



TUGAS AKHIR - TM184835

**PEMODELAN DAN ANALISA VOLTASE YANG DIHASILKAN
MEKANISME PEMBANGKIT ENERGI LISTRIK TENAGA
GELOMBANG LAUT TIPE MASSA PEGAS PIEZOELEKTRIK
SEJAJAR**

**Daffa Ramli
NRP 02111840000184**

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

Program Studi Sarjana

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



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TM184835

**PEMODELAN DAN ANALISA VOLTASE YANG DIHASILKAN
MEKANISME PEMBANGKIT ENERGI LISTRIK TENAGA
GELOMBANG LAUT TIPE MASSA PEGAS PIEZOELEKTRIK
SEJAJAR**

Daffa Ramli
NRP 02111840000184

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

Program Studi Sarjana

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



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

Final Project - TM184835

**MODELING AND ANALYSIS OF VOLTAGE PRODUCED BY THE
MECHANISM OF ELECTRICITY GENERATING MARINE WAVE
POWER TYPE OF PIEZOELECTRIC PARALLEL MASS SPRING**

Daffa Ramli
NRP 02111840000184

Lecture Advisor
Aida Annisa Amin Daman S.T., M.T.
NIP 198907052015042005

Undergraduate Study Program

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 ENERGI LISTRIK TENAGA GELOMBANG LAUT TIPE MASSA PEGAS PIEZOELEKTRIK SEJAJAR

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik pada

Program Studi S-1 Teknik Mesin

Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

Daffa Ramli

NRP 02111840000184

Disetujui oleh Tim Penguji Proposal Tugas Akhir:

1. Aida Annisa Amin Daman, S.T., M.T.  Pembimbing
2. Dr. Wiwiek Hendrowati, S.T., M.T.  Penguji
3. Prof. Dr. Harus Laksana Guntur, 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 THE MECHANISM OF ELECTRICITY GENERATING MARINE WAVE POWER TYPE OF PIEZOELECTRIC PARALLEL MASS SPRING

FINAL PROJECT

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

By:

Daffa Ramli

NRP. 02111840000184

Approved by Final Project Examiner Team:

1. Aida Annisa Amin Daman, S.T., M.T.  Advisor
2. Dr. Wiwiek Hendrowati, S.T., M.P.  Examiner
3. Prof. Dr. Harus Laksana Gunur, S.T., M.T.  Examiner
4. Prof. Ir. I Nyoman Sutantra, M.Sc., Ph.D.  Examiner

SURABAYA

July 2022

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa/NRP : Daffa Ramli / 02111840000184

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 ENERGI LISTRIK TENAGA GELOMBANG LAUT TIPE MASSA PEGAS PIEZOELEKTRIK SEJAJAR”** 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, 12 Juli 2022

Mengetahui

Dosen Pembimbing

Mahasiswa,



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

NIP. 198907052015042005



(Daffa Ramli)

NRP. 02111840000184

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

Name of student/NRP : Daffa Ramli / 02111840000184
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 THE MECHANISM OF ELECTRICITY GENERATING MARINE WAVE POWER TYPE OF PIEZOELECTRIC PARALLEL MASS SPRING”** 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



(Daffa Ramli)

NRP. 02111840000184

PEMODELAN DAN ANALISA VOLTASE YANG DIHASILKAN MEKANISME PEMBANGKIT ENERGI LISTRIK TENAGA GELOMBANG LAUT TIPE MASSA PEGAS PIEZOELEKTRIK SEJAJAR

Nama Mahasiswa / NRP : Daffa Ramli / 02111840000184
Jurusan : Teknik Mesin, FTIRS ITS
Dosen Pembimbing : Aida Annisa Amin Daman S.T., M.T.

Abstrak

Berkembangnya perekonomian Indonesia berakibat pada konsumsi energi yang semakin meningkat juga. Peningkatan konsumsi energi tidak diikuti dengan persediaan yang memadai. Maka dilakukan penelitian terkait jenis energi baru dan terbarukan atau jenis energi bersih (*clean energy*) agar dapat memenuhi kebutuhan energi yang semakin banyak tersebut. Melihat Indonesia adalah negara dengan 62% wilayahnya adalah perairan maka hal tersebut dapat dimanfaatkan sebagai jenis energi terbaru diantaranya adalah energi gelombang laut. Oleh karena itu penelitian ini bertujuan untuk merancang mekanisme *energy harvesting* dengan menggunakan piezoelektrik dan menganalisa pengaruh amplitudo gelombang terhadap energi yang dihasilkan.

Pada penelitian ini dilakukan pemodelan pembangkit energi tenaga gelombang laut dengan mekanisme massa-pegas-piezoelektrik dan dilakukan proses analisa dengan simulasi *software MATLAB Simulink*. Pada proses simulasi digunakan parameter variasi berupa amplitudo gelombang laut sebesar 0.5 m, 1 m, 1.5 m, berat massa utama sebesar 5 kg, 10 kg, 15 kg, dan jumlah piezoelektrik sejumlah 8, 10, 12, 15.

Dari penelitian ini diperoleh hasil berupa grafik defleksi piezoelektrik terhadap variasi, dan grafik voltase bangkitan terhadap variasi. Berdasarkan grafik dan data hasil simulasi, diketahui setiap variasi yang digunakan memberikan pengaruh pada voltase bangkitan. Penggunaan massa beban yang semakin berat meningkatkan defleksi dan voltase bangkitan piezoelektrik. Peningkatan amplitudo gelombang meningkatkan defleksi piezoelektrik dan voltase bangkitan piezoelektrik. Dan penambahan jumlah piezoelektrik menghasilkan defleksi piezoelektrik yang semakin kecil namun voltase bangkitan piezoelektrik meningkat. Defleksi maksimal yang dihasilkan mekanisme model sistem adalah sebesar 6.2 mm dengan variasi massa 15 kg, amplitudo 1.5 m dan jumlah piezoelektrik 12 buah. Sedangkan voltase bangkitan maksimal yang dihasilkan mekanisme model sistem adalah sebesar 6.41-volt dengan variasi massa 15 kg, amplitudo 1.5 m dan jumlah piezoelektrik 15 buah.

Kata Kunci : Energi alternatif, mekanisme massa pegas piezoelektrik, piezoelektrik, energi terbarukan.

MODELING AND ANALYSIS OF VOLTAGE PRODUCED BY THE MECHANISM OF ELECTRICITY GENERATING MARINE WAVE POWER TYPE OF PIEZOELECTRIC PARALLEL MASS SPRING

Student's Name / NRP : Daffa Ramli / 02111840000184
Department : Mechanical Engineering FTIRS ITS
Advisory Lecturer : Aida Annisa Amin Daman S.T., M.T.

Abstract

The development of the Indonesian economy has resulted in increasing energy consumption as well. The increase in energy consumption is not followed by an adequate supply. So, research is carried out related to new and renewable energy types or clean energy types to meet the increasing energy needs. Seeing that Indonesia is a country with 62% of its territory is water, it can be used as a type of renewable energy including ocean wave energy. Therefore, this study aims to design an energy harvesting mechanism using piezoelectric and analyze the effect of wave amplitude on the energy produced.

In this research, modeling of ocean wave power plant with mass-spring-piezoelectric mechanism is carried out and the analysis process is carried out with simulation software MATLAB Simulink. In the simulation process, variation parameters are used in the form of ocean wave amplitudes of 0.5 m, 1 m, 1.5 m, the main mass weight of 5 kg, 10 kg, 15 kg, and the number of piezoelectrics of 8, 10, 12, 15.

From this research, the results obtained are piezoelectric deflection graphs for variations, and voltage generation graphs for variations. Based on the graphs and simulation data, it is known that each variation used has an effect on the generation voltage. The use of heavier load mass increases the deflection and the piezoelectric generation voltage. Increasing the wave amplitude increases the piezoelectric deflection and the piezoelectric generation voltage. And the addition of the number of piezoelectrics produces a smaller piezoelectric deflection but the piezoelectric generation voltage increases. The maximum deflection produced by the system model mechanism is 6.2 mm with a mass variation of 15 kg, an amplitude of 1.5 m and a total of 12 piezoelectrics. Meanwhile, the maximum generation voltage produced by the system model mechanism is 6.41-volt with a mass variation of 15 kg, an amplitude of 1.5 m and the number of piezoelectrics of 15 units.

Keywords: Alternative energy, piezoelectric spring mass mechanism, piezoelectric, renewable energy.

KATA PENGANTAR

Segala puji hanya untuk Allah SWT yang telah memberikan nikmat atas keberhasilan dalam penyusunan laporan penelitian tugas akhir ini, dan shalawat serta salam semoga terlimpah kepada rasulullah Muhammad SAW. Pada kesempatan kali ini izinkan penulis untuk mengucapkan rasa syukur dan terima kasih kepada pihak-pihak yang membantu kelancaran dalam proses penelitian, antara lain:

1. Ayah tercinta Teddy Ramli, dan Ibu tercinta Yessi Asdeliza, dan saudara-saudara terkasih Zadyra Tasha, Khalista Salshabilla, Ganiyyah Naura Fadhillah, dan adik kesayangan abang Karim Azzafran Ramli, terima kasih atas segala cinta dan kasih sayang kalian.
2. Ibu Aida Annisa Amin Daman S.T., M.T. selaku dosen pembimbing. Terima kasih banyak atas saran, kesempatan diskusi, ilmu-ilmu yang sangat membantu jalannya penelitian, dan kesabaran dalam membimbing serta membina.
3. (Dosen penguji) selaku dosen penguji, terima kasih atas saran-sarannya dalam penyusunan tugas akhir ini.
4. Ibu Vivien Suphandani, S.T., M. Eng.Sc. PhD. selaku dosen wali. Terima kasih atas saran, dan perhatian Ibu selama ini.
5. Seluruh dosen yang memberikan ilmu yang tak ternilai harganya dan staff departemen yang memberikan banyak kemudahan selama ini.
6. Rekan-rekan satu bimbingan dalam tugas akhir ini, Dimas, Abrar, Bagas, Dasa, dan rahmat. Terimakasih telah menjadi bagian dari kesuksesan selama perjalanan tugas akhir ini.
7. Novi Anita, terimakasih atas segala dukungan, energi positif, serta kebaikan yang selalu diberikan.
8. Keluarga bultang araya, ngab alec, dims, masdi, masmod, sunux, aler, lincux, priti, dan nopi terimakasih sudah menjadi teman dekat dalam dunia perkuliahan.
9. Teman-teman penghuni lab vibrasi, aler, dims, ngab alec, bob, falin, najya, hani, cia. Terimakasih sudah menjadi teman penghilang sepi di lab vibrasi.
10. Teman-teman himpunan mahasiswa mesin periode 2021-2022, terima kasih atas kesempatan serta pengalaman yang berharga selama menjabat.

Terimakasih saya ucapkan lagi atas segala bantuan, bimbingan dan fasilitas yang diberikan sehingga tugas akhir ini dapat terselesaikan. Penulis menyadari penelitian ini tidaklah sempurna dan penulis berharap agar penelitian ini dapat dikembangkan pada masa mendatang sehingga dapat bermanfaat bagi masyarakat luas.

Surabaya, Juli 2022

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....	IV
PERNYATAAN ORISINALITAS.....	VI
ABSTRAK	II
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 LATAR BELAKANG	1
1.2 RUMUSAN MASALAH.....	1
1.3 BATASAN MASALAH	1
1.4 TUJUAN.....	2
1.5 MANFAAT PENELITIAN	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	3
2.1 DASAR TEORI.....	3
2.1.1 Piezoelektrik.....	3
2.1.2 Degree of Freedom (DoF).....	4
2.1.3 Gelombang Laut.....	5
2.2 PENELITIAN TERKAIT OCEAN WAVE ENERGY HARVESTER DENGAN MENGGUNAKAN PIEZOELEKTRIK.....	5
BAB III METODOLOGI.....	21
3.1 TAHAPAN PENELITIAN	21
3.1.1 Diagram Alir	21
3.1.2 PENJELASAN DIAGRAM ALIR	22
3.2 RANCANGAN PEMODELAN	23
3.2.1 Perancangan Mekanisme	23
3.2.2 Persamaan Gerak Model.....	25
3.2.3 Persamaan Gaya Eksitasi Gelombang	28
3.2.4 PERSAMAAN VOLTASE BANGKITAN PIEZOELEKTRIK	29
3.3 Frekuensi Natural Model Sistem.....	29
3.4 Penentuan Parameter dan Variabel	30
3.5 TAHAPAN SIMULASI	32
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN	34
4.1 ANALISA KEKUATAN STATIS	34
4.1.1 Engineering Data.....	34
4.1.2 Geometry	34
4.1.3 Meshing	34
4.1.4 Setup Fixed Position dan Force.....	35
4.1.5 Solution.....	36
4.1.6 Uji Konvergensi	36
4.2 SIMULASI DAN ANALISA MODEL SISTEM.....	37
4.2.1 Respon Defleksi Piezoelektrik	37
4.2.2 Respon Voltase Bangkitan Piezoelektrik.....	40
4.3 HASIL KESELURUHAN SIMULASI	43
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	50
5.1 KESIMPULAN.....	50
5.2 SARAN.....	50

