



TUGAS AKHIR - TM184835

**PEMODELAN DAN ANALISA VOLTASE YANG DIHASILKAN
MEKANISME PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GELOMBANG
LAUT TIPE MASS-SPRING-PIEZOELECTRIC BERTINGKAT**

**Natanael Dimas Arihta
NRP 0211184000126**

**Dosen Pembimbing
Aida Annisa Amin Daman S.T., M.T.
NIP 198907052015042005**

**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2022**



TUGAS AKHIR - TM184835

**PEMODELAN DAN ANALISA VOLTASE YANG DIHASILKAN
MEKANISME PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GELOMBANG
LAUT TIPE MASS-SPRING-PIEZOELECTRIC BERTINGKAT**

**Natanael Dimas Arihta
NRP 02111840000126**

**Dosen Pembimbing
Aida Annisa Amin Daman S.T., M.T.
NIP 198907052015042005**

**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2022**



Final Project - TM184835

***MODELING AND ANALYSIS OF VOLTAGE PRODUCED BY
MULTILEVEL MASS-SPRING-PIEZOELECTRIC TYPE POWER
GENERATING MECHANISM***

**Natanael Dimas Arihta
NRP 0211184000126**

Lecture Advisor

**Aida Annisa Amin Daman S.T., M.T.
NIP 198907052015042005**

***MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY AND SYSTEM ENGINEERING
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
Surabaya 2022***

LEMBAR PENGESAHAN

**PEMODELAN DAN ANALISA VOLTASE YANG DIHASILKAN MEKANISME
PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GELOMBANG LAUT TIPE MASS-SPRING-
PIEZOELECTRIC BERTINGKAT**




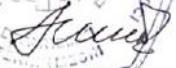
TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat
memperoleh gelar Sarjana
Teknik pada Program Studi S-1
Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh: **Natanael Dimas Arihta**

NRP 02111840000126

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Aida Annisa Amin Daman, S.T., M.T.  Pembimbing
2. Prof. Dr. Harus Laksana Guntur, S.T., M.T.  Penguji
3. Dr. Wiwiek Hendrowati, S.T., M.T.  Penguji
4. Prof. Ir. I Nyoman Sutantra, M.Sc., Ph.D.  Penguji

SURABAYA

Juli, 2022

APPROVAL SHEET





MODELING AND ANALYSIS OF VOLTAGE PRODUCED BY MULTILEVEL MASS- SPRING-PIEZOELECTRIC TYPE POWER GENERATING MECHANISM

FINAL PROJECT

*Submitted to fulfill one of the requirements
for obtaining a degree Bachelor of Engineering at
Undergraduate Study Program of Mechanical Engineering
Mechanical Engineering Department
Faculty of Industrial Technology and System Engineering
Sepuluh Nopember Institute of Technology*

*By: Natanael Dimas Arihta
NRP. 0211184000126*

Approved by Final Project Examiner Team:

- | | | |
|---|--|-----------------|
| 1. Aida Annisa Amin Daman, S.T., M.T. |  | <i>Advisor</i> |
| 2. Prof. Dr. Harus Laksana Guntur, S.T., M.T. |  | <i>Examiner</i> |
| 3. Dr. Wiwiek Hendrowati, S.T., M.T. |  | <i>Examiner</i> |
| 4. Prof. Ir. I Nyoman Sutantra, M.Sc., Ph.D. |  | <i>Examiner</i> |

SURABAYA
July, 2022

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa/NRP : Natanael Dimas Arihta/02111840000126

Departemen : Teknik Mesin FT-IRS

Dosen pembimbing/NIP : Aida Annisa Amin Daman, S.T., M.T./198907052015042005

dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul **“PEMODELAN DAN ANALISA VOLTASE YANG DIHASILKAN MEKANISME PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GELOMBANG LAUT TIPE MASS-SPRING-PIEZOELECTRIC BERTINGKAT”** adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 21 Juli 2022

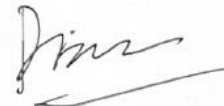
Mengetahui

Dosen Pembimbing

Mahasiswa,



(Aida Annisa Amin Daman, S.T., M.T.)
NIP. 198907052015042005



(Natanael Dimas Arihta)
NRP. 02111840000126

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

Name of student/NRP : Natanael Dimas Arihta / 02111840000126
Department : Mechanical Engineering
Advisor/NIP : Aida Annisa Amin Daman, S.T., M.T./ 198907052015042005

hereby declare that the Final Project with the title of "**MODELING AND ANALYSIS OF VOLTAGE PRODUCED BY MULTILEVEL MASS-SPRING-PIEZOELECTRIC TYPE POWER GENERATING MECHANISM**" is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing.

If in the future there is a discrepancy with this statement, then I am willing to accept sanctions in accordance with the provisions that apply at Sepuluh Nopember Institute of Technology.

Surabaya, 12 Juli 2022

Acknowledged

Advisor



(Aida Annisa Amin Daman, S.T., M.T.)

NIP. 198907052015042005

Student



(Natanael Dimas Arihta)

NRP. 02111840000126

PEMODELAN DAN ANALISA VOLTASE YANG DIHASILKAN MEKANISME PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GELOMBANG LAUT TIPE MASS-SPRING-PIEZOELECTRIC BERTINGKAT

Nama Mahasiswa/NRP : Natanael Dimas Arihta
NRP : 02111840000126
Departemen : Teknik Mesin FTIRS-ITS
Dosen Pembimbing : Aida Annisa Amin Daman S.T., M.T.

ABSTRAK

Kenaikan tarif listrik, pemadaman berkala, kelangkaan dan kenaikan harga bahan bakar minyak merupakan bentuk-bentuk nyata dari krisis energi yang sedang terjadi di Indonesia. Beberapa penelitian sudah mulai dilakukan untuk mencari sumber energi alternatif yang sesuai digunakan di Indonesia. Salah satu jawabannya adalah energi gelombang laut karena Indonesia merupakan negara kepulauan yang memiliki garis pantai yang panjang. Namun, amplitude gelombang laut di Indonesia relative rendah dibanding dengan beberapa negara yang lain. Oleh karena itu, dibutuhkan teknologi yang dapat mengoptimalkan konversi energi gelombang laut di Indonesia menjadi energi listrik. Sehingga pada penelitian ini mensimulasikan mekanisme *energy harvesting* menggunakan *piezoelectric* karena *piezoelectric* dapat menghasilkan energi listrik dengan defleksi yang minimum.

Pada penelitian ini, dilakukan pemodelan dan analisa voltase yang dihasilkan mekanisme pembangkit listrik tenaga gelombang laut tipe *mass-spring-piezoelectric* bertingkat. Cara kerja *piezoelectric* menghasilkan energi adalah dengan mengubah energi kinetik, seperti gelombang laut, menjadi energi listrik. Mekanisme massa dan pegas pada sistem berfungsi untuk menghasilkan defleksi yang lebih besar pada *cantilever piezoelectric*. Variasi yang dilakukan yaitu massa beban utama, amplitude gelombang laut, dan jumlah *piezoelectric*. Variasi massa beban utama yang digunakan adalah 5 kg, 10 kg, dan 15 kg. Sedangkan untuk variasi amplitudo gelombang laut yang digunakan adalah 0.5 m, 1 m, dan 1.5 m. Untuk variasi terakhir yaitu jumlah *piezoelectric* yang digunakan adalah 8, 10, dan 12 buah.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan, didapatkan hasil voltase bangkitan maksimal saat menggunakan beban utama atau massa *base* 15 kg, amplitudo gelombang laut 1.5 m, dan jumlah *piezoelectric* vertikal 12 buah. Voltase yang dihasilkan dengan variabel tersebut bernilai 14.721 V. Selain itu, bisa disimpulkan bahwa pengaruh massa *base*, amplitude, dan jumlah *piezoelectric* vertikal berbanding lurus dengan voltase bangkitan.

Kata kunci: *Piezoelectric*, gelombang laut, voltase

MODELING AND ANALYSIS OF VOLTAGE PRODUCED BY MULTILEVEL MASS-SPRING-PIEZOELECTRIC TYPE POWER GENERATING MECHANISM

Student's Name : Natanael Dimas Arihta
NRP : 02111840000126
Departement : Mechanical Engineering FTIRS ITS
Advisor : Aida Annisa Amin Daman S.T., M.T.

ABSTRACT

Rising electricity tariffs, periodic outages, scarcity and rising fuel prices are tangible forms of the ongoing energy crisis in Indonesia. Several studies have begun to be carried out to find alternative energy sources that are suitable for use in Indonesia. One of the answers is ocean wave energy because Indonesia is an archipelagic country that has a long coastline. However, the amplitude of sea waves in Indonesia is relatively low compared to several other countries. Therefore, technology is needed that can optimize the conversion of ocean wave energy in Indonesia into electrical energy. So that in this study simulated the energy harvesting mechanism using piezoelectric because piezoelectric can produce electrical energy with minimum deflection.

In this study, modeling and analyzing the voltage produced by the mechanism of a multistage mass-spring-piezoelectric type marine wave power plant was carried out. The way piezoelectric works to produce energy is by converting kinetic energy, such as ocean waves, into electrical energy. The mass and spring mechanisms on the system serve to produce greater deflection on the piezoelectric cantilever. The variations carried out are the mass of the main load, the amplitude of the ocean waves, and the number of piezoelectrics. The main load mass variations used are 5 kg, 10 kg, and 15 kg. As for the variations in the amplitude of sea waves used are 0.5 m, 1 m, and 1.5 m. For the last variation, the number of piezoelectrics used is 8, 10, and 12 pieces.

Based on the research conducted, the results of the maximum rise voltage were obtained when using the main load or base mass of 15 kg, the amplitude of sea waves of 1.5 m, and the number of vertical piezoelectrics of 12 pieces. The voltage generated by this variable is 14,721 V. In addition, it can be concluded that the influence of base mass, amplitude, and the number of vertical piezoelectrics is directly proportional to the rise voltage.

Keywords: Piezoelectric, ocean waves, voltage

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis sampaikan kepada Tuhan yang Maha Esa yang telah memberi saya hikmat selama mengerjakan dan kekuatan untuk menyelesaikan tugas akhir ini. Penyusunan tugas akhir ini merupakan persyaratan akademis pada mata kuliah “Tugas Akhir” pada tahun ajaran 2021-2022, program studi S1 Departemen Teknik Mesin FTIRS ITS.

Tugas akhir ini juga penulis jalankan dengan bantuan dan dukungan dari berbagai pihak secara langsung maupun tidak langsung. Maka dari itu, pada kesempatan ini izinkan penulis untuk mengucapkan rasa syukur dan terima kasih kepada pihak-pihak tersebut, antara lain:

1. Ayah tercinta Ria Tarigan, Ibu tercinta Ristika Elviana, dan adik tercinta Natania Arum. Terima kasih atas dorongan dan dukungan kalian.
2. Ibu Aida Annisa A. Daman S.T., M.T., selaku dosen pembimbing penulis. Terima kasih atas saran, ide, diskusi, dan kesabaran yang besar dalam membimbing.
3. Bapak Prof. Dr. Harus Laksana Guntur, S.T., M.T., Ibu Dr. Wiwiek Hendrowati, S.T., M.T., dan Ibu Dinny Harnany S.T., M.T., selaku dosen penguji, terima kasih atas saran-sarannya untuk tugas akhir ini.
4. Keluarga besar bulutangkis araya, Francis, Daffa, Dio, Johan, Alir, Lince, Prita, dan Novi, yang selalu menemani bermain bulutangkis dikala suntuk.
5. Teman seperjuangan dalam tugas akhir ini Daffa, Bagass, Abrar, dan Dasa. Terima kasih sudah mau belajar bersama dan bingung bersama.
6. Teman-teman Lab. Vibrasi Alir, Daffa, Falin, Hani, Najya, dan lain-lain yang sudah mengerjakan bersama dan saling menyemangati.

Meski begitu, penulis menyadari bahwa penelitian ini masih jauh dari kata sempurna, sehingga kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan. Semoga tugas akhir ini dapat memberikan wawasan baru dan menjadi manfaat bagi semua yang membacanya.

Surabaya, 27 Juni 2022
Penulis

Daftar Isi

PERNYATAAN ORISINALITAS	7
ABSTRAK	I
ABSTRACT	II
KATA PENGANTAR	IV
DAFTAR ISI	V
DAFTAR GAMBAR	VII
DAFTAR TABEL	IX
BAB 1	1
1.1 LATAR BELAKANG	1
1.2 RUMUSAN MASALAH	1
1.3 BATASAN MASALAH.....	2
1.4 TUJUAN PENELITIAN.....	2
1.5 MANFAAT PENELITIAN.....	2
BAB 2	3
2.1 DASAR TEORI	3
2.1.1 Derajat Kebebasan	3
2.1.2 Piezoelectric	3
2.2 TINJAUAN PUSTAKA	5
BAB 3	21
3.1 TAHAPAN PENELITIAN.....	21
3.1.1 Diagram Alir Penelitian.....	21
3.1.2 Penjelasan Diagram Alir Penelitian	22
3.2 RANCANGAN MODEL	23
3.2.1 Perancangan Mekanisme.....	23
3.2.2 Persamaan Gerak Model	26
3.2.3 Persamaan Gaya Eksitasi	30
3.3 PENENTUAN PARAMETER DAN VARIABEL	30
3.4 TAHAPAN SIMULASI	33
BAB 4	35
4.1 ANALISA FREKUENSI <i>NATURAL</i> SISTEM PEMBANGKIT	35
4.2 SIMULASI DEFLEKSI PADA <i>PIEZOELECTRIC</i> HORIZONTAL.....	36
4.2.1 <i>Engineering Data</i>	36
4.2.2 <i>Meshing</i>	37
4.2.3 <i>Setup</i>	38
4.2.4 <i>Solution</i>	39
4.3 SIMULASI DEFLEKSI PADA <i>BEAM</i> DAN <i>PIEZOELECTRIC</i> VERTIKAL	39
4.3.1 <i>Engineering Data</i>	39
4.3.2 <i>Meshing</i>	40
4.3.3 <i>Setup</i>	41
4.3.4 <i>Solution</i>	41
4.4 RESPON <i>DISPLACEMENT</i> PADA <i>PIEZOELECTRIC</i> TERHADAP VARIABEL	42

4.4.1 Displacement pada Piezoelectric terhadap Variabel Massa	43
4.4.2 Displacement pada Piezoelectric terhadap Variabel Amplitudo	45
4.4.3 Displacement pada Piezoelectric terhadap Variabel Jumlah Piezoelectric.....	46
4.5 PENGARUH VARIABEL TERHADAP VOLTASE YANG DIHASILKAN	48
4.5.1 Pengaruh Massa terhadap Voltase yang dihasilkan.....	49
4.5.2 Pengaruh Amplitudo terhadap Voltase yang dihasilkan.....	50
4.5.3 Pengaruh Jumlah Piezoelectric terhadap Voltase yang dihasilkan.....	52
4.6 PEMBAHASAN.....	54
BAB 5	58
5.1 KESIMPULAN	58
5.2 SARAN	58
DAFTAR PUSTAKA	59
LAMPIRAN	60
BIODATA PENULIS.....	66

Daftar Gambar

Gambar 2.1 <i>Free body diagram</i> dari sistem dengan dua derajat kebebasan (Chang, 2016)	3
Gambar 2.2 Perubahan distribusi muatan bahan <i>piezoelectric</i> (a) Tanpa gaya luar, (b) Bila diberi gaya tarik, (c) Bila diberi gaya tekan(Hidayatullah & Syukri, 2016)	4
Gambar 2.3 Ilustrasi <i>cantilever piezoelectric</i> (Hehn & Manoli, 2015).....	4
Gambar 2.4 <i>Floating Energy Harvester Model</i> (Viet et al., 2016).....	5
Gambar 2.5 Sistem pembangkit terapung (Viet et al., 2016)	6
Gambar 2.6 Grafik amplitudo gelombang terhadap RMS (Viet et al., 2016).....	7
Gambar 2.7 Grafik pengaruh massa terhadap RMS (Viet et al., 2016).....	7
Gambar 2.8 Grafik pengaruh periode gelombang terhadap daya (Viet et al., 2016)	8
Gambar 2.9 Grafik pengaruh <i>lever height</i> terhadap daya (Viet et al., 2016).....	8
Gambar 2.10 Model dari pembangkit energi <i>piezoelectric</i> dan operasinya (Hwang et al., 2017).....	9
Gambar 2.11 Grafik hambatan terhadap daya (Hwang et al., 2017).....	10
Gambar 2.12 Grafik <i>displacement</i> terhadap voltase (Hwang et al., 2017).....	10
Gambar 2.13 <i>Free body diagram</i> dari pembangkit (Nabavi et al., 2018)	11
Gambar 2.14 Komponen yang digunakan dalam percobaan (A), pembangkit (B) (Nabavi et al., 2018)	12
Gambar 2.15 Grafik frekuensi terhadap percepatan dan voltase (Nabavi et al., 2018).....	12
Gambar 2.16 Pengaruh perubahan kekakuan pada frekuensi pertama dan kedua dan <i>perfection rate</i> di stasiun 44.013 (Boston) (A); dan stasiun 46.012 (San Francisco) (B) respon frekuensi sistem yang terletak di Boston (C) dan San Francisco (D) (Nabavi et al., 2018)	13
Gambar 2.17 Pengaruh perubahan tahanan beban terhadap daya keluaran pertengahan tahun pertama dan kedua di stasiun 44.013 (Boston) (A); dan stasiun 46.012 (San Francisco) (B) (Nabavi et al., 2018)	13
Gambar 2.18 Skematik balok <i>piezoelectric</i> dengan beban massa ujung (Nabavi et al., 2019)	14
Gambar 2.19 Tegangan keluaran <i>Mtip1</i> (A); <i>Mtip2</i> (B) dari sistem pembangkit energi <i>piezoelectric</i> (Nabavi et al., 2019).....	15
Gambar 2.20 Konfigurasi pertama (A); kedua (B); ketiga (C) dan keempat (D) untuk sistem pembangkit (Nabavi et al., 2019).....	15
Gambar 2.21 Grafik perbandingan tegangan yang dihasilkan antar konfigurasi (Nabavi et al., 2019) .	16
Gambar 2.22 Instalasi alat pembangkit tenaga gelombang laut tipe kayuh dayung- <i>piezoelectric</i> (Yusup, 2016).....	17
Gambar 2.23 Pengaruh frekuensi terhadap voltase dan daya listrik (Yusup, 2016)	18
Gambar 2.24 Pengaruh frekuensi terhadap kuat arus yang dihasilkan (Yusup, 2016).....	19
Gambar 2.25 Pengaruh tinggi gelombang terhadap voltase (Yusup, 2016)	19
Gambar 2.26 Pengaruh tinggi gelombang yang dihasilkan terhadap kuat arus yang dihasilkan (Yusup, 2016)	20
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian.....	22
Gambar 3.2 PLTGL dengan sistem massa pada mekanisme apung	24
Gambar 3.3 Detail komponen <i>piezoelectric</i> horizontal.....	24
Gambar 3.4 Detail pemasangan <i>piezoelectric</i> vertikal.....	25
Gambar 3.5 Tampak samping model pembangkit	25
Gambar 3.6 <i>Free Body Diagram</i> Pembangkit pada Gelombang	26
Gambar 3.7 Tampak atas <i>free-body diagram</i>	26
Gambar 3.8 Tampak samping <i>free-body diagram</i>	27
Gambar 3.9 <i>Free-body diagram</i> dari massa <i>piezoelectric</i> 1.....	27
Gambar 3.10 <i>Free-body diagram</i> dari massa <i>base</i>	28
Gambar 3.11 <i>Free-body diagram</i> dari massa <i>piezoelectric</i> 2.....	28
Gambar 3.12 <i>Free-body diagram</i> dari massa <i>tip</i>	29
Gambar 3.13 Pemetaan tinggi gelombang di Indonesia (<i>Pusat Meteorologi Maritim BMKG, n.d.</i>)...33	

Gambar 3.14 <i>Flowchart</i> tahapan simulasi.....	34
Gambar 4.1 <i>Cantilever Piezoelectric Free Body Diagram</i>	36
Gambar 4.2 <i>Meshing Horizontal Piezoelectric</i>	37
Gambar 4.3 Parameter Kualitas <i>Skewness Mesh Metric</i>	38
Gambar 4.4 <i>Setup Static Structural</i>	38
Gambar 4.5 Solusi Defleksi <i>Horizontal Piezoelectric</i>	39
Gambar 4.6 <i>Meshing Beam dan Piezoelectric Vertikal</i>	40
Gambar 4.7 <i>Setup Static Structural</i>	41
Gambar 4.8 Solusi Defleksi <i>Vertical Beam</i>	42
Gambar 4.9 Grafik Waktu terhadap Defleksi pada <i>Horizontal Piezoelectric</i>	43
Gambar 4.10 Grafik Waktu terhadap Defleksi pada <i>Piezoelectric Vertikal</i>	44
Gambar 4.11 Grafik Waktu terhadap Defleksi pada <i>Horizontal Piezoelectric</i>	45
Gambar 4.12 Grafik Waktu terhadap Defleksi pada <i>Piezoelectric Vertikal</i>	46
Gambar 4.13 Grafik Waktu terhadap Defleksi pada <i>Horizontal Piezoelectric</i>	47
Gambar 4.14 Grafik Waktu terhadap Defleksi pada <i>Piezoelectric Vertikal</i>	48
Gambar 4.15 Grafik Waktu terhadap Voltase pada <i>Horizontal Piezoelectric</i>	49
Gambar 4.16 Grafik Waktu terhadap Voltase pada <i>Piezoelectric Vertikal</i>	50
Gambar 4.17 Grafik Waktu terhadap Voltase pada <i>Horizontal Piezoelectric</i>	51
Gambar 4.18 Grafik Waktu terhadap Voltase pada <i>Piezoelectric Vertikal</i>	52
Gambar 4.19 Grafik Waktu terhadap Voltase pada <i>Horizontal Piezoelectric</i>	53
Gambar 4.20 Grafik Waktu terhadap Voltase pada <i>Piezoelectric Vertikal</i>	54
Gambar 4.21 Grafik Pengaruh Variabel Amplitudo dan Jumlah Piezoelectric pada Massa 5 Kg.....	56
Gambar 4.22 Grafik Pengaruh Variabel Amplitudo dan Jumlah Piezoelectric pada Massa 10 Kg.....	56
Gambar 4.23 Grafik Pengaruh Variabel Amplitudo dan Jumlah Piezoelectric pada Massa 15 Kg.....	57

Daftar Tabel

Tabel 2.1 <i>Ocean Wave Data and FEH's Dimension</i> (Viet et al., 2016).....	6
Tabel 2.2 Spesifikasi <i>piezoelectric</i> yang digunakan dalam penelitian (Hwang et al., 2017)	9
Tabel 2.3 Sifat-sifat perangkat sistem pembangkit energi yang digunakan (Nabavi et al., 2019).....	14
Tabel 2.4 Frekuensi alami yang terukur dan frekuensi alami awal.....	15
Tabel 2.5 Data energi rata-rata yang dihasilkan mekanisme dengan variasi frekuensi, tinggi gelombang dan jumlah PZT (Yusup, 2016)	17
Tabel 3.1 Tabel Parameter Sistem Utama	30
Tabel 3.2 Tabel Parameter <i>Piezoelectric Minisense 100 Vibration Sensor</i>	31
Tabel 3.3 Tabel Parameter <i>Piezoelectric</i> dan <i>Beam</i> Vertikal (Nabavi et al., 2018).....	31
Tabel 3.4 Tabel Parameter Teknis <i>Piezoelectric</i> Vertikal (Nabavi et al., 2019)	31
Tabel 3.5 Tabel parameter gelombang	32
Tabel 3.6 Tabel variabel penelitian.....	33
Tabel 4.1 Tabel Variabel dan Frekuensi <i>Natural</i> Pembangkit	36
Tabel 4.2 <i>Material Properties Horizontal Piezoelectric</i>	37
Tabel 4.3 <i>Mesh Metric</i> dan <i>Statistic</i>	37
Tabel 4.4 Hasil Uji Konvergensi <i>Meshing Horizontal Piezoelectric</i>	38
Tabel 4.5 Tabel Hasil Nilai Defleksi <i>Horizontal Piezoelectric</i>	39
Tabel 4.6 <i>Material Properties Beam</i>	40
Tabel 4.7 <i>Mesh Metric</i> dan <i>Statistic</i>	40
Tabel 4.8 Hasil Uji Konvergensi <i>Beam</i> dan <i>Piezoelectric Vertikal</i>	41
Tabel 4.9 Tabel Hasil Nilai Defleksi <i>Vertical Beam</i>	42
Tabel 4.10 Sampel Variasi Pengujian	42
Tabel 4.11 Data Statistik Defleksi Variasi Massa pada <i>Horizontal Piezoelectric</i>	43
Tabel 4.12 Data Statistik Defleksi Variasi Massa pada <i>Piezoelectric</i> Vertikal	44
Tabel 4.13 Data Statistik Defleksi Variasi Amplitudo <i>Horizontal Piezoelectric</i>	45
Tabel 4.14 Data Statistik Defleksi Variasi Amplitudo <i>Piezoelectric Vertikal</i>	46
Tabel 4.15 Data Statistik Defleksi Variasi Jumlah Piezoelektrik pada <i>Horizontal Piezoelectric</i>	47
Tabel 4.16 Data Statistik Defleksi Variasi Jumlah Piezoelektrik pada <i>Piezoelectric</i> Vertikal.....	48
Tabel 4.17 Data Statistik Respon Voltase Variasi Massa pada <i>Horizontal Piezoelectric</i>	49
Tabel 4.18 Data Statistik Respon Voltase Variasi Massa pada <i>Piezoelectric</i> Vertikal.....	50
Tabel 4.19 Data Statistik Respon Voltase Variasi Amplitudo pada <i>Horizontal Piezoelectric</i>	51
Tabel 4.20 Data Statistik Respon Voltase Variasi Amplitudo pada <i>Piezoelectric</i> Vertikal	52
Tabel 4.21 Data Statistik Respon Voltase Variasi Jumlah Piezoelektrik pada <i>Horizontal Piezoelectric</i>	53
Tabel 4.22 Data Statistik Respon Voltase Variasi Jumlah Piezoelektrik pada <i>Piezoelectric</i> Vertikal ..	54
Tabel 4.23 Tabel Hasil RMS <i>Voltage</i>	55

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kenaikan tarif listrik, pemadaman berkala, kelangkaan dan kenaikan harga bahan bakar minyak merupakan bentuk-bentuk nyata dari krisis energi yang sedang terjadi di Indonesia. Peningkatan permintaan energi ini seiring dengan pulihnya perekonomian negara ditengah pandemic COVID-19 ini. Peningkatan kebutuhan tersebut dapat dilihat dari tren pembelian kendaraan motor berbahan bakar minyak. Penjualan mobil pada 2017 mencapai 1,079 juta unit, naik hampir 150 persen dalam 10 tahun atau rata-rata 10 persen per tahun. Pada kurun yang sama, penjualan motor meningkat sebesar 33 persen, atau 3,3 persen per tahun (BPPT, 2018). Cepat atau lambat bahan bakar minyak akan semakin mahal karena jumlahnya semakin sedikit dan akhirnya akan habis. Oleh sebab itu, diperlukan adanya energi baru terbarukan (EBT) yang dapat menggantikan peran minyak sebagai sumber energi utama. Dalam Rencana Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) 2021-2030, Indonesia menetapkan porsi penambahan pembangkit energi baru terbarukan (EBT) sebagai sumber energi pembangkit listrik sebesar 51,6% dan energi fosil sebesar 48,4% (EBTKE, 2021). Hal tersebut menunjukkan bahwa kedepannya energi baru terbarukan memiliki potensi yang besar untuk digunakan sebagai sumber energi utama.

Salah satu energi baru terbarukan yang berpotensi besar untuk menyumbang energi di Indonesia adalah energi gelombang. Indonesia merupakan negara kepulauan yang memiliki garis pantai yang panjang, selat yang sempit, dan teluk yang banyak. Hal tersebut menunjukkan besarnya potensi Indonesia untuk menghasilkan energi dari gelombang laut. Di Indonesia penelitian mengenai energi terbarukan ini juga sudah mulai dilakukan. Menurut penelitian dari *Center for Development of Region (CDSR)*, satu *bouy* berdiameter dua meter yang diletakan di Cidaun, Kabupaten Cianjur dapat menghasilkan densitas energi hingga 42.41 kW/m. Energi tersebut dapat digunakan untuk memenuhi kebutuhan listrik 300 rumah (CDSR, 2019). Pembangkit listrik tipe ini sangat sesuai untuk diterapkan di kota atau Pelabuhan kecil di kepulauan maupun di pesisir. Dengan begitu, tidak lagi diperlukan kabel transmisi energi bawah laut bertegangan tinggi. Dari sisi pemerintah, pengembangan energi terbarukan ini juga sudah didukung penuh. Di *Bali Clean Energy Forum*, Presiden RI Joko Widodo telah berkomitmen untuk mendukung pengembangan energi bersih, baru, dan terbarukan (Samadhi, 2016).

Meski memiliki potensi energi yang tinggi, pengembangan terkait energi baru terbarukan ini masih belum optimal. Di satu sisi, energi gelombang laut memiliki densitas energi yang tinggi dan memiliki dampak pada lingkungan yang kecil. Tetapi, selain dari kondisi laut yang dinamis dan tidak dapat dikendalikan, penyebab mahalnya harga listrik dari energi gelombang laut adalah kurangnya penelitian terkait EBT ini. Oleh sebab itu, perlu diadakan penelitian lebih lanjut mengenai mekanisme pembangkit listrik tenaga gelombang laut agar dapat menghasilkan listrik yang optimum.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang mengenai penggunaan energi gelombang laut sebagai energi baru terbarukan, diperlukan adanya penelitian yang lebih lanjut. Maka dari itu perumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana merancang dan mensimulasikan pembangkit listrik tenaga gelombang laut dengan sistem massa pada mekanisme apung?
2. Bagaimana pengaruh massa beban dalam mekanisme terhadap energi listrik yang dihasilkan?
3. Bagaimana pengaruh amplitudo gelombang terhadap energi listrik yang dihasilkan?
4. Bagaimana pengaruh jumlah *piezoelectric* dalam mekanisme terhadap energi listrik yang dihasilkan?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Eksitasi gelombang yang dihasilkan dianggap konstan.
2. Lantai dianggap licin maka gesekan dan redaman sangat kecil sehingga dapat diabaikan.
3. Pengaruh gaya vertikal diabaikan.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Memperoleh rancangan dan mensimulasikan pembangkit listrik tenaga gelombang laut dengan sistem massa pada mekanisme apung.
2. Mengetahui pengaruh variasi massa beban dalam mekanisme terhadap voltase yang dihasilkan.
3. Mengetahui pengaruh variasi amplitudo terhadap voltase yang dihasilkan.
4. Mengetahui pengaruh variasi jumlah *piezoelectric* dalam mekanisme terhadap voltase yang dihasilkan.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah:

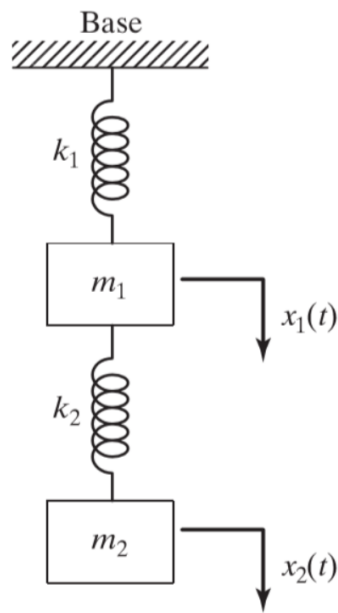
1. Memberi solusi alternatif baru untuk mengatasi krisis energi yang sedang terjadi di Indonesia.
2. Memberi suatu pandangan baru terkait pengembangan pembangkit energi gelombang laut yang menggunakan *piezoelectric*.
3. Mengoptimalkan penggunaan gelombang laut sebagai sumber daya alam terbarukan untuk menghasilkan energi bersih terbarukan.

