F. (2013). Dinamika Kebijakan Diversifikasi Energi Di Indonesia: Analisis Kebijakan Pengembangan Energi Terbarukan Di Indonesia. *Jurnal Ilmiah Administrasi Publik dan Pembangunan*, Vol.4, No.2
- (1999), *Teknik Pantai*, cetakan ke-5, Penerbit Beta Offset, Yogyakarta
- Uihlein, A., and Magagna, D. (2016). Wave and tidal current energy – A review of the current state of research beyond technology. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 58, 1070–1081.
- Vegh, V., dkk. (2012), “High-field Magnetic Resonance imaging using solenoid radiofrequency coils”, *Magnetic Resonance Imaging, University of Queensland*, ELSEVIER, doi 10.1016/j.mri.2012.04.027.
- Winawang, G., (2014) *Pemanfaatan Gelombang Laut di Selatan Jawa sebagai Sumber Pembangkit Energi Listrik dengan Sistem Bandul*. SKRIPSI. Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surakarta. Surakarta
- Wiyanto, (2008), *Elektromagnetika*, Penerbit Graha Ilmu, Jakarta.
- Young, H.D., R.A Freedman, T.R Sandin dan A.L. Ford (2002), *Fisika Universitas, Jilid 1* (terjemahan Pantur Silaban), Penerbit Erlangga, Jakarta.
- Young, H.D., R.A Freedman, T.R Sandin dan A.L. Ford (2003), *Fisika Universitas, Jilid 2* (terjemahan Pantur Silaban), Penerbit Erlangga, Jakarta.
- Zakaria, A., (2009), *Dasar Teori dan Aplikasi Program Interaktif Berbasis Web Untuk Menghitung Panjang Gelombang dan Pasang Surut*, Universitas Lampung, Bandar Lampung.

BIOGRAFI PENULIS



Penulis memiliki nama lengkap Disabella Dayera, dilahirkan di Sorong-Papua Barat pada tanggal 26 Januari 1990, merupakan anak kedua dari tiga bersaudara dari pasangan David Dominggus Dayera dan Alfrintce Velly Yohanis. Penulis telah menempuh pendidikan formal di SD Negeri 24 Sorong (1995-2001), SMP Negeri 2 Sorong (2001-2004), SMA Negeri 1 Sorong (2004-2007) dan melanjutkan studi ke jenjang perguruan tinggi di Universitas Negeri Papua mengambil jurusan Fisika Sains, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam melalui jalur SNMPTN pada tahun 2007 dengan NRP 2007-37-003 dan lulus mendapat gelar Sarjana Sains (S.Si) pada tahun 2012. Pada tahun 2013, penulis mendapatkan beasiswa Pra-S2 Saintek untuk melanjutkan studi magister di Institut Teknologi Sepuluh Nopember yang kemudian pada tahun 2014 dialihkan ke Beasiswa BPPDN dari DIKTI dan terima sebagai mahasiswa pascasarjana Fisika Sains, bidang minat Optik dan Elektronika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam dengan NRP 1114201010. Penulis mengambil topik penelitian tesis dengan judul **PROTOTYPE GENERATOR LISTRIK TENAGA GELOMBANG PERMUKAAN AIR LAUT 1 WATT UNTUK MENYUPLAI SISTEM DETEKTOR TSUNAMI “YONOHAPÉ” DI LAUT** dibawah bimbingan Dr. Yono Hadi Pramono M.Eng untuk memperoleh gelar Magister Sains (M.Si).