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Perubahan distribusi muatan piezoelektrik (Wira Hidayatullah, 2016).....	3
Gambar 2. 2 Cantilever piezoelectric (Thorsten Hehn, 2015)	3
Gambar 2. 3 Model Dinamis cantilever piezoelectric (Thorsten, 2015).....	4
Gambar 2. 4 Rangkaian listrik ekivalen piezoelektrik (Thorsten, 2015)	4
Gambar 2. 5 Mekanisme dua derajat kebebasan (Yusup, 2016)	5
Gambar 2. 6 Model Floating Energy Harvester (Viet et al. 2016)	6
Gambar 2. 7 Model sistem floating energy harvester (Viet et al. 2016).....	7
Gambar 2. 8 Grafik perpindahan relatif massa 1 dan massa 2 (Viet et al. 2016).....	7
Gambar 2. 9 Grafik pengaruh amplitudo terhadap energi listrik yang dihasilkan (Viet et al. 2016)	8
Gambar 2. 10 Grafik pengaruh periode gelombang laut terhadap energi listrik yang dihasilkan (Viet et al. 2016)	8
Gambar 2. 11 Grafik pengaruh massa 2 dan model dengan dan/atau tidak menggunakan tuas (Viet et al. 2016)	9
Gambar 2. 12 Grafik pengaruh tinggi tuas terhadap energi listrik yang dihasilkan (Viet et al. 2016)	9
Gambar 2. 13 Model sistem beraking water force energy harvester (Nabavi et al. 2019)	10
Gambar 2. 14 Tegangan output Mtip 1 ©; Mtip 2 (D) dari sistem pembangkit piezoelektrik (Nabavi et al. 2019).....	11
Gambar 2. 15 Konfigurasi model sistem 1 (Nabavi et al. 2019).....	11
Gambar 2. 16 Grafik perbandingan tegangan antar konfigurasi model sistem (Nabavi et al. 2019)	12
Gambar 2. 17 Model sistem energy harvester (Hwang et al. 2017)	12
Gambar 2. 18 Susunan perangkat piezoelektrik (Hwang et al. 2017)	13
Gambar 2. 19 Power output dari masing-masing variasi pergeseran (Hwang et al. 2017).....	14
Gambar 2. 20 Model sistem piezoelektrik dengan massa ujung (Nabavi, Farshidianfar, and Afsharfard 2018).....	14
Gambar 2. 21 Susunan perangkat untuk mencari respon frekuensi (A); energy harvester (B) (Nabavi, Farshidianfar, and Afsharfard 2018)	15
Gambar 2. 22 Pengaruh perubahan kekakuan pada frekuensi pertama dan kedua dan perfection rate (P.R) pada stasiun Boston (44,013) (A); dan stasiun San Francisco (46,012) (B); respon frekuensi sistem yang berlokasi di Boston (C) dan San Francisco (D) (Nabavi, Farshidianfar, and Afsharfard 2018)	15
Gambar 2. 23 Model sistem kayuh dayung – piezoelektrik (Yusup, 2016).....	17
Gambar 2. 24 Pengaruh frekuensi terhadap Voltase yang dihasilkan (Yusup, 2016)	18
Gambar 2. 25 Pengaruh tinggi gelombang yang dihasilkan terhadap Voltase (Yusup, 2016)	18
Gambar 2. 26 Pengaruh Frekuensi yang dihasilkan terhadap kuat arus yang dihasilkan (Yusup, 2016)	19
Gambar 2. 27 Pengaruh tinggi gelombang yang dihasilkan terhadap kuat arus yang dihasilkan (Yusup, 2016).....	19
Gambar 3. 1 Perancangan model pembangkit energi	24
Gambar 3. 2 Detail rangkaian sistem piezoelektrik	24
Gambar 3. 3 Model sistem pembangkit energi.....	24
Gambar 3. 4 Mekanisme Kerja Model Sistem	25
Gambar 3. 5 Free body diagram keseluruhan model sistem	26
Gambar 3. 6 Free body diagram model sistem.....	26

Gambar 3. 7 Free body diagram massa utama	26
Gambar 3. 8 Free body diagram piezoelektrik 1	27
Gambar 3. 9 Free body diagram piezoelektrik 2	27
Gambar 3. 10 Diagram Momen Piezoelektrik.....	28
Gambar 3. 11 Flowchart Simulasi	33
Gambar 4. 1 Geometri Piezoelektrik	34
Gambar 4. 2 Mesh.....	35
Gambar 4. 3 (a) Mesh Quality (b) Parameter Kualitas Orthogonal Quality	35
Gambar 4. 4 Posisi Fixed Support	35
Gambar 4. 5 Posisi Gaya yang Bekerja.....	36
Gambar 4. 6 Hasil Analisa Static Structural.....	36
Gambar 4. 7 Besar Defleksi Piezoelektrik	36
Gambar 4. 8 Grafik Defleksi Piezoelektrik Terhadap Variasi Massa.....	38
Gambar 4. 9 Grafik Defleksi Piezoelektrik Terhadap Variasi Amplitudo	39
Gambar 4. 10 Grafik Defleksi Piezoelektrik Terhadap Variasi Jumlah Piezoelektrik	40
Gambar 4. 11 Grafik Voltase Terhadap Variasi Massa	41
Gambar 4. 12 Grafik Voltase Terhadap Variasi Amplitudo	42
Gambar 4. 13 Grafik Voltase Terhadap Variasi Jumlah Piezoelektrik.....	43
Gambar 4. 14 Perbandingan Voltase Bangkitan Variasi Massa (a) Massa 5 Kg, (b) Massa 10 Kg, (c) Massa 15 Kg	46

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Data Gelombang Laut dan Dimensi Floating Energy Harvester (Viet et al. 2016) ..	6
Tabel 2. 2 Properti Perangkat Energy Harvesting (Nabavi et al. 2019).....	10
Tabel 2. 3 Frekuensi Awal dan Frekuensi Natural yang telah terukur (Nabavi et al. 2019)....	11
Tabel 2. 4 Properti perangkat piezoelektrik (Hwang et al. 2017).....	13
Tabel 2. 5 Tabel energi rata-rata terhadap variasi	17
Tabel 3. 1 Nilai Frekuensi Natural Model Sistem	30
Tabel 3. 2 Tabel parameter utama model sistem	30
Tabel 3. 3 Tabel parameter piezoelektrik	30
Tabel 3. 4 Tabel parameter gelombang	31
Tabel 3. 5 Tabel parameter ukuran perangkat massa pegas	31
Tabel 3. 6 Tabel variasi penelitian	32
Tabel 4. 1 Tabel Properti Mekanis Piezoelektrik	34
Tabel 4. 2 Hasil Uji Konvergensi Mesh.....	36
Tabel 4. 3 Sampel variasi yang digunakan pada pembahasan.....	37
Tabel 4. 4 Data Statistik Defleksi Piezoelektrik Terhadap Massa.....	38
Tabel 4. 5 Data Statistik Defleksi Piezoelektrik Terhadap Amplitudo.....	39
Tabel 4. 6 Data Statistik Defleksi Piezoelektrik Terhadap Jumlah Piezoelektrik	40
Tabel 4. 7 Data Statistik Respon Voltase Terhadap Massa.....	41
Tabel 4. 8 Data Statistik Respon Voltase Terhadap Amplitudo	42
Tabel 4. 9 Data Statistik Respon Voltase Terhadap Jumlah Piezoelektrik	43
Tabel 4. 10 Tabel data voltase RMS dan defleksi piezoelektrik yang dihasilkan dengan variasi massa, amplitudo, dan jumlah piezoelektrik	44
Tabel 4. 11 Tabel Daya Bangkitan Piezoelektrik	47
Tabel 4. 12 Respon Kecepatan dan Percepatan Massa Utama	48

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dengan semakin maju dan berkembangnya perekonomian di Indonesia konsumsi energi ikut meningkat bersamaan dengan hal tersebut. Kebutuhan energi yang berasal dari minyak bumi, listrik, serta sumber daya alam lainnya ikut meningkat. Meningkatnya kebutuhan energi sayangnya tidak diikuti dengan persediaan yang memadai dan berakibat kepada terjadinya krisis energi di negara ini. Berbagai hal dilakukan untuk mengatasi kurangnya kebutuhan energi dan salah satunya adalah dengan penggunaan *clean energy* atau energi bersih yang tidak memiliki dampak negatif terhadap lingkungan.

Dengan meningkatnya kebutuhan energi menjadikan *clean energy* sebagai solusi untuk memenuhi kebutuhan energi. Dan energi gelombang laut adalah potensi yang ditemukan serta dapat dikembangkan di Indonesia. Penelitian dilakukan dengan melihat beberapa daerah di Indonesia yang memiliki tingkat gelombang yang tinggi pada daerah pantai barat Pulau Sumatera bagian selatan dan pantai selatan Pulau Jawa bagian barat (“Direktorat Jenderal EBTKE - Kementerian ESDM” n.d.) Penelitian telah dilakukan oleh Puslitbang Geologi Kelautan (PPPGL) dengan bekerjasama dengan Program Studi Oceanografi ITB pada tahun 2005 terkait pengukuran arus laut di Selat Lombok dan Selat Alas. Kemudian penelitian dilanjutkan sejak tahun 2006 hingga 2010 pada berbagai tempat di Indonesia. Dari penelitian tersebut pemerintah dengan dibawahi Ditjen Energi Terbarukan, Puslitbangtek Ketenagalistrikan dan Energi Terbarukan merencanakan pembuatan prototipe turbin pembangkit listrik tenaga gelombang laut.

Di Indonesia penelitian yang dilakukan terkait energi gelombang laut adalah dengan memanfaatkan gelombang laut untuk memutar turbin air sehingga diperoleh energi listrik. Sejauh ini belum dilakukan penelitian terkait pemanfaatan gelombang laut sebagai sumber energi dengan metode perangkat terapung untuk mendapatkan energi listrik. Maka dari itu diperlukan penelitian terkait pemanfaatan gelombang laut sebagai pembangkit listrik menggunakan perangkat terapung.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dari dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang dan mensimulasikan model *floating energy harvester*.
2. Bagaimana pengaruh massa beban terhadap voltase listrik yang dihasilkan.
3. Bagaimana pengaruh amplitudo gelombang air laut terhadap voltase listrik yang dihasilkan.
4. Bagaimana pengaruh jumlah piezoelektrik rangkaian pada voltase listrik yang dihasilkan.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Gesekan dan redaman pada sistem sangat kecil sehingga dapat diabaikan.
2. Eksitasi gelombang konstan.
3. Pengaruh gaya vertikal diabaikan.
4. Pengaruh gaya gelombang laut diabaikan.

1.4 Tujuan

Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memperoleh rancangan dan mensimulasikan model *floating energy harvester*.
2. Mengetahui massa beban dan pengaruhnya pada voltase listrik yang dihasilkan.
3. Mengetahui pengaruh amplitudo gelombang air laut terhadap voltase listrik yang dihasilkan.
4. Mengetahui jumlah piezoelektrik yang digunakan dan pengaruhnya pada voltase listrik yang dihasilkan.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut:

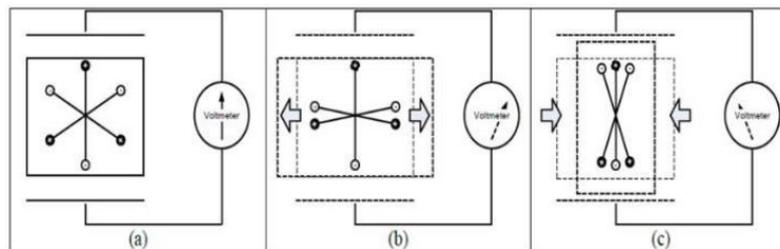
1. Memberi solusi terhadap krisis energi di Indonesia.
2. Mengoptimalkan sumber daya alam gelombang laut sebagai sumber energi terbarukan.
3. Mengembangkan penelitian terkait pembangkit energi dengan menggunakan piezoelektrik.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Dasar Teori

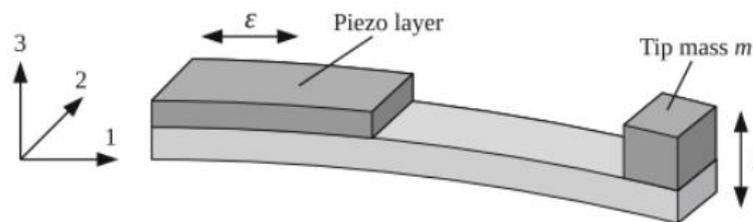
2.1.1 Piezoelektrik

Jacques dan Currie menemukan fenomena piezoelectric pada tahun 1880, dimana piezoelectric merupakan katagori material yang mempunyai sifat unik. Penerapan stress pada kristal piezoelectric akan membangkitkan listrik karena terjadi polarisasi muatannya. Piezoelektrisitas didefinisikan sebagai suatu kemampuan yang dimiliki sebagian kristal maupun bahan-bahan tertentu lainnya yang dapat menghasilkan suatu arus listrik jika mendapatkan perlakuan tekanan. Efek piezoelectric adalah efek terjadinya perubahan energy mekanik menjadi nergi listrik. Oleh karena itu bahan piezoelectric sangat dimungkinkan sekali untuk dijadikan konverter antara energi listrik dan gerakan mekanis. Bahan piezoelectric merupakan kristal yang mampu menghasilkan tegangan listrik saat mengalami tekanan, tarikan atau getaran (direct piezoelectric). Kondisi sebaliknya juga 15 berlaku, yaitu bila diberi tegangan listrik, kristal piezoelectric bergetar (inverse piezoelectric). Kristal piezoelectric menghasilkan tegangan listrik ketika terjadi perubahan polaritas muatan listrik akibat perubahan dimensinya yang digambarkan pada gambar 2.1. (Wira Hidayatullah, 2016)



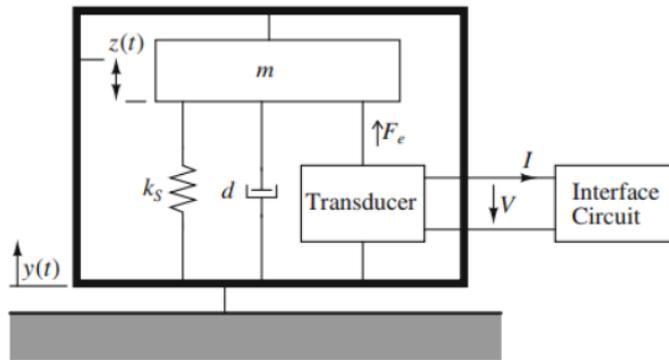
Gambar 2. 1 Perubahan distribusi muatan piezoelektrik (Wira Hidayatullah, 2016)

Terdapat berbagai jenis piezoelektrik yang ada pada saat ini, salah satu jenis yang banyak digunakan adalah piezoelektrik jenis *cantilever piezoelectric* seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.2.