BAB 2 DASAR TEORI DAN TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Dasar Teori

2.1.1 Derajat Kebebasan

Derajat kebebasan dapat didefinisikan sebagai jumlah minimum variabel independen yang diperlukan untuk menggambarkan gerakan suatu sistem. Sebagai contoh, sistem yang memiliki satu derajat kebebasan hanya membutuhkan satu variabel independen untuk menggambarkan gerakan sistem tersebut. Semakin banyak derajat kebebasan yang dimiliki suatu sistem, maka pergerakan dari mekanisme akan semakin bebas juga (Yusup, 2016).



Gambar 2.1 *Free body diagram* dari sistem dengan dua derajat kebebasan (Chang, 2016)

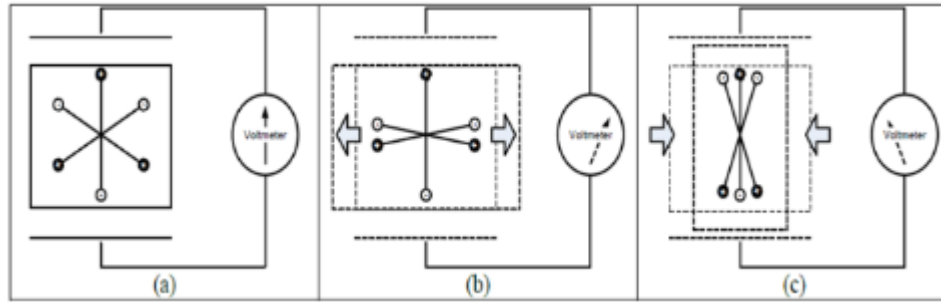
Tidak selamanya sistem dengan derajat kebebasan lebih dari satu memiliki jumlah arah pergerakan yang sama. Contohnya pada Gambar 2.1 *Free body diagram* dari sistem dengan dua derajat kebebasan (Chang, 2016) bisa dilihat bahwa sistem tersebut memiliki dua derajat kebebasan namun kedua massa bergerak ke arah yang sama. Dalam contoh ini, pergerakan x_1 dan x_2 sama-sama bergerak pada sumbu y . Walau begitu, pergerakan x_1 dan x_2 saling mempengaruhi satu dengan yang lain.

2.1.2 Piezoelectric

Piezoelectric merupakan suatu bahan yang mampu menghasilkan tegangan listrik saat mengalami defleksi akibat tekanan, tarikan atau getaran. Gaya yang diberikan pada *piezoelectric* akan menyebabkan kristal untuk menghasilkan listrik karena terjadinya polarisasi muatan.

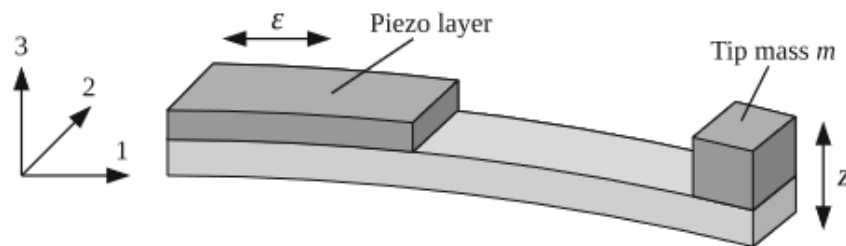
Pada Gambar 2.2 (a) terlihat susunan muatan positif dan negatif yang tersebar merata saat kristal *piezoelectric* tidak mengalami defleksi akibat gaya dari luar. Namun bila menerima gaya dari luar seperti gaya tekan atau gaya tarik, posisi muatan berubah sehingga menghasilkan polarisasi muatan dan tegangan listrik. Gambar 2.2 (b) memperlihatkan saat bahan *piezoelectric* menerima gaya tarik, bahan melebar dan memendek. Muatan positif dan negatif tertarik ke bagian samping

dan saling menetralkan. Muatan sisanya mengarah kebagian atas dan bawah sehingga terbentuk kutub negatif dan kutub positif. Gambar 2.2 (c) memperlihatkan saat *piezoelectric* menerima gaya tekan dari sisi kanan dan kiri, bahan memanjang dan menyempit. Selain itu, muatan pada bahan terbagi ke dua sisi. Masing-masing sisi mengalami kelebihan muatan sehingga terbentuk kutub positif dan kutub negatif. Peristiwa ini menimbulkan perbedaan potensial listrik. Bila kedua kutub bahan piezoelektrik dihubungkan dalam rangkaian listrik tertutup, perbedaan potensial yang terjadi dapat disalurkan dalam bentuk impuls arus listrik (Hidayatullah & Syukri, 2016).



Gambar 2.2 Perubahan distribusi muatan bahan *piezoelectric* (a) Tanpa gaya luar, (b) Bila diberi gaya tarik, (c) Bila diberi gaya tekan (Hidayatullah & Syukri, 2016)

Rancangan pembangkit listrik tenaga gelombang laut pada percobaan ini menggunakan *cantilever piezoelectric*. *Cantilever piezoelectric* adalah jenis *piezoelectric* yang berbentuk *cantilever* dengan material *piezoelectric transducer* (PZT) di bagian atas atau bawah. *Piezoelectric* jenis ini dapat dimodelkan sebagai pegas *cantilever beam* yang memiliki konstanta kekakuan. *Cantilever piezoelectric* pada penelitian sebelumnya merupakan tipe *piezoelectric* yang sesuai untuk sistem yang mengalami frekuensi yang rendah. Menurut Gambar 2.3, defleksi yang dialami oleh PZT terdapat pada sumbu z dan regangan pada sumbu x (Hehn & Manoli, 2015).



Gambar 2.3 Ilustrasi *cantilever piezoelectric* (Hehn & Manoli, 2015).

Untuk mengetahui berapa tegangan listrik yang dihasilkan oleh *cantilever piezoelectric*, digunakan persamaan (2.1).

$$V_p = \frac{3d_{31}E_p w_p t}{4C} X_p \quad (2.1)$$

Dimana:

V_p = Voltase *piezoelectric*

d_{31} = Konstanta voltase

E_p = Modulus elastisitas

w_p = Lebar *piezoelectric*

t = Tebal *piezoelectric*

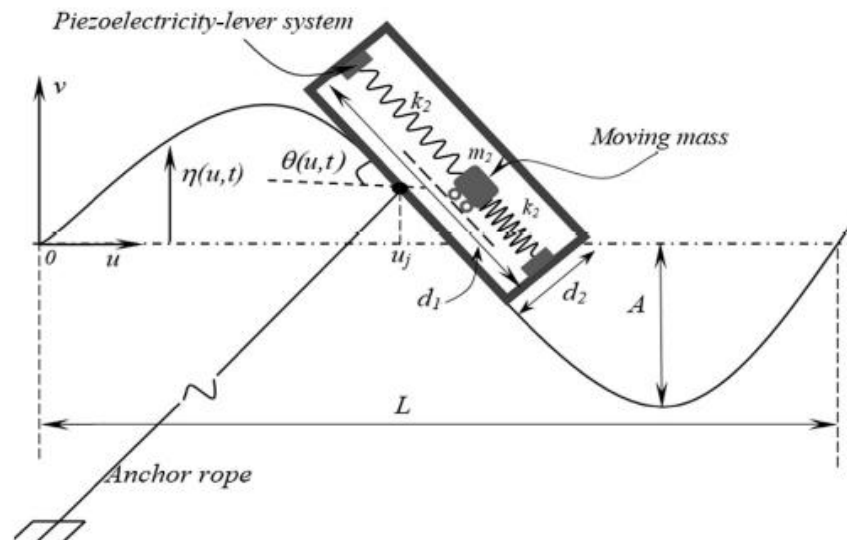
C = *Piezoelectric capacitance*

X_p = Defleksi *piezoelectric*

2.2 Tinjauan Pustaka

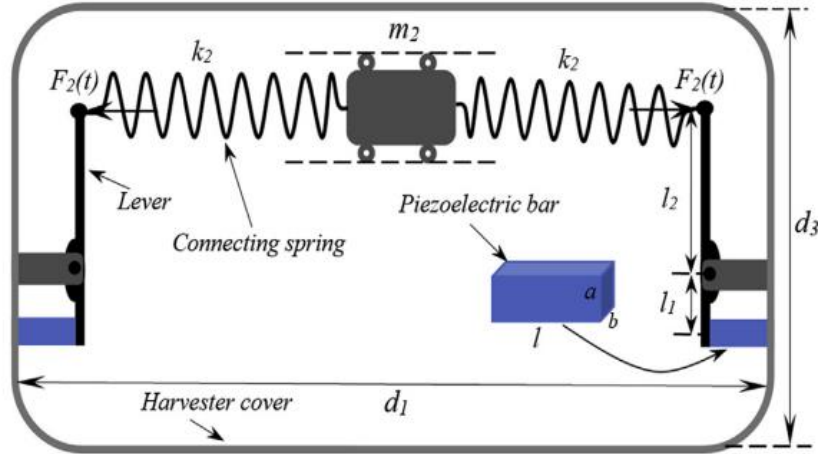
Sebelum melakukan penelitian, diperlukan adanya tinjauan pustaka dari penelitian-penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya. Penelitian pertama membahas mengenai pemanfaatan energi gelombang laut dengan pembangkit terapung (Viet et al., 2016). Penelitian ini mengungkapkan bahwa gelombang laut memiliki densitas energi yang lebih besar dibandingkan energi matahari atau angin. Densitas energi gelombang laut diperkirakan sebesar $2-3 \text{ kW/m}^2$. Oleh sebab itu, penelitian ini berfokus kepada pembangkit listrik tenaga gelombang laut. Tipe pembangkit yang diteliti adalah yang dapat digunakan tidak hanya pada gelombang yang dangkal, namun juga pada laut dalam. Selain itu diperlukan juga pembangkit yang mudah untuk dipelihara dan dapat berjalan secara stabil guna meningkatkan efisiensi pembangkit.

Pembangkit listrik terapung menggunakan *piezoelectric* yang dikembangkan dapat berfungsi secara optimal pada gelombang laut *intermediate* sampai laut dalam. Selain memenuhi kebutuhan diatas, alasan penggunaan *piezoelectric* adalah karena memiliki transduksi densitas energi tiga kali lebih besar dibandingkan dengan elektrostatis maupun elektromagnetik. Pembangkit yang dikembangkan menggunakan sistem massa dan pegas untuk mengubah gerakan gelombang laut menjadi getaran yang kemudian disalurkan ke *piezoelectric* yang akan mengubah energi getaran menjadi energi listrik. Model pembangkit listrik terapung dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 *Floating Energy Harvester Model* (Viet et al., 2016)

Setelah mendapatkan gambaran desain dari pembangkit terapung dibuatlah persamaan-persamaan analitis untuk mengetahui performa dari pembangkit. Untuk mempermudah pembuatan persamaan analitik, maka dibuat model dinamis pada pembangkit seperti terlihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Sistem pembangkit terapung (Viet et al., 2016)

Dari model dinamis sistem diatas dapat dijabarkan persamaan untuk mencari pergeseran permukaan laut, pergeseran angular dari pembangkit terapung, dan RMS. Persamaan yang digunakan dapat dilihat sebagai berikut:

$$\eta(u, t) = A \cdot \sin(q \cdot u - \omega \cdot t) \quad (2.2)$$

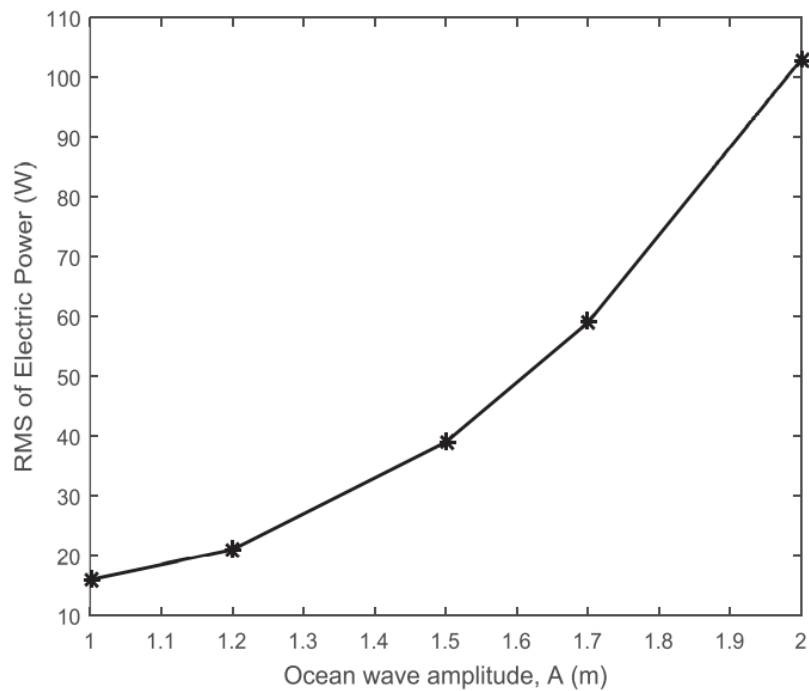
$$\theta(u, t) = \arctan (A \cdot q \cdot \cos(q \cdot u - \omega \cdot t)) \quad (2.3)$$

Pada penelitian ini digunakan data gelombang laut dan dimensi pembangkit terapung sebagai berikut:

Tabel 2.1 *Ocean Wave Data and FEH's Dimension* (Viet et al., 2016)

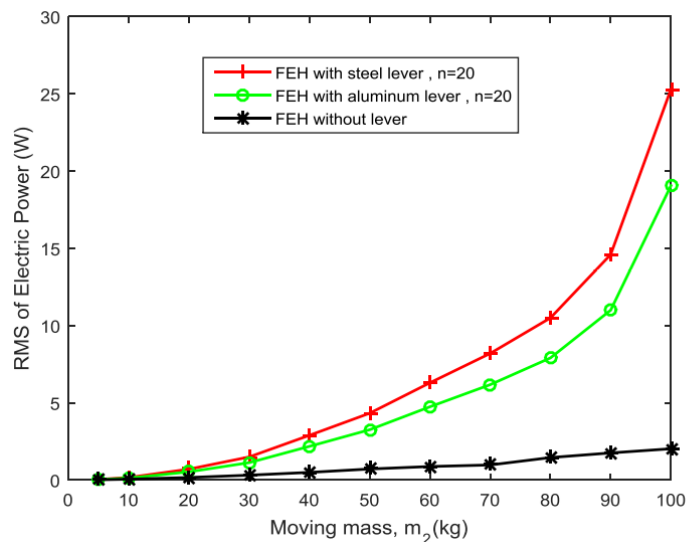
<i>Ocean Wave Data and FEH's Dimension</i>					
<i>Ocean Wave Properties</i>			<i>FEH Dimension</i>		
A(m)	T(s)	L(m)	d1(m)	d2(m)	d3(m)
1.3	6	3	1	0.5	1

Data dari gelombang dan *floating energy harvester* dapat dilihat pada Tabel 2.1. Data yang ada kemudian diolah menggunakan persamaan yang ada dan diperoleh hasil yang terlihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Grafik amplitudo gelombang terhadap RMS (Viet et al., 2016)

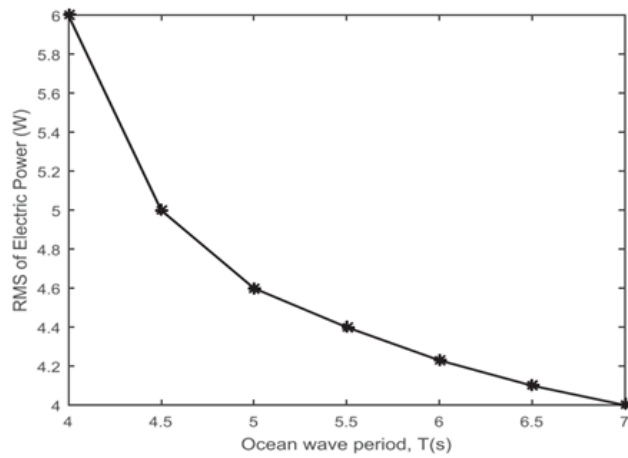
Massa 2 yang digunakan pada persamaan ini sebesar 100 kg. Pada Gambar 2.6 dapat dilihat bahwa kenaikan amplitudo gelombang berbanding lurus dengan kenaikan RMS pada pembangkit terapung. Pada amplitudo 1 m, RMS yang dihasilkan sebesar 17W dan saat amplitudo 2 m RMS yang dihasilkan sebesar 103W.



Gambar 2.7 Grafik pengaruh massa terhadap RMS (Viet et al., 2016)

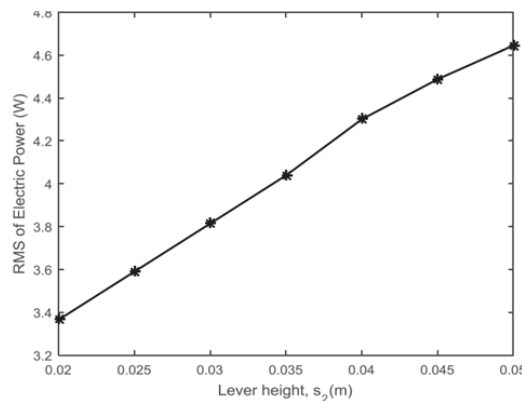
Pada Gambar 2.7 dapat dilihat bahwa peningkatan massa pada pembangkit berbanding lurus dengan peningkatan RMS. Selain itu, pengaruh *lever* juga dapat dilihat dari grafik tersebut. Dengan menggunakan *steel lever*, sistem menghasilkan 10 kali lebih besar RMS dibanding tidak menggunakan *lever* saat menggunakan beban yang sama

yaitu 100kg. Saat menggunakan *steel lever* sistem menghasilkan 25W dan saat tidak menggunakan *lever* sistem menghasilkan 2.5W.



Gambar 2.8 Grafik pengaruh periode gelombang terhadap daya (Viet et al., 2016)

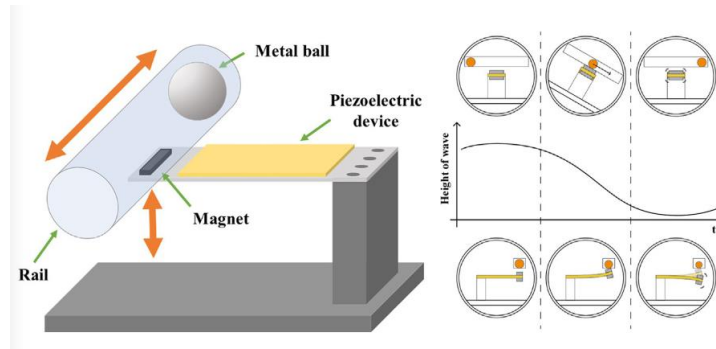
Pada Gambar 2.8 dapat terlihat pengaruh periode gelombang terhadap daya. Periode dan frekuensi berbanding terbalik, maka bisa disimpulkan bahwa semakin besar periode, frekuensi akan semakin kecil. Frekuensi yang lebih kecil akan menghasilkan kecepatan linear massa yang lebih kecil juga. Hal tersebut akan menyebabkan sistem untuk menghasilkan daya yang lebih kecil juga.



Gambar 2.9 Grafik pengaruh *lever height* terhadap daya (Viet et al., 2016)

Pada Gambar 2.9 dapat dilihat bahwa *lever height* dan daya yang dihasilkan sistem berbanding lurus. Hal tersebut dapat terjadi karena dengan *lever height* yang lebih panjang, keuntungan mekanik akibat *lever* akan semakin tinggi. Gaya yang diterima oleh *piezoelectric* juga akan semakin besar maka daya yang dihasilkan juga semakin besar.

Penelitian selanjutnya berfokus pada desain sistem yang memanfaatkan *sway movement* dari batang (Hwang et al., 2017). Tujuan penelitian ini untuk memanfaatkan getaran dengan frekuensi rendah yang berada *bouy* dan kapal. Model yang digunakan menggunakan *cantilever*, *piezoelectric*, dan bola seperti yang terlihat pada Gambar 2.10. Penggunaan *cantilever* berfungsi untuk meningkatkan *strain* pada *piezoelectric* dan menghasilkan energi yang lebih besar.



Gambar 2.10 Model dari pembangkit energi *piezoelectric* dan operasinya (Hwang et al., 2017)

Untuk menghitung frekuensi resonansi *cantilever*, dapat menggunakan persamaan (2.4). Sedangkan untuk menghitung kekakuan effective pada *cantilever* dapat menggunakan persamaan (2.5). Untuk data Spesifikasi *piezoelectric* yang digunakan dalam penelitian dapat dilihat pada Tabel 2.2.

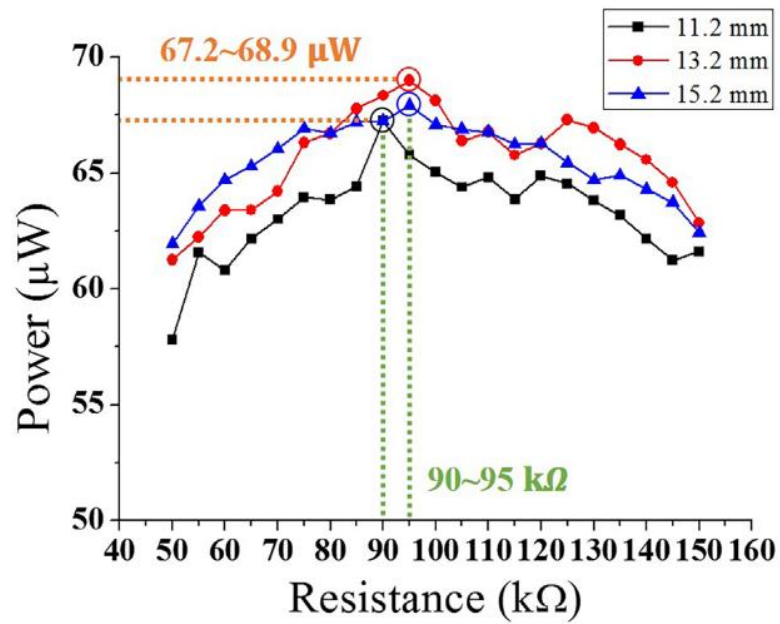
$$\omega_{\text{beam}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{K_{\text{beam}}}{m_{\text{eff}}}} \quad (2.4)$$

$$K_{\text{beam}} = \frac{b}{4L^3} \left(\sum_{i=1}^{n_1} n_i E_i h_i^3 + \sum_{i=1}^{n_2} n_i E_i h_i^3 \right) \quad (2.5)$$

Tabel 2.2 Spesifikasi *piezoelectric* yang digunakan dalam penelitian (Hwang et al., 2017)

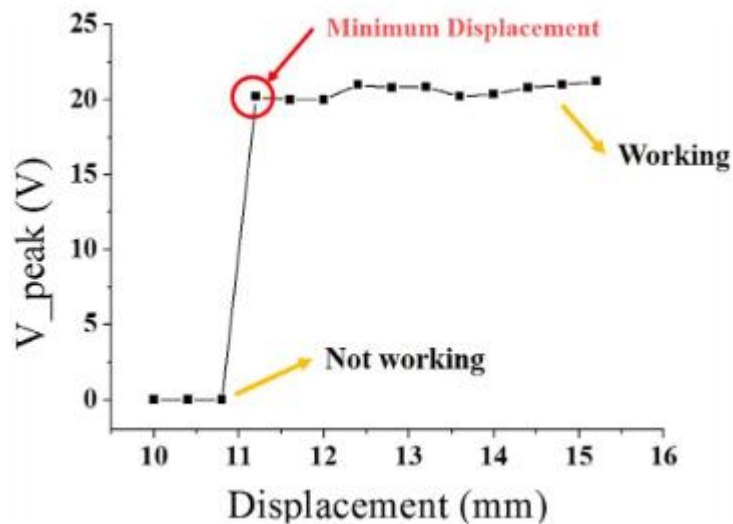
Properties	Value
Density (g/cm ³)	7.6
Dielectric constants ($\epsilon_{33T}/\epsilon_0$)	21
Piezoelectric charge constants ($\times 10^{-12}$ m/V): d33, d31	450, -200
Piezoelectric voltage constants ($\times 10^{-3}$ V m/N): g33, g31	22.1, 11.1
Elastic constants ($\times 10^{-12}$ m ² /N): SE11, SD11	13.8, 11.8
Stainless steel (SUS-304)	N/A
Density(g/cm ³)	8
Young's modulus (GPa)	193
Tip-massmagnet(g)	4

Pada penelitian ini, metode pengambilan datanya adalah lewat eksperimen. Setelah dilakukan eksperimen, didapat bahwa voltase terbesar yang dihasilkan adalah 21.1V menggunakan *displacement* sebesar 13.2 mm. Kemudian dilakukan eksperimen lanjutan untuk menemukan *displacement* yang dapat menghasilkan daya terbesar. Berikut adalah hasil dari eksperimen tersebut:



Gambar 2.11 Grafik hambatan terhadap daya (Hwang et al., 2017)

Menurut Gambar 2.11 daya terbesar bisa tercapai menggunakan *displacement* 13.2 mm dan hambatan antara 90-95 kΩ. Untuk frekuensi yang digunakan pada semua eksperimen adalah 0.5 Hz. Alasan penggunaan frekuensi tersebut adalah untuk menyesuaikan dengan frekuensi yang ada di gelombang laut.



Gambar 2.12 Grafik *displacement* terhadap voltase (Hwang et al., 2017)

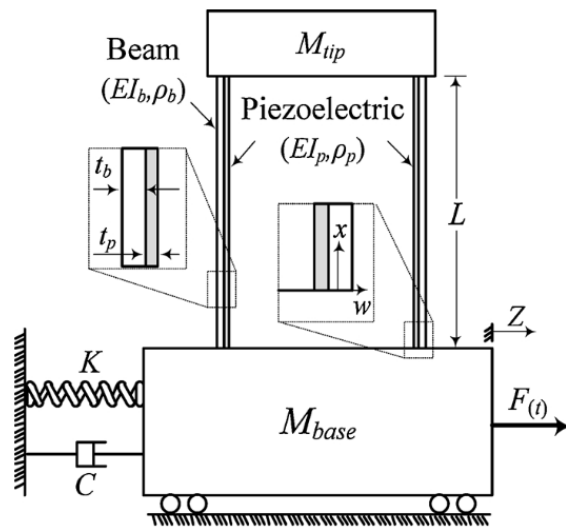
Pada Gambar 2.12 menunjukkan bahwa ada saat dimana sistem tidak menghasilkan voltase dan saat dimana voltase yang dihasilkan relatif stabil. Hal tersebut menunjukkan bahwa *piezoelectric* tersebut memiliki defleksi minimal untuk menghasilkan tegangan dan defleksi maksimal dimana *piezoelectric* tersebut tidak dapat menghasilkan voltase diatas itu.

Dengan menggunakan desain pada penelitian ini, kekurangan yang ada pada sistem pembangkit menggunakan *cantilever* pada umumnya dapat dikurangi. Desain ini dapat beroperasi pada frekuensi rendah, bergerak di dua arah, dan menghasilkan daya lebih besar. Selain itu, desain ini dapat digunakan dalam skala lebih kecil.

Penelitian berikutnya membahas mengenai penggunaan piezoelectric pada *offshore buoys* untuk menghasilkan energi (Nabavi et al., 2018). Energi gelombang laut adalah salah satu energi yang berpotensi besar namun belum dikembangkan secara maksimal. Salah satu alasannya adalah karena frekuensi dari gelombang yang sangat rendah. Pada penelitian ini diterapkan sistem pembangkit energi berbasis *piezoelectric* yang dirangkai seperti kolom. Tujuannya adalah untuk mendapatkan *strain* terbesar. Semakin besar *strain*, akan semakin besar pula energi yang dihasilkan. Penggunaannya sendiri dituju untuk memberi energi untuk perangkat elektronik pada *offshore weather bouy* seperti sensor pengambilan data, cuaca, dll.

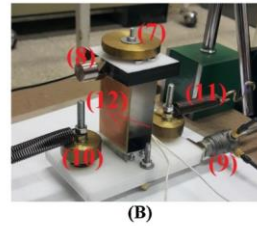
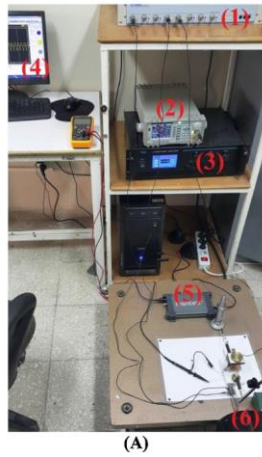
Bouy adalah alat aerologis yang dapat mengukur sifat gelombang laut dengan cara mengejar gerakan partikel air di permukaan laut. Menurut penelitian yang sudah ada, *bouy* diasumsikan hanya memiliki gerakan *heave*. Asumsi tersebut dapat dikonfirmasi berdasarkan hasil percobaan yang dilakukan. Pembangkit yang digunakan dalam *bouy* memiliki dua derajat kebebasan. Untuk mendapatkan energi maksimum, frekuensi pada sistem harus mendekati frekuensi dari gelombang laut.

Desain pada penelitian ini memperhitungkan ketinggian dan frekuensi gelombang. Untuk lebih mudah membayangkan, berikut adalah *free body diagram* dari pembangkit:



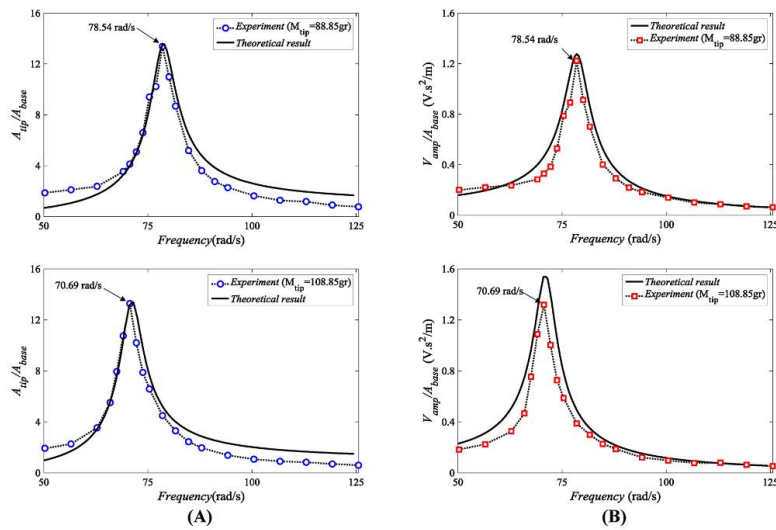
Gambar 2.13 *Free body diagram* dari pembangkit (Nabavi et al., 2018)

Selain melakukan pendekatan analitis, dilakukan juga percobaan untuk meningkatkan validitas dari data yang sudah diolah. Untuk percobaan digunakan frekuensi sebesar 10 KHz dan menggunakan dua massa (88.85gr dan 108.85gr). Berikut adalah komponen-komponen yang digunakan dalam percobaan:



- | | |
|--------------------------------|-------------------------|
| 1- Data acquisition system | 7- Tip mass |
| 2- Signal generator | 8- Accelerometer |
| 3- Power amplifier | 9- Impedance head |
| 4- Frequency response analyzer | 10- Main mass |
| 5- Oscilloscope | 11- Main mass spring |
| 6- Shaker | 12- piezoelectric beams |

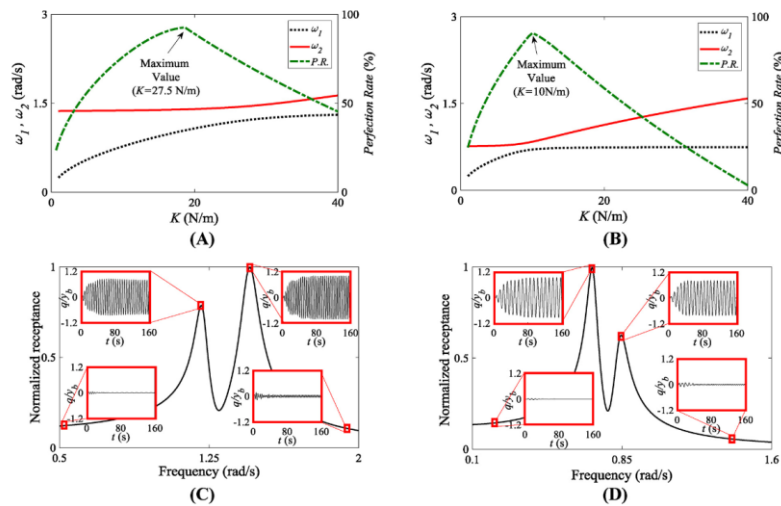
Gambar 2.14 Komponen yang digunakan dalam percobaan (A), pembangkit (B) (Nabavi et al., 2018)



Gambar 2.15 Grafik frekuensi terhadap percepatan dan voltase (Nabavi et al., 2018)

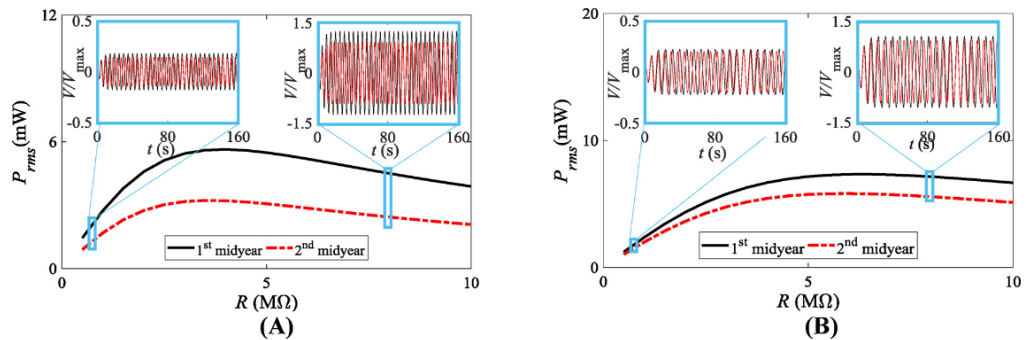
Dari Gambar 2.15 dapat disimpulkan bahwa frekuensi yang menghasilkan percepatan dan voltase tertinggi berada di frekuensi yang sama. Untuk massa *tip* 88.85 gr berada di 78.54 rad/s dan untuk massa *tip* 108.85 gr berada di 70.69 rad/s.

Frekuensi yang diuji ada dua, frekuensi pertama adalah frekuensi rata-rata gelombang dari awal sampai pertengahan tahun dan frekuensi kedua adalah frekuensi rata-rata gelombang dari pertengahan hingga akhir tahun. Berikut adalah hasil dari percobaan tersebut:



Gambar 2.16 Pengaruh perubahan kekakuan pada frekuensi pertama dan kedua dan *perfection rate* di stasiun 44.013 (Boston) (A); dan stasiun 46.012 (San Francisco) (B) respon frekuensi sistem yang terletak di Boston (C) dan San Francisco (D) (Nabavi et al., 2018)

Berdasarkan data dari Gambar 2.16 dapat disimpulkan bahwa untuk stasiun 44.013, PR tertinggi terjadi pada $K = 27,5$ N/m. Bagian (B) dari gambar ini, menunjukkan bahwa pada stasiun 46.012, PR maksimum terjadi jika $K = 10,0$ N/m. Bagian (C) dan (D) dari gambar 2.12, tunjukkan respons frekuensi sistem, yang disetel untuk bekerja di stasiun 44.013 dan 46.012, masing-masing.



Gambar 2.17 Pengaruh perubahan tahanan beban terhadap daya keluaran pertengahan tahun pertama dan kedua di stasiun 44.013 (Boston) (A); dan stasiun 46.012 (San Francisco) (B) (Nabavi et al., 2018)

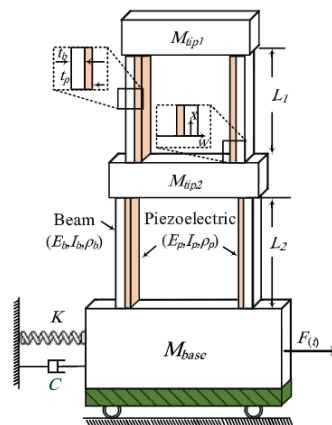
Berdasarkan Gambar 2.17, untuk daya yang dihasilkan pada stasiun Boston memiliki nilai maksimum saat hambatan sebesar 2,5 M Ω . Sedangkan, pada stasiun San Francisco menghasilkan daya maksimum saat nilai hambatan sebesar 5 M Ω . Salah satu alasan daya yang dihasilkan pada stasiun San Francisco lebih besar dibandingkan stasiun Boston adalah karena gelombang di San Francisco memiliki amplitude yang lebih besar.

Selain memanfaatkan gelombang laut untuk energi, pada penelitian berikut ini juga memanfaatkannya untuk memecah gelombang pada garis pantai (Nabavi et al., 2019). Masalah besar yang terjadi pada struktur pantai saat ini adalah pemecahan gelombang dan energi bersih. Penelitian ini bertujuan untuk menyelesaikan kedua masalah tersebut dengan membuat pembangkit energi yang bersumber getaran dari pemecahan gelombang. Potensi dari energi gelombang laut diestimasi sebesar 885 TWh

setiap tahunnya. Meski memiliki potensi energi yang besar, pembangkit dengan sumber gelombang laut masih belum banyak diterapkan. Hal tersebut dikarenakan tingginya biaya konstruksi dan merusak lingkungan pesisir pantai. Dengan menggunakan rancangan pada penelitian ini, dapat meminimalisir kendala tersebut.

Sumber energi yang diambil untuk pembangkit berasal dari amplitude gaya pecahnya gelombang. Ketika gelombang laut pecah secara langsung pada struktur pantai, tekanan yang dihasilkan sangat tinggi dan berdurasi pendek dibandingkan dengan gelombang yang tidak pecah. Gelombang yang dimaksud bisa memiliki frekuensi antara 1-250 rad/s. Desain yang diajukan berukuran kecil dan dapat berfungsi di frekuensi gelombang laut yang rendah. Selain itu, frekuensi sistem dapat disesuaikan dengan frekuensi gelombang. *Euler Bernoulli Beam Theory* dalam hubungannya dengan metode Lagrange digunakan untuk menentukan persamaan diferensial gerak sistem. Dalam analisis ini, material piezoelektrik juga dimodelkan menggunakan *Euler Bernoulli Beam Theory*.

Selain menggunakan metode analitik, dilakukan juga percobaan untuk meningkatkan keakuratan data yang didapat. Skematik balok *piezoelectric* dengan beban massa ujung dapat dilihat pada Gambar 2.18. Sistem pembangkit memiliki sifat-sifat yang digunakan dalam percobaan dan perhitungan analitik. Sifat-sifat tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.3.

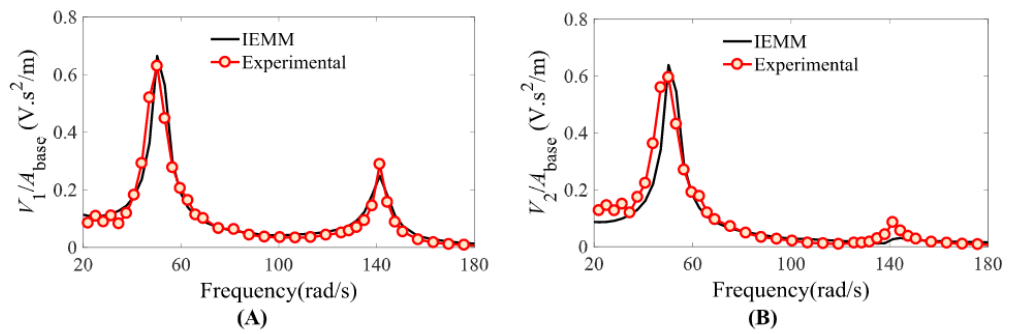


Gambar 2.18 Skematik balok *piezoelectric* dengan beban massa ujung (Nabavi et al., 2019)

Tabel 2.3 Sifat-sifat perangkat sistem pembangkit energi yang digunakan (Nabavi et al., 2019)

Parameters	Values	Parameters	Values	Parameters	Values
L_{B1} (mm)	59.00	M_{tip2} (g)	134.07	d_{31} (pC/N)	-280
L_{B2} (mm)	61.75	E_p (GPa)	62.5	e_{33} (nC/m)	6.5
L_{p1} (mm)	59.00	E_B (GPa)	170	t_B (mm)	0.15
L_{p2} (mm)	61.75	ρ_B (kg/m ³)	8500	t_p (mm)	0.11
M_{base} (gr)	311.94	ρ_p (kg/m ³)	7500	w_p (mm)	36
M_{tip1} (gr)	38.85	R (M Ω)	1	w_B (mm)	37

Setelah mendapat data dari percobaan, dilakukan perbandingan antara hasil percobaan dengan hasil perhitungan analitik. Perbandingan yang dilakukan antara lain adalah tegangan yang dihasilkan dan frekuensi alami. Berikut adalah hasil perbandingannya:



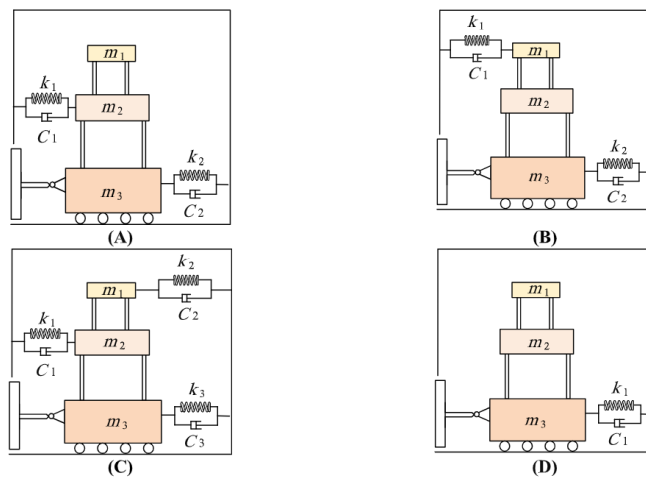
Gambar 2.19 Tegangan keluaran M_{tip1} (A); M_{tip2} (B) dari sistem pembangkit energi *piezoelectric* (Nabavi et al., 2019)

Dari Gambar 2.19 dapat disimpulkan bahwa pembangkit listrik tenaga gelombang laut dengan konfigurasi ini dapat menghasilkan tegangan paling besar saat mengalami frekuensi antara 50-60 rad/s.

Tabel 2.4 Frekuensi alami yang terukur dan frekuensi alami awal

Parameter	ω_1 (rad/s)	Error (%)	ω_2 (rad/s)	Error (%)	σ_Φ
Experimental	51.4719	—	141.5602	—	—
Analytical	53.0479	3.0619	144.2109	1.8725	0.0452

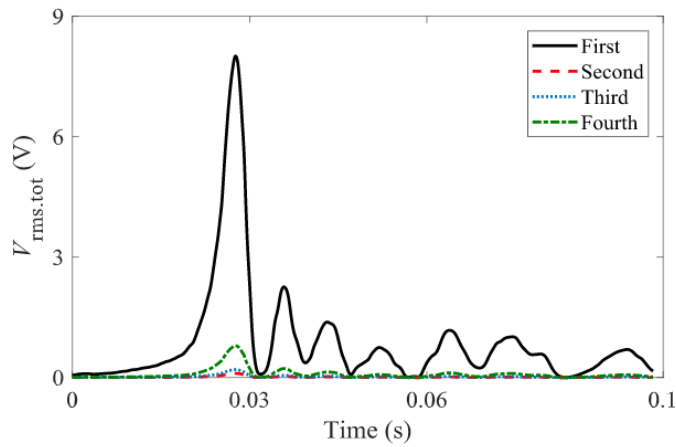
Dari kedua hasil yang didapat, bisa disimpulkan bahwa data analitik dan data percobaan sudah sesuai dengan penyimpangan yang kecil. Selain itu, pada penelitian ini dilakukan beberapa konfigurasi untuk mendapatkan konfigurasi optimal yang bisa menghasilkan energi terbesar. Konfigurasi yang diubah adalah penempatan pegas pada sistem awal. Berikut adalah bentuk konfigurasi yang dibuat dalam penelitian:



Gambar 2.20 Konfigurasi pertama (A); kedua (B); ketiga (C) dan keempat (D) untuk sistem pembangkit (Nabavi et al., 2019)

Keempat konfigurasi tersebut diuji kembali untuk menentukan konfigurasi mana yang menghasilkan tegangan paling tinggi. Setelah melalui percobaan didapatkan hasil seperti pada Gambar 2.21. Dari gambar tersebut dapat disimpulkan bahwa konfigurasi pertama menghasilkan tegangan paling tinggi sebesar 6.054V. Penyebab terjadinya

adalah gerakan relatif dari massa dalam konfigurasi yang lebih besar daripada konfigurasi lainnya.



Gambar 2.21 Grafik perbandingan tegangan yang dihasilkan antar konfigurasi (Nabavi et al., 2019)

Bentuk lain dari mekanisme pembangkit energi tenaga gelombang laut adalah dengan menggunakan model kayuh dayung *piezoelectric* (Yusup, 2016). Indonesia merupakan salah satu negara yang sedang mengalami krisis energi yang disebabkan oleh semakin berkurangnya cadangan energi fosil. Salah satu energi baru terbarukan dengan potensi besar yang cocok untuk digunakan di Indonesia adalah energi gelombang laut. Oleh sebab itu, penelitian mengenai energi gelombang laut sudah mulai banyak dilakukan. Alat yang digunakan pada penelitian ini untuk menghasilkan energi dari getaran gelombang laut adalah *piezoelectric*. Untuk menyesuaikan dengan gelombang laut di Indonesia yang gelombangnya lebih besar, maka pada penelitian ini akan dilakukan simulasi pembangkit energi gelombang laut dengan sistem kayuh dayung.

Gelombang merupakan peristiwa naik turunnya permukaan laut. Pada umumnya, gelombang disebabkan oleh angin yang ada di laut. Untuk mengukur gaya yang dihasilkan oleh gelombang, digunakan persamaan sebagai berikut:

$$F = \frac{\rho g H^2 b}{16} \quad (2.6)$$

Dimana: E_k = Energi kinetik (joule); ρ = masa jenis fluida (air tawar 1000 kg/m³); g = percepatan gravitasi (9.8 m/s²); H = tinggi gelombang (m); b = lebar air laut yang mengenai dayung atau lebar dayung (m)

Piezoelectric sendiri merupakan suatu bahan yang jika diberikan tegangan mekanik akan menghasilkan medan listrik. Salah satu sifat *piezoelectric* adalah *Electromechanical coupling factor* (k). *Electromechanical coupling factor* merupakan konstanta yang menentukan efektivitas material *piezoelectric* untuk mengubah energi mekanik ke energi listrik. *Piezoelectric* yang digunakan dalam sistem yang baik dapat menghasilkan efisiensi hingga 90%. Untuk mendapatkan daya yang dihasilkan oleh suatu *piezoelectric* dapat digunakan persamaan sebagai berikut:

$$W_{mech} = F x_{PZT} \quad (2.7)$$

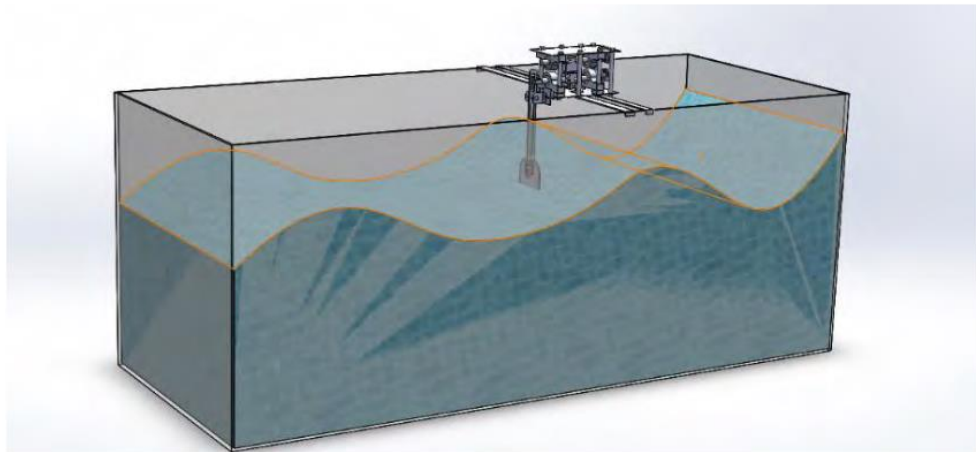
Dimana: F = adalah gaya total yang bekerja pada piezoelectric tersebut (Newton); x_{PZT} =adalah displacement yang terjadi pada material piezoelectric (m)

Untuk menghitung tegangan yang dihasilkan oleh *piezoelectric* dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$V = k_{31} \cdot \sqrt{\frac{2 W_{mech}}{C}} \quad (2.8)$$

Dimana: V = Voltage (V); W_{mech} = Energi Mekanik (Joule); C = Kapasitansi Material (F); k_{31} = Coupling Factor

Dimensi dari pembangkit tenaga gelombang laut tipe kayuh dayung-*piezoelectric* yang diteliti memiliki panjang 30 cm, lebar 15 cm, dan tinggi chassis 15.5 cm, serta panjang lengan dayung total 53 cm. Berikut adalah gambaran alat dan kolam gelombang:



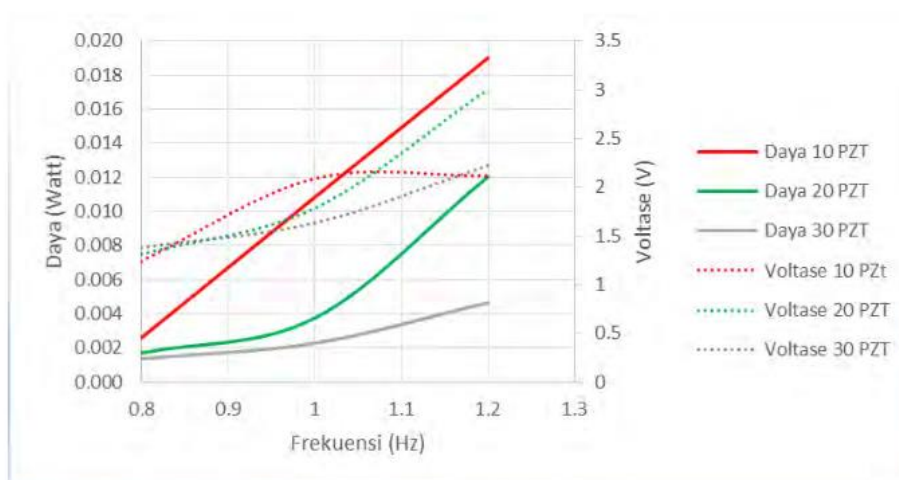
Gambar 2.22 Instalasi alat pembangkit tenaga gelombang laut tipe kayuh dayung-*piezoelectric* (Yusup, 2016)

Pembangkit listrik tenaga gelombang laut sistem kayuh dayung *piezoelectric* memanfaatkan gaya horizontal gelombang untuk menghasilkan energi. Saat gelombang menabrak permukaan dayung maka dayung akan bergerak memutar dan poros pengungkit akan menggeser poros transmisi. Poros transmisi yang bergerak horizontal akan mendorong poros pendorong massa, dipasang dua bantalan slider agar poros pendorong massa bergerak secara horizontal sempurna. Setelah poros pendorong bergerak, poros tersebut akan menggerakkan massa yang menghimpit piezoelectric. Gaya yang diberikan massa pendorong akan membuat piezoelectric defleksi. Defleksi yang terjadi pada *piezoelectric* akan menghasilkan energi listrik. Hasil dari simulasi yang telah dilakukan dapat dilihat pada Tabel 2.5.

Tabel 2.5 Data energi rata-rata yang dihasilkan mekanisme dengan variasi frekuensi, tinggi gelombang dan jumlah PZT (Yusup, 2016)

PZT	H (m)	f (Hz)	V-RMS (V)	I-RMS (A)	P-RMS (watt)
10	0.004	0.8	1.247	0.002	0.003

	0.05	1.0	2.086	0.005	0.011	
		1.2	2.114	0.009	0.019	
		0.8	2.076	0.003	0.007	
		1.0	2.069	0.008	0.017	
		1.2	2.107	0.014	0.030	
		0.06	0.8	2.059	0.005	0.009
	20	0.004	1.0	2.080	0.012	0.024
			1.2	2.114	0.020	0.042
			0.8	1.315	0.001	0.002
		0.05	1.0	1.790	0.002	0.004
			1.2	3.014	0.004	0.012
			0.8	2.055	0.002	0.004
0.06		1.0	2.797	0.003	0.009	
		1.2	4.132	0.006	0.026	
		0.8	2.960	0.003	0.009	
30	0.004	1.0	4.145	0.005	0.019	
		1.2	4.153	0.0090	0.037	
		0.8	1.381	0.001	0.001	
	0.05	1.0	1.632	0.001	0.002	
		1.2	2.219	0.002	0.005	
		0.8	2.158	0.002	0.003	
	0.06	1.0	2.551	0.002	0.005	
		1.2	3.468	0.003	0.011	
		0.8	3.082	0.002	0.007	
0.06	1.0	3.673	0.003	0.011		
	1.2	6.426	0.005	0.030		

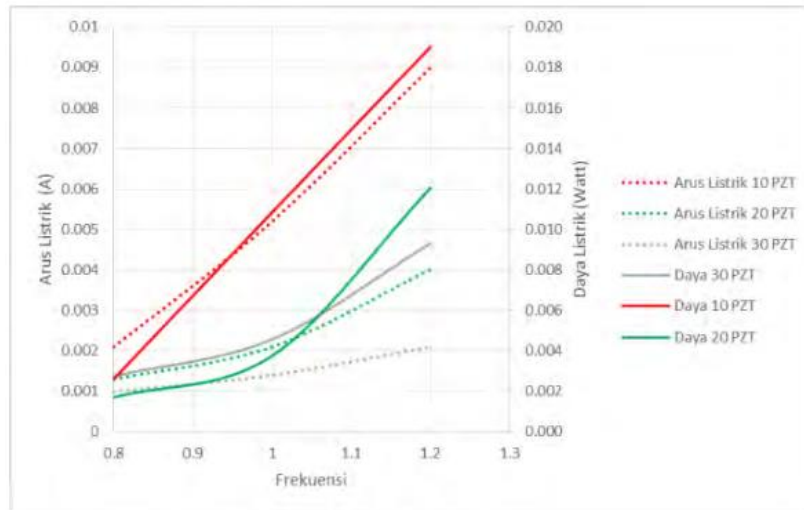


Gambar 2.23 Pengaruh frekuensi terhadap voltase dan daya listrik (Yusup, 2016)

Pada Gambar 2.23 ditampilkan pengaruh frekuensi terhadap daya listrik dan tegangan listrik. *Trendline* daya dan tegangan listrik yang dihasilkan naik seiring dengan bertambahnya kenaikan frekuensi. Namun ada pengecualian untuk percobaan yang

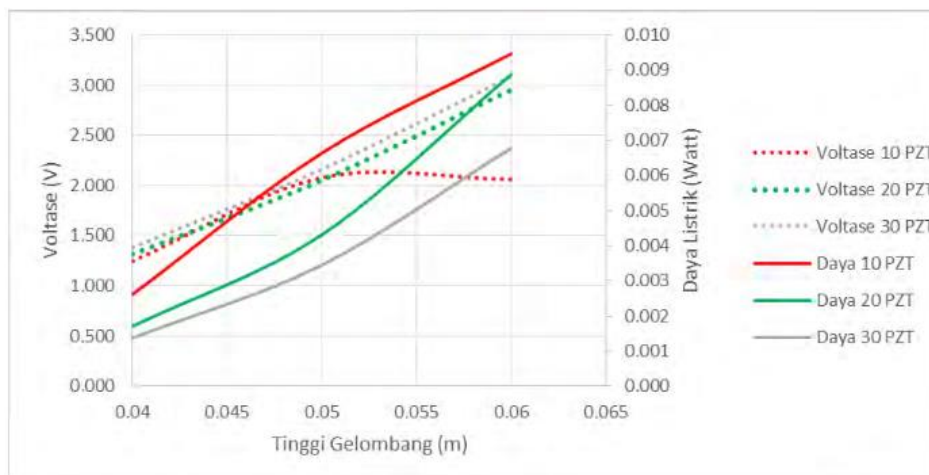
menggunakan 10 *piezoelectric*. Percobaan tersebut menghasilkan voltase yang relatif stabil pada 2V dari frekuensi 1 Hz hingga 1.2 Hz.

Meningkatkannya daya dan tegangan listrik yang dihasilkan berbanding lurus dengan peningkatan frekuensi. Hal tersebut disebabkan oleh peningkatan defleksi pada *piezoelectric* yang disebabkan oleh frekuensi yang lebih besar.



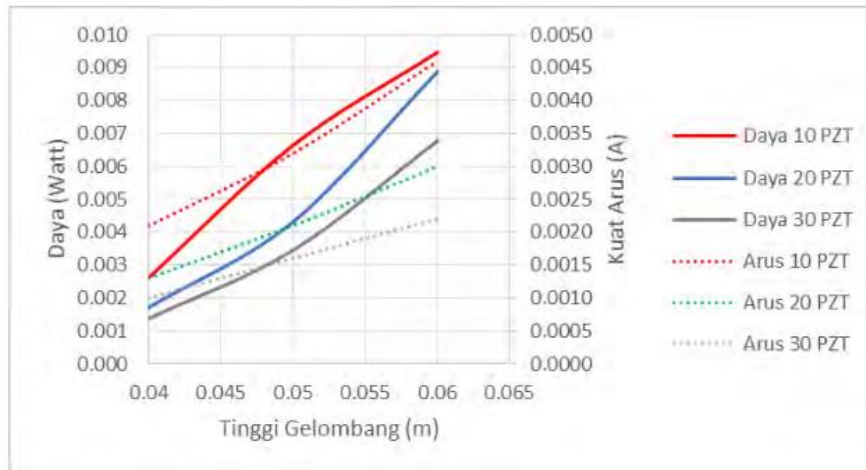
Gambar 2.24 Pengaruh frekuensi terhadap kuat arus yang dihasilkan (Yusup, 2016)

Dari Gambar 2.24 dapat dilihat bahwa kuat arus listrik justru berbanding terbalik dengan jumlah *piezoelectric*. Kuat arus yang tertinggi terdapat pada *piezoelectric* dengan jumlah 10 dan kuat arus yang terkecil berada pada jumlah *piezoelectric* 30. Penyebabnya adalah pembangkit dengan jumlah *piezoelectric* lebih sedikit memiliki kekakuan yang lebih kecil dibandingkan dengan pembangkit dengan jumlah *piezoelectric* lebih banyak. Kekakuan pada *piezoelectric* memiliki peran yang besar karena kekakuan dapat mempengaruhi defleksi pada *piezoelectric*. Semakin tingginya kecepatan defleksi maka akan semakin memperbesar kuat arus listrik yang dihasilkan. Frekuensi yang tinggi akan menghasilkan daya gelombang yang tinggi yang kemudian mempercepat defleksi pada *piezoelectric*.



Gambar 2.25 Pengaruh tinggi gelombang terhadap voltase (Yusup, 2016)

Berdasarkan Gambar 2.25, secara umum dapat dilihat bahwa tinggi gelombang berbanding lurus terhadap tegangan listrik. Sesuai dengan persamaan (2.6), tinggi gelombang dapat mempengaruhi gaya yang diterima oleh pembangkit. Dengan bertambahnya tinggi gelombang, gaya yang mendorong massa pendorong akan semakin besar. Saat massa pendorong menerima gaya yang lebih besar, defleksi yang lebih besar juga akan dialami oleh *piezoelectric*. Semakin besar defleksi semakin besar pula voltase yang dihasilkan, sesuai dengan persamaan (2.8).