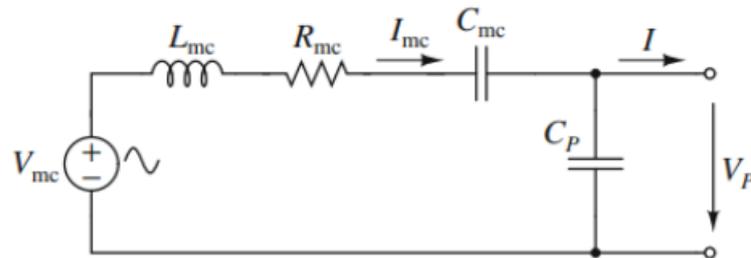


Gambar 2. 2 Cantilever piezoelectric (Thorsten Hehn, 2015)

Model dinamis dari perangkat piezoelektrik jenis *cantilever* dimodelkan dalam susunan massa pegas dilengkapi dengan pemanen energi seperti pada gambar 2.3 dan pada gambar 2.4 dapat dilihat rangkaian listrik dari mekanisme piezoelektrik jenis *cantilever*.



Gambar 2. 3 Model Dinamis *cantilever piezoelectric* (Thorsten, 2015)



Gambar 2. 4 Rangkaian listrik ekivalen piezoelektrik (Thorsten, 2015)

Berikut ini adalah persamaan yang dihasilkan dari rangkaian listrik piezoelektrik pada gambar 2.4

$$V_{mc} = L_{mc} \frac{dI_{mc}}{dt} + R_{mc} I_{mc} + \frac{1}{C_{mc}} \int I_{mc} dt + V_p \quad 2.1$$

$$F_e = n\Gamma V_p \quad 2.2$$

Dimana:

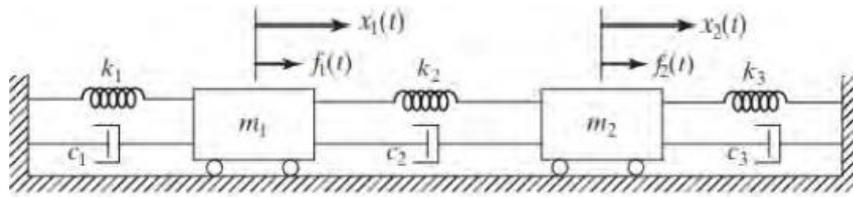
$$L_{mc} = \frac{M}{\Gamma^2} ; R_{mc} = \frac{d_p}{\Gamma^2} ; V_{mc} = \frac{\Gamma^2}{k_p} ; \Gamma = \sqrt{k_{31} k_p C_p} \quad 2.3$$

Dengan:

- d_p : Konstanta redaman piezoelektrik
- k_p : Konstanta pegas piezoelektrik
- C_p : Kapasitansi piezoelektrik
- M : Massa Piezoelektrik
- F_e : Gaya elektromagnetik
- n : Jumlah Piezoelektrik
- Γ : *Electromechanical factor piezoelectric*

2.1.2 Degree of Freedom (DoF)

Derajat kebebasan (*Degree of Freedom*) adalah kebebasan pergerakan sistem yang terdapat pada mekanisme. Yang paling sederhana adalah sistem yang memiliki satu derajat kebebasan, artinya sistem tersebut hanya memiliki satu arah pergerakan massa. Semakin bebas pergerakan dari mekanisme, maka jumlah derajat kebebasannya pun semakin banyak. Berikutnya adalah sistem dua derajat kebebasan, jika suatu mekanisme memiliki dua derajat kebebasan maka benda tersebut memiliki dua arah pergerakan yang berbeda. Pergerakan satu dimisalkan x_1 pergerakan lainnya dimisalkan x_2 . Besarnya pergerakan x_1 dan x_2 saling mempengaruhi.



Gambar 2. 5 Mekanisme dua derajat kebebasan (Yusup, 2016)

2.1.3 Gelombang Laut

Gelombang adalah peristiwa naik turunnya permukaan air laut dari ukuran kecil sampai yang paling panjang. Penyebab utama terjadinya gelombang adalah angin. Gelombang dipengaruhi oleh kecepatan angin, lamanya angin bertiup, dan jarak tanpa rintangan saat angin bertiup. Menurut Garisson (1993) terdapat 4 bentuk besaran yang berkaitan dengan gelombang, yaitu:

- Amplitudo gelombang (A) adalah jarak antara puncak gelombang dengan permukaan rata-rata air.
- Frekuensi gelombang (f) adalah sejumlah besar gelombang yang melintasi suatu titik dalam suatu waktu tertentu.
- Kecepatan gelombang c adalah jarak yang ditempuh gelombang dalam satu satuan waktu tertentu.
- Kemiringan gelombang (H/λ) adalah perbandingan antara tinggi gelombang dengan panjang gelombang.

Susunan gelombang dilautan baik bentuk maupun ukuran macamnya sangat bervariasi dan kompleks. Untuk itu para ahli mendesain sebuah model gelombang buatan untuk memudahkan dalam mempelajarinya, walaupun bentuk gelombang ini kemungkinan tidak akan dijumpai sama seperti gelombang laut yang sebenarnya. Bagian-bagian gelombang-gelombang ideal adalah:

- Crest* adalah titik tertinggi atau puncak sebuah gelombang.
- Trough* adalah titik terendah atau lembah sebuah gelombang.
- Wave height* adalah jarak vertikal antara crest dan trough atau disebut juga tinggi gelombang.
- Wavelength* adalah jarak berturut-turut antara dua buah crest atau dua buah trough, disebut juga panjang gelombang.
- Wave period* adalah waktu yang dibutuhkan crest untuk kembali pada titik semula secara berturut-turut, disebut juga periode gelombang.
- Wave steepness* adalah perbandingan antara panjang gelombang dengan tinggi gelombang, disebut juga kemiringan gelombang.

(“Introductory-Dynamical-Oceanography-by-Pond-Amp-Pickard-Pampp,” n.d.)

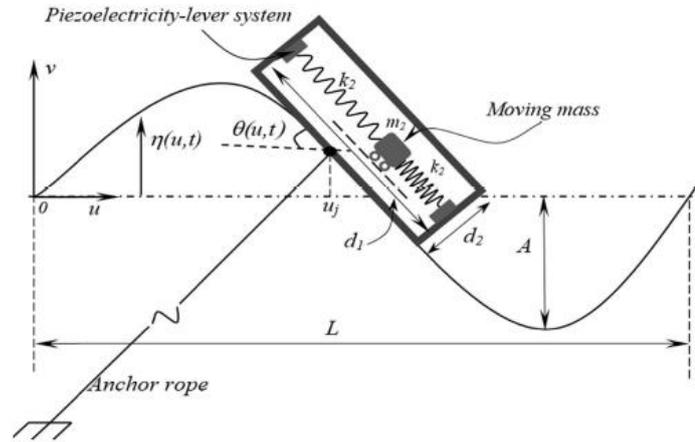
2.2 Penelitian Terkait *Ocean Wave Energy Harvester* dengan Menggunakan Piezoelektrik

Penelitian ini dilakukan oleh N.V Viet, dkk pada tahun 2016. Pada jurnal ini membahas metode *energy harvesting* dengan piezoelektrik dengan memanfaatkan energi gelombang laut. Perangkat yang digunakan terbuat dari model sistem massa dan pegas yang digunakan untuk mengirimkan getaran mekanis kepada tuas piezoelektrik yang dapat menghasilkan listrik dari efek piezoelektrik.

Alat yang digunakan pada penelitian ini berupa perangkat terapung yang didalamnya terdapat sistem massa dan pegas seperti yang terlihat pada gambar 2.5. Model perangkat

terapung ini terinspirasi dari gerak alami belut ketika berenang. Alat ini terbuat dari bahan *flexible polyvinylidene fluoride (PVDV)*.

Berikut pada gambar 2.6 merupakan desain dan model yang digunakan dalam penelitian:



Gambar 2. 6 Model Floating Energy Harvester (Viet et al. 2016)

Tabel 2. 1 Data Gelombang Laut dan Dimensi Floating Energy Harvester (Viet et al. 2016)

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

Dari gambar 2.6 dapat diketahui bahwa sistem perangkat terapung dikaitkan dengan jangkar tambang pada dasar laut untuk menahan struktur tetap berada pada tempatnya, dan ketika digerakan oleh ombak akan membentuk sudut sebesar θ . Pada bagian dalam perangkat terapung terdapat sistem massa dan pegas untuk mentransmisikan gerakan gelombang menjadi getaran mekanis. Kemudian terdapat dua tuas piezoelektrik yang digunakan untuk mentransmisikan dan mengamplifikasi getaran mekanis yang diperoleh menjadi energi listrik. Dari gambar dapat dilihat sumbu u menjelaskan arah perambatan gelombang, kemudian v menjelaskan arah vertikal gelombang dan besar $v = 0$. Dari gambar juga dapat diketahui pergeseran permukaan air laut yang merupakan fungsi posisi u , waktu t , yang dijelaskan dengan persamaan berikut:

$$\eta(u, t) = A \cdot \sin(q \cdot u - \omega \cdot t) \quad 2.4$$

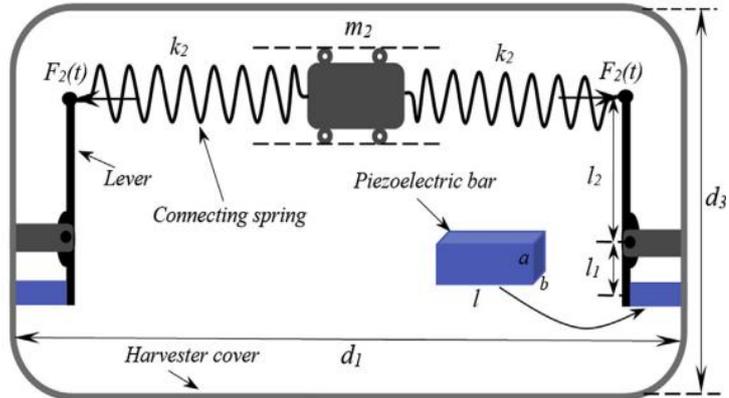
Dimana A adalah amplitudo gelombang; $q = \frac{2 \cdot \pi}{L}$ adalah wave number dan $\omega = \frac{2 \cdot \pi}{T}$ adalah frekuensi angular. T adalah periode gelombang, d_1, d_2, d_3 adalah panjang, tinggi, dan lebar dari *floating energy harvester*. Panjang dari *floating energy harvester* tidak lebih panjang dari panjang gelombang laut, sehingga $d_1 < L$.

Pergeseran angular dari *floating energy harvester*, $\theta(u, t)$ dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$\tan \theta = \frac{d\eta(u, t)}{du} = A \cdot q \cdot \cos(q \cdot u - \omega \cdot t) \quad 2.5$$

dimana untuk θ :

$$\theta(u, t) = \arctan(A \cdot q \cdot \cos(q \cdot u - \omega \cdot t)) \quad 2.6$$



Gambar 2. 7 Model sistem floating energy harvester (Viet et al. 2016)

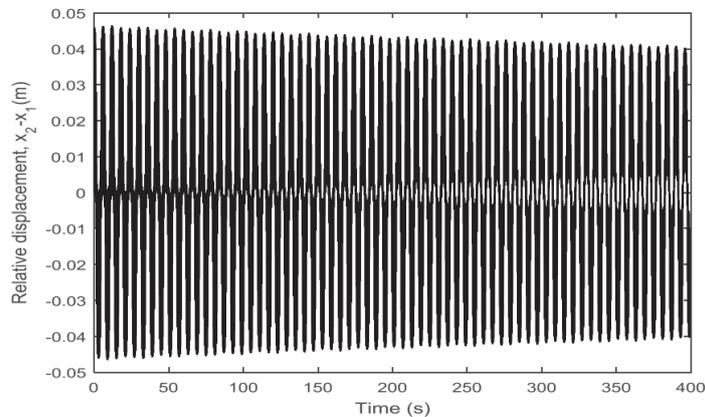
Setelah dilakukan iterasi berdasarkan properti mekanis yang diperoleh, didapatkan persamaan untuk menghitung besar energi listrik yang dihasilkan. Persamaan RMS sebagai berikut:

$$P_s^{rms} = 2 \cdot \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} P_s^2(t) \cdot dt} \quad 2.7$$

Ketika τ dipisahkan menjadi selang waktu m yang kecil, dapat dituliskan kembali menjadi persamaan RMS sebagai berikut:

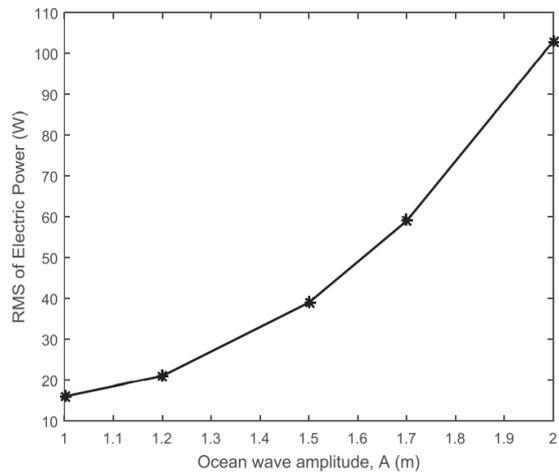
$$P_s^{rms} = 2 \cdot \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m P_s^2(t_{\odot})} \quad 2.8$$

Dari hasil perhitungan yang dilakukan, diperoleh data sebagai berikut:



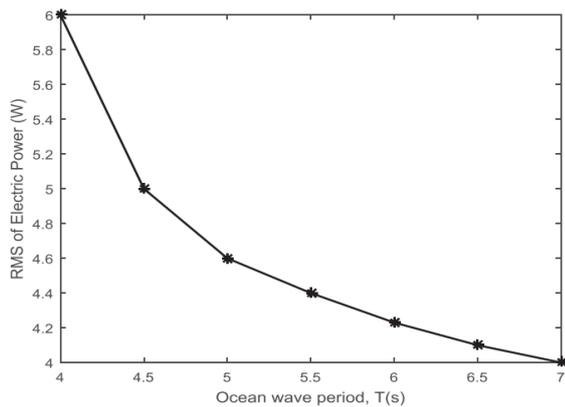
Gambar 2. 8 Grafik perpindahan relatif massa 1 dan massa 2 (Viet et al. 2016)

Gambar 2.8 menjelaskan perbandingan pergeseran relatif dari massa 1 dan massa 2 terhadap waktu. Massa 2 diatur sebesar 50 kg. Dapat dilihat bahwa periode osilasi relatif dari massa 1 dan massa 2 sama dengan periode gaya luar yaitu periode gelombang laut. Dari perhitungan terdapat penurunan terhadap pergeseran relatif menjadi konstan ketika nilai berada pada kisaran 0.025 m setelah 5000 detik.