Gambar 2.26 Pengaruh tinggi gelombang yang dihasilkan terhadap kuat arus yang dihasilkan (Yusup, 2016)

Pada Gambar 2.26 dapat dilihat bahwa semakin tinggi gelombang laut, maka akan semakin tinggi juga kuat arus yang dihasilkan, namun ketika jumlah *piezoelectric* bertambah maka akan terjadi penurunan kuat arus. Hal tersebut disebabkan oleh kekakuan pada pembangkit yang lebih besar dengan jumlah *piezoelectric* yang lebih banyak. Namun, *trendline* kuat arus dan daya naik sesuai dengan kenaikan tinggi gelombang. Tinggi gelombang yang lebih besar akan menghasilkan gaya lebih besar, yang kemudian menghasilkan defleksi yang lebih besar.

Berdasarkan data yang didapat dari percobaan dapat disimpulkan bahwa frekuensi dan tinggi gelombang berbanding lurus dengan besar perpindahan. Semakin besar perpindahan yang terjadi maka *piezoelectric* menghasilkan tegangan yang lebih besar juga. Semakin tinggi kecepatan defleksi *piezoelektrik*, semakin besar arus listrik yang dihasilkan. Energi listrik yang dihasilkan akan meningkat seiring dengan bertambahnya tinggi gelombang dan frekuensi.

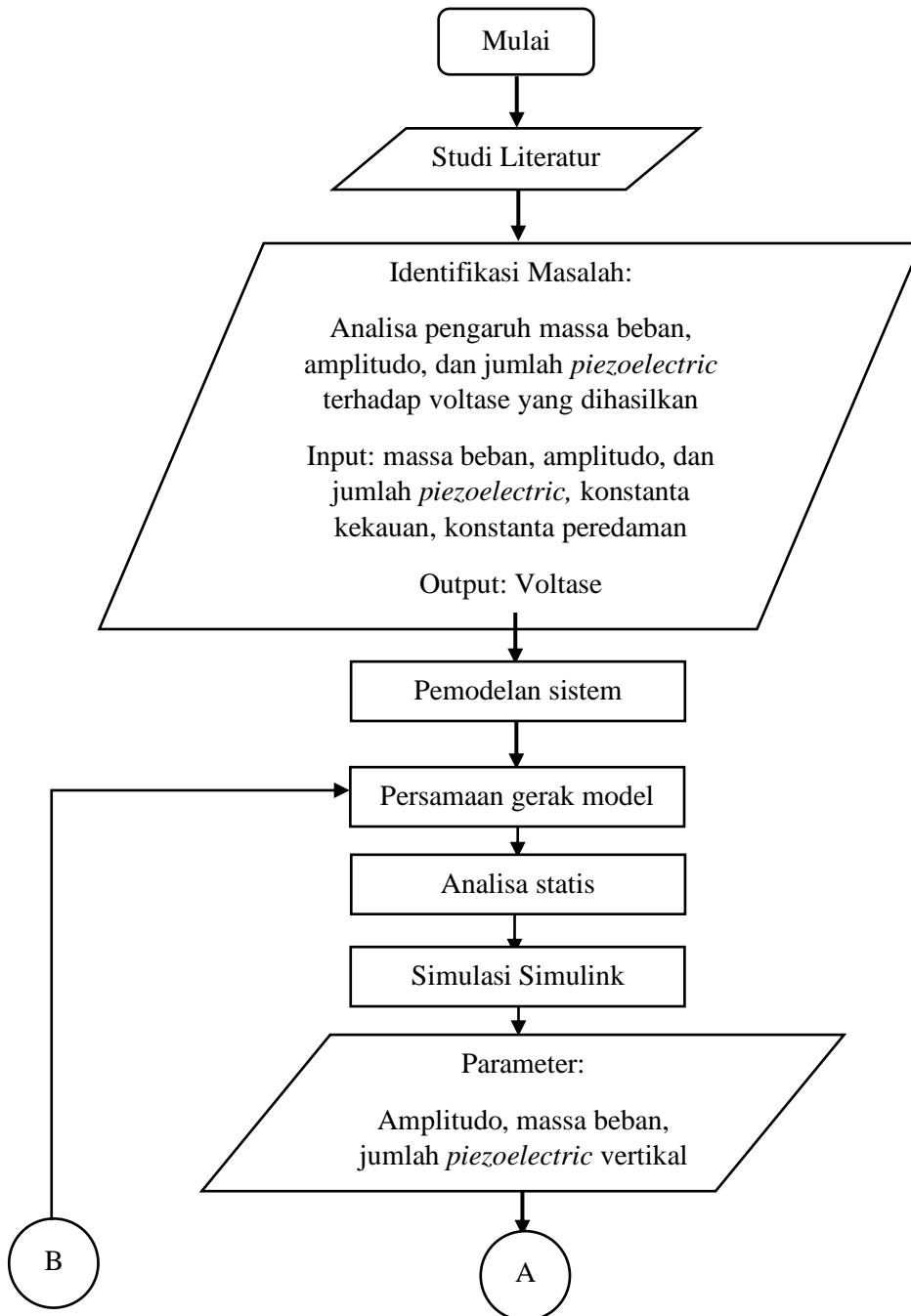
Peningkatan jumlah *piezoelectric* dapat meningkatkan tegangan yang dihasilkan oleh sistem, namun dapat menurunkan kuat arus listrik. Hal tersebut disebabkan oleh kecepatan defleksi yang semakin berkurang. Oleh sebab itu, penambahan *piezoelectric* harus diperhitungkan secara matang agar dapat menghasilkan voltase yang tinggi dan tetap menjaga kuat arus listrik.

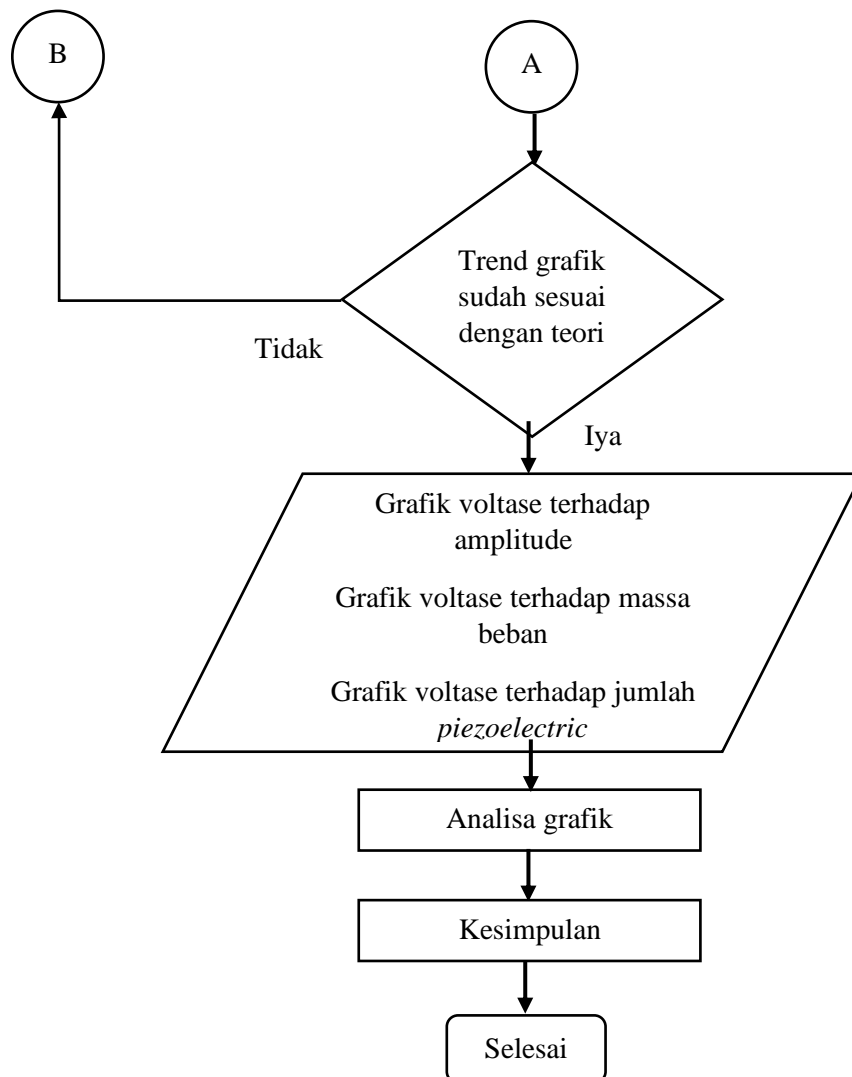
BAB 3 METODOLOGI

3.1 Tahapan Penelitian

3.1.1 Diagram Alir Penelitian

Untuk melakukan penulisan tugas akhir yang sistematis dan sesuai tujuan, diperlukan adanya langkah-langkah yang sesuai dengan prosedur analisa. Langkah-langkah tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.1.





Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.1.2 Penjelasan Diagram Alir Penelitian

Berikut adalah penjelasan terkait diagram alir pada Gambar 3.1.

1. Studi literatur

Sebelum melakukan penelitian, diperlukan adanya tinjauan pustaka dari penelitian-penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya. Studi yang ditinjau berkaitan dengan gelombang, *piezoelectric*, derajat kebebasan, *base motion*, dan contoh pembangkit listrik tenaga gelombang laut.

2. Identifikasi Masalah

Analisa pengaruh massa beban, amplitudo, dan jumlah *piezoelectric* terhadap energi yang dihasilkan

Input: massa beban, amplitudo, dan jumlah piezoelectric, konstanta kekakuan, konstanta peredaman

Output: Voltase

3. Pemodelan sistem

Pemodelan yang dilakukan pada penelitian ini menggunakan *mass-spring-piezoelectric system* dengan empat derajat kebebasan. Sistem dimodelkan secara tiga dimensi menggunakan *software* Solidworks 2020. Selain itu dilakukan juga analisa statis pada sistem pembangkit untuk memastikan bahwa pembangkit tidak akan rusak saat dijalankan pada simulasi.

4. Persamaan gerak model

Model yang telah dirancang kemudian dianalisa persamaan geraknya melalui *free-body diagram* sampai ketahap *state variable*.

5. Simulasi MATLAB

Persamaan *state variable* yang sudah didapat kemudian dibuat menjadi blok diagram pada MATLAB Simulink. Blok tersebut bertujuan untuk mensimulasikan sistem dari pembangkit yang telah dirancang.

6. Trend grafik sudah sesuai dengan teori

Setelah melakukan pemodelan dan simulasi pada MATLAB Simulink, dilakukan running dari simulasi yang telah dibuat. Apabila trend grafik sudah sesuai dengan teori, maka bisa dilanjutkan memasukkan variasi massa beban, amplitudo, dan jumlah *piezoelectric*. Apabila trend grafik belum sesuai, maka kemungkinan besar ada kesalahan pada persamaan gerak model dan perlu diperbaiki.

7. Grafik respon terhadap variasi

Dari simulasi akan didapatkan hasil yaitu voltase dan defleksi *piezoelectric* yang dihasilkan. Hasil tersebut dibuat kedalam grafik yang bertujuan untuk melihat *trendline* dari hasil dan membandingkan hasil dari variasi parameter. Ada tiga grafik voltase yang akan dianalisa yaitu grafik voltase terhadap massa beban, grafik voltase terhadap amplitudo gelombang laut, dan grafik voltase terhadap jumlah *piezoelectric*. Selain itu ada juga tiga grafik defleksi yang akan dianalisa yaitu grafik defleksi terhadap massa beban, grafik defleksi terhadap amplitudo gelombang laut, dan grafik defleksi terhadap jumlah *piezoelectric*.

8. Analisa grafik

Setelah mendapat hasil dalam bentuk grafik, hasil dapat dianalisa untuk melihat pengaruh perubahan dari variasi terhadap *output* yang dihasilkan.

9. Kesimpulan

Dari hasil analisa grafik dapat disimpulkan pengaruh-pengaruh variasi pada *output* pembangkit. Mulai dari *trendline* hingga parameter yang menghasilkan voltase dan kuat arus listrik paling optimal.

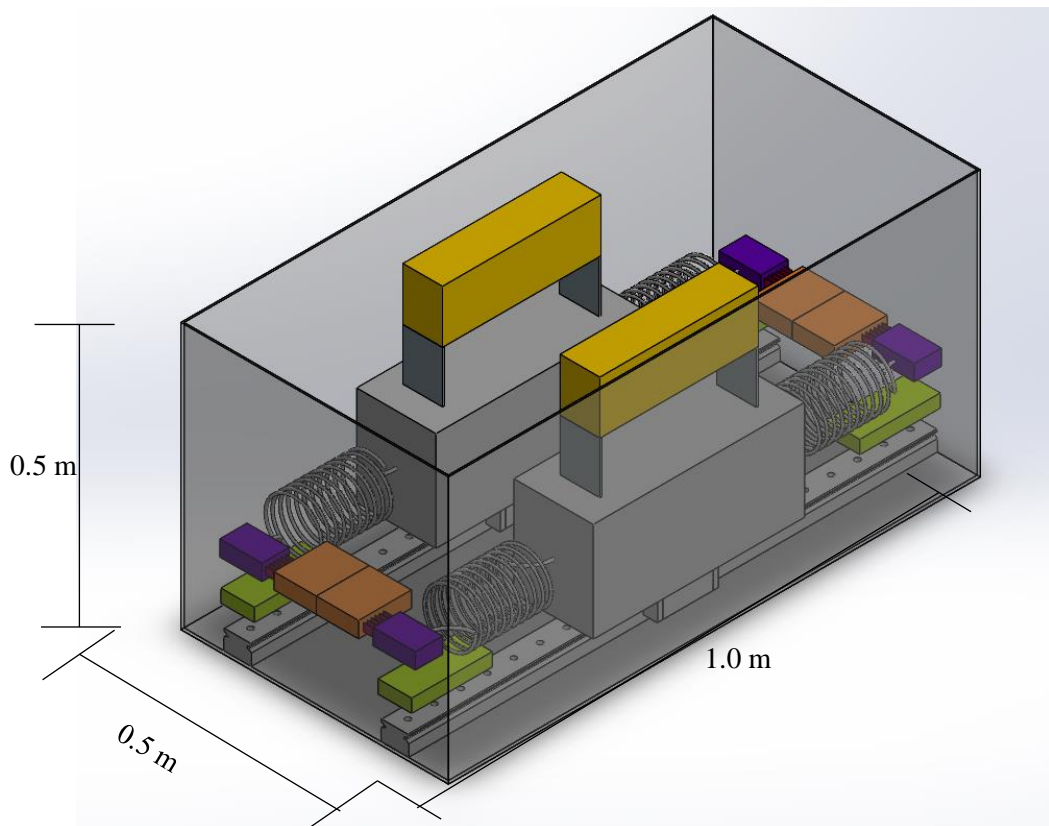
3.2 Rancangan Model

3.2.1 Perancangan Mekanisme

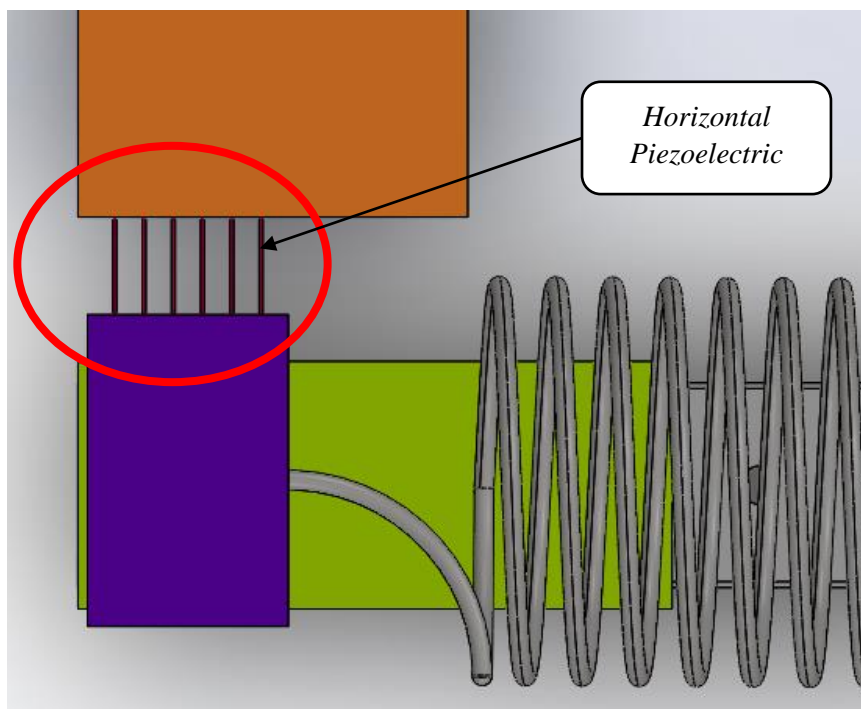
Pembangkit listrik tenaga gelombang laut dengan sistem massa pada mekanisme apung memanfaatkan gaya berat yang dimiringkan oleh gelombang laut. Pada saat sistem mendapatkan gaya dari gelombang, massa akan bergerak mendorong pegas dan plat *piezoelectric*. Pada penelitian ini menggunakan dua tipe *piezoelectric* dengan konfigurasi parallel seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.3 dan Gambar 3.4. Dorongan dari massa akan membuat plat *piezoelectric* terdefleksi dan menghasilkan energi listrik. Pegas juga berfungsi untuk mengembalikan massa ke posisi semula.

Perancangan model dilakukan menggunakan *software* Solidworks 2020. Rancangan PLTGL berikut dapat diaplikasikan pada *buoy* karena ukurannya yang realistis

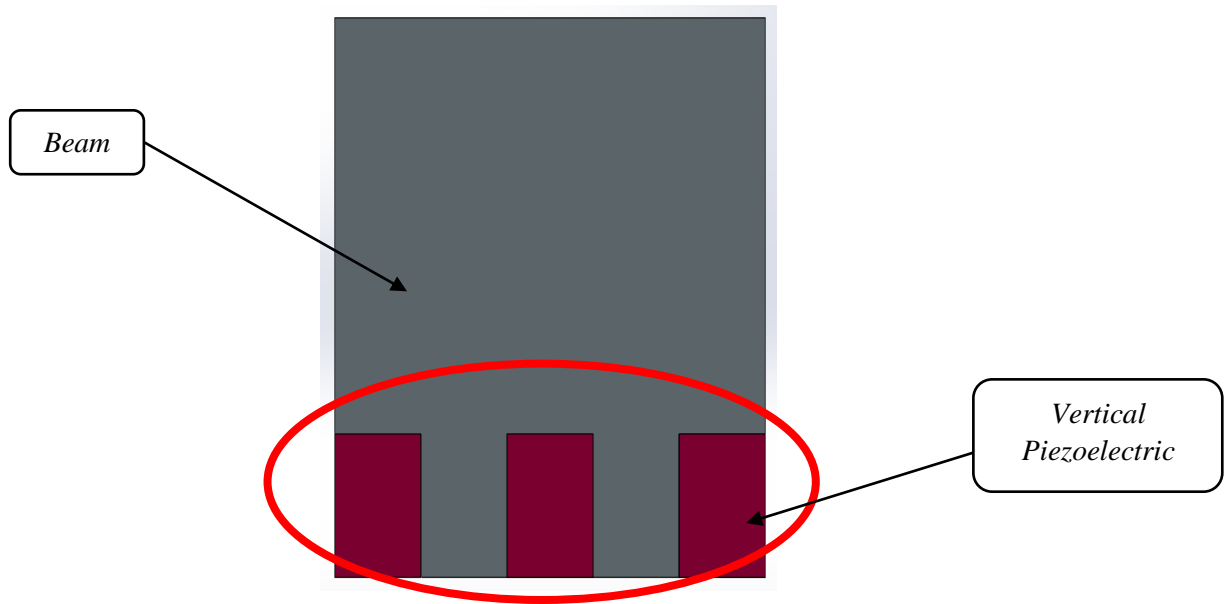
kecil dan membutuhkan energi yang sedikit. PLTGL yang dirancang memiliki dimensi lebar 50cm, tinggi 50cm, dan panjang 100cm. Sesuai dengan yang ditampilkan pada Gambar 3.2.



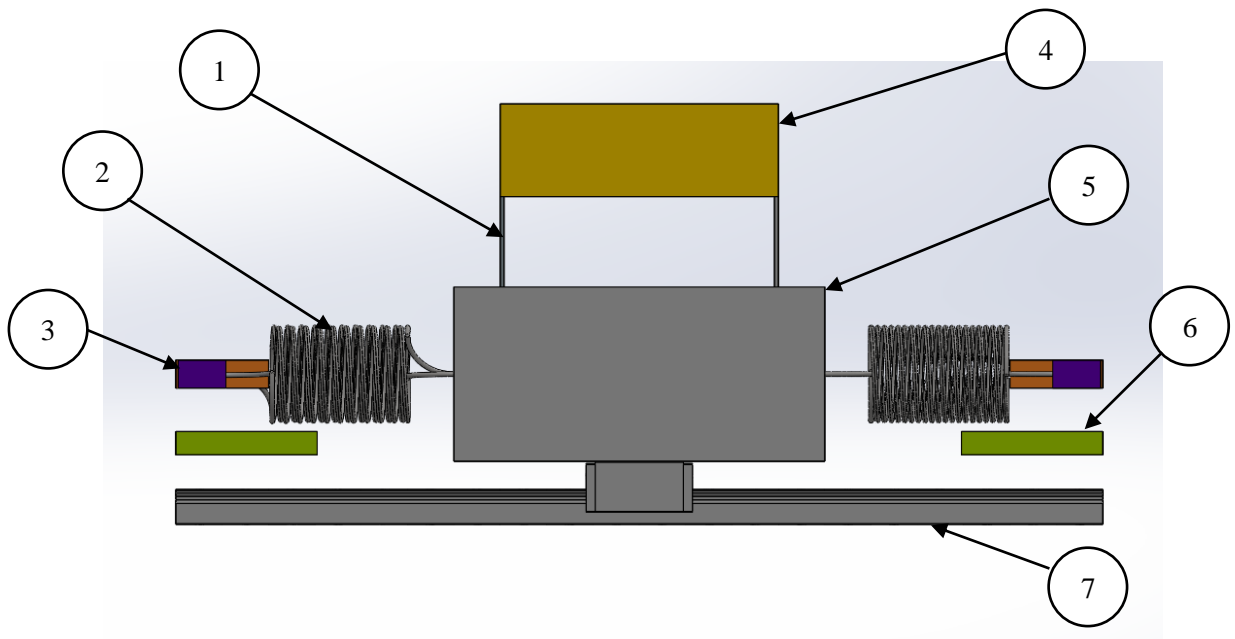
Gambar 3.2 PLTGL dengan sistem massa pada mekanisme apung



Gambar 3.3 Detail komponen *piezoelectric* horizontal



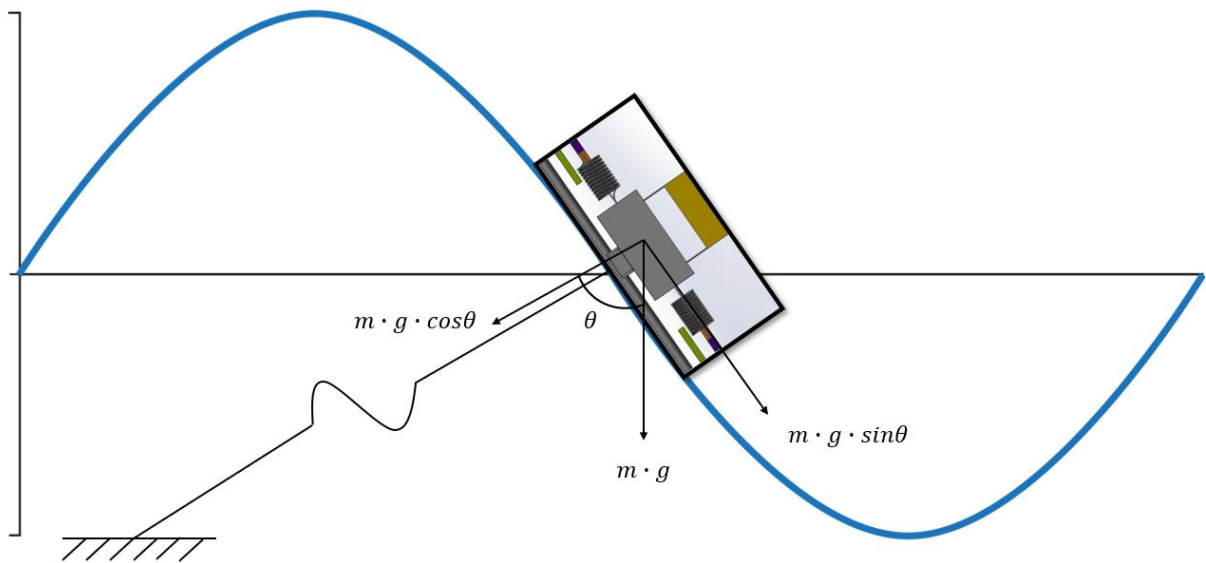
Gambar 3.4 Detail pemasangan *piezoelectric* vertikal



Gambar 3.5 Tampak samping model pembangkit

Keterangan Gambar 3.5:

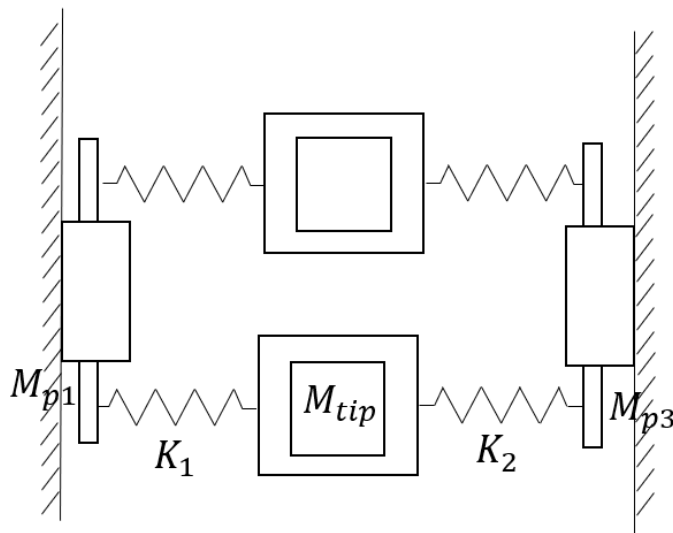
1. *Piezoelectric* dan *support beam*
2. *Pegas*
3. *Massa piezoelectric*
4. *Tip mass*
5. *Base mass*
6. *Stopper*
7. *Linear guide*



Gambar 3.6 *Free Body Diagram* Pembangkit pada Gelombang

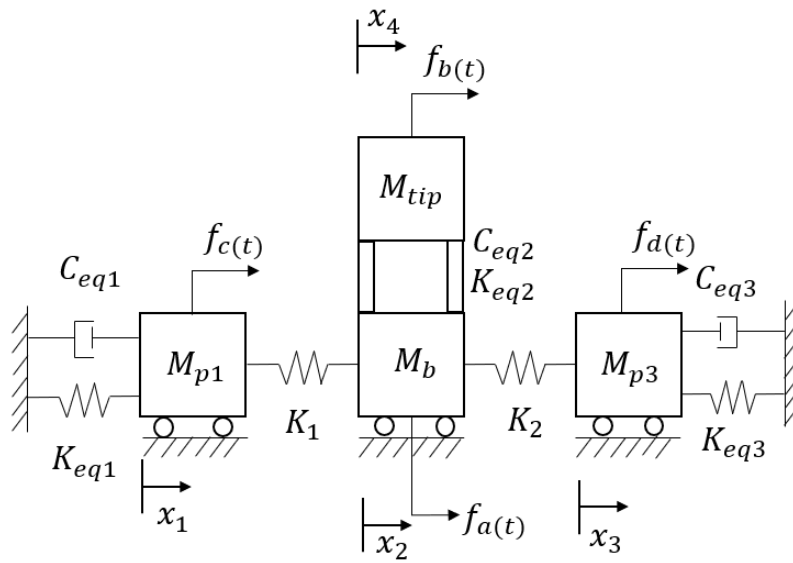
3.2.2 Persamaan Gerak Model

Pada penelitian ini, *free-body diagram* dari pembangkit dapat digambarkan seperti pada Gambar 3.7 menurut tampak atas dan Gambar 3.8 menurut tampak samping.

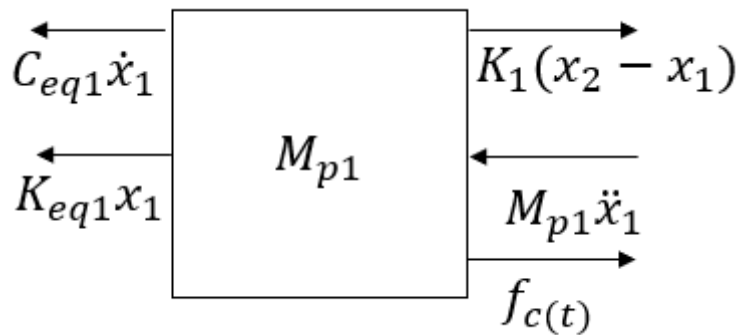


Gambar 3.7 Tampak atas *free-body diagram*

Dapat dilihat dari Gambar 3.8, bahwa sistem memiliki empat derajat kebebasan. Untuk mempermudah penjabaran persamaan gerak model, maka penjabaran akan dibagi ke empat bagian sesuai dengan jumlah derajat kebebasan pada sistem. Bagian pertama di M_{p1} atau massa pegas 1, bagian kedua di M_b atau massa *base*, bagian ketiga ada di M_{p3} atau massa pegas 3, dan terakhir ada di M_{tip} atau massa tip.



Gambar 3.8 Tampak samping *free-body diagram*



Gambar 3.9 *Free-body diagram* dari massa *piezoelectric* 1

Gambar 3.9 menunjukkan *free-body diagram* dari massa *piezoelectric* 1 dan gaya yang bekerja disana. Terdapat gaya kekakuan dan redaman dari *piezoelectric* 1, gaya dari pegas K_1 dan gaya inersia dari massa itu sendiri. Persamaan gerak dari model tersebut dapat dijabarkan sebagai berikut:

$$K_1(x_2 - x_1) + f_c(t) = C_{eq1}\dot{x}_1 + K_{eq1}x_1 + M_{p1}\ddot{x}_1 \quad (3.1)$$

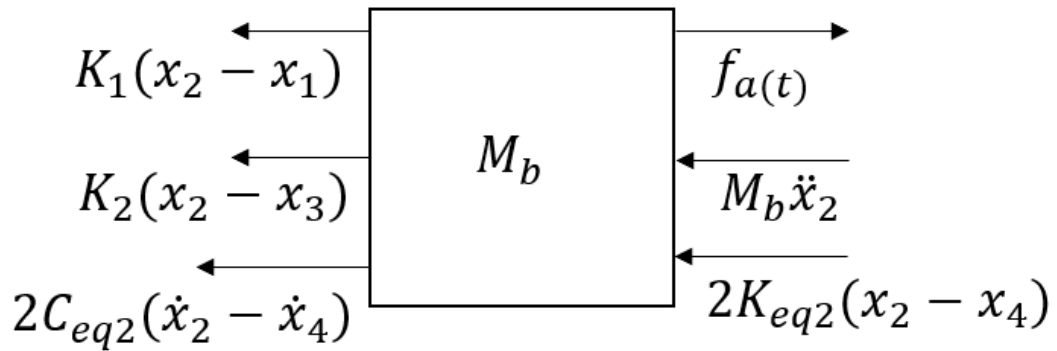
$$f_c(t) = C_{eq1}\dot{x}_1 + K_{eq1}x_1 + M_{p1}\ddot{x}_1 - K_1x_2 + K_1x_1 \quad (3.2)$$

Dimana:

C_{eq1} = Konstanta peredaman ekivalen *piezoelectric* 1

K_{eq1} = Konstanta kekakuan ekivalen *piezoelectric* 1

M_{p1} = Massa *piezoelectric* 1



Gambar 3.10 *Free-body diagram* dari massa base

Gambar 3.10 menunjukkan *free-body diagram* dari massa base dan gaya yang bekerja disana. Terdapat gaya kekakuan dan redaman dari *piezoelectric 2*, gaya inersia dari massa itu sendiri, gaya berat, dan gaya dari pegas K_1 dan K_2 . Persamaan gerak dari model tersebut dapat dijabarkan sebagai berikut:

$$f_a(t) = K_1(x_2 - x_1) + K_2(x_2 - x_3) + M_b\ddot{x}_2 + 2C_{eq2}(\dot{x}_2 - \dot{x}_4) + 2K_{eq2}(x_2 - x_4) \quad (3.3)$$

$$f_a(t) = K_1x_2 - K_1x_1 + K_2x_2 - K_2x_3 + M_b\ddot{x}_2 + 2C_{eq2}\dot{x}_2 - 2C_{eq2}\dot{x}_4 + 2K_{eq2}x_2 - 2K_{eq2}x_4 \quad (3.4)$$

Dimana:

$f_a(t)$ = Gaya berat dari massa base

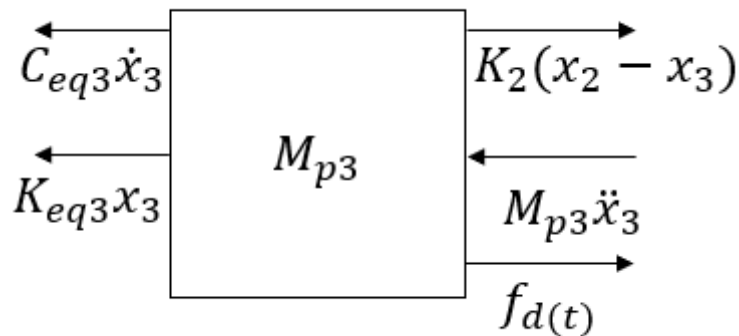
K_1 = Konstanta kekakuan pegas 1

K_2 = Konstanta kekakuan pegas 2

M_b = Massa base

K_{eq2} = Konstanta kekakuan ekivalen *piezoelectric 2*

C_{eq2} = Konstanta peredaman ekivalen *piezoelectric 2*



Gambar 3.11 *Free-body diagram* dari massa *piezoelectric 2*

Gambar 3.11 menunjukkan *free-body diagram* dari massa *piezoelectric* 2 dan gaya yang bekerja disana. Terdapat gaya kekakuan dan redaman dari *piezoelectric* 2, gaya dari pegas K_2 dan gaya inersia dari massa itu sendiri. Persamaan gerak dari model tersebut dapat dijabarkan sebagai berikut:

$$K_2(x_2 - x_3) + f_d(t) = C_{eq3}\dot{x}_3 + K_{eq3}x_3 + M_{p3}\ddot{x}_3 \quad (3.5)$$

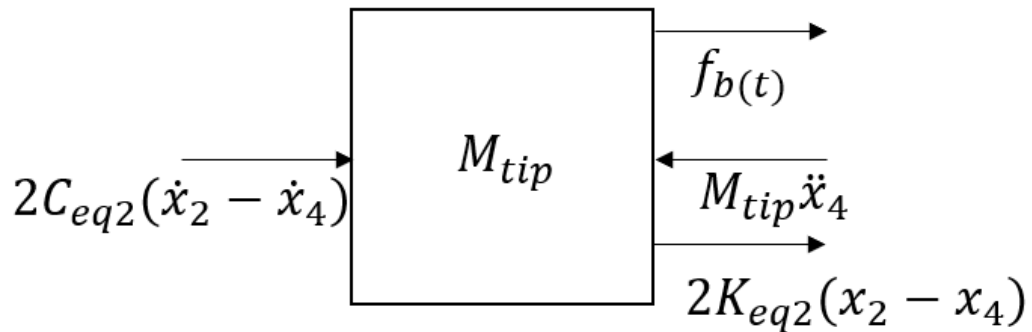
$$f_d(t) = C_{eq3}\dot{x}_3 + K_{eq3}x_3 + M_{p3}\ddot{x}_3 - K_2x_2 + K_2x_3 \quad (3.6)$$

Dimana:

C_{eq3} = Konstanta peredaman ekivalen *piezoelectric* 3

K_{eq3} = Konstanta kekakuan ekivalen *piezoelectric* 3

M_{p3} = Massa *piezoelectric* 3



Gambar 3.12 *Free-body diagram* dari massa *tip*

Gambar 3.12 menunjukkan *free-body diagram* dari massa *tip* dan gaya yang bekerja disana. Terdapat gaya kekakuan dan redaman dari *piezoelectric* 3, gaya berat, dan gaya inersia dari massa itu sendiri. Persamaan gerak dari model tersebut dapat dijabarkan sebagai berikut:

$$M_{tip}\ddot{x}_4 = f_b(t) + 2C_{eq2}(\dot{x}_2 - \dot{x}_4) + 2K_{eq2}(x_2 - x_4) \quad (3.7)$$

$$f_b(t) = M_{tip}\ddot{x}_4 - 2C_{eq2}\dot{x}_2 + 2C_{eq2}\dot{x}_4 - 2K_{eq2}x_2 + 2K_{eq2}x_4 \quad (3.8)$$

Dimana:

$f_b(t)$ = Gaya berat massa *tip*

M_{tip} = Massa *tip*

C_{eq2} = Konstanta peredaman ekivalen *piezoelectric* 2

K_{eq2} = Konstanta kekakuan ekivalen *piezoelectric* 2

3.2.3 Persamaan Gaya Eksitasi

Gaya eksitasi yang bekerja pada sistem ini dilambangkan dengan $f_{a(t)}$ untuk gaya berat dari massa *base* dan $f_{b(t)}$ untuk gaya berat massa *tip*. Gaya tersebut dapat muncul karena sistem yang miring akibat gelombang laut. Pada Gambar 2.4, terdapat ilustrasi hubungan antara gaya eksitasi yang dihasilkan dan gelombang laut. Menurut Gambar 2.4, gaya berat yang ada pada massa *base* dan *tip* dapat dijabarkan sebagai berikut.

$$f_{a(t)} = M_b g \sin(\theta(t)) \quad (3.9)$$

$$f_{b(t)} = M_{tip} g \sin(\theta(t)) \quad (3.10)$$

Kemudian $\theta(t)$ dapat didefinisikan sesuai pada persamaan 2 sebagai berikut:

$$\theta(u, t) = \arctan(A \cdot q \cdot \cos(q \cdot u - \omega \cdot t)) \quad (3.11)$$

Dimana:

A= Amplitudo gelombang

$q = \frac{2\pi}{l}$ = *wavenumber*

u= Jarak sistem pada sumbu u

$\omega = 2\pi f$ = Kecepatan sudut

t= waktu

3.3 Penentuan Parameter dan Variabel

Sebelum simulasi dapat dijalankan, parameter percobaan harus terlebih dahulu diketahui. Parameter tersebut adalah antara lain parameter sistem utama, parameter *piezoelectric*, dan parameter gelombang. Parameter sistem utama diambil dari rancangan yang sudah dibuat dengan pertimbangan dari tinjauan pustaka, sedangkan parameter *piezoelectric* diambil dari parameter *piezoelectric* pada penelitian (Nabavi et al., 2018) dan *piezoelectric* Minisense 100 yang selanjutnya akan disebut *piezoelrctric* horizontal. Parameter gelombang pada Tabel 3.3 diambil dari tinjauan pustaka penelitian yang terdahulu.

Tabel 3.1 Tabel Parameter Sistem Utama

Keterangan	Parameter	Nilai
Lebar pembangkit	w	0.5 m
Tinggi pembangkit	h	0.5 m
Panjang pembangkit	l	1.0 m
Konstanta pegas 1	K_1	10000 N/m
Konstanta pegas 2	K_2	10000 N/m
Massa <i>tip</i>	M_{tip}	2.5 kg

Tabel 3.2 Tabel Parameter *Piezoelectric Minisense 100 Vibration Sensor*

Keterangan	Parameter	Nilai
Massa <i>piezoelectric</i>	M_{pzt}	6×10^{-4} kg
Tebal <i>piezoelectric</i>	t_{pzt}	1×10^{-3} m
Lebar <i>piezoelectric</i>	w_{pzt}	6×10^{-3} m
Panjang <i>piezoelectric</i>	L_{pzt}	12×10^{-3} m
Kapasitansi	C_{pzt}	244×10^{-10} F
Konstanta regangan <i>piezoelectric</i>	d_{31}	1.1×10^{-10} C/N
<i>Electromechanical coupling factor</i>	k_{31}	12%
Konstanta pegas	k_{pzt}	2604 N/m
Konstanta peredam	C_{pzt}	2.372 Ns/m
Modulus Young	E	3×10^9 Pa
Hambatan	R	10 M Ω
Frekuensi Resonansi	fr	75 Hz
Massa tip <i>piezoelectric</i>	M_{tippzt}	0.6 kg

Tabel 3.3 Tabel Parameter *Piezoelectric* dan *Beam* Vertikal (Nabavi et al., 2018)

Table 1

Properties of the presented energy harvesting system device.

Parameters	Values	Parameters	Values	Parameters	Values
L_{B1} (mm)	59.00	M_{tip2} (g)	134.07	d_{31} (pC/N)	-280
L_{B2} (mm)	61.75	E_p (GPa)	62.5	e_{33} (nC/m)	6.5
L_{P1} (mm)	59.00	E_B (GPa)	170	t_B (mm)	0.15
L_{P2} (mm)	61.75	ρ_B (kg/m ³)	8500	t_p (mm)	0.11
M_{base} (gr)	311.94	ρ_p (kg/m ³)	7500	w_p (mm)	36
M_{tip1} (gr)	38.85	R (M Ω)	1	w_B (mm)	37

Tabel 3.4 Tabel Parameter Teknis *Piezoelectric* Vertikal (Nabavi et al., 2019)

Table A1
Technical parameter of the piezoelectric material.

Technical Parameter	Symbol	Unit	Data
Relative dielectric constant	ϵ_{33}^T	—	3500
Dielectric loss	$\text{tg}\delta$	%	2
Radial electromechanical coupling factor	K_p	—	0.65
Length electromechanical coupling factor	K_{31}	—	0.35
Vertical electromechanical coupling factor	K_{33}	—	0.70
Thickness vertical electromechanical coupling factor	K_T	—	0.55
Piezoelectric strain coefficient	d_{31}	10^{-12} c/N	-280
Piezoelectric strain coefficient	d_{33}	10^{-12} c/N	650
Piezoelectric voltage coefficient	g_{31}	10^{-3} Vm/N	13
Piezoelectric voltage coefficient	g_{33}	10^{-3} Vm/N	28
Compliance coefficient	S_{11}^E	10^{-12} m ² /N	16
Poisson's ratio	σ^E	—	0.36
Mechanical quality factor	Q_m	—	60
Maximum voltage	V_{\max}	V	8
Maximum Current	I_{\max}	A	5

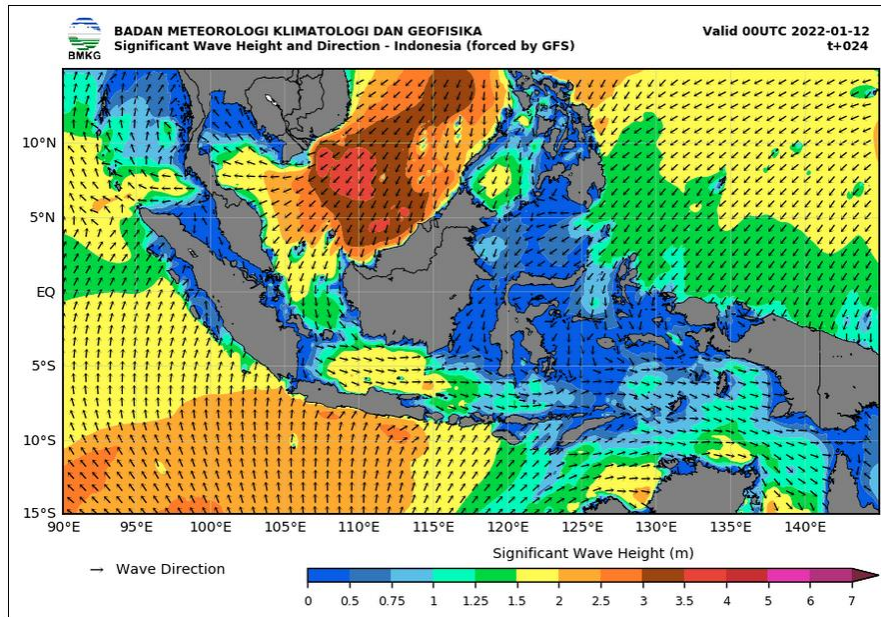
Kapasitansi suatu *piezoelectric* dipengaruhi oleh beberapa hal seperti dimensi, *relative dielectric constant*, dan *permivity vacuum*. Dimensi dari *piezoelectric* vertikal itu sendiri adalah 20 x 40 x 5 mm. Kapasitansi tersebut dapat dirumuskan seperti pada persamaan (3.12).

$$C_{pzt} = \frac{K_{33}^T E_0 l w}{h} \quad (3.12)$$

Tabel 3.5 Tabel parameter gelombang

Keterangan	Parameter	Nilai
Periode	T	6 s
Panjang gelombang	L_g	3 m
Frekuensi gelombang	f	0.167 Hz

Selain parameter, dibutuhkan juga variabel untuk mengetahui pengaruh dari variabel tersebut terhadap hasil dari simulasi. Variabel yang digunakan dalam penelitian ini adalah massa *base*, amplitudo gelombang laut, dan jumlah *piezoelectric* vertikal. Variasi nilai gelombang laut diambil dari data BMKG pada Gambar 3.13 di tanggal 12 Januari 2022 (*Pusat Meteorologi Maritim | BMKG*, n.d.). *Piezoelectric* vertikal yang dimaksud adalah *piezoelectric 2* yang menghubungkan antara M_b dengan M_{tip} .



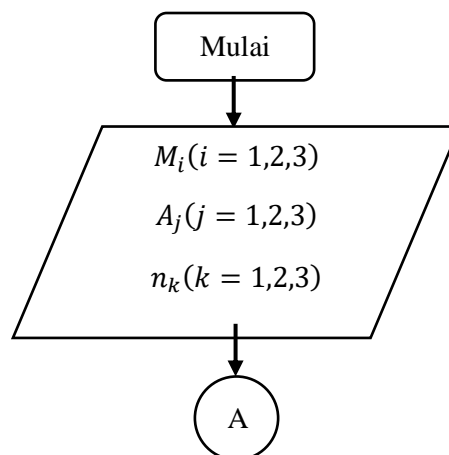
Gambar 3.13 Pemetaan tinggi gelombang di Indonesia (*Pusat Meteorologi Maritim / BMKG, n.d.*)

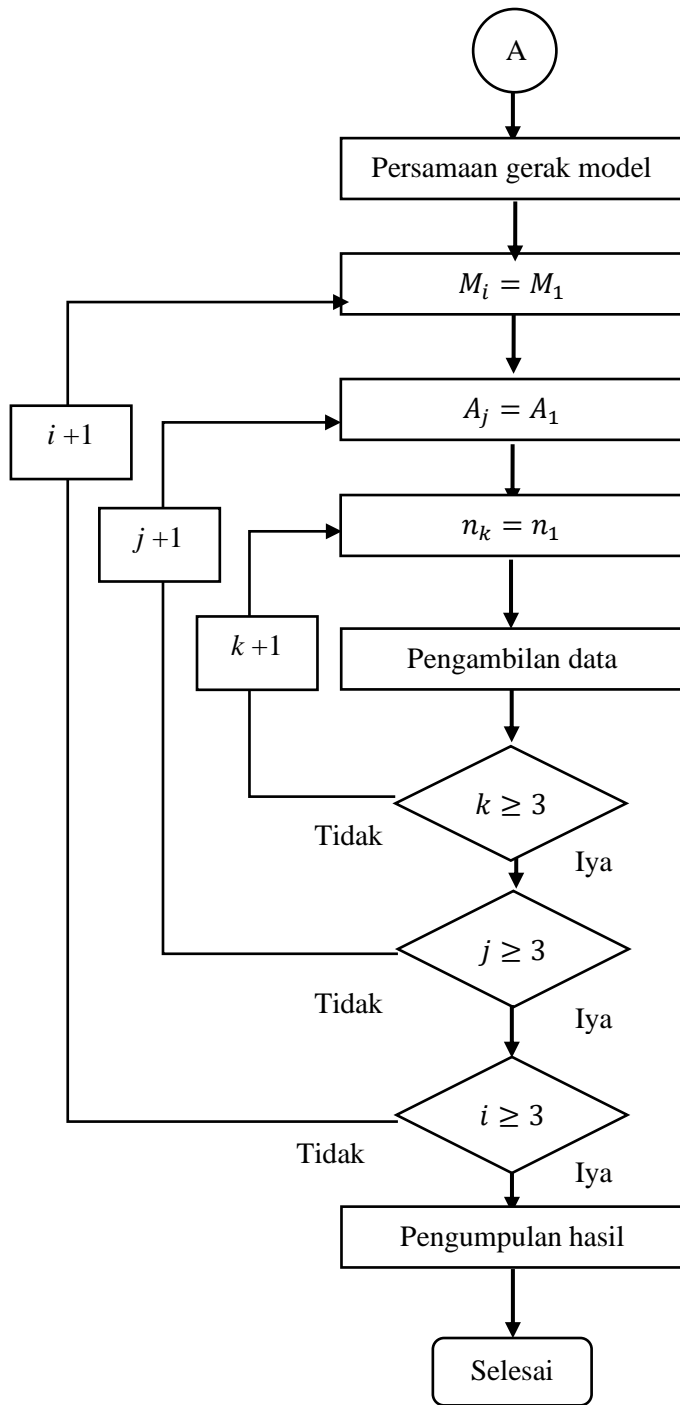
Tabel 3.6 Tabel variabel penelitian

Massa <i>base</i>		Amplitudo		Jumlah <i>piezoelectric</i>	
Variabel	Nilai	Variabel	Nilai	Variabel	Nilai
M_{b1}	5 kg	A_1	0.5 m	n_1	8
M_{b2}	10 kg	A_2	1.0 m	n_2	10
M_{b3}	15 kg	A_3	1.5 m	n_3	12

3.4 Tahapan Simulasi

Agar simulasi dapat berjalan secara sistematis dan sesuai tujuan, diperlukan adanya langkah-langkah yang sesuai. Langkah-langkah tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.14.





Gambar 3.14 *Flowchart* tahapan simulasi

BAB 4 ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisa Frekuensi *Natural* Sistem Pembangkit

Sebelum memulai simulasi pada sistem pembangkit, perlu dilakukan analisa frekuensi *natural* dari sistem. Hal tersebut penting karena jika terjadi resonansi antara gelombang laut dan sistem pembangkit maka *output* yang dihasilkan oleh pembangkit akan sulit ditentukan.

Langkah pertama untuk mendapatkan frekuensi *natural* dari gelombang adalah untuk membuat matrix dari *steady state equation* sistem yang *undamped*. Untuk mendapatkan frekuensi *natural* itu sendiri bisa menggunakan eigenvalue yang didapat menggunakan MATLAB. Persamaan umum untuk matrixnya dapat dilihat pada persamaan (4.1) dan matrix yang digunakan ada dibawahnya.

$$[M]\{X\}+[k]\{x\}=0 \quad (4.1)$$

$$\begin{bmatrix} -M_{p1}\omega^2 + K_{eq1} + K_1 & -K_1 & 0 & 0 \\ -K_1 & -M_b\omega^2 + K_1 + K_2 + 2K_{eq2} & -K_2 & -2K_{eq2} \\ 0 & -K_2 & -M_{p3}\omega^2 + K_{eq3} + K_2 & 0 \\ 0 & -2K_{eq2} & 0 & -M_{tip}\omega^2 + 2K_{eq2} \end{bmatrix} = 0$$

Setelah mendapatkan matrix yang digunakan, data dan variabel yang digunakan masukan dan di *running* pada MATLAB. Untuk Coding yang digunakan sendiri dapat dilihat sebagai berikut.

```
clc;
clear all;
M = [0.6 0 0 0;0 5 0 0;0 0 0.6 0; 0 0 0 2.5];
k = [25526 -10000 0 0;
-10000 113820000 -10000 -113800000;
0 -10000 25624 0;
0 -113800000 0 113800000];
A = inv(M)*k;
[v1 fr1] = eig(k, M)
```

Fr1 merupakan ω^2 atau frekuensi *natural* kuadrat. Nilai tersebut adalah yang kita perlukan. Untuk mendapatkan frekuensi *natural* nilai fr1 diakarkan dan dikonversikan ke satuan Hz. Hasil dari simulasi dan variabelnya dapat dilihat di Tabel 4.1. Nilai frekuensi yang didapat masih dibawah nilai rata-rata frekuensi gelombang laut yaitu 0.09-1.00 Hz (Wyatt, n.d.), sehingga sistem pembangkit masih aman untuk digunakan.

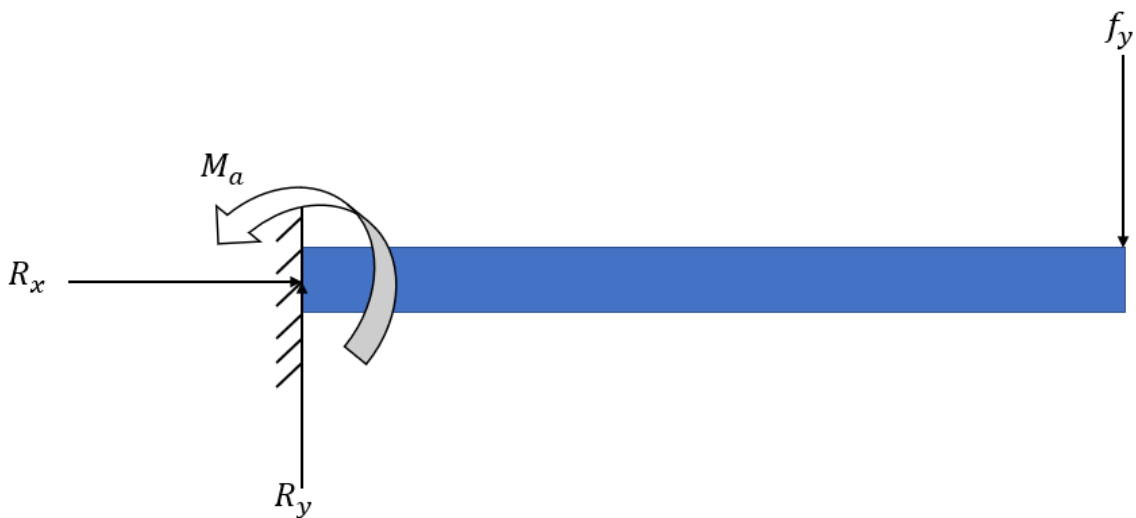
Tabel 4.1 Tabel Variabel dan Frekuensi *Natural* Pembangkit

No.	Variabel		Frekuensi Natural			
	Massa Base (kg)	keq2	w1 (Hz)	w2 (Hz)	w3 (Hz)	w4 (Hz)
1	5	5680000	6.34	32.90	33.31	415.67
2		6900000	6.34	32.90	33.31	458.13
3		8120000	6.34	32.90	33.31	496.98
4	10	5680000	4.94	32.90	33.14	379.43
5		6900000	4.94	32.90	33.14	418.20
6		8120000	4.94	32.90	33.14	453.66
7	15	5680000	4.18	32.90	33.07	366.56
8		6900000	4.18	32.90	33.07	404.01
9		8120000	4.18	32.90	33.07	438.27

4.2 Simulasi Defleksi pada *Piezoelectric Horizontal*

Agar dapat mengetahui apakah defleksi yang dialami oleh *piezoelectric* horizontal pada sistem pembangkit tidak merusak *piezoelectric* itu sendiri maka perlu dilakukan simulasi defleksi menggunakan ANSYS. Tipe simulasi yang digunakan adalah ANSYS *Static Structural*.

Sebelum memulai analisa statis pada ANSYS perlu diketahui terlebih dahulu, gaya apa saja yang diterima oleh *piezoelectric*. Agar lebih mudah memahami ada gaya apa saja maka diperlukan *free body diagram* seperti yang ditertera pada Gambar 4.1. Pada *cantilever piezoelectric* terdapat satu ujung yang dihubungkan pada *fixed support* dan ujung lainnya yang diberikan gaya.



Gambar 4.1 *Cantilever Piezoelectric Free Body Diagram*

4.2.1 *Engineering Data*

Langkah pertama adalah untuk memasukan *material properties* dari *piezoelectric* yang digunakan pada simulasi ini. Untuk mempermudah proses simulasi, maka

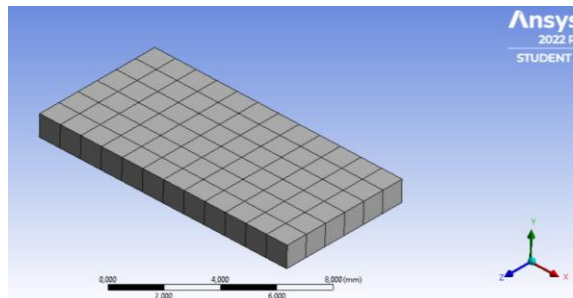
komponen-komponen dalam *piezoelectric* diasumsikan menjadi satu kesatuan. Berikut adalah *material properties* dari *piezoelectric* tersebut.

Tabel 4.2 *Material Properties Horizontal Piezoelectric*

<i>Mechanical Properties</i>	
<i>Material</i>	<i>Minisense 100 Piezoelectric</i>
<i>Density (Kg/m3)</i>	7850
<i>Constant Damping Coefficient (Ns/m)</i>	2.5
<i>Young Modulus (Pa)</i>	3×10^9
<i>Poisson Ratio</i>	0.3
<i>Bulk Modulus (Pa)</i>	2.5×10^9
<i>Shear Modulus (Pa)</i>	1.1538×10^9

4.2.2 Meshing

Setelah *engineering data* sudah dimasukan, dilakukan proses *meshing*. *Meshing* sendiri merupakan metode *finite element* yang digunakan sebagai pendekatan terhadap bentuk asli dari komponen. Semakin baik kualitas *mesh* maka akan semakin tinggi tingkat konvergensinya. Pada simulasi ini tiap elemen berukuran 1 mm. Dengan ukuran elemen 1 mm, didapatkan jumlah *nodes* sebanyak 597 dan *elements* sebanyak 72. Untuk mengetahui apakah *meshing* yang dilakukan sudah sesuai dilakukan pengecekan kualitas *meshing*. Pengukuran kualitas pada simulasi ini menggunakan *mesh metric skewness* dengan nilai rata-rata $1,3058e-10$. Menurut Gambar 4.3, kualitas *meshing* pada simulasi ini *excellent*.



Gambar 4.2 *Meshing Horizontal Piezoelectric*

Tabel 4.3 *Mesh Metric dan Statistic*

Mesh Metric	Skewness
<input type="checkbox"/> Min	1,3057e-010
<input type="checkbox"/> Max	1,3058e-010
<input type="checkbox"/> Average	1,3057e-010
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0,
Inflation	
Advanced	
Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	597
<input type="checkbox"/> Elements	72

Skewness mesh metrics spectrum:



Gambar 4.3 Parameter Kualitas *Skewness Mesh Metric*

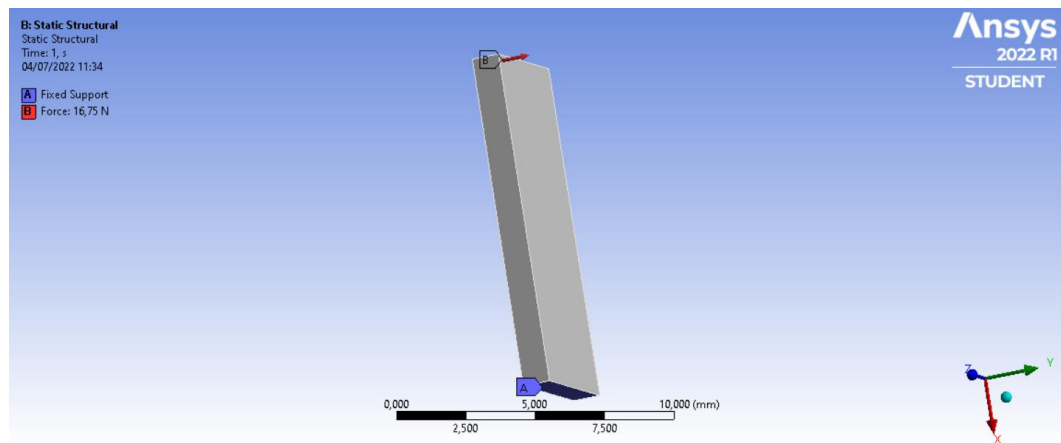
Tabel 4.4 Hasil Uji Konvergensi *Meshing Horizontal Piezoelectric*

Unit	Mesh Element Size (mm)	Maximum Deformation (mm)	Max Deformation Error
DP 0	2.5	6.1895	
DP 1	2	6.1084	1.328%
DP 2	1.5	6.0766	0.523%
DP 3	1	6.1495	1.185%
DP 4	0.5	6.2484	1.583%

Setelah *meshing*, dilakukan uji konvergensi *meshing* untuk mengetahui apakah error dari *meshing* dibawah 5%. Cara ujinya adalah dengan menggunakan beberapa ukuran *mesh element size* untuk mengetahui ukuran mana yang stabil dan error paling kecil. Dari Tabel 4.4 bisa dilihat bahwa *mesh element size* 1.5 mm memiliki *max deformation error* terkecil.