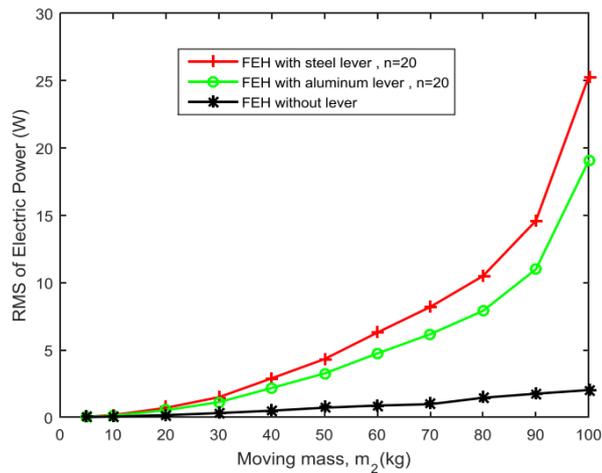
Gambar 2. 9 Grafik pengaruh amplitudo terhadap energi listrik yang dihasilkan (Viet et al. 2016)

Gambar 2.9 menunjukkan pengaruh dari amplitudo gelombang pada RMS terhadap energi listrik yang dihasilkan dengan massa 2 sebesar 100 kg. Dapat dilihat bahwa RMS meningkat secara non-linear dengan meningkatnya amplitudo gelombang. Ketika amplitudo meningkat dari 1m menuju 2m, besar RMS meningkat dari 20W menjadi 103W.



Gambar 2. 10 Grafik pengaruh periode gelombang laut terhadap energi listrik yang dihasilkan (Viet et al. 2016)

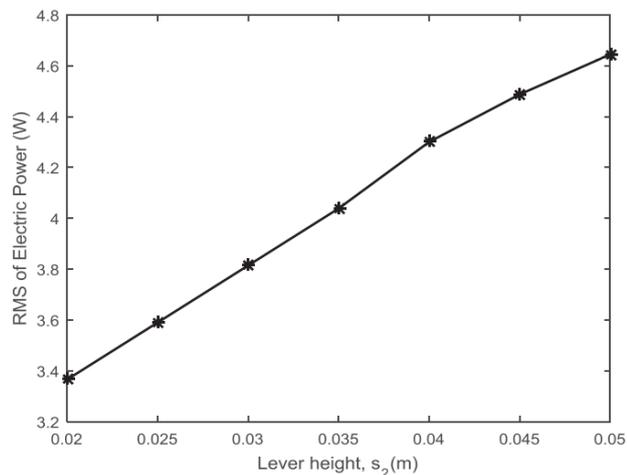
Gambar 2.10 menunjukkan pengaruh periode gelombang laut pada RMS terhadap energi listrik yang dihasilkan dengan massa 2 sebesar 50 kg. Dapat dilihat bahwa nilai RMS menurun secara non-linear dari 6 W menjadi 4 W seiring dengan meningkatnya periode gelombang dari 4 s menjadi 7 s.



Gambar 2. 11 Grafik pengaruh massa 2 dan model dengan dan/atau tidak menggunakan tuas (Viet et al. 2016)

Gambar 2.11 menjelaskan pengaruh massa 2 pada RMS terhadap energi listrik yang dihasilkan oleh *floating energy harvester*. Pada simulasi tersebut tuas yang digunakan terbuat dari baja dan aluminum dengan nilai rasio $n = 20$. Selain itu juga dilakukan simulasi dengan sistem tanpa tuas sebagai pembandingan. Hasil yang diperoleh adalah adanya peningkatan RMS dari 0.4 W menjadi 25.5 W dengan adanya peningkatan pada massa 2 dari 5 kg menjadi 100 kg untuk tuas baja. Peningkatan dari massa 2 tersebut berpengaruh pada peningkatan energi kinetik dan energi potensial pada sistem.

Energi listrik yang dihasilkan dari simulasi sistem tanpa tuas diperoleh hasil lebih rendah 11 kali dibandingkan dengan sistem bertuas baja dengan massa 2 yang sama sebesar 100 kg.

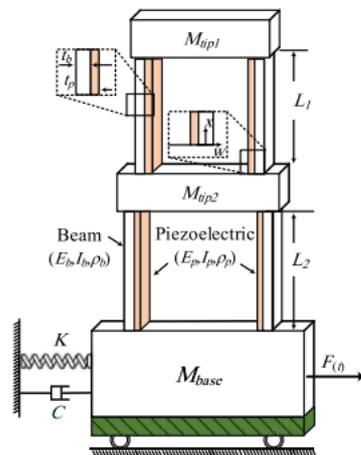


Gambar 2. 12 Grafik pengaruh tinggi tuas terhadap energi listrik yang dihasilkan (Viet et al. 2016)

Gambar 2.12 menunjukkan pengaruh tinggi tuas pada RMS terhadap energi listrik yang dihasilkan dengan massa 2 sebesar 50 kg. Berdasarkan simulasi diperoleh hasil bahwa RMS meningkat dari 3.3 W menjadi 4.56 W ketika tinggi tuas ditingkatkan dari 0.02 m menjadi 0.05 m. Hal ini terjadi karena adanya pengaruh dari nilai kekakuan k_l tuas. Peningkatan pada k_l tuas menyebabkan meningkatnya nilai redaman c_l tuas dan menyebabkan peningkatan secara linear dari RMS.

Penelitian selanjutnya adalah penelitian yang dilakukan oleh Nabavi dkk, pada tahun 2019. Pada jurnal ini membahas metode *energy harvesting* dengan memanfaatkan energi pecahan gelombang laut dan piezoelektrik. Penelitian dilakukan dengan metode data analisis serta eksperimen. Kedua metode tersebut digunakan untuk membandingkan hasil yang diperoleh. Model sistem yang digunakan pada alat ini berupa struktur vertikal pinggir laut yang terbuat dari balok piezoelektrik.

Amplitudo pecahan gelombang menjadi sumber energi dari model sistem *energy harvester* ini. Ketika gelombang laut menghantam struktur pinggir pantai akan dihasilkan tekanan yang sangat tinggi dengan durasi pendek. Model sistem yang dibuat ditujukan untuk gelombang dengan frekuensi gelombang yang rendah. Persamaan yang digunakan pada percobaan ini adalah *Euler Bernoulli Beam Theory* yang berhubungan dengan metode Lagrange untuk menentukan persamaan diferensial gerak sistem. Model sistem tersebut seperti yang terlihat pada gambar 2.13.



Gambar 2. 13 Model sistem beraking water force energy harvester (Nabavi et al. 2019)

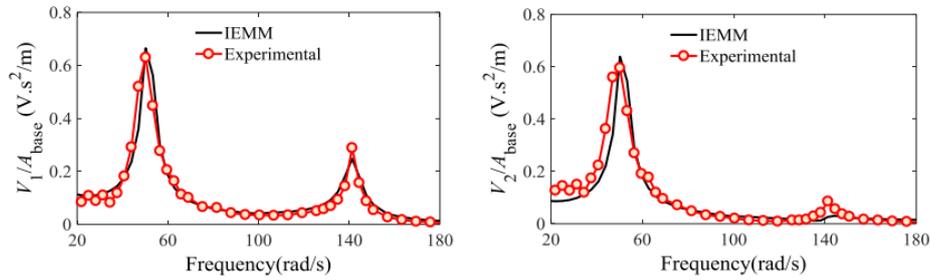
Model sistem tersebut menggunakan tiang balok piezoelektrik dengan massa pada bagian ujungnya dan terdapat sistem massa pegas pada dasar strukturnya. Properti yang digunakan dalam model sistem ini dapat dilihat pada tabel 2.2

Tabel 2. 2 Properti Perangkat *Energy Harvesting* (Nabavi et al. 2019)

Parameters	Values	Parameters	Values	Parameters	Value
$L_{B1} (mm)$	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	$\rho_B (kg/m^3)$	8500	$t_p (mm)$	0.11
$L_{base} (mm)$	311.94	$\rho_p (kg/m^3)$	7500	$W_p (mm)$	36
$L_{tip1} (mm)$	38.85	$R (M\Omega)$	1	$W_B (mm)$	37

Dari data yang diperoleh kemudian dilakukan percobaan dan perhitungan analitik. Hasil yang diperoleh dibandingkan dengan tegangan yang dihasilkan serta frekuensi natural. Hasil

tegangan dapat dilihat pada gambar 2.14, sedangkan hasil perbandingan antara hasil eksperimen dan analitik dapat dilihat pada tabel 2.3.



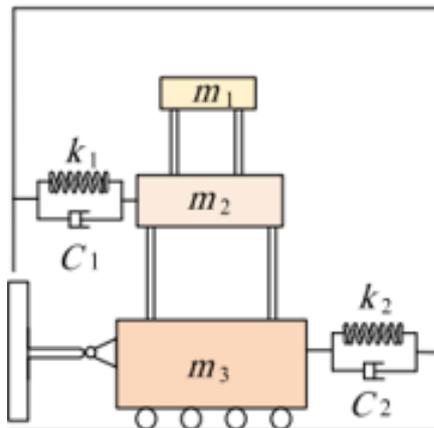
Gambar 2. 14 Tegangan output Mtip 1 ©; Mtip 2 (D) dari sistem pembangkit piezoelektrik (Nabavi et al. 2019)

Tabel 2. 3 Frekuensi Awal dan Frekuensi Natural yang telah terukur (Nabavi et al. 2019)

Parameter	$\omega_1(\text{rad/s})$	Error (%)	$\omega_2(\text{rad/s})$	Error (%)	σ_ϕ
Experimental	51.4719	-	141.5602	-	-
Analytical	53.0479	3.0619	144.2109	1.8725	0.0452
Updated Analytical (IEMM)	51.4888	0.0328	141.5793	0.0135	0.0005

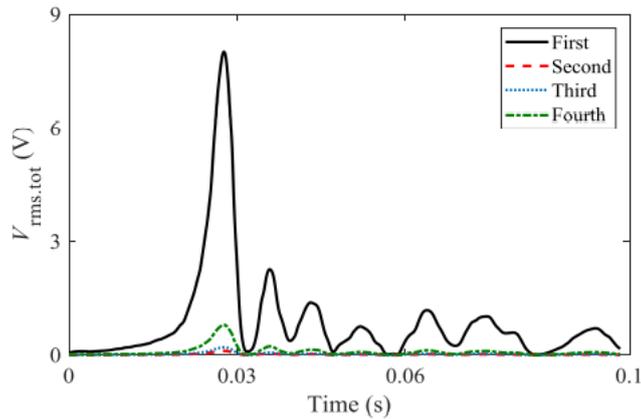
Berdasarkan data hasil eksperimen dan perhitungan analitik diperoleh data yang sesuai dengan error yang kecil.

Pada penelitian ini dilakukan percobaan untuk menentukan konfigurasi struktur optimal untuk memperoleh energi listrik yang lebih besar. Pada gambar 2.15 diketahui model sistem 1 menghasilkan energi listrik yang lebih besar dibandingkan dengan konfigurasi model sistem yang lainnya.



Gambar 2. 15 Konfigurasi model sistem 1 (Nabavi et al. 2019)

Setelah dilakukan percobaan serta dibandingkan hasilnya dari keempat konfigurasi tersebut diketahui bahwa konfigurasi 1 menghasilkan tegangan yang paling tinggi dibandingkan konfigurasi lainnya. Tegangan yang dihasilkan sebesar 6.054 V sebagaimana hasil keseluruhannya ditunjukkan pada gambar 2.16.

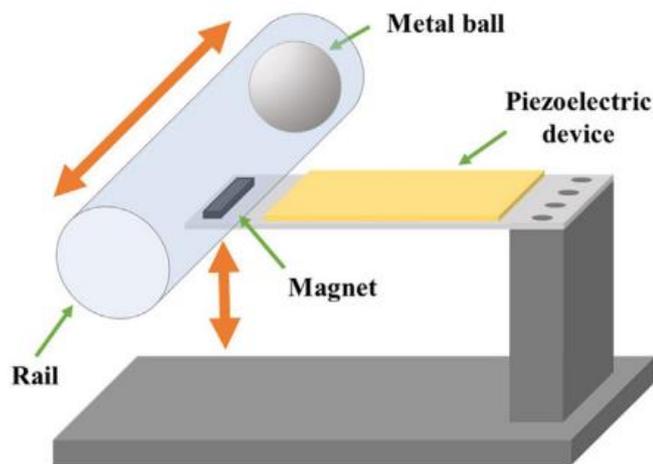


Gambar 2. 16 Grafik perbandingan tegangan antar konfigurasi model sistem (Nabavi et al. 2019)

Konfigurasi 1 menghasilkan tegangan lebih tinggi dibandingkan konfigurasi lainnya karena pada pegas k_1 memberikan hambatan yang mengakibatkan meningkatnya laju regangan pada balok kolom pertama dan menghasilkan tegangan listrik lebih besar. Hal tersebut karena gerak relatif yang lebih tinggi dari konfigurasi 1 dibandingkan konfigurasi lainnya.