4.2.3 Setup

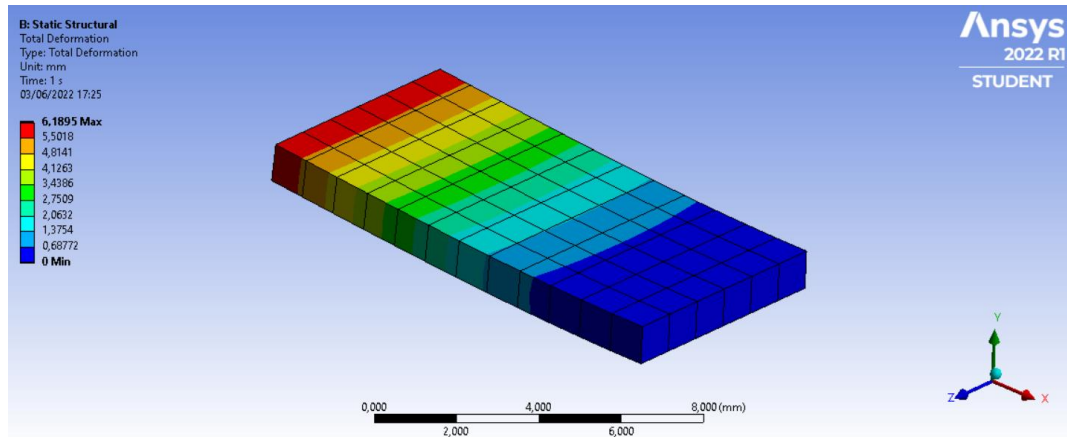
Pada tahap ini dilakukan pemberian gaya dan menentukan *fixed support* pada komponen. Pemberian gaya dan penentuan *fixed support* harus sesuai dengan sistem pembangkit yang sudah dirancang. Titik A pada Gambar 4.4 menggambarkan *fixed support* pada *piezoelectric* karena pada sistem pembangkit salah satu ujung *piezoelectric* tidak bergerak. Titik B pada Gambar 4.4 diberi gaya 16.75 N. Nilai tersebut diambil dari data simulasi pada Simulink. Gaya tersebut didapat dari eksitasi pada sistem pembangkit yang sudah dibagi dengan jumlah *piezoelectric* yang digunakan.



Gambar 4.4 *Setup Static Structural*

4.2.4 Solution

Setelah semua persiapan telah dilakukan, maka simulasi bisa di *solve* untuk mendapatkan hasil. Dari simulasi ini bisa didapat bahwa defleksi minimum pada komponen *horizontal Piezoelectric* ini sebesar 0 mm. Hal tersebut terjadi karena ada sisi *piezoelectric* yang di *fixed support*. Untuk defleksi maksimum bernilai 6,1896 mm sendiri berada di titik dimana gaya diberi. Defleksi rata-rata sepanjang komponen adalah sebesar 2,3521 mm.



Gambar 4.5 Solusi Defleksi *Horizontal Piezoelectric*

Tabel 4.5 Tabel Hasil Nilai Defleksi *Horizontal Piezoelectric*

Results	
<input type="checkbox"/> Minimum	0, mm
<input type="checkbox"/> Maximum	6,1895 mm
<input type="checkbox"/> Average	2,3521 mm

4.3 Simulasi Defleksi pada *Beam* dan *Piezoelectric* Vertikal

Sama seperti simulasi yang sebelumnya, perlu dilakukan adanya simulasi untuk mengetahui apakah defleksi yang dialami oleh *beam* dan *piezoelectric* vertikal pada sistem pembangkit merusak atau tidak merusak *piezoelectric*. Oleh sebab itu, perlu dilakukan simulasi defleksi menggunakan ANSYS. Tipe simulasi yang digunakan adalah menggunakan ANSYS *Static Structural*.

4.3.1 Engineering Data

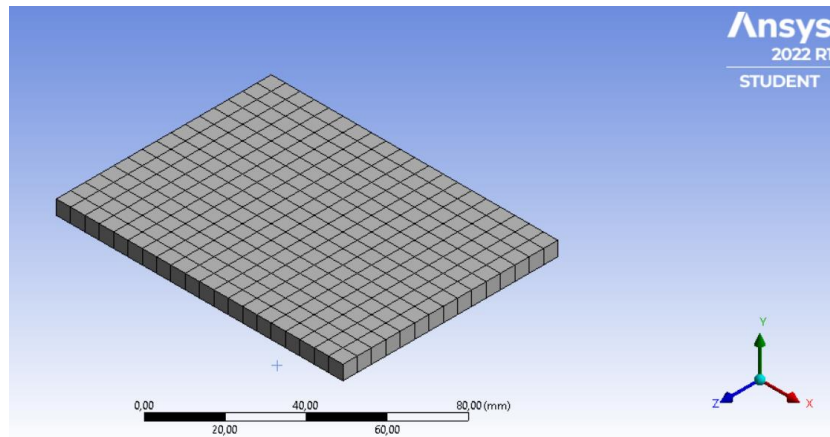
Pertama memasukan *material properties* dari *beam* yang digunakan pada simulasi ini. Untuk mempermudah proses simulasi, maka komponen *beam* dan *piezoelectric* diasumsikan menjadi satu. Berikut adalah *material properties* dari *beam* tersebut.

Tabel 4.6 *Material Properties Beam*

<i>Mechanical Properties</i>	
<i>Material</i>	<i>Vertical Beam</i>
<i>Density (Kg/m3)</i>	8500
<i>Constant Damping Coefficient (Ns/m)</i>	712.7
<i>Young Modulus (Pa)</i>	1.7×10^{11}
<i>Poisson Ratio</i>	0.3
<i>Bulk Modulus (Pa)</i>	1.4167×10^{11}
<i>Shear Modulus (Pa)</i>	6.5385×10^{10}

4.3.2 *Meshing*

Selanjutnya, dilakukan proses *meshing* kembali. Pada simulasi ini tiap elemen berukuran 5 mm. Dengan ukuran elemen 5 mm, didapatkan jumlah *nodes* sebanyak 2278 dan *elements* sebanyak 300. Untuk mengetahui apakah *meshing* yang dilakukan sudah sesuai dilakukan pengecekan kualitas *meshing*. Pengukuran kualitas pada simulasi ini menggunakan *mesh metric skewness* dengan nilai rata-rata $1,3058E-10$. Menurut Gambar 4.3, kualitas *meshing* pada simulasi ini *excellent*.



Gambar 4.6 *Meshing Beam dan Piezoelectric Vertikal*

Tabel 4.7 *Mesh Metric dan Statistic*

Mesh Metric	Skewness
<input type="checkbox"/> Min	1,3057e-010
<input type="checkbox"/> Max	1,3059e-010
<input type="checkbox"/> Average	1,3058e-010
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0,
Inflation	
Advanced	
Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	2278
<input type="checkbox"/> Elements	300

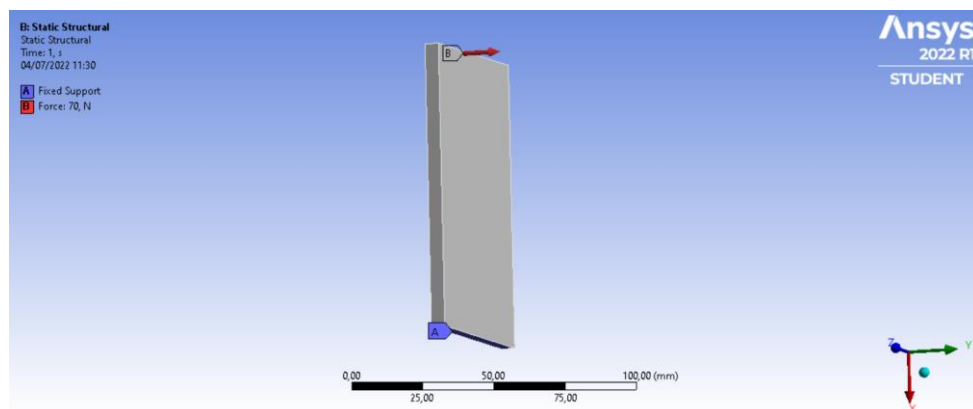
Tabel 4.8 Hasil Uji Konvergensi *Beam* dan *Piezoelectric Vertikal*

Unit	Mesh Element Size (mm)	Maximum Deformation (mm)	Max Deformation Error	Percent
DP 0	6	0.16677		
DP 1	5	0.16701	0.144%	0.143704
DP 2	4	0.16783	0.489%	0.48859
DP 3	3	0.16791	0.048%	0.047645
DP 4	2	0.16804	0.077%	0.077363

Setelah *meshing*, dilakukan uji konvergensi *meshing* untuk mengetahui apakah error dari *meshing* dibawah 5%. Cara ujinya adalah dengan menggunakan beberapa ukuran *mesh element size* untuk mengetahui ukuran mana yang stabil dan error paling kecil. Dari Tabel 4.8Tabel 4.4 bisa dilihat bahwa *mesh element size* 1.5 mm memiliki *max deformation error* terkecil.

4.3.3 Setup

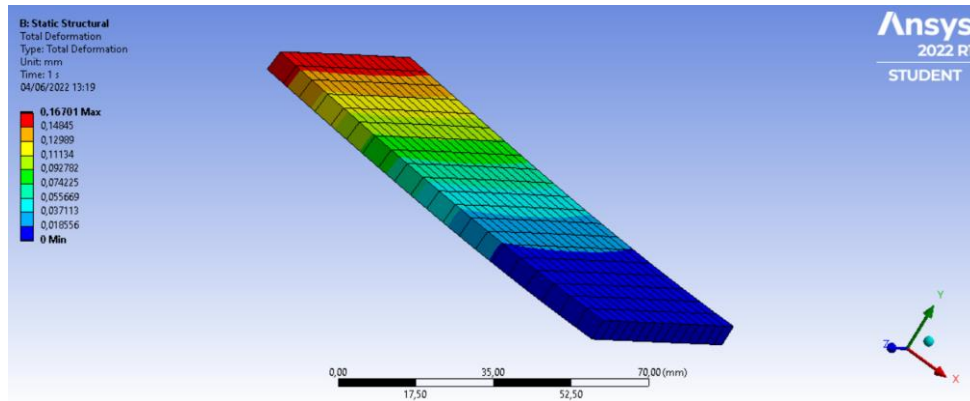
Pada tahap ini dilakukan pemberian gaya dan menentukan *fixed support* pada komponen. Pemberian gaya dan penentuan *fixed support* harus sesuai dengan sistem pembangkit yang sudah dirancang. Titik A pada Gambar 4.7 menggambarkan *fixed support* pada *beam* karena pada sistem pembangkit salah satu ujung *beam* dianggap tidak bergerak. Salah satu ujung *beam* dianggap tidak bergerak karena gaya yang dialami oleh *beam* adalah gaya relatif antara titik A dan titik B pada Gambar 4.7. Titik B pada Gambar 4.7 diberi gaya 70 N. Gaya tersebut didapat dari eksitasi pada sistem pembangkit.



Gambar 4.7 *Setup Static Structural*

4.3.4 Solution

Setelah semua persiapan telah dilakukan, maka simulasi bisa di *solve* untuk mendapatkan hasil. Dari simulasi ini bisa didapat bahwa defleksi minimum pada komponen *Horizontal 100 Piezoelectric* ini sebesar 0 mm. Hal tersebut terjadi karena ada sisi *beam* yang di *fixed support*. Untuk defleksi maksimum bernilai 0.16701 mm sendiri berada di titik dimana gaya diberi. Defleksi rata-rata sepanjang komponen adalah sebesar 0.0062604 mm.



Gambar 4.8 Solusi Defleksi *Vertical Beam*

Tabel 4.9 Tabel Hasil Nilai Defleksi *Vertical Beam*

Results	
<input type="checkbox"/> Minimum	0, mm
<input type="checkbox"/> Maximum	0,16701 mm
<input type="checkbox"/> Average	6,2604e-002 mm

4.4 Respon *Displacement* pada *Piezoelectric* terhadap Variabel

Untuk mengetahui respon *displacement* pada *piezoelectric* terhadap variabel, dilakukan simulasi pada Simulink. Persamaan gerak dari bab sebelumnya diubah menjadi bentuk *state variable*, kemudian diubah menjadi blok dalam Simulink. *Displacement* atau defleksi yang dianalisa hanya defleksi yang mempengaruhi produksi voltase dari sistem. Dengan kata lain, hanya defleksi *piezoelectric* yang dianalisa. Defleksi *piezoelectric* vertikal sendiri diukur dari selisih antara defleksi massa *base* dan massa *tip*.

Variabel yang dianalisa pada penelitian ini adalah massa *base*, amplitudo gelombang laut, dan jumlah *piezoelectric* vertikal. Maka dari itu akan diambil beberapa sampel variasi pengujian, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.10, yang akan mewakili pengaruh variabel kepada hasil voltase yang dihasilkan.

Tabel 4.10 Sampel Variasi Pengujian

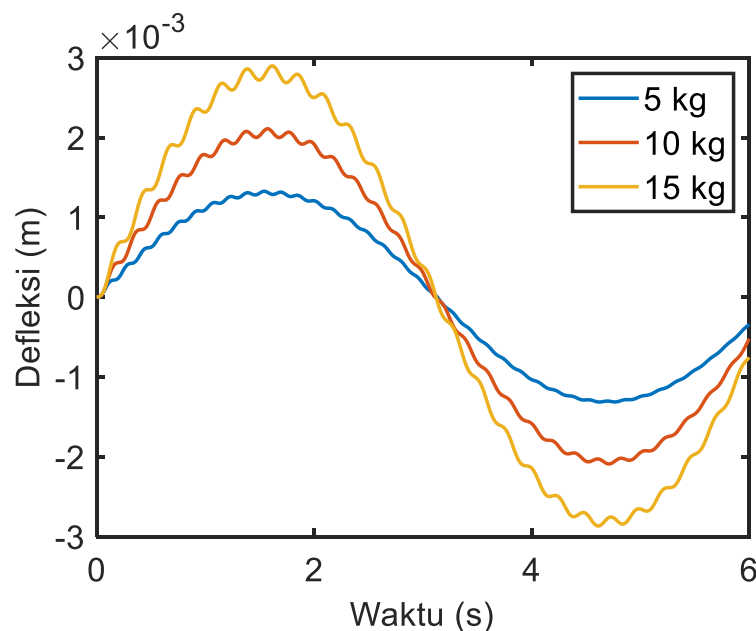
Variasi		
Massa (kg)	Amplitudo (m)	Jumlah
5	0.5	8
10	0.5	8
15	0.5	8
15	0.5	8
15	1	8
15	1.5	8
15	0.5	8
15	0.5	10
15	0.5	12

4.4.1 Displacement pada Piezoelectric terhadap Variabel Massa

Variabel pertama yang diuji adalah variabel massa *base* dengan nilai 5 kg, 10 kg, dan 15 kg terhadap defleksi pada *piezoelectric*. Yang perlu dianalisa adalah bagaimana respon defleksi terhadap variabel massa dan defleksi maksimum dari tiap variabel.

Dari Gambar 4.9 bisa dilihat bahwa respon defleksi pada *Piezoelectric* horizontal berbentuk sinusoidal sesuai dengan input gelombangnya. Selain itu, semakin besar variabel massa yang digunakan, semakin besar pula defleksi yang dihasilkan. Hal tersebut dikarenakan massa yang divariasikan tersebut merupakan salah satu penyebab eksitasi terbesar pada sistem pembangkit. Jika massa diperbesar, maka gaya eksitasi yang diterima sistem juga akan menjadi semakin besar.

Selain untuk melihat respon defleksi, grafik pada Gambar 4.9 bisa diteliti lebih jauh menggunakan *data statistic tools*. Hasil dari *data statistic tools* pada Tabel 4.11 didapat defleksi maksimum pada variabel 5 kg adalah 0.001329 m, defleksi maksimum pada variabel 10 kg adalah 0.002111 m, dan defleksi maksimum pada variabel 15 kg adalah 0.0029 m.



Gambar 4.9 Grafik Waktu terhadap Defleksi pada *Horizontal Piezoelectric*

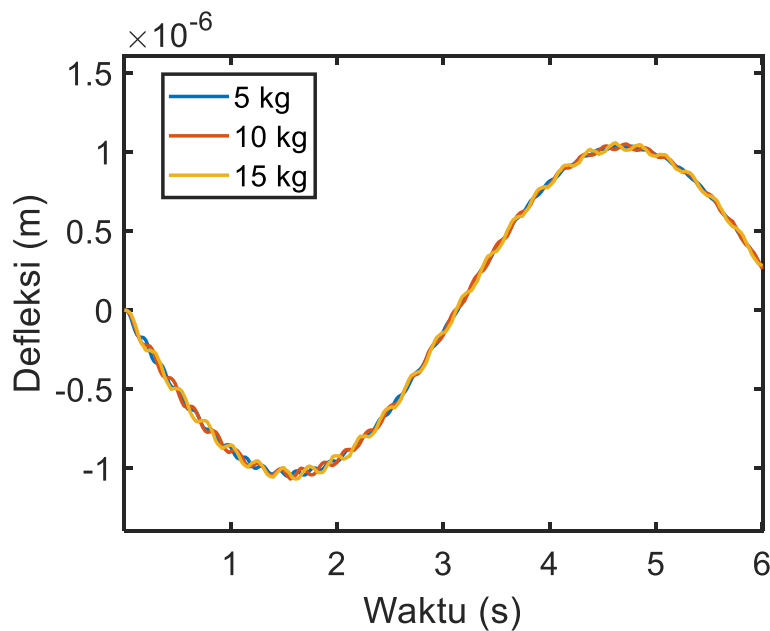
Tabel 4.11 Data Statistik Defleksi Variasi Massa pada *Horizontal Piezoelectric*

Data Statistik Defleksi Variasi Massa		
Massa	Min (m)	Max (m)
5	-0.001314	0.001329
10	-0.002089	0.002111
15	-0.002867	0.0029

Selain defleksi pada *Horizontal Piezoelectric*, perlu juga dilakukan analisis respon defleksi pada *piezoelectric* vertikal. Defleksi yang dialami oleh *piezoelectric* vertikal adalah defleksi dari massa *base* dikurangi dengan defleksi massa *tip* atau $x_2 - x_4$.

Hasil grafik pada Gambar 4.10 berbentuk sinusoidal namun bergerak ke arah negative dahulu baru ke arah positif. Grafik tersebut menunjukkan bahwa defleksi dari *piezoelectric* vertikal bergerak berlawanan arah dengan arah gerak massa *base*. Hal tersebut terjadi karena saat massa *base* mulai bergerak, massa *tip* masih mempertahankan posisinya. Akibat dari fenomena ini, *piezoelectric* vertikal bagian bawah bergerak searah dengan massa *base* dan *piezoelectric* bagian atas mempertahankan posisinya dengan massa *tip*. Selain itu, terdapat perbedaan respon defleksi dengan *horizontal piezoelectric*. Pada *piezoelectric vertikal* tidak menunjukkan perbedaan signifikan saat diberi variabel massa *base*. Hal tersebut mungkin terjadi karena adanya konstanta kekakuan yang besar pada beam sehingga perbedaan antara defleksi massa *base* dan defleksi pada massa *tip* tidak berubah signifikan.

Karena tidak ada perbedaan yang signifikan, grafik pada Gambar 4.10 diteliti lebih jauh menggunakan *data statistic tools*. Hasil dari *data statistic tools* pada Tabel 4.12 didapat defleksi maksimum pada variabel 5 kg adalah 1.039×10^{-6} m, defleksi maksimum pada variabel 10 kg adalah 1.051×10^{-6} m, dan defleksi maksimum pada variabel 15 kg adalah 1.059×10^{-6} m.



Gambar 4.10 Grafik Waktu terhadap Defleksi pada *Piezoelectric* Vertikal

Tabel 4.12 Data Statistik Defleksi Variasi Massa pada *Piezoelectric* Vertikal

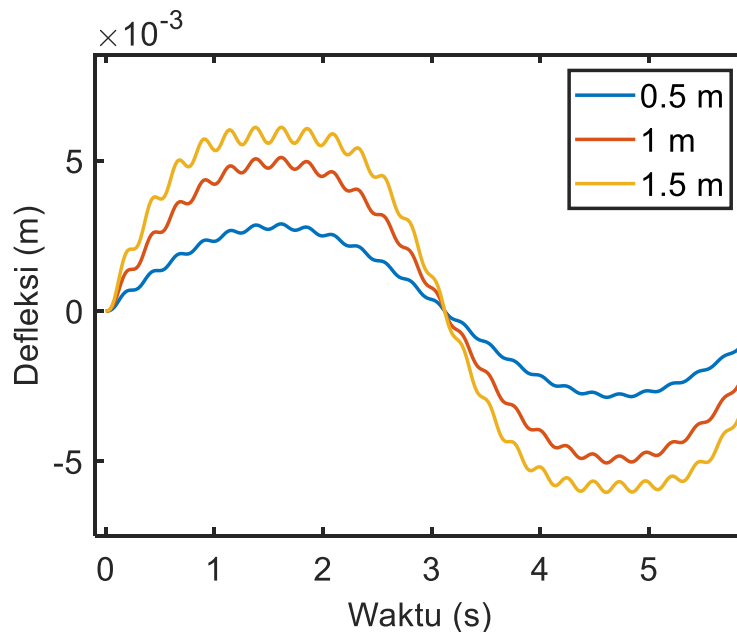
Data Statistik Defleksi Variasi Massa		
Massa	Min (m)	Max (m)
5	-1.05E-06	1.04E-06
10	-1.07E-06	1.05E-06
15	-1.07E-06	1.06E-06

4.4.2 Displacement pada Piezoelectric terhadap Variabel Amplitudo

Variabel kedua yang diuji adalah variabel amplitude gelombang laut dengan nilai 0.5 m, 1 m, dan 1.5 m terhadap defleksi pada *piezoelectric*. Yang perlu dianalisa adalah bagaimana respon defleksi terhadap variabel amplitudo dan defleksi maksimum dari tiap variabel.

Dari Gambar 4.11 bisa dilihat bahwa respon defleksi pada *horizontal piezoelectric* berbentuk sinusoidal sesuai dengan input gelombangnya. Selain itu, semakin besar variabel amplitudo yang digunakan, semakin besar pula defleksi yang dihasilkan. Hal tersebut terjadi karena semakin besar amplitude gelombang, semakin besar juga sudut teta yang dihasilkan antara pembangkit dan gelombang. Sudut teta tersebut akan mempengaruhi gaya eksitasi dari massa sesuai dengan persamaan (3.9) dan (3.10).

Grafik pada Gambar 4.11 bisa diteliti lebih jauh menggunakan *data statistic tools* untuk melihat perbedaan respon secara akurat. Hasil dari *data statistic tools* pada Tabel 4.13 didapat defleksi maksimum pada variabel 0.5 m adalah 0.0029 m, defleksi maksimum pada variabel 1 m adalah 0.005113 m, dan defleksi maksimum pada variabel 1.5 m adalah 0.006118 m.



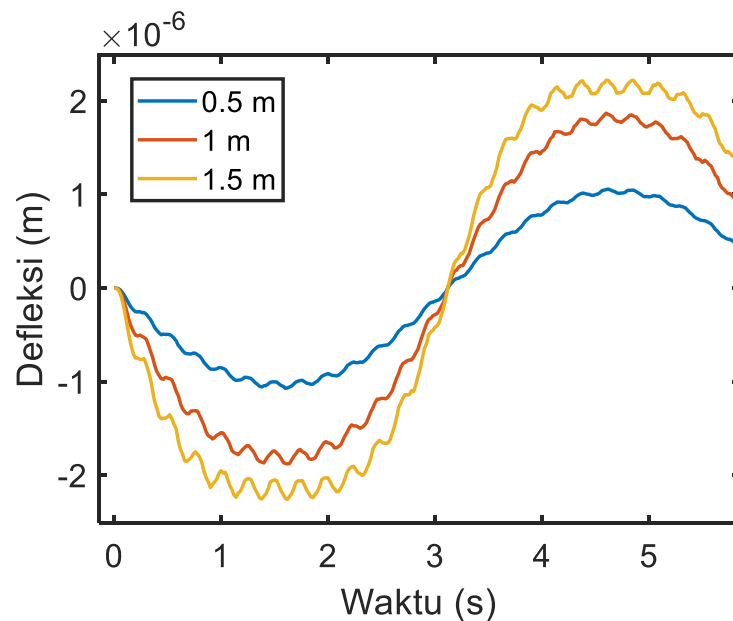
Gambar 4.11 Grafik Waktu terhadap Defleksi pada *Horizontal Piezoelectric*

Tabel 4.13 Data Statistik Defleksi Variasi Amplitudo *Horizontal Piezoelectric*

Data Statistik Defleksi Variasi Amplitudo		
Amplitudo	Min (m)	Max (m)
0.5	-0.002867	0.0029
1	-0.005048	0.005113
1.5	-0.00603	0.006118

Selain defleksi pada *horizontal piezoelectric*, perlu juga dilakukan analisis respon defleksi pada *piezoelectric* vertikal terhadap variabel amplitudo. Hasil grafik pada Gambar 4.12 berbentuk sinusoidal namun bergerak ke arah negative dahulu baru ke arah positif. Penemuan ini masih konsisten dengan hasil dari variabel sebelumnya. Meski begitu, pengaruh amplitudo masih berbanding lurus dengan voltase yang dihasilkan, sama seperti respon pada *horizontal piezoelectric*

Grafik pada Gambar 4.12 bisa diteliti lebih jauh menggunakan *data statistic tools*. Hasil dari *data statistic tools* pada Tabel 4.14 didapat defleksi maksimum pada variabel 0.5 m adalah 1.057e-06 m, defleksi maksimum pada variabel 1 m adalah 1.87e-06 m, dan defleksi maksimum pada variabel 1.5 m adalah 2.222e-06 m.



Gambar 4.12 Grafik Waktu terhadap Defleksi pada *Piezoelectric* Vertikal

Tabel 4.14 Data Statistik Defleksi Variasi Amplitudo *Piezoelectric* Vertikal

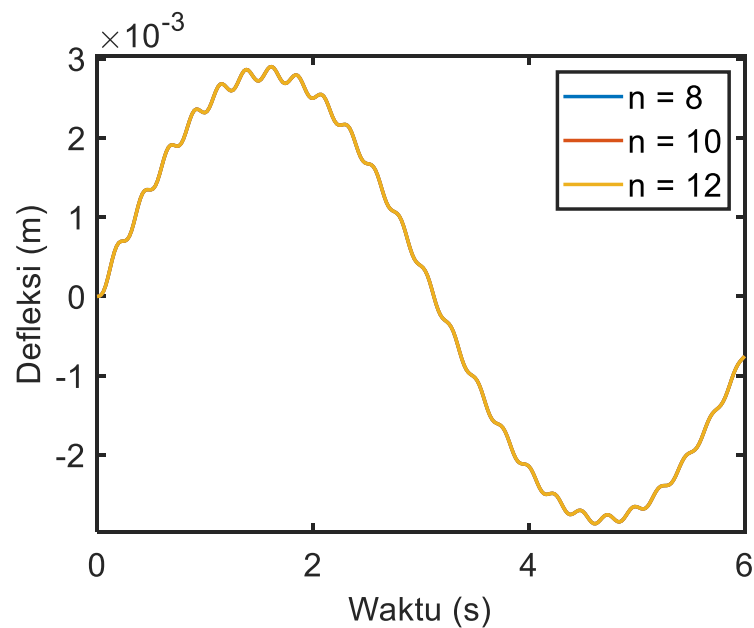
Data Statistik Defleksi Variasi Amplitudo		
Amplitudo	Min (m)	Max (m)
0.5	-1.07E-06	1.06E-06
1	-1.88E-06	1.87E-06
1.5	-2.26E-06	2.22E-06

4.4.3 Displacement pada *Piezoelectric* terhadap Variabel Jumlah *Piezoelectric*

Variabel terakhir yang diuji adalah variabel jumlah *piezoelectric* vertikal dengan jumlah 8, 10, dan 12 terhadap defleksi pada *piezoelectric*. Yang perlu dianalisa adalah bagaimana respon defleksi terhadap variabel jumlah *piezoelectric* vertikal dan defleksi maksimum dari tiap variabel.

Dari Gambar 4.13 bisa dilihat bahwa respon defleksi pada *horizontal piezoelectric* berbentuk sinusoidal sesuai dengan input gelombangnya. Selain itu, grafik defleksi dari tiap variabel tidak menunjukkan perbedaan. Hal tersebut menunjukkan bahwa tidak ada hubungan secara langsung atau hubungan yang signifikan antara jumlah *piezoelectric* vertikal dengan defleksi pada *horizontal piezoelectric*.

Untuk memastikan bahwa benar tidak ada perbedaan pada grafik maka, grafik pada Gambar 4.13 bisa diteliti lebih jauh menggunakan *data statistic tools*. Hasil dari *data statistic tools* pada Tabel 4.15 didapat defleksi maksimum pada tiap variabel adalah sama yaitu 0.0029 m.