Selanjutnya adalah penelitian yang dilakukan oleh Hwang dkk, pada tahun 2017. Penelitian dilakukan berlatar belakang memburuknya kondisi lingkungan sehingga membuat para ilmuwan melakukan penelitian terkait energi terbarukan. Teknologi *energy harvesting* yang diadaptasi pada penelitian ini berbasis energi kinetik termasuk elektromagnetik, elektrostatik, dan piezoelektrik. Piezoelektrik menjadi pertimbangan utama karena dapat digunakan dalam lingkungan yang bermacam-macam.

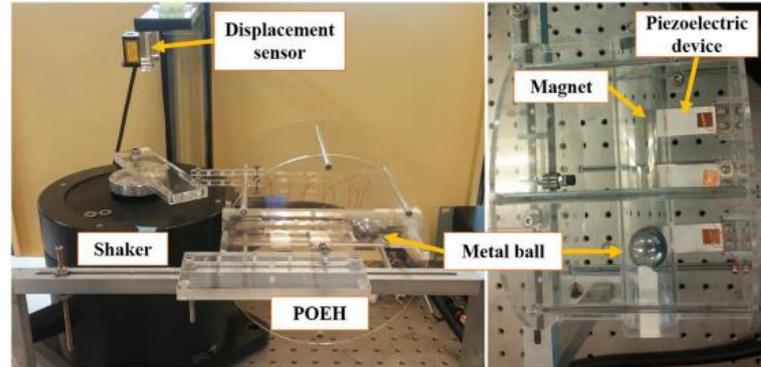
Metode penelitian yang dilakukan merupakan eksperimen secara langsung. Model yang digunakan adalah struktur penopang dan magnet yang dipasangkan pada modul piezoelektrik seperti yang terlihat pada gambar 2.17. Pada bagian atas magnet dipasangkan tabung yang berfungsi sebagai jalur bola besi untuk bergerak. Ketika sistem bergerak dan membentuk sudut tertentu, bola besi akan bergerak dan membuat getaran terhadap piezoelektrik. Getaran terhadap sistem merupakan getaran frekuensi rendah yang dianggap getaran yang dihasilkan dari gelombang laut. Frekuensi getaran dari struktur penopang dapat dihitung dengan persamaan 6.



Gambar 2. 17 Model sistem energy harvester (Hwang et al. 2017)

$$\omega_{beam} = \sqrt{\frac{K_{beam}}{m_{eff}}} \quad 2.9$$

Dimana K_{beam} merupakan kekakuan batang, dan m_{eff} merupakan massa batang. Dibawah ini merupakan spesifikasi dan properti dari perangkat piezoelektrik:

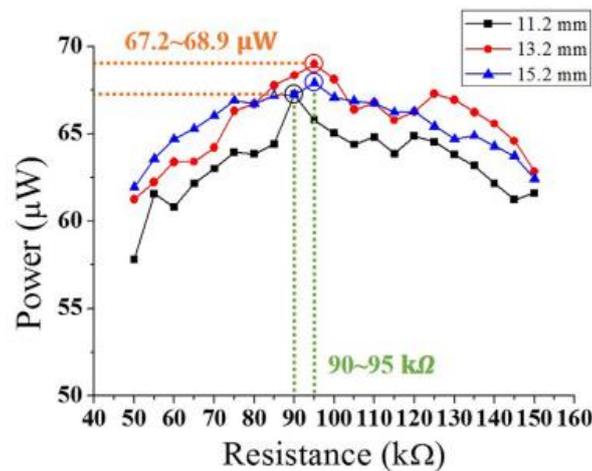


Gambar 2. 18 Susunan perangkat piezoelektrik (Hwang et al. 2017)

Tabel 2. 4 Properti perangkat piezoelektrik (Hwang et al. 2017)

Properties	Value
Density (g/cm^3)	7.6
Dielectric Constants ($\epsilon_{33}T/\epsilon_0$)	21
Piezoelectric charge Constants ($\times 10^{-12} \text{m/V}$): d_{33}, d_{31})	450, - 200
Piezoelectric Voltage Constants ($\times 10^3 \text{Vm/N}$): g_{33}, g_{31})	22.1, - 11.1
Elastic Constants ($\times 10^{12} \text{m}^2/\text{N}$): S_{11}^E, S_{11}^D)	13.8, 11.8
Stainless Steel (SUS-304)	N/A
Density (g/cm^3)	8
Young's Modulus (Gpa)	193
TIP-mass Magnet (g)	4

Percobaan dilakukan dengan membuat sebuah sistem yang dapat membuat gerak menyerupai gerak gelombang laut. Sistem yang dibuat dengan memposisikan tiga perangkat piezoelektrik pada susunan magnet yang berada dalam frame berbentuk sirkular. Ditengah frame diletakan pada rel dengan bola besi. Kemudian magnet dari tiap perangkat piezoelektrik diposisikan dibawah rel. Sistem tersebut digerakan dengan alat penggetar dan sensor pergeseran untuk menyebabkan adanya kemiringan dari sistem. Hasil dari percobaan ditampilkan pada gambar 2.19.

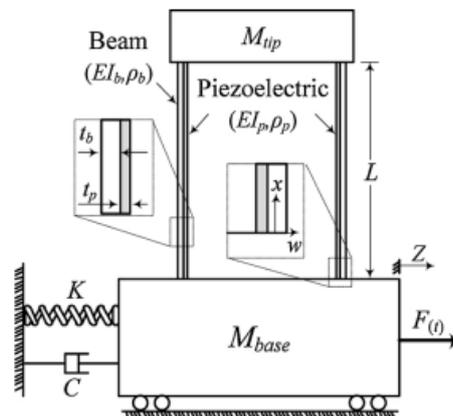


Gambar 2. 19 Power output dari masing-masing variasi pergeseran (Hwang et al. 2017)

Berdasarkan gambar 2.19 diperoleh kesimpulan bahwa tenaga maksimal yang dihasilkan sebesar $68.9 \mu\text{W}$ dengan impedansi $95 \text{ k}\Omega$ untuk pergeseran sebesar 13.2 mm .

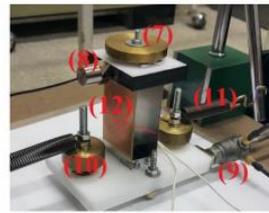
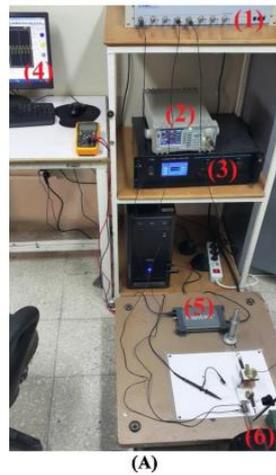
Kemudian penelitian yang dilakukan oleh Nabavi, et al dengan latar belakang energi gelombang laut merupakan jenis energi alternatif yang dapat ditemui dengan mudah disekitar kita. Pemanfaatan terkait energi gelombang laut masih sedikit karena frekuensinya yang rendah sehingga dianggap tidak dapat memenuhi kebutuhan energi. Pada jurnal ini dilakukan penelitian dengan model sistem rangkaian kolom dengan piezoelektrik. Rangkaian sistem ini diletakan pada *offshore buoys* untuk menghasilkan energi.

Percobaan dilakukan menggunakan dua metode yaitu metode data analisis dan percobaan. Metode data analisis mengacu pada perilaku getaran dari batang kolom dari struktur piezoelektrik. Untuk memvalidasi hasil analisa dari metode data analisis, dilakukan percobaan secara langsung. Berikut merupakan model sistem yang digunakan pada percobaan:



Gambar 2. 20 Model sistem piezoelektrik dengan massa ujung (Nabavi, Farshidianfar, and Afsharfard 2018)

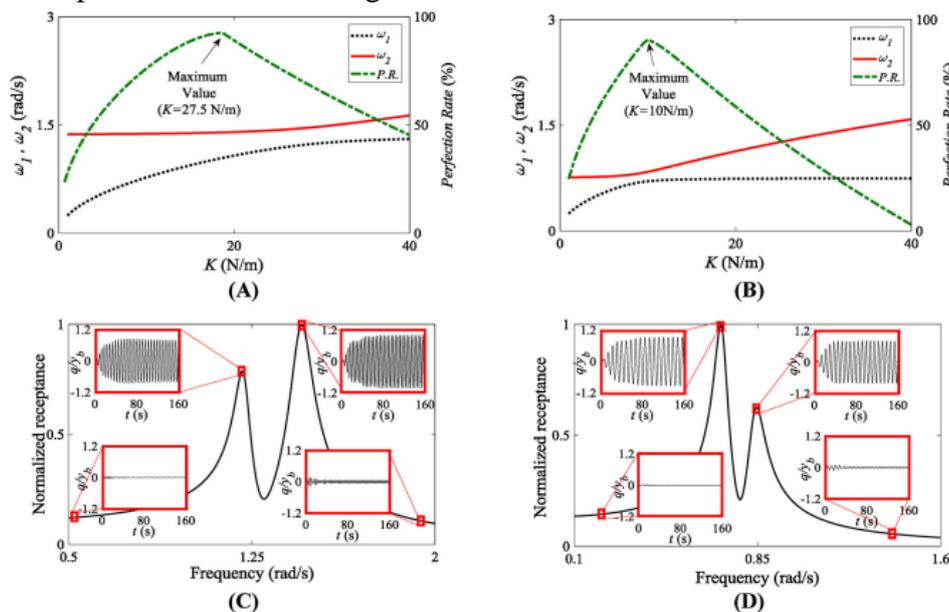
Pada percobaan digunakan frekuensi sebesar 10 Khz dan menggunakan dua massa dengan berat masing-masing 88.85 gr dan 108.85 gr . Berikut adalah komponen yang digunakan dalam percobaan:



- | | |
|--------------------------------|-------------------------|
| 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. 21 Susunan perangkat untuk mencari respon frekuensi (A); energy harvester (B) (Nabavi, Farshidianfar, and Afsharfard 2018)

Karena perbedaan frekuensi, percobaan dilakukan di dua titik yang berbeda. Titik pertama berlokasi di Boston (44,013) dan titik kedua berlokasi di San Francisco (46,012). Dengan berat massa pada ujung masing-masing *buoy* adalah 688.80 gr dan 695.50 gr berurutan. Hasil yang diperoleh dari percobaan adalah sebagai berikut:



Gambar 2. 22 Pengaruh perubahan kekakuan pada frekuensi pertama dan kedua dan perfection rate (P.R) pada stasiun Boston (44,013) (A); dan stasiun San Francisco (46,012) (B); respon frekuensi sistem yang berlokasi di Boston (C) dan San Francisco (D) (Nabavi, Farshidianfar, and Afsharfard 2018)

Berdasarkan gambar 2.22 diperoleh kesimpulan bahwa pada stasiun Boston (44,013) P.R tertinggi terjadi pada $K = 27,5 \text{ N/m}$. Kemudian pada stasiun San Francisco (46,012) P.R tertinggi terjadi pada $K = 10,0 \text{ N/m}$. Pada gambar I dan (D) menunjukkan respon frekuensi sistem yang digunakan pada stasiun Boston (44,013) dan San Francisco (46,012).

Dan terakhir adalah penelitian yang dilakukan oleh Yusup dengan latar belakang Indonesia adalah negara yang sedang terdampak krisis ekonomi karena cadangan energi fosil semakin menipis. Dalam menangani masalah tersebut dilakukan penelitian terkait energi alternatif.

Salah satu energi alternatif yang dikembangkan di Indonesia adalah energi gelombang laut. Hal tersebut karena melihat potensi dari energi gelombang laut Indonesia yang terbilang besar. Penelitian dilakukan dengan memanfaatkan material piezoelektrik. Material piezoelektrik adalah material yang sangat sensitif terhadap getaran dan memiliki rasio *harvesting* energi terhadap massa lebih besar dibandingkan motor linear sebagai generator. Dengan memanfaatkan hal tersebut, dilakukan penelitian dengan sistem kayuh dayung yang dikombinasikan dengan piezoelektrik.

Energi yang dihasilkan oleh gelombang dihitung sebagai energi mekanik. Dimana energi tersebut merupakan hasil penjumlahan dari energi kinetik dan energi potensial. Gaya yang dihasilkan oleh gelombang laut dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$F = \frac{\rho g h^2 \lambda b}{16} \quad 2.10$$

Dimana :

- F = Gaya Ombak (N)
- ρ = Massa Jenis Fluida (1000 kg/m³)
- g = Percepatan Gravitasi (9.8 m/s²)
- h = Tinggi Gelombang (m)
- λ = Panjang Gelombang (m)
- b = Lebar air laut yang mengenai model sistem (m)

Pada penelitian ini digunakan material piezoelektrik. Material piezoelektrik merupakan sebuah material yang dapat menghasilkan medan listrik jika diberikan tegangan mekanik. Hal tersebut dipengaruhi oleh *Electromechanical coupling factor* (k) yang merupakan indikator efektifitas material piezoelektrik dalam mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Untuk mengetahui besar daya yang dihasilkan oleh sebuah material piezoelektrik dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$W_{mech} = F \times X_{piezo} \quad 2.11$$

Dimana :

- W_{mech} = Energi Mekanik yang diterima
- F = Gaya Total yang Bekerja pada Piezoelektrik (N)
- X_{piezo} = *displacement* yang Terjadi pada Material Piezoelektrik (m)

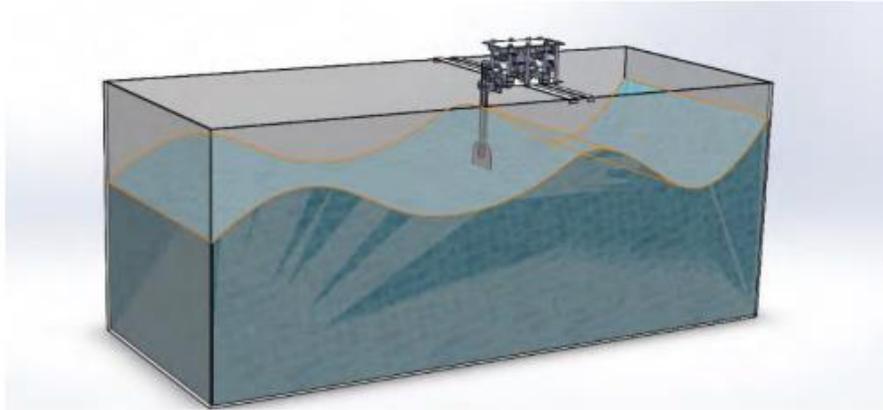
Besar voltase yang dihasilkan oleh material piezoelektrik dipengaruhi oleh besarnya energi mekanik yang diterima material piezoelektrik, jenis material piezoelektrik, kapasitansi material piezoelektrik. Besar voltase yang dihasilkan dapat dihitung dengan persamaan:

$$V = K_{31} \sqrt{\frac{2 W_{mech}}{C}} \quad 2.12$$

Dimana :

- V = Voltage (V)
- W_{mech} = Energi Mekanik (Joule)
- C = Kapasitansi Material (F)
- K_{31} = *Coupling Factor*

Model sistem yang digunakan pada penelitian ini adalah model sistem kayuh dayung seperti yang terlihat pada gambar 2.22. Model sistem tersebut memiliki panjang 30 cm, lebar 15 cm, tinggi chassis 15.5 cm, panjang lengan dayung total 53 cm.



Gambar 2. 23 Model sistem kayuh dayung – piezoelektrik (Yusup, 2016)

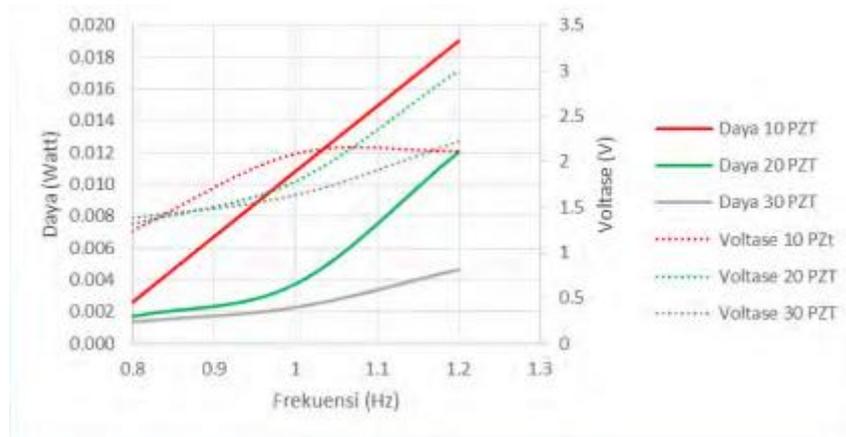
Model sistem ini memiliki prinsip kerja memanfaatkan gaya horizontal gelombang laut. Pada saat gelombang menyentuh permukaan dayung maka dayung akan bergerak memutar dan poros pengungkit akan menggeser poros transmisi. Poros transmisi yang bergerak horizontal akan mendorong poros pendorong massa, dipasang dua bantalan slider agar poros pendorong massa bergerak secara horizontal sempurna. Setelah poros pendorong bergerak, poros tersebut akan menggerakkan massa yang menghimpit piezoelektrik. Gaya yang diberikan massa pendorong akan membuat piezoelektrik defleksi. Defleksi yang terjadi pada piezoelectric akan menghasilkan energi listrik. Pada tabel 2.5 dapat dilihat hasil simulasi model sistem dengan variasi frekuensi, tinggi gelombang, dan jumlah piezoelektrik.

Tabel 2. 6 Data energi rata-rata yang dihasilkan model sistem dengan variasi frekuensi, tinggi gelombang, dan jumlah piezoelektrik (Yusup, 2016)

Tabel 2. 5 Tabel energi rata-rata terhadap variasi

PZT	H (m)	f (Hz)	V-RMS (V)	I-RMS (A)	P-RMS (Watt)
10	0.04	0.8	1.247	0.002	0.003
		1	2.086	0.005	0.011
		1.2	2.114	0.009	0.019
	0.05	0.8	2.076	0.003	0.007
		1	2.069	0.008	0.017
		1.2	2.107	0.014	0.03
	0.06	0.8	2.059	0.005	0.009
		1	2.080	0.012	0.024
		1.2	2.114	0.020	0.042
20	0.04	0.8	1.315	0.001	0.002
		1	1.790	0.002	0.004
		1.2	3.014	0.004	0.012
	0.05	0.8	2.055	0.002	0.004
		1	2.797	0.003	0.009
		1.2	4.132	0.006	0.026
	0.06	0.8	2.960	0.003	0.009
		1	2.797	0.005	0.019

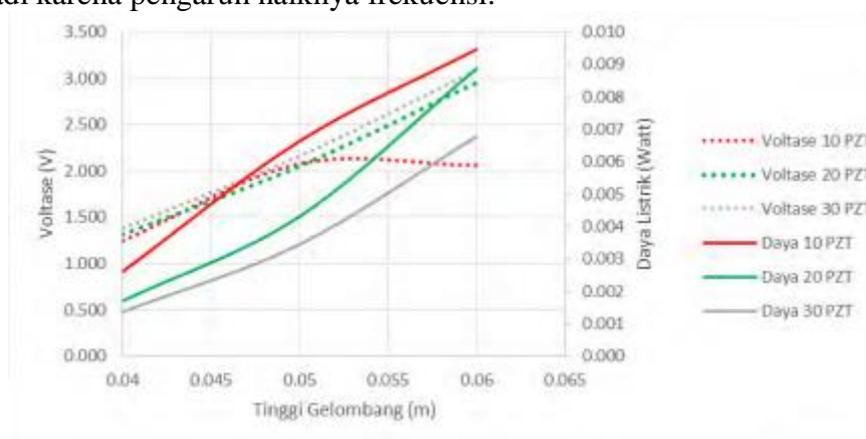
		1.2	4.132	0.009	0.037
30	0.04	0.8	1.381	0.001	0.001
		1	1.632	0.001	0.002
		1.2	2.219	0.002	0.005
	0.05	0.8	2.158	0.002	0.003
		1	2.551	0.002	0.005
		1.2	3.468	0.003	0.011
	0.06	0.8	3.092	0.002	0.007
		1	3.673	0.003	0.011
		1.2	4.426	0.005	0.030



Gambar 2. 24 Pengaruh frekuensi terhadap Voltase yang dihasilkan (Yusup, 2016)

Gambar 2.24 menunjukkan pengaruh frekuensi terhadap tegangan listrik yang dihasilkan. Dapat dilihat bahwa data tersebut menunjukkan *trendline* yang naik seiring dengan kenaikan frekuensi terhadap sistem. Kenaikan tegangan listrik tersebut juga dipengaruhi oleh bertambahnya jumlah piezoelektrik yang digunakan.

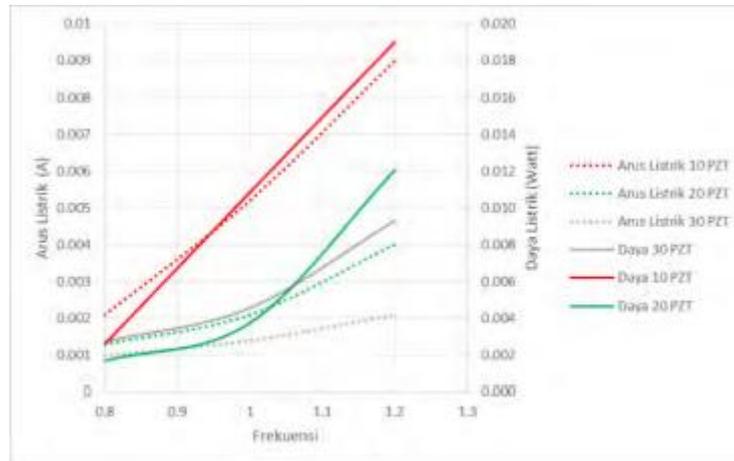
Kenaikan tegangan listrik diakibatkan karena kenaikan defleksi piezoelektrik. Kenaikan defleksi tersebut dipicu karena perpindahan massa pendorong. Kenaikan massa pendorong tersebut terjadi karena pengaruh naiknya frekuensi.



Gambar 2. 25 Pengaruh tinggi gelombang yang dihasilkan terhadap Voltase (Yusup, 2016)

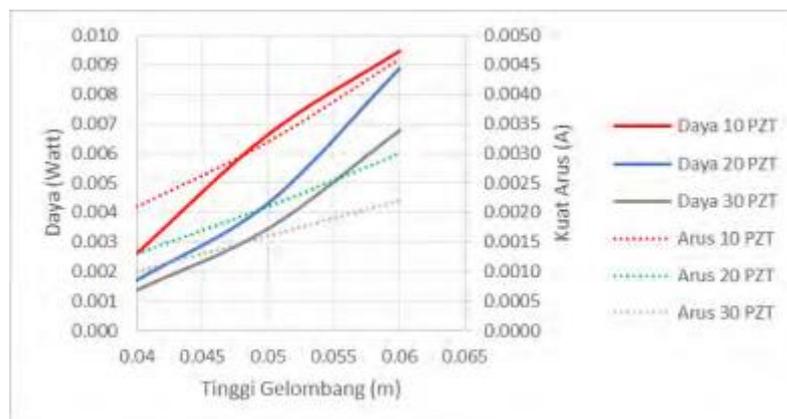
Gambar 2.25 menunjukkan pengaruh tinggi gelombang yang dihasilkan terhadap tegangan listrik yang dihasilkan. Dapat dilihat semakin tinggi gelombang berpengaruh pada kenaikan

tegangan listrik yang dihasilkan. Hal tersebut karena kenaikan gelombang membuat gaya yang bekerja pada massa pendorong semakin besar, semakin besar gaya yang bekerja akan berpengaruh pada semakin besar defleksi yang terjadi pada piezoelektrik. Defleksi yang semakin besar berpengaruh pada penyerapan energi mekanik yang semakin besar pula, hal tersebut menghasilkan tegangan listrik yang besar.



Gambar 2. 26 Pengaruh Frekuensi yang dihasilkan terhadap kuat arus yang dihasilkan (Yusup, 2016)

Gambar 2.26 menunjukkan pengaruh frekuensi yang dihasilkan terhadap kuat arus yang dihasilkan. Pada variasi ini diketahui bahwa penambahan jumlah piezoelektrik berbanding terbaik dengan peningkatan respon kuat arus listrik. Dengan menggunakan jumlah piezoelektrik sebanyak 10 mendapatkan hasil kuat arus yang lebih tinggi dibandingkan dengan penggunaan piezoelektrik sebanyak 20 dan 30. Hal tersebut karena semakin banyak piezoelektrik yang digunakan menyebabkan sistem menjadi lebih kaku sehingga kecepatan defleksi sistem menurun.



Gambar 2. 27 Pengaruh tinggi gelombang yang dihasilkan terhadap kuat arus yang dihasilkan (Yusup, 2016)

Gambar 2.27 menunjukkan pengaruh tinggi gelombang yang dihasilkan terhadap kuat arus yang dihasilkan. Pada variasi ini diketahui semakin tinggi gelombang laut maka semakin tinggi juga kuat arus yang dihasilkan. Namun dengan penambahan jumlah piezoelektrik menyebabkan terjadinya penurunan kuat arus. Hal tersebut karena semakin banyak piezoelektrik yang digunakan menyebabkan sistem menjadi lebih kaku dan kecepatan defleksi menurun. Maka

dapat diketahui bahwa kecepatan defleksi piezoelektrik mempengaruhi kuat arus yang dihasilkan.

Dari percobaan yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa besar frekuensi serta tinggi gelombang memiliki pengaruh positif terhadap kenaikan tegangan listrik yang dihasilkan. Hal tersebut karena besar frekuensi dan tinggi gelombang menyebabkan perpindahan yang besar terhadap model sistem.

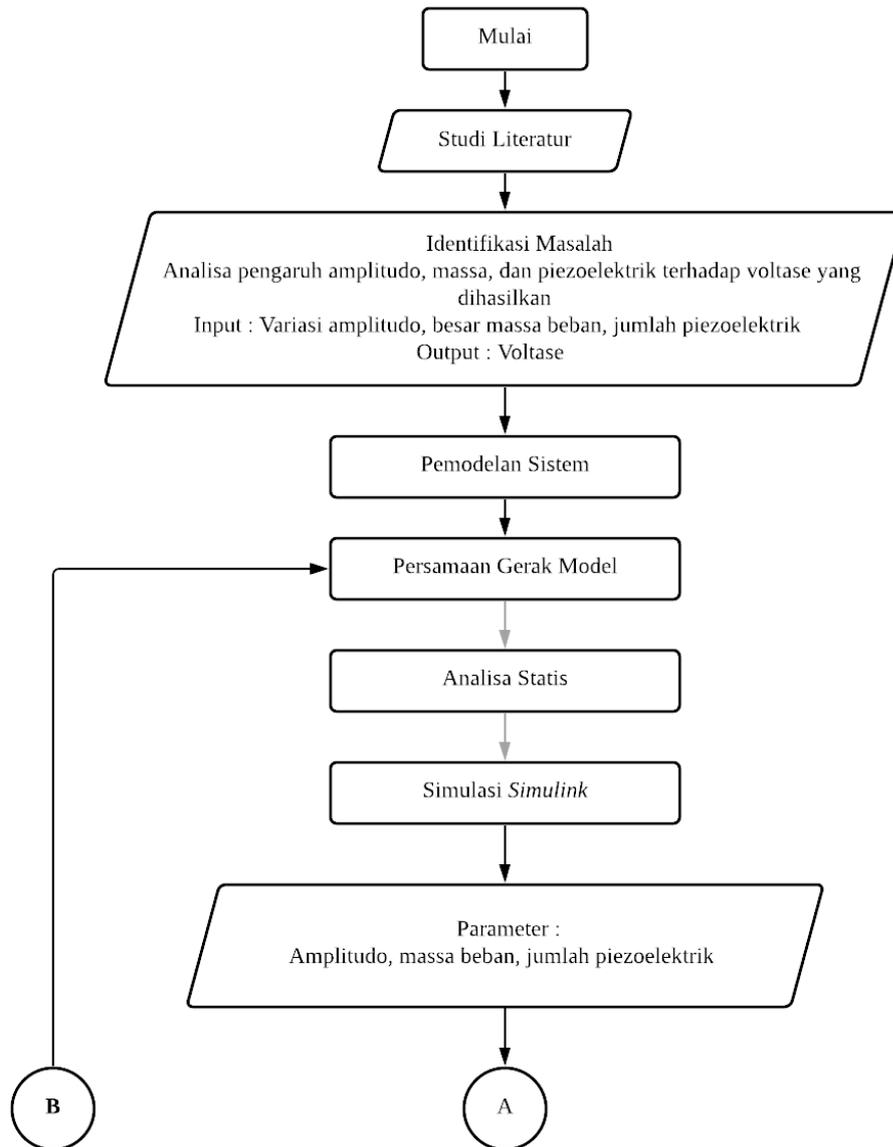
Namun diketahui juga bahwa penambahan jumlah piezoelektrik yang digunakan memberikan pengaruh negatif terhadap arus listrik yang dihasilkan. Hal tersebut karena semakin banyak piezoelektrik yang digunakan menyebabkan model sistem menjadi lebih kaku dan menurunkan kecepatan defleksi piezoelektrik.

BAB III METODOLOGI

3.1 Tahapan Penelitian

3.1.1 Diagram Alir

Agar penulisan tugas akhir ini mencapai tujuan sebagaimana tercantum dalam tujuan maka perlu dilakukan langkah-langkah yang sesuai dengan prosedur analisa. Berikut diagram alir prosedur analisa pada tugas akhir ini:



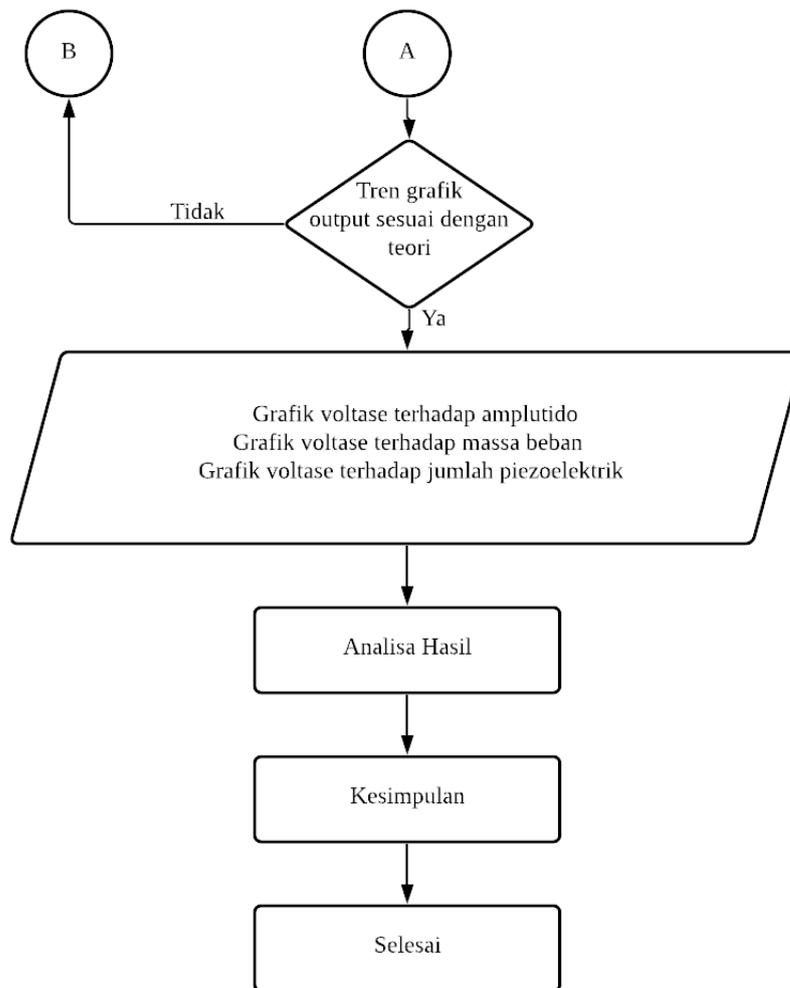


Diagram 3. 1 Diagram alir penelitian

3.1.2 Penjelasan Diagram Alir

Berikut adalah penjelasan diagram alir:

1. Studi Literatur

Sebelum dilakukan penelitian dilakukan studi mengenai literatur yang berkaitan dengan *base motion*, gelombang laut, mekanika getaran khususnya *degree of freedom*, dan jurnal penelitian yang berkaitan dengan *wave energy harvester* menggunakan piezoelektrik.

2. Identifikasi Masalah

Input: amplitudo gelombang laut, massa beban, jumlah piezoelektrik.

Amplitudo gelombang berpengaruh pada besar kemiringan model sistem yang mempengaruhi besar potensial kepada massa beban. Sehingga penelitian ini variasi yang digunakan amplitudo gelombang laut, sehingga dapat diketahui karakteristik listrik yang dihasilkan karena pengaruh amplitudo gelombang laut kemudian massa beban pada model sistem, jumlah piezoelektrik model sistem karena variasi tersebut berpengaruh pada besar energi listrik yang dihasilkan.

3. Pemodelan Sistem *Wave Energy Harvester*

Pemodelan yang dilakukan pada *wave energy harvester* dengan piezoelektrik dimulai dari memodelkan sistem massa-pegas, mekanisme piezoelektrik.

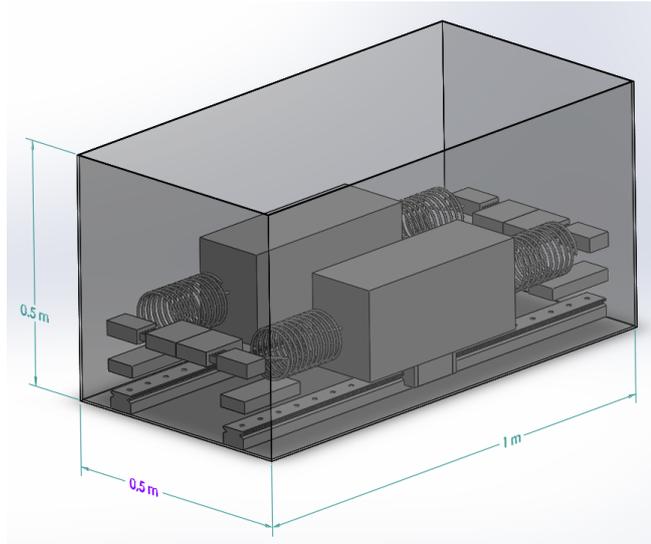
4. Persamaan Gerak

- Pada tahap ini model yang telah dirancang kemudian dianalisa persamaan geraknya melalui *free-body diagram* sampai pada tahap *state variable*.
5. Setelah persamaan gerak diperoleh, dilakukan analisa statis terhadap komponen yang digunakan. Untuk menentukan apakah parameter yang digunakan sudah tepat atau tidak.
 6. Simulasi *Simulink*
State variable yang didapatkan dari persamaan gerak dibuat blok diagram pada *Simulink*.
 7. Tren Grafik Sesuai dengan teori
Setelah melakukan pemodelan dan simulasi pada *simulink*, dilakukan *running* dari simulasi yang telah dibuat. Pada simulasi apabila telah berjalan tanpa kesalahan dilanjutkan dengan variasi amplitudo, massa, dan jumlah piezoelektrik. Jika pada simulasi terdapat kesalahan dan belum bisa dijalankan maka dilakukan pemeriksaan pada persamaan gerak.
 8. Grafik Respon Voltase terhadap Variasi
Dari hasil simulasi yang didapatkan yaitu voltase, dilakukan plot pada grafik. Grafik tersebut membandingkan voltase yang diperoleh dari berbagai variasi yang diberikan. Ada empat grafik analisa yang dianalisa yaitu grafik voltase terhadap amplitudo gelombang laut, besar massa, jumlah piezoelektrik.
 9. Analisa Grafik
Pada grafik yang diperoleh dari proses simulasi, dilakukan analisa pengaruh perubahan variasi parameter terhadap perubahan voltase.
 10. Kesimpulan
Dari hasil analisa grafik disimpulkan tentang pengaruh variasi parameter terhadap voltase yang dihasilkan. Dan dapat diketahui parameter yang memberikan pengaruh paling besar terhadap voltase yang dihasilkan.

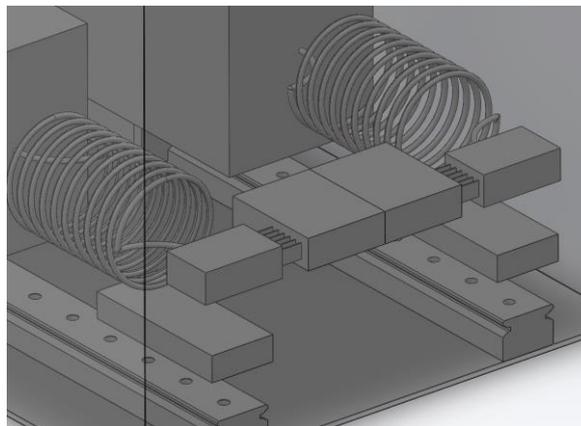
3.2 Rancangan Pemodelan

3.2.1 Perancangan Mekanisme

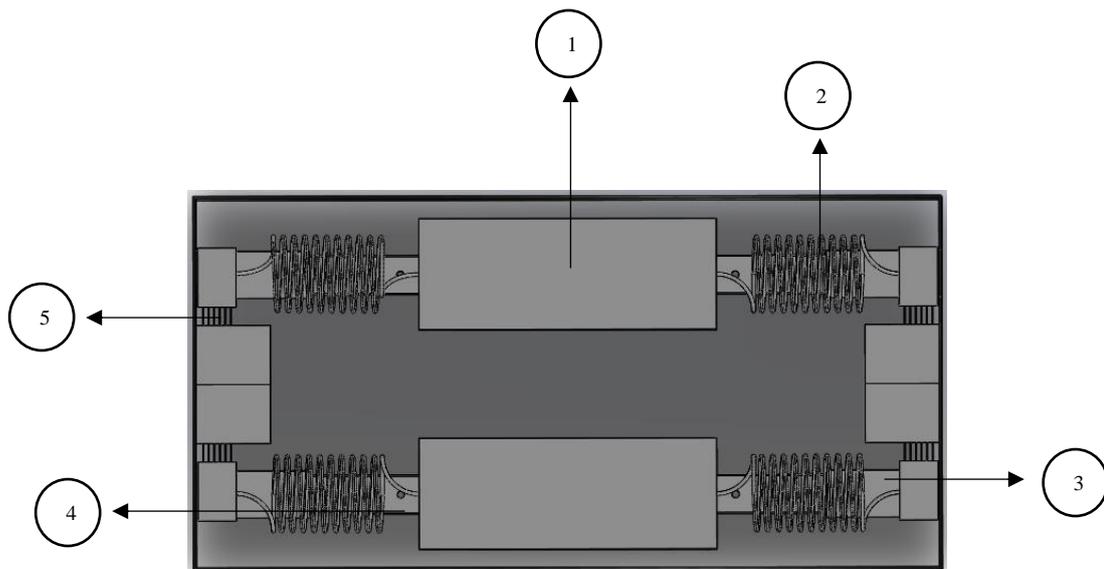
Dalam perancangan ini hanya terbatas pada perancangan mekanisme massa, pegas, dan piezoelektrik. Perancangan model dilakukan menggunakan *software Solidworks 2020* sehingga dapat ditampilkan hasil perancangan pada gambar 3.1. Detail dari rangkaian piezoelektrik model sistem ditunjukkan pada gambar 3.2 dan penjelasan komponen model sistem ditunjukkan pada gambar 3.3.



Gambar 3. 1 Perancangan model pembangkit energi



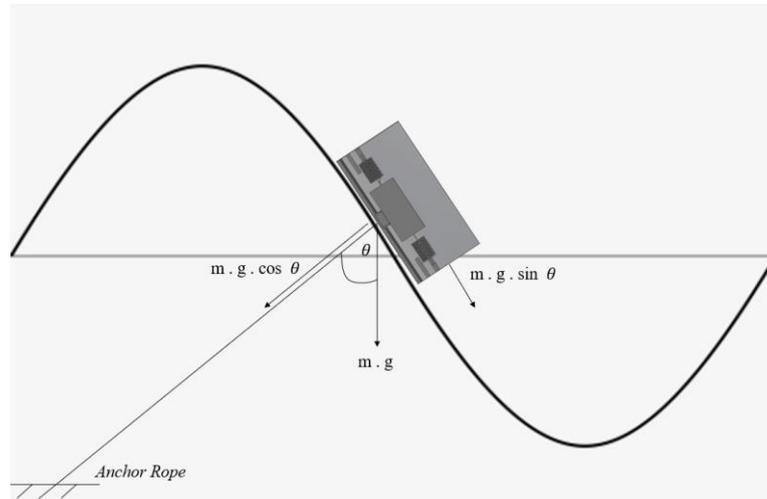
Gambar 3. 2 Detail rangkaian sistem piezoelektrik



Gambar 3. 3 Model sistem pembangkit energi

Keterangan:

1. Massa utama model sistem
2. Pegas
3. *Stopper linear guide*
4. *Slider linear guide*
5. Susunan mekanisme piezoelektrik

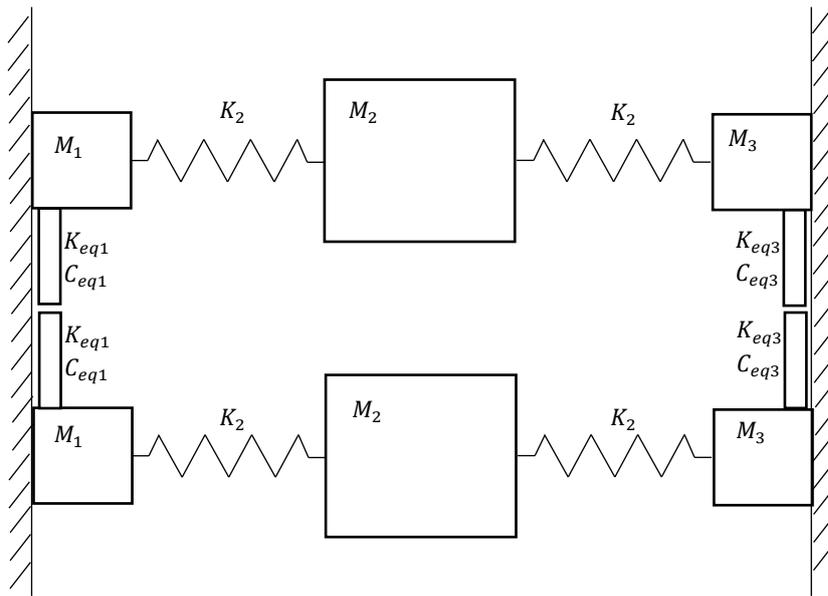


Gambar 3. 4 Mekanisme Kerja Model Sistem

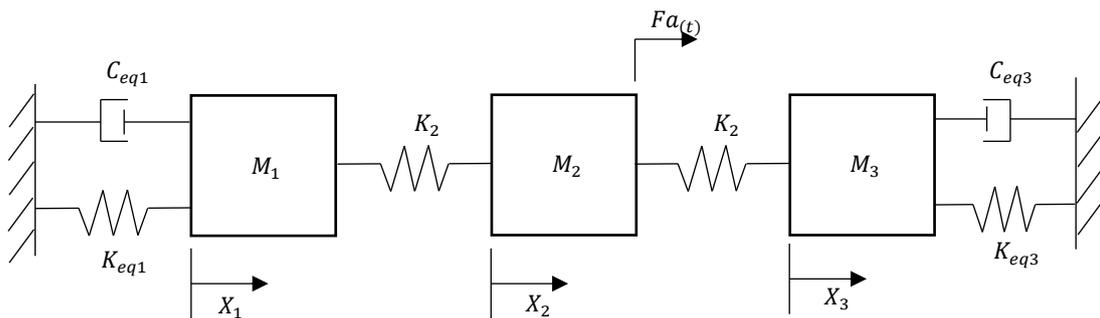
Prinsip kerja pembangkit energi tenaga gelombang laut dengan sistem massa pegas-piezoelektrik yang ditunjukkan pada gambar 3.4 adalah dengan memanfaatkan energi mekanis yang dihasilkan dari gelombang laut. Perangkat pembangkit energi yang terapung di permukaan laut akan bergerak secara sinusoidal yang menyebabkan massa didalamnya bergerak maju-mundur. Dari pergerakan massa tersebut akan memberikan gaya terhadap pegas untuk menekan plat piezoelektrik. Plat piezoelektrik yang menerima gaya dari massa-pegas akan mengalami defleksi yang menghasilkan energi listrik. Massa yang digunakan sebanyak dua buah dan ditempatkan paralel untuk menghasilkan voltase listrik yang optimal pada sistem pembangkit energi.

3.2.2 Persamaan Gerak Model

Berdasarkan model sistem yang telah dibuat, disusun *free body diagram* untuk mempermudah proses penurunan persamaan gerak dan *free body diagram* digambarkan pada gambar 3.4. Pada gambar 3.4 ditunjukkan berupa tampak atas dari model sistem pembangkit energi dan pada gambar 3.5 ditunjukkan tampak samping dari model sistem pembangkit energi.

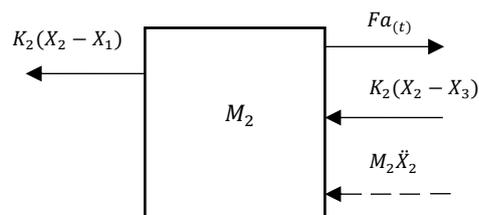


Gambar 3. 5 Free body diagram keseluruhan model sistem



Gambar 3. 6 Free body diagram model sistem

Berdasarkan gambar 3.5 diketahui sistem memiliki tiga derajat kebebasan dan untuk memudahkan penurunan persamaan gerak model maka model akan dibagi dalam tiga bagian penurunan persamaan gerak. Bagian pertama pada M_1 yaitu massa piezoelektrik 1, bagian kedua pada M_2 yaitu massa utama model sistem, dan bagian ketiga pada M_3 yaitu massa piezoelektrik 2.



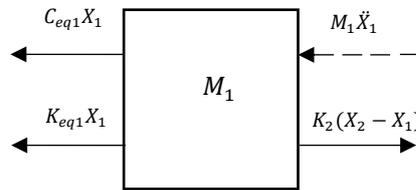
Gambar 3. 7 Free body diagram massa utama

Gambar 3.6 menunjukkan gaya-gaya yang bekerja pada massa utama model sistem. Gaya yang bekerja adalah gaya inersia dari massa utama, gaya kekakuan dari pegas yang berada pada sisi kanan dan kiri massa utama, dan gaya kekakuan serta redaman piezoelektrik. Persamaan gerak model tersebut sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 Fa(t) &= M_2 \ddot{X}_2 + K_2(X_2 - X_3) + K_2(X_2 - X_1) \\
 Fa(t) &= M_2 \ddot{X}_2 + 2 K_2 X_2 - K_2 X_3 - K_2 X_1
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

Keterangan:

- $Fa(t)$: Gaya berat massa utama
- K_2 : Konstanta kekakuan pegas 2
- M_2 : Massa utama



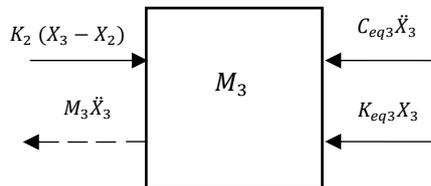
Gambar 3. 8 Free body diagram piezoelektrik 1

Gambar 3.7 menunjukkan gaya-gaya yang bekerja pada massa 1 sistem piezoelektrik. Gaya yang bekerja adalah gaya inersia dari massa utama, gaya kekakuan dari pegas, dan gaya kekakuan serta redaman piezoelektrik. Persamaan gerak model tersebut sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 M_1 \ddot{X}_1 + C_{eq1} \dot{X}_1 + K_{eq1} X_1 - K_2 (X_2 - X_1) &= 0 \\
 M_1 \ddot{X}_1 + C_{eq1} \dot{X}_1 + K_{eq1} X_1 - K_2 X_2 + K_2 X_1 &= 0
 \end{aligned}
 \tag{3.2}$$

Keterangan:

- M_1 : Massa blok penghubung piezoelektrik 1
- C_{eq1} : Konstanta redaman ekivalen piezoelektrik 1
- K_{eq1} : Konstanta kekakuan ekivalen piezoelektrik 1
- K_2 : Konstanta kekakuan pegas 2



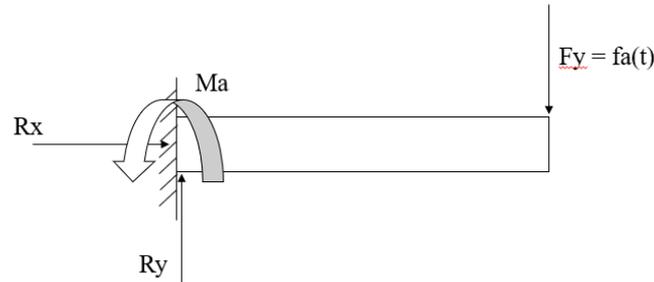
Gambar 3. 9 Free body diagram piezoelektrik 2

Gambar 3.8 menunjukkan gaya-gaya yang bekerja pada massa 3 sistem piezoelektrik. Gaya yang bekerja adalah gaya inersia dari massa utama, gaya kekakuan dari pegas, dan gaya kekakuan serta redaman piezoelektrik. Persamaan gerak model tersebut sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 M_3 \ddot{X}_3 + C_{eq3} \dot{X}_3 + K_{eq3} X_3 - K_2 (X_3 - X_2) &= 0 \\
 M_3 \ddot{X}_3 + C_{eq3} \dot{X}_3 + K_{eq3} X_3 - K_2 X_2 + K_2 X_3 &= 0
 \end{aligned}
 \tag{3.3}$$

Keterangan:

- M_3 : massa blok penghubung piezoelektrik 2
- K_2 : Konstanta kekakuan ekivalen pegas 2
- C_{eq3} : Konstanta redaman ekivalen piezoelektrik 2
- K_{eq3} : Konstanta kekakuan ekivalen piezoelektrik 2



Gambar 3. 10 Free Body Diagram Momen Piezoelektrik

Gambar 3.10 menunjukkan gaya momen yang bekerja pada piezoelektrik. Gaya F_y merupakan gaya yang berasal dari gerak massa utama karena sistem mengalami kemiringan akibat gelombang laut.

Setelah persamaan gerak setiap model sudah diperoleh, maka persamaan gerak diubah bentuknya menjadi *steady state equation*. Tujuan persamaan diubah menjadi bentuk *steady state equation* adalah untuk mempermudah proses penurunan persamaan menjadi bentuk blok diagram sebagai input pada *matlab simulink*. Berikut adalah *steady state equation* dari persamaan gerak model sistem:

Steady state equation

$$\dot{X}_1 = V_1$$

$$M_1 \dot{V}_1 + C_{eq1} V_1 + K_{eq1} X_1 - K_2 (X_2 - X_1) = 0$$

$$M_1 \dot{V}_1 + C_{eq1} V_1 + (K_{eq1} + K_2) X_1 - K_2 X_2 = 0 \quad 3.4$$

$$\dot{V}_1 = \frac{1}{M_1} (K_2 X_2 - (K_{eq1} + K_2) X_1 - C_{eq1} V_1) \quad 3.5$$

$$\dot{X}_2 = V_2$$

$$F_a(t) = M_2 \dot{V}_2 + K_2 (X_2 - X_3) + K_2 (X_2 - X_1)$$

$$F_a(t) = M_2 \dot{V}_2 + 2K_2 X_2 - K_2 X_3 - K_2 X_1 \quad 3.6$$

$$\dot{V}_2 = \frac{1}{M_2} (F_a(t) + K_2 X_1 + K_2 X_3 - 2K_2 X_2) \quad 3.7$$

$$\dot{X}_3 = V_3$$

$$M_3 \dot{V}_3 + C_{eq3} V_3 + K_{eq3} X_3 - K_2 (X_3 - X_2) = 0$$

$$M_3 \dot{V}_3 + C_{eq3} V_3 + (K_{eq3} + K_2) X_3 + K_2 X_2 = 0 \quad 3.8$$

$$\dot{V}_3 = \frac{1}{M_3} (-K_2 X_2 - (K_{eq3} + K_2) X_3 - C_{eq3} V_3) \quad 3.9$$

3.2.3 Persamaan Gaya Eksitasi Gelombang

Gaya eksitasi model sistem ditunjukkan dengan $F_a(t)$ sebagai gaya berat dari massa utama model sistem. Gaya eksitasi muncul karena kemiringan yang dihasilkan kepada model sistem

akibat gelombang laut. Hal tersebut diilustrasikan oleh gambar 2.3. Persamaan yang dihasilkan dari ilustrasi tersebut adalah sebagai berikut:

$$f_a(t) = M g \sin(\theta(t)) \quad 3.10$$

Dengan θ ditunjukkan pada persamaan sebagai berikut:

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

Keterangan:

- A : Amplitudo gelombang
- Q : $2\pi/l = \text{wavenumber}$
- u : Jarak sistem pada sumbu u
- ω : $2\pi f = \text{Kecepatan sudut}$
- t : Waktu

3.2.4 Persamaan Voltase Bangkitan Piezoelektrik

Dari persamaan gerak yang digunakan, akan diketahui besar *displacement* pada piezoelektrik. *Displacement* piezoelektrik digunakan untuk mencari besar voltase yang dibangkitkan oleh rangkaian piezoelektrik, berikut adalah persamaan voltase bangkitan piezoelektrik.

$$V_p = \frac{3d_{31}E_pW_p t}{4C} X_p \quad 3.12$$

Dimana:

- V_p : Voltase piezoelektrik
- d_{31} : Konstanta voltase
- E_p : Modulus elastisitas
- W_p : Lebar piezoelektrik
- t : Tebal piezoelektrik
- C : Kapasitansi piezoelektrik
- X_p : Defleksi/*displacement* piezoelektrik

3.3 Frekuensi Natural Model Sistem

Untuk mengetahui model sistem dapat bekerja pada frekuensi gelombang laut yang ditentukan, maka dilakukan perhitungan frekuensi natural dari model sistem. Dimana frekuensi natural ditentukan dengan melakukan simulasi pada matlab menggunakan matriks sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} M_1\omega^2 + K_{eq1} + K_2 & -K_2 & 0 \\ -K_2 & M_2\omega^2 + 2K_2 & -K_2 \\ 0 & -K_2 & M_3\omega^2 + K_{eq3