Gambar 4.13 Grafik Waktu terhadap Defleksi pada *Horizontal Piezoelectric*

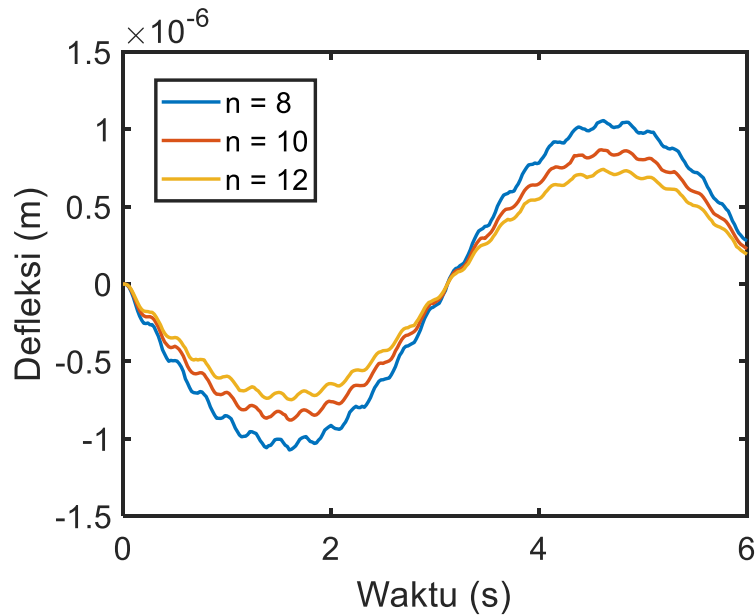
Tabel 4.15 Data Statistik Defleksi Variasi Jumlah Piezoelektrik pada *Horizontal Piezoelectric*

Data Statistik Defleksi Variasi Jumlah Piezoelektrik		
Piezoelektrik	Min (m)	Max (m)
8	-0.002867	0.0029
10	-0.002867	0.0029
12	-0.002867	0.0029

Selain defleksi pada *Horizontal Piezoelectric*, perlu juga dilakukan analisis respon defleksi pada *piezoelectric* vertikal. Dari Gambar 4.14 bisa dilihat bahwa grafik berbentuk sinusoidal namun bergerak ke arah negative dahulu baru ke arah positif. Penemuan ini masih konsisten dengan hasil dari variabel sebelumnya. Namun terdapat perbedaan respon defleksi dengan *Horizontal Piezoelectric*. Pada *piezoelectric vertikal* menunjukkan perbedaan signifikan saat diberi variabel jumlah *piezoelectric* vertikal. Hal tersebut mungkin terjadi karena adanya perbedaan konstanta kekakuan yang besar pada beam sehingga perbedaan antara defleksi massa *base* dan defleksi pada massa *tip* berubah. Selain itu, semakin banyak jumlah *piezoelectric* vertikal, semakin kecil defleksi yang

dihasilkan. Walaupun jumlahnya lebih banyak, namun konstanta kekakuan pada beam juga akan membesar dan menyebabkan mengecilnya defleksi yang dihasilkan.

Untuk melihat perbedaan hasil akibat variabel jumlah *piezoelectric* maka, Grafik pada Gambar 4.14 diteliti lebih jauh menggunakan *data statistic tools*. Hasil dari *data statistic tools* pada Tabel 4.16 didapat defleksi maksimum pada $n=8$ adalah $1.057e-6$ m, defleksi maksimum pada variabel $n=10$ adalah $8.68e-7$ m, dan defleksi maksimum pada variabel $n=12$ adalah $7.416e-7$ m.



Gambar 4.14 Grafik Waktu terhadap Defleksi pada *Piezoelectric* Vertikal

Tabel 4.16 Data Statistik Defleksi Variasi Jumlah Piezoelektrik pada *Piezoelectric* Vertikal

Data Statistik Defleksi Variasi Jumlah Piezoelektrik		
Piezoelektrik	Min (m)	Max (m)
8	-1.07E-06	1.06E-06
10	-8.79E-07	8.68E-07
12	-7.48E-07	7.42E-07

4.5 Pengaruh Variabel terhadap Voltase yang Dihasilkan

Untuk mengetahui respon voltase pada *piezoelectric* terhadap variabel, dilakukan simulasi pada Simulink. Voltase yang dianalisa adalah voltase yang dihasilkan oleh *horizontal piezoelectric* dan *vertical piezoelectric*.

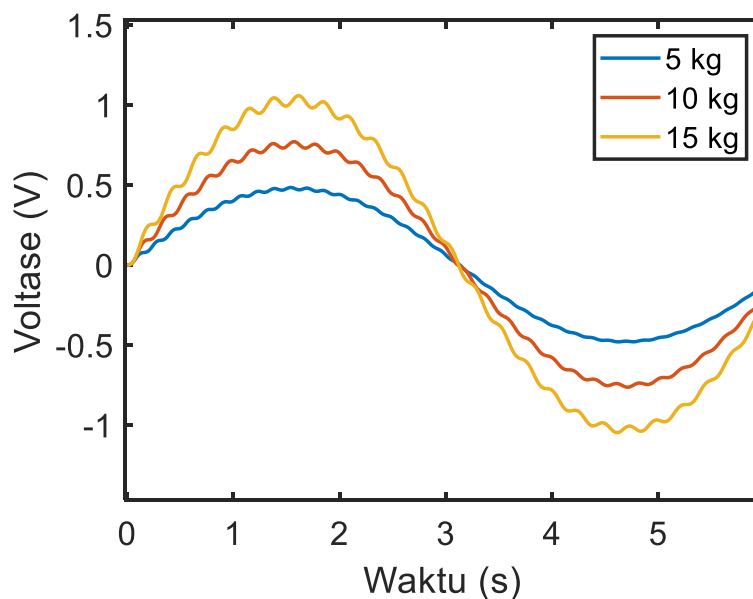
Variabel yang dianalisa pada penelitian ini adalah massa *base*, amplitudo gelombang laut, dan jumlah *piezoelectric* vertikal. Maka dari itu akan diambil beberapa sampel hasil simulasi yang akan mewakili pengaruh variabel kepada hasil voltase yang dihasilkan. Sampel tersebut sesuai dengan Tabel 4.10.

4.5.1 Pengaruh Massa terhadap Voltase yang dihasilkan

Variabel pertama yang diuji adalah variabel massa *base* dengan nilai 5 kg, 10 kg, dan 15 kg terhadap voltase pada *Horizontal Piezoelectric* dan *piezoelectric* vertikal. Yang perlu dianalisa adalah bagaimana respon voltase terhadap variabel massa, voltase maksimum dari tiap variabel, dan voltase RMS.

Dari Gambar 4.15 bisa dilihat bahwa respon defleksi pada *Horizontal Piezoelectric* berbentuk sinusoidal sesuai dengan input gelombangnya. Selain itu, semakin besar variabel massa yang digunakan, semakin besar pula voltase yang dihasilkan. Hal tersebut dikarenakan massa yang divariasikan tersebut merupakan salah satu penyebab eksitasi terbesar pada sistem pembangkit. Jika massa diperbesar, maka gaya eksitasi yang diterima sistem juga akan menjadi semakin besar. Semakin besar eksitasi pada sistem maka *displacement* juga akan semakin besar. Kemudian menurut rumus (2.1), defleksi *piezoelectric* berbanding lurus dengan voltase yang dihasilkan.

Untuk melihat nilai voltase yang dihasilkan pada puncak, grafik pada Gambar 4.15 perlu diteliti lebih jauh menggunakan *data statistic tools*. Hasil dari *data statistic tools* pada Tabel 4.17 didapat voltase maksimum pada variabel 5 kg adalah 0.4853 V, defleksi maksimum pada variabel 10 kg adalah 0.7708 V, dan defleksi maksimum pada variabel 15 kg adalah 1.059 V.



Gambar 4.15 Grafik Waktu terhadap Voltase pada *Horizontal Piezoelectric*

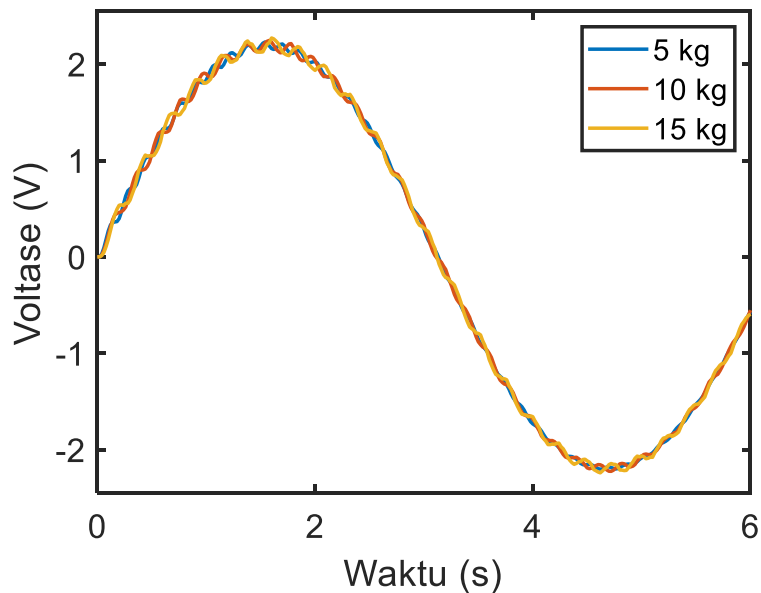
Tabel 4.17 Data Statistik Respon Voltase Variasi Massa pada *Horizontal Piezoelectric*

Data Statistik Respon Voltase Variasi Massa		
Massa	Min (V)	Max (V)
5	-0.4789	0.4853
10	-0.7629	0.7708
15	-1.047	1.059

Selain defleksi pada *Horizontal Piezoelectric*, perlu juga dilakukan analisis respon voltase pada *piezoelectric* vertikal. Voltase yang diambil adalah jumlah nilai voltase dari *piezoelectric* vertikal yang terpasang.

Dari Gambar 4.16 bisa dilihat bahwa respon voltase pada *Piezoelectric* vertikal berbentuk sinusoidal sesuai dengan input gelombangnya. Namun terdapat perbedaan respon voltase dengan *Horizontal Piezoelectric*. Pada *piezoelectric vertikal* tidak menunjukkan perbedaan signifikan saat diberi variabel massa *base*. Hal tersebut mungkin terjadi karena adanya konstanta kekakuan yang besar pada beam sehingga perbedaan antara defleksi massa *base* dan defleksi pada massa *tip* tidak berubah signifikan.

Untuk melihat perbedaan tersebut secara detail maka, grafik pada Gambar 4.16 perlu diteliti lebih jauh menggunakan *data statistic tools*. Hasil dari *data statistic tools* pada Tabel 4.18 didapat voltase maksimum pada variabel 5 kg adalah 2.23 V, defleksi maksimum pada variabel 10 kg adalah 2.246 V, dan defleksi maksimum pada variabel 15 kg adalah 2.272 V.



Gambar 4.16 Grafik Waktu terhadap Voltase pada *Piezoelectric* Vertikal

Tabel 4.18 Data Statistik Respon Voltase Variasi Massa pada *Piezoelectric* Vertikal

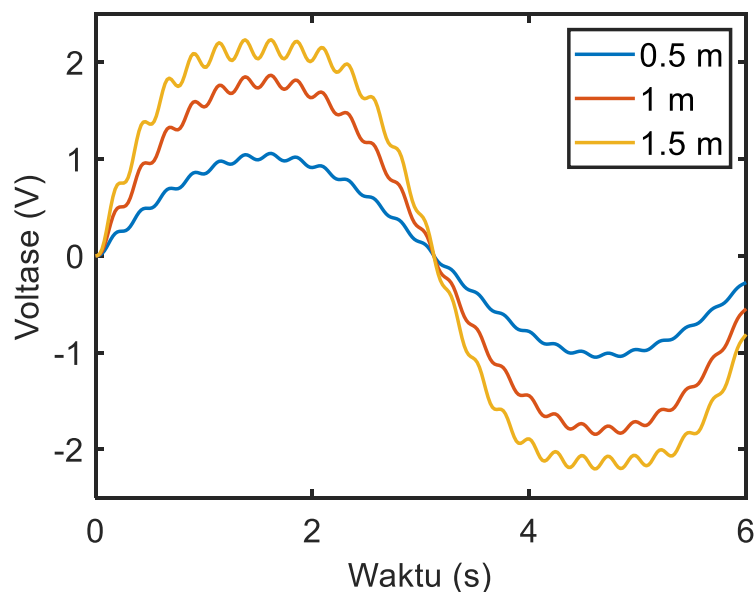
Data Statistik Respon Voltase Variasi Massa		
Massa	Min (V)	Max (V)
5	-2.202	2.23
10	-2.224	2.246
15	-2.24	2.272

4.5.2 Pengaruh Amplitudo terhadap Voltase yang dihasilkan

Variabel kedua yang diuji adalah variabel amplitude gelombang laut dengan nilai 0.5 m, 1 m, dan 1.5 m terhadap voltase yang dihasilkan *piezoelectric*. Yang perlu dianalisa adalah bagaimana respon voltase terhadap variabel amplitude, voltase maksimum dari tiap variabel dan voltase RMS.

Dari Gambar 4.17 bisa dilihat bahwa respon voltase pada *Horizontal Piezoelectric* berbentuk sinusoidal sesuai dengan input gelombangnya. Selain itu, semakin besar variabel amplitudo yang digunakan, semakin besar pula voltase yang dihasilkan. Hal tersebut terjadi karena semakin besar amplitude gelombang, semakin besar juga sudut teta yang dihasilkan antara pembangkit dan gelombang. Sudut teta tersebut akan mempengaruhi gaya eksitasi dari massa sesuai dengan persamaan (3.9) dan (3.10). Semakin besar gaya eksitasi akan menghasilkan defleksi yang lebih besar dan voltase yang lebih besar juga sesuai dengan persamaan (2.1).

Grafik pada Gambar 4.17 bisa diteliti lebih jauh menggunakan *data statistic tools*. Hasil dari *data statistic tools* pada Tabel 4.19 didapat voltase maksimum pada variabel 0.5 m adalah 1.059 V, defleksi maksimum pada variabel 1 m adalah 1.867 V, dan defleksi maksimum pada variabel 1.5 m adalah 2.234 V.



Gambar 4.17 Grafik Waktu terhadap Voltase pada *Horizontal Piezoelectric*

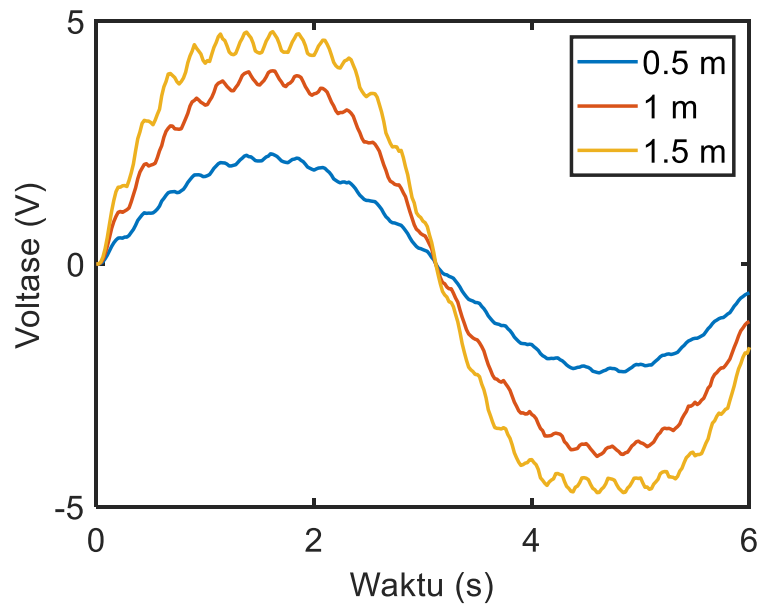
Tabel 4.19 Data Statistik Respon Voltase Variasi Amplitudo pada *Horizontal Piezoelectric*

Data Statistik Respon Voltase Variasi Amplitudo		
Amplitudo	Min (V)	Max (V)
0.5	-1.047	1.059
1	-1.843	1.867
1.5	-2.202	2.234

Selain voltase pada *Horizontal Piezoelectric*, perlu juga dilakukan analisis respon voltase pada *piezoelectric* vertikal terhadap variabel amplitudo. Dari Gambar 4.18 bisa dilihat bahwa respon voltase pada *piezoelectric* vertikal berbentuk sinusoidal sesuai dengan input gelombangnya. Selain itu, semakin besar variabel amplitudo yang digunakan, semakin besar pula voltase yang dihasilkan. Hal tersebut terjadi karena semakin besar amplitude gelombang, semakin besar juga sudut teta yang dihasilkan

antara pembangkit dan gelombang. Sudut teta tersebut akan mempengaruhi gaya eksitasi dari massa sesuai dengan persamaan (3.9) dan (3.10).

Grafik pada Gambar 4.18 bisa diteliti lebih jauh menggunakan *data statistic tools*. Hasil dari *data statistic tools* pada Tabel 4.20 didapat voltase maksimum pada variabel 0.5 m adalah 2.272 v, defleksi maksimum pada variabel 1 m adalah 3.981 V, dan defleksi maksimum pada variabel 1.5 m adalah 4.787 V.



Gambar 4.18 Grafik Waktu terhadap Voltase pada *Piezoelectric* Vertikal

Tabel 4.20 Data Statistik Respon Voltase Variasi Amplitudo pada *Piezoelectric* Vertikal

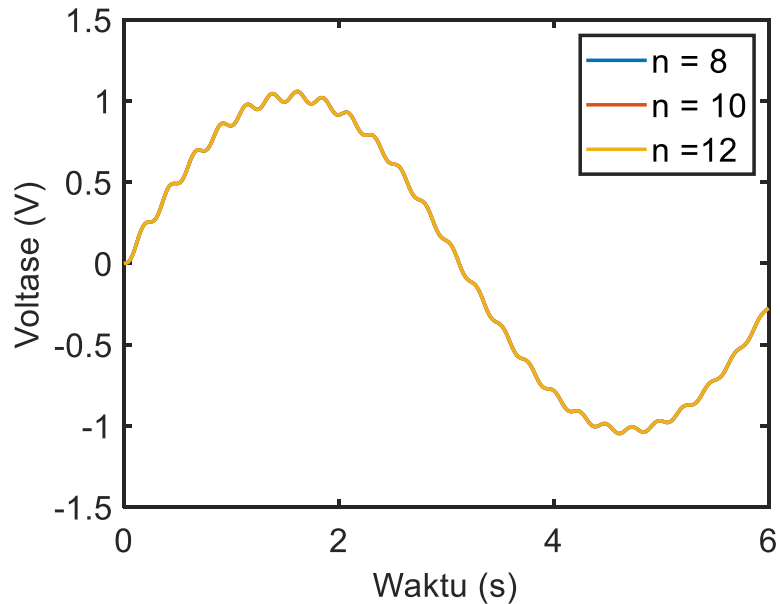
Data Statistik Respon Voltase Variasi Amplitudo		
Amplitudo	Min (V)	Max (V)
0.5	-2.24	2.272
1	-3.961	3.981
1.5	-4.707	4.787

4.5.3 Pengaruh Jumlah *Piezoelectric* terhadap Voltase yang dihasilkan

Variabel terakhir yang diuji adalah variabel jumlah *piezoelectric* vertikal dengan jumlah 8, 10, dan 12 terhadap voltase pada *piezoelectric*. Yang perlu dianalisa adalah bagaimana respon defleksi terhadap variabel jumlah *piezoelectric* vertikal, defleksi maksimum, dan voltase RMS dari tiap variabel.

Dari Gambar 4.19 bisa dilihat bahwa respon voltase pada *Horizontal Piezoelectric 100* berbentuk sinusoidal sesuai dengan input gelombangnya. Namun tidak terdapat perbedaan respon defleksi akibat variabel pada *Horizontal Piezoelectric*. Hal tersebut menunjukkan bahwa tidak terdapat pengaruh yang signifikan dari jumlah *piezoelectric* vertikal kepada voltase yang dihasilkan oleh *Horizontal Piezoelectric*.

Grafik pada Gambar 4.19 bisa diteliti lebih jauh menggunakan *data statistic tools*. Hasil dari *data statistic tools* pada Tabel 4.21 didapat voltase maksimum pada variabel $n=8$, $n=10$, dan $n=12$ adalah 1.059 V.



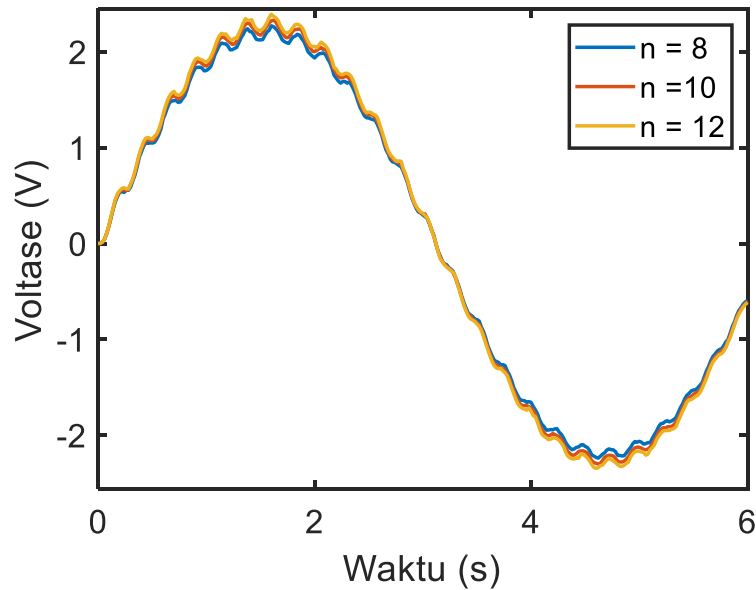
Gambar 4.19 Grafik Waktu terhadap Voltase pada *Horizontal Piezoelectric*

Tabel 4.21 Data Statistik Respon Voltase Variasi Jumlah Piezoelektrik pada *Horizontal Piezoelectric*

Data Statistik Respon Voltase Variasi Jumlah Piezoelektrik		
Piezoelektrik	Min (V)	Max (V)
8	-1.047	1.059
10	-1.047	1.059
12	-1.047	1.059

Selain voltase pada *Horizontal Piezoelectric*, perlu juga dilakukan analisis respon voltase pada *piezoelectric* vertikal terhadap variabel jumlah *piezoelectric* vertikal. Dari Gambar 4.20 bisa dilihat bahwa respon voltase pada *Piezoelectric* vertikal berbentuk sinusoidal sesuai dengan input gelombangnya. Pada *piezoelectric* vertikal menunjukkan perbedaan voltase yang saat diberi variabel jumlah *piezoelectric* vertikal. Hal tersebut mungkin terjadi karena semakin banyak jumlah *piezoelectric* vertikal, semakin besar juga konstanta kekakuan pada beam tersebut. Oleh karena itu, defleksi pada beam juga akan mengecil. Walaupun defleksinya mengecil, jumlah *piezoelectric* vertikal semakin banyak, maka voltase yang dihasilkan menjadi lebih besar.

Grafik pada Gambar 4.20 bisa diteliti lebih jauh menggunakan *data statistic tools*. Hasil dari *data statistic tools* pada Tabel 4.22 didapat voltase maksimum pada $n=8$ adalah 2.272 V, defleksi maksimum pada variabel $n=10$ adalah 2.33 V, dan defleksi maksimum pada variabel $n=12$ adalah 2.392V.



Gambar 4.20 Grafik Waktu terhadap Voltase pada *Piezoelectric* Vertikal

Tabel 4.22 Data Statistik Respon Voltase Variasi Jumlah Piezoelektrik pada *Piezoelectric* Vertikal

Data Statistik Respon Voltase Variasi Jumlah Piezoelektrik		
Piezoelektrik	Min (V)	Max (V)
8	-2.24	2.272
10	-2.3	2.33
12	-2.345	2.392

4.6 Pembahasan

Setelah menganalisa pengaruh variabel massa *base*, amplitudo gelombang laut, dan jumlah *piezoelectric* vertikal, bisa ditentukan kombinasi variabel mana yang digunakan untuk menghasilkan voltase maksimal. Untuk semua variabel, massa *base*, amplitudo, dan jumlah *piezoelectric* vertikal, semakin besar nilainya semakin besar juga voltase yang dihasilkan.

Penemuan dari penelitian ini sudah sesuai dengan referensi yang sudah ada sebelumnya. Untuk pengaruh variasi massa bisa dilihat dari persamaan (3.9) yang menunjukkan bahwa massa dan gaya eksitasi berbanding lurus. Sedangkan untuk variasi amplitudo bisa diteliti dari persamaan (3.11), dimana besar amplitudo dan besar teta yang dihasilkan berbanding lurus. Teta tersebut akan digunakan kembali pada persamaan (3.9) untuk menghasilkan gaya eksitasi. Terakhir adalah variasi jumlah *piezoelectric* vertikal, yang dimana semakin besar konstanta kekakuan ekuivalen dari beam vertikal, semakin kecil defleksi yang akan dialami *piezoelectric* vertikal. Meski pada persamaan (2.1) defleksi *piezoelectric* berbanding lurus dengan voltase bangkitan, karena jumlahnya semakin banyak maka voltase RMS total yang dihasilkan lebih besar.

Voltase maksimal bisa dihasilkan dengan menggunakan massa 15 kg, amplitudo 1.5 m, dan jumlah *piezoelectric* vertikal 12. Voltase maksimal yang diukur dalam penelitian ini adalah voltase RMS. Voltase RMS sendiri merupakan voltase yang terukur

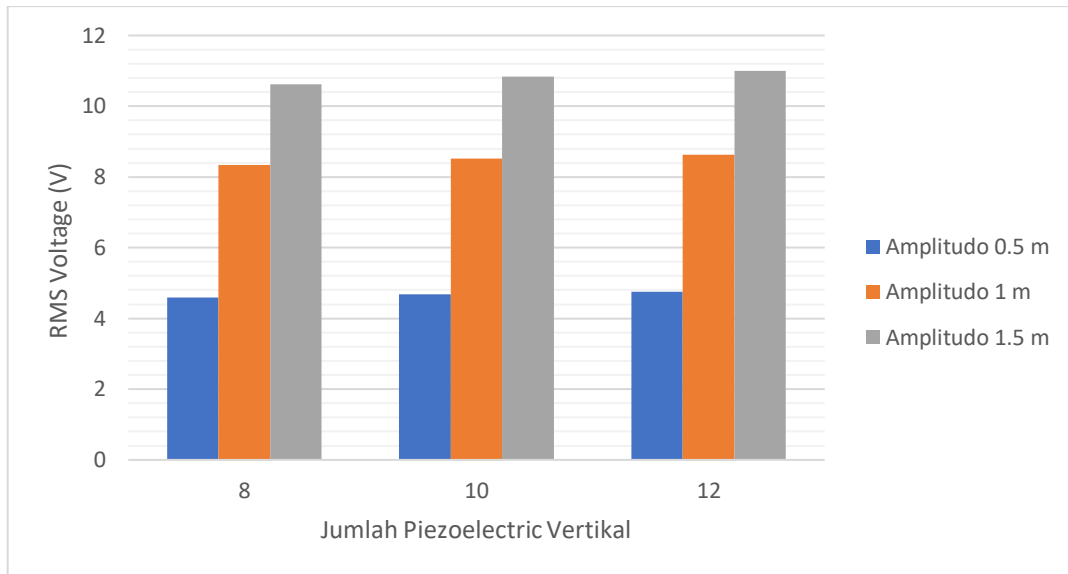
pada alat ukur seperti voltmeter. Voltase RMS ini sendiri merupakan penjumlahan secara seri dari semua *piezoelectric* pada pembangkit. Nilai voltase RMS maksimal yang bisa dihasilkan pada sistem ini adalah 14.721 V. Selain dari hasil voltase RMS maksimal, bisa dilihat dari Tabel 4.23

Tabel 4.23 Tabel Hasil RMS Voltage

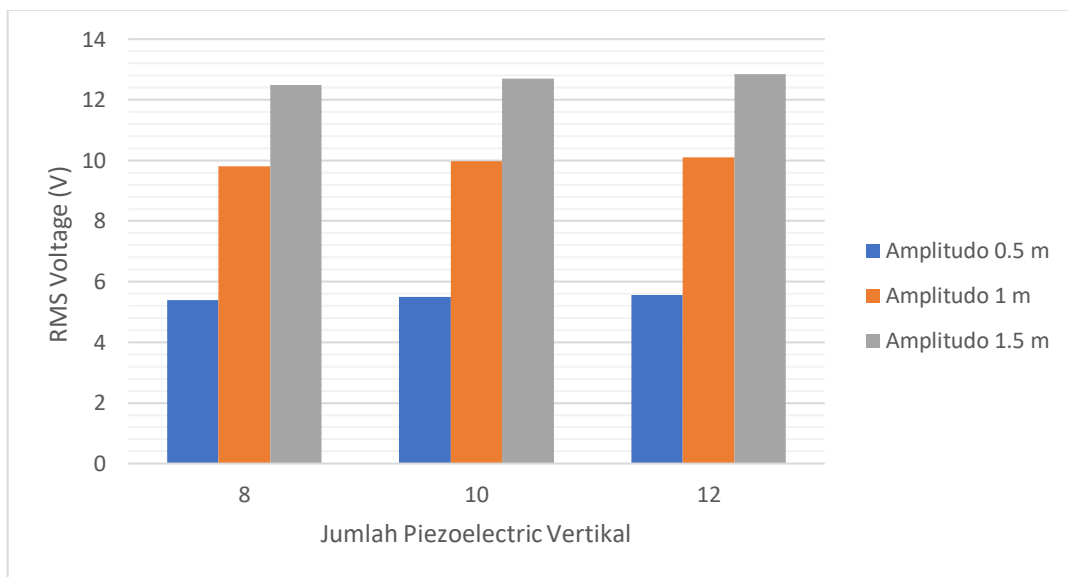
No	Variasi			VRMS (V)
	Massa (Kg)	Amplitudo (m)	Jumlah Piezoelektrik	Total
1	5	0.5	8	4.590
2			10	4.682
3			12	4.746
4		1	8	8.343
5			10	8.512
6			12	8.635
7		1.5	8	10.626
8			10	10.840
9			12	10.992
10	10	0.5	8	5.393
11			10	5.486
12			12	5.552
13		1	8	9.805
14			10	9.973
15			12	10.091
16		1.5	8	12.491
17			10	12.706
18			12	12.856
19	15	0.5	8	6.197
20			10	6.289
21			12	6.355
22		1	8	11.267
23			10	11.436
24			12	11.554
25		1.5	8	14.355
26			10	14.571
27			12	14.721

Untuk mempermudah melihat *trendline* dan pengaruh dari variabel secara keseluruhan, bisa dilihat di Gambar 4.21, Gambar 4.22, dan Gambar 4.23. Gambar tersebut sudah mewakili semua data yang diambil pada penelitian ini. Penemuan yang didapat dengan menggunakan sampel dari Tabel 4.10 sesuai dengan penemuan dari data keseluruhan dari Gambar 4.21, Gambar 4.22, dan Gambar 4.23. Hal tersebut menunjukkan bahwa penemuan dari sampel konsisten terhadap semua data penelitian. Bisa dilihat bahwa

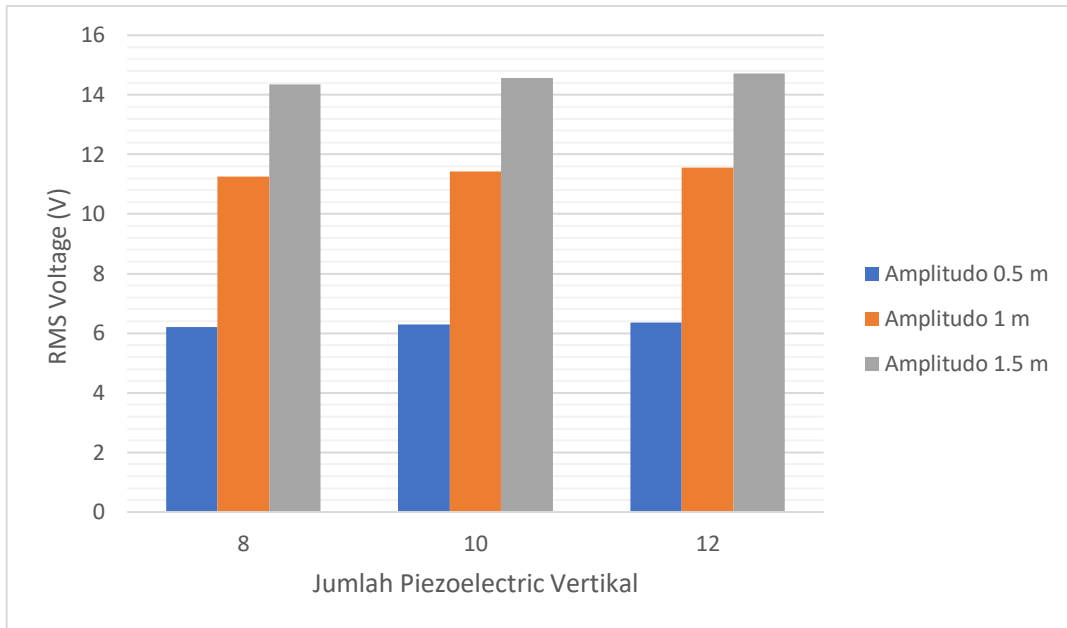
pada data keseluruhan pengaruh amplitudo gelombang dan massa *base* berbanding lurus dengan voltase yang dihasilkan. Sedangkan jumlah *piezoelectric* vertikal berbanding lurus namun tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan seperti variabel massa *base* dan amplitude gelombang.



Gambar 4.21 Grafik Pengaruh Variabel Amplitudo dan Jumlah Piezoelectric pada Massa 5 Kg



Gambar 4.22 Grafik Pengaruh Variabel Amplitudo dan Jumlah Piezoelectric pada Massa 10 Kg



Gambar 4.23 Grafik Pengaruh Variabel Amplitudo dan Jumlah Piezoelectric pada Massa 15 Kg

Selain dari voltase, pada penelitian ini juga mengambil arus listrik yang dihasilkan untuk menentukan daya yang dihasilkan. Keseluruhan data tersebut dapat dilihat pada Lampiran 8. Alasan pada penelitian ini tidak meneliti lebih lanjut kepada daya adalah karena voltase merupakan hasil utama yang diberikan oleh *piezoelectric* saat diberikan gaya. Pada tujuan juga ingin menentukan pengaruh variabel terhadap voltase yang dihasilkan karena nilainya akan lebih menarik untuk diteliti dibandingkan dengan daya. Untuk daya yang dikeluarkan dapat dikonfigurasi pada sirkuit listrik yang nanti akan di rancang pada pembangkit dengan menggunakan resistor dan berbagai ukuran kabel.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Telah dibuat suatu model dinamis yang merepresentasikan persamaan gerak pembangkit listrik tenaga gelombang laut yang diberi eksitasi dari gelombang laut. Untuk model dinamis, permodelan dilakukan di *software* MATLAB Simulink R2021b. Hasil yang diambil dari model tersebut adalah defleksi dan voltase.
2. Didapatkan pengaruh massa berbanding lurus terhadap voltase yang dihasilkan. Massa beban dalam mekanisme berpengaruh secara langsung kepada sistem karena massa tersebut merupakan sumber eksitasi dari sistem. Dengan variasi massa 5 kg, 10 kg, dan 15 kg, amplitudo konstan 0.5 m, dan jumlah *piezoelectric* vertikal 8 buah didapatkan voltase 4.59 V, 5.393 V, dan 6.197 V.
3. Didapatkan pengaruh amplitudo gelombang laut berbanding lurus terhadap voltase yang dihasilkan. Amplitudo dari gelombang tersebut akan berpengaruh ke sudut yang terbentuk pada pembangkit. Semakin besar sudut yang terbentuk maka eksitasi dari massa juga akan semakin besar. Dengan variasi amplitudo 0.5 m, 1 m, dan 1.5 m, massa konstan 15 kg, dan jumlah *piezoelectric* vertikal 8 buah didapatkan voltase 6.197 V, 11.267 V, dan 14.355 V.
4. Didapatkan pengaruh jumlah *piezoelectric* vertikal berbanding lurus terhadap voltase yang dihasilkan. Dengan jumlah *piezoelectric* vertikal, sumber voltase pembangkit akan semakin banyak walau konstanta kekakuan yang tinggi dan defleksi kecil. Namun peningkatan voltase tidak signifikan. Dengan variasi jumlah *piezoelectric* vertikal 8, 10, dan 12, massa konstan 15 kg, dan amplitudo 0.5 m didapatkan voltase 6.197 V, 6.289 V, dan 6.355 V.

5.2 SARAN

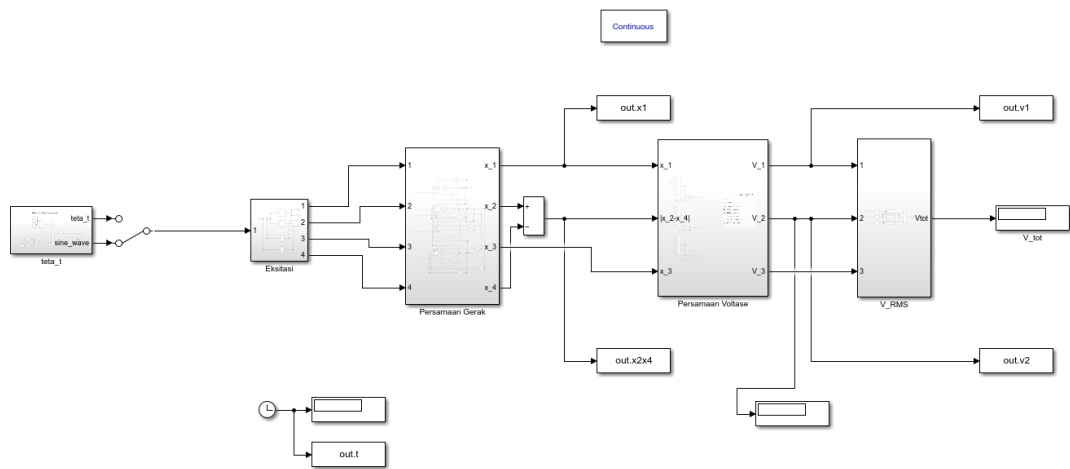
Adapun saran dari penelitian yang telah dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Perlunya dilakukan pengambilan data secara langsung atau eksperimen untuk memvalidasi data dari simulasi yang sudah dibuat.
2. Perlunya pendekatan simulasi dengan *software* yang dapat menunjukkan perilaku gelombang laut secara langsung terhadap pembangkit.
3. Perlunya dilakukan simulasi dengan menggunakan eksitasi *base motion* sebagai pembanding.

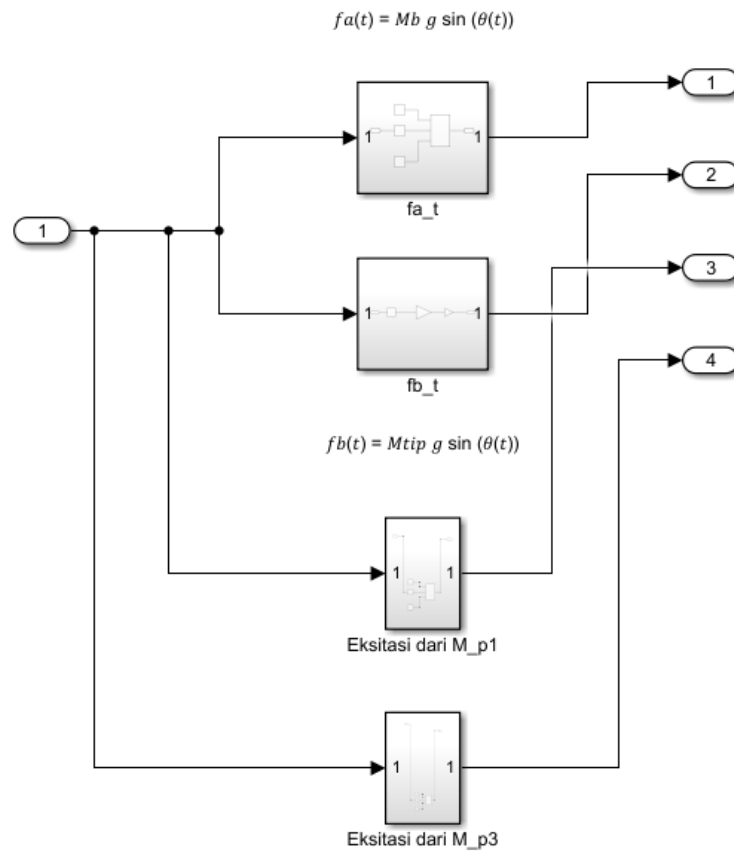
Daftar Pustaka

- CDSR. (2019, March 8). *CDSR - Potensi Pengembangan Teknologi Energi Gelombang Laut di Indonesia*. <http://cdsr.pse.ugm.ac.id/news1post.php?id=62>
- Chang, Y.-W. (2016, December 17). *Two degree of freedom system containing two springs and two masses*. <https://ernie55ernie.github.io/python/2016/12/17/two-degree-freedom-system-containing-two-springs-and-two-masses.html>
- Hehn, T., & Manoli, Y. (2015). *Springer Series in Advanced Microelectronics 38 CMOS Circuits for Piezoelectric Energy Harvesters Efficient Power Extraction, Interface Modeling and Loss Analysis*. <http://www.springer.com/series/4076>
- Hidayatullah, W., & Syukri, M. (2016). *PERANCANGAN PROTOTYPE PENGHASIL ENERGI LISTRIK BERBAHAN DASAR PIEZOELEKTRIK*. 1(3), 2016.
- Hwang, W. S., Ahn, J. H., Jeong, S. Y., Jung, H. J., Hong, S. K., Choi, J. Y., Cho, J. Y., Kim, J. H., & Sung, T. H. (2017). Design of piezoelectric ocean-wave energy harvester using sway movement. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 260, 191–197. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2017.04.026>
- Nabavi, S. F., Farshidianfar, A., & Afsharfard, A. (2018). Novel piezoelectric-based ocean wave energy harvesting from offshore buoys. *Applied Ocean Research*, 76, 174–183. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2018.05.005>
- Nabavi, S. F., Farshidianfar, A., Afsharfard, A., & Khodaparast, H. H. (2019). An ocean wave-based piezoelectric energy harvesting system using breaking wave force. *International Journal of Mechanical Sciences*, 151, 498–507. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.12.008>
- Pusat Meteorologi Maritim / BMKG. (n.d.). Retrieved January 6, 2022, from https://maritim.bmkg.go.id/prakiraan/satu_minggu_kedepan
- Samadhi, N. P. A. (2016, October 9). *Indonesia dan Krisis Energi Akut | WRI Indonesia*. <https://wri-indonesia.org/id/blog/indonesia-dan-krisis-energi-akut>
- Viet, N. v., Xie, X. D., Liew, K. M., Bantia, N., & Wang, Q. (2016). Energy harvesting from ocean waves by a floating energy harvester. *Energy*, 112, 1219–1226. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.019>
- Wyatt, L. R. (n.d.). *THE OCEAN WAVE SPECTRUM DIRECTIONAL*.
- Yusup, Muh. I. (2016). *PEMODELAN DAN ANALISA ENERGI LISTRIK YANG DIHASILKAN MEKANISME PEMBANGKIT LISTRIK GELOMBANG LAUT TIPE KAYUH DAYUNG- PIEZOELECTRIC*.

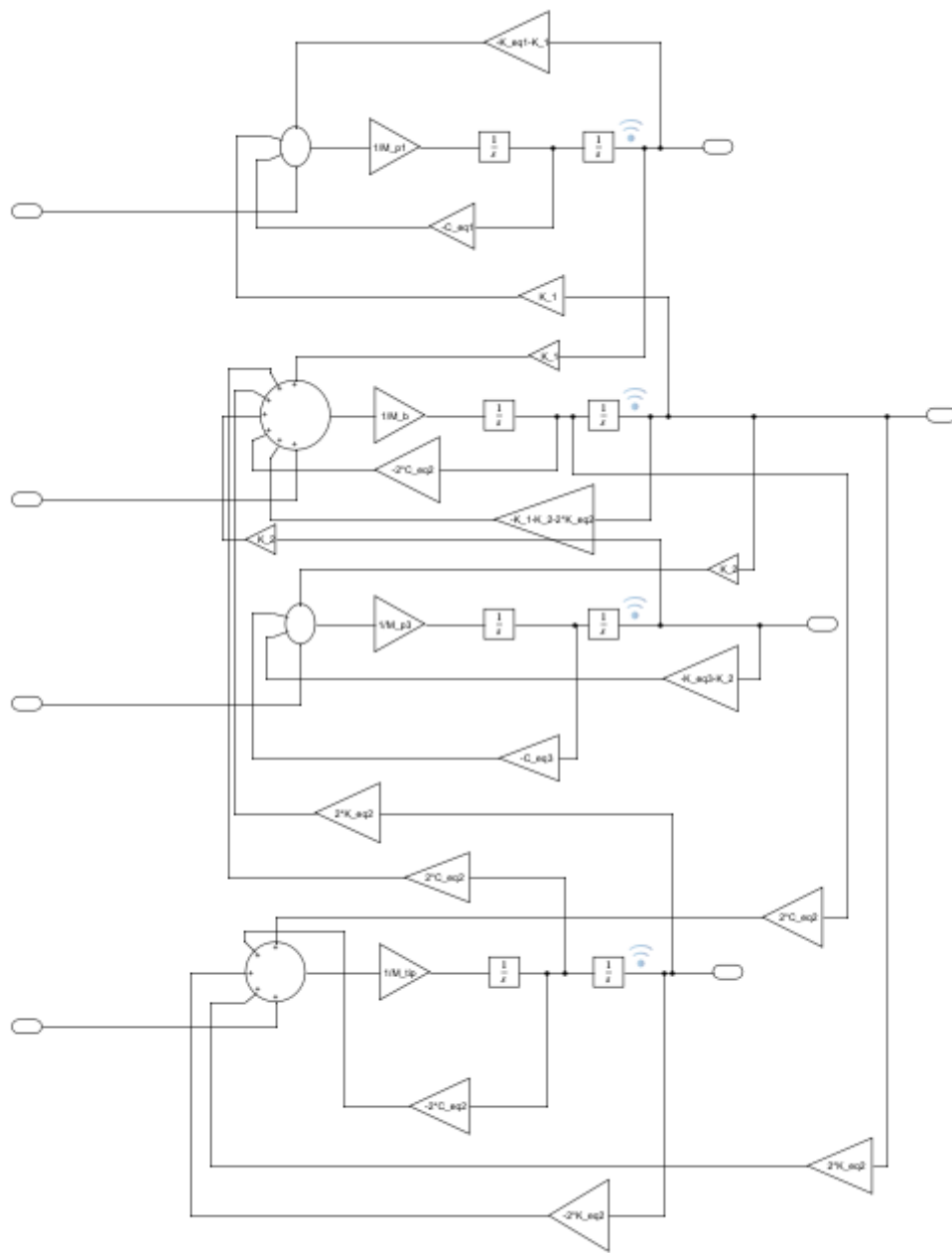
LAMPIRAN



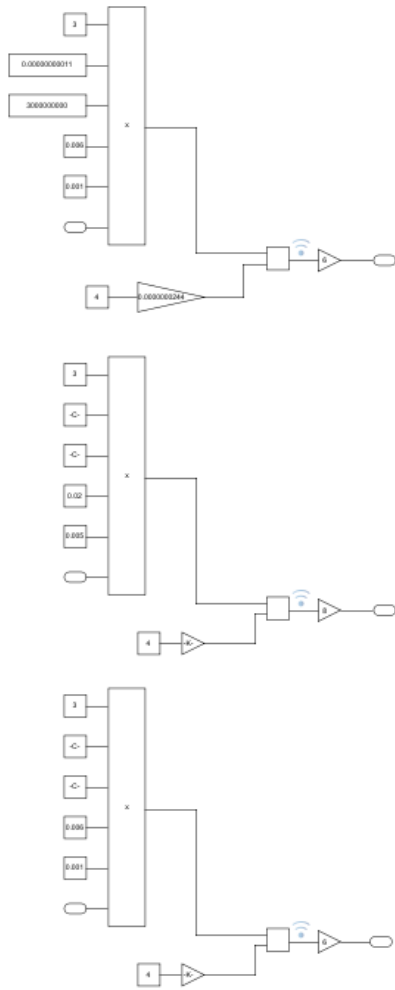
Lampiran 1 Keseluruhan Model dalam Simulink



Lampiran 2 Subsystem Eksitasi



Lampiran 3 *Subsystem* Persamaan Gerak

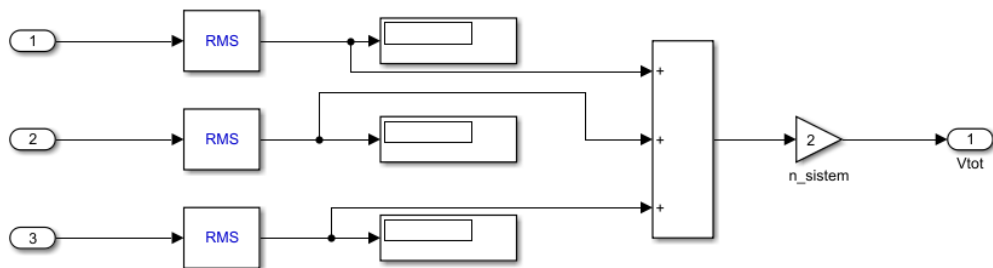


$$V_p = \frac{3d_{31}E_p w_p t}{4C} X_p$$

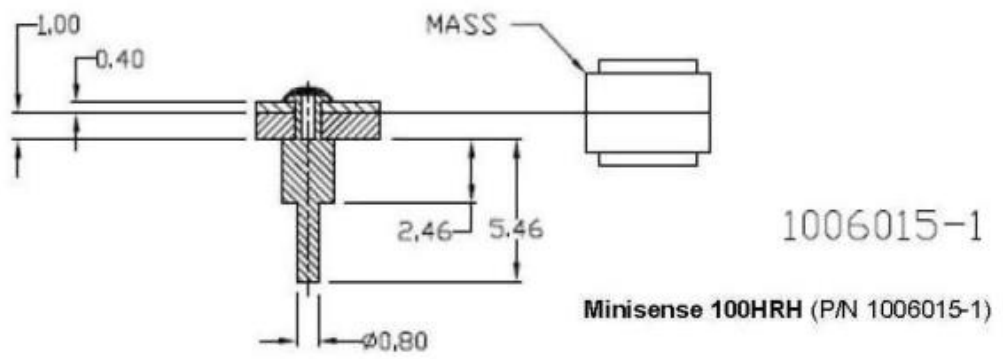
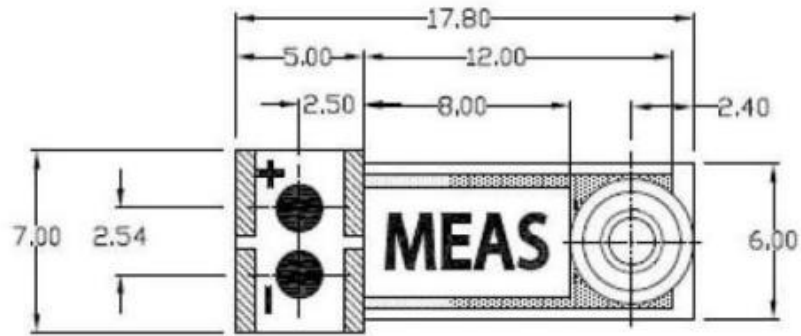
Dimana:

- V_p = Voltase piezoelectric
- d_{31} = Konstanta voltase
- E_p = Modulus elastisitas
- w_p = Lebar piezoelectric
- t = Tebal piezoelectric
- C = Piezoelectric capacitance
- X_p = Defleksi piezoelectric

Lampiran 4 *Subsystem* Persamaan Voltase



Lampiran 5 *Subsystem* VRMS



Lampiran 6 Dimensi *Minisense 100 Piezoelectric*

No	Variasi		VRMS		Defleksi				
	Massa (Kg)	Amplitudo (m)	Jumlah Piezoelektrik	VRMS Total	Minisense kiri	Vertikal	Minisense kanan	Minisense	X2-X4
1	5	Amplitudo 0.5 m	8	4.590	0.6968	3.196	0.6968	0.001329	1.04E-06
2			10	4.682	0.6968	3.28875	0.6968	0.001329	8.56E-07
3			12	4.746	0.6968	3.3525	0.6968	0.001329	7.27E-07
4	5	Amplitudo 1 m	8	8.343	1.267	5.809	1.267	0.002338	1.83E-06
5			10	8.512	1.267	5.9775	1.267	0.002338	1.50E-06
6			12	8.635	1.267	6.1005	1.267	0.002338	1.28E-06
7	5	Amplitudo 1.5 m	8	10.626	1.613	7.4	1.613	0.002783	2.17E-06
8			10	10.840	1.613	7.61375	1.613	0.002783	1.79E-06
9			12	10.992	1.613	7.7655	1.613	0.002783	1.52E-06
10	10	0.5	8	5.393	1.098	3.197	1.098	0.002111	1.05E-06
11			10	5.486	1.098	3.29	1.098	0.002111	8.65E-07
12			12	5.552	1.098	3.3555	1.098	0.002111	7.34E-07
13	10	1	8	9.805	1.996	5.813	1.996	0.003716	1.85E-06
14			10	9.973	1.996	5.98125	1.996	0.003716	1.52E-06
15			12	10.091	1.996	6.099	1.996	0.003716	1.29E-06
16	15	1.5	8	12.491	2.543	7.405	2.543	0.004434	2.21E-06
17			10	12.706	2.543	7.62	2.543	0.004434	1.81E-06
18			12	12.856	2.543	7.77	2.543	0.004434	1.54E-06
19	15	0.5	8	6.197	1.499	3.199	1.499	0.0029	1.06E-06
20			10	6.289	1.499	3.29125	1.499	0.0029	8.69E-07
21			12	6.355	1.499	3.357	1.499	0.0029	7.38E-07
22	15	1	8	11.267	2.726	5.815	2.726	0.005113	1.87E-06
23			10	11.436	2.726	5.98375	2.726	0.005113	1.53E-06
24			12	11.554	2.726	6.102	2.726	0.005113	1.31E-06
25	15	1.5	8	14.355	3.473	7.409	3.473	0.006118	2.22E-06
26			10	14.571	3.473	7.625	3.473	0.006118	1.83E-06
27			12	14.721	3.473	7.7745	3.473	0.006118	1.55E-06

Lampiran 7 Hasil dari Simulasi MATLAB

No	Massa (Kg)	Variasi Amplitudo (m)	x_dot Piezoelectric (m)		x_double_dot Piezoelectric (m)		VRMS (V)		IRMS (A)		PRMS (W)			
			Horizontal	Vertikal	Horizontal	Vertikal	Minsense kiri	Vertikal	Minsense kiri	Vertikal	Minsense kiri	Vertikal		
1	8	Amplitudo 0.5 m	0.001037	-8.17E-07	0.01905	0.008289	0.6968	3.196	0.6968	-3.02E-07	0.0001244	8.66819E-05	-9.64872E-07	8.66819E-05
2	10		0.001037	-6.47E-07	0.01905	0.04002	0.6968	3.28875	0.6968	-2.40E-07	0.0001244	8.66819E-05	7.87988E-07	8.66819E-05
3	12		0.001037	-4.95E-07	0.01905	0.03085	0.6968	3.3525	0.6968	-1.84E-07	0.0001244	8.66819E-05	-6.18201E-07	8.66819E-05
4	8	Amplitudo 1 m	0.001926	-1.52E-06	0.03812	0.017	1.267	5.809	1.267	-5.59E-07	0.0002311	0.000292804	-3.24781E-06	0.000292804
5	10		0.001926	-1.19E-06	0.03812	0.07924	1.267	5.9775	1.267	-4.42E-07	0.0002311	0.000292804	-2.63966E-06	0.000292804
6	12		0.001926	-9.03E-07	0.03812	0.06246	1.267	6.1005	1.267	-3.56E-07	0.0002311	0.000292804	-2.05038E-06	0.000292804
7	8	Amplitudo 1.5 m	0.002612	-2.06E-06	0.05723	0.02267	1.613	7.4	1.613	-7.59E-07	0.0003134	0.000505514	-5.6129E-06	0.000505514
8	10		0.002612	-1.60E-06	0.05723	0.1217	1.613	7.61375	1.613	-5.92E-07	0.0003134	0.000505514	-4.30506E-06	0.000505514
9	12		0.002612	-1.14E-06	0.05723	0.08393	1.613	7.7655	1.613	-4.24E-07	0.0003134	0.000505514	-3.29102E-06	0.000505514
10	8	0.5	0.001739	-8.57E-07	0.02951	0.0183	1.098	3.197	1.098	-3.16E-07	0.0002086	0.000229043	-1.00961E-06	0.000229043
11	10		0.001739	-7.12E-07	0.02951	0.008363	1.098	3.29	1.098	-2.62E-07	0.0002086	0.000229043	-8.62638E-07	0.000229043
12	12		0.001739	-5.86E-07	0.02951	0.01998	1.098	3.3555	1.098	-2.16E-07	0.0002086	0.000229043	-7.25459E-07	0.000229043
13	8	1	0.00326	-1.60E-06	0.05906	0.03512	1.996	5.813	1.996	-5.89E-07	0.0003912	0.000780835	-3.42386E-06	0.000780835
14	10		0.00326	-1.33E-06	0.05906	0.01574	1.996	5.98125	1.996	-4.90E-07	0.0003912	0.000780835	-2.92902E-06	0.000780835
15	12		0.00326	-1.09E-06	0.05906	0.04569	1.996	6.099	1.996	-4.03E-07	0.0003912	0.000780835	-2.45607E-06	0.000780835
16	8	1.5	0.004488	-2.20E-06	0.08873	0.05869	2.543	7.405	2.543	-8.05E-07	0.0005385	0.001369406	-5.96028E-06	0.001369406
17	10		0.004488	-1.83E-06	0.08873	0.02341	2.543	7.62	2.543	-6.71E-07	0.0005385	0.001369406	-5.11454E-06	0.001369406
18	12		0.004488	-1.50E-06	0.08873	0.0567	2.543	7.77	2.543	-5.49E-07	0.0005385	0.001369406	-4.26495E-06	0.001369406
19	8	0.5	0.002457	-8.78E-07	0.03845	0.02017	1.499	3.199	1.499	-3.23E-07	0.0002948	0.000441905	-1.03238E-06	0.000441905
20	10		0.002457	-7.16E-07	0.03845	0.02634	1.499	3.29125	1.499	-2.64E-07	0.0002948	0.000441905	-8.67244E-07	0.000441905
21	12		0.002457	-5.96E-07	0.03845	0.0339	1.499	3.357	1.499	-2.20E-07	0.0002948	0.000441905	-7.36862E-07	0.000441905
22	8	1	0.00463	-1.65E-06	0.07698	0.0407	2.726	5.815	2.726	-6.06E-07	0.0005555	0.001514293	-3.52098E-06	0.001514293
23	10		0.00463	-1.35E-06	0.07698	0.05269	2.726	5.98375	2.726	-4.95E-07	0.0005555	0.001514293	-2.96315E-06	0.001514293
24	12		0.00463	-1.12E-06	0.07698	0.06143	2.726	6.102	2.726	-4.13E-07	0.0005555	0.001514293	-2.5183E-06	0.001514293
25	8	1.5	0.006422	-2.27E-06	0.1157	0.06767	3.473	7.409	3.473	-8.31E-07	0.0007706	0.002676294	-6.15836E-06	0.002676294
26	10		0.006422	-1.85E-06	0.1157	0.09161	3.473	7.625	3.473	-6.78E-07	0.0007706	0.002676294	-5.000516594	0.002676294
27	12		0.006422	-1.54E-06	0.1157	0.08893	3.473	7.745	3.473	-5.65E-07	0.0007706	0.002676294	-4.39415E-06	0.002676294

Lampiran 8 Hasil Daya dari MATLAB

BIODATA PENULIS



Natanael Dimas Arihta dilahirkan di Jakarta, 8 Februari 2000. Penulis memulai pendidikan di sekolah dasar Dian Harapan sampai SMP dan melanjutkan pendidikannya di SMAK 5 Penabur Jakarta. Kemudian penulis menjalani jenjang pendidikan tinggi di S1 Teknik Mesin FTIRS Institut Teknologi Sepuluh Nopember pada bidang studi desain.

Pada masa perkuliahannya penulis aktif dalam kegiatan akademik maupun non-akademik. Penulis tergabung ke dalam salah satu organisasi mahasiswa mesin bernama Mesin ITS Autosport yang bergerak di bidang olahraga otomotif. Selain itu, penulis juga aktif dalam berbagai kepanitiaan seperti Red Euphoria Month FTI dan ITS Basketball League. Penulis juga pernah mengikuti beberapa Unit Kegiatan Mahasiswa antara lain, ITS Flag Football dan ITS Softball. Meskipun penulis mengikuti berbagai kegiatan non-akademik, penulis tidak meninggalkan kewajibannya sebagai mahasiswa yaitu untuk menimba ilmu sebanyak-banyaknya.

Dalam bidang akademis, penulis sangat tertarik dengan otomotif dan energi baru tatau energi bersih terbarukan. Namun, untuk penelitian tugas akhir penulis memilih untuk mendalami teknologi energi baru terbarukan mengingat potensinya yang sangat besar di Indonesia. Maka dari itu, penulis melakukan penelitian tugas akhir dengan judul “Pemodelan dan Analisa Voltase yang Dihasilkan Mekanisme Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut Tipe *Mass-Spring-Piezoelectric* Bertingkat.” Penulis sangat terbuka untuk diskusi seputar topik tugas akhir tersebut. Komunikasi dengan penulis mengenai laporan tugas akhir ini dapat melalui email: natanael.dimas.a@gmail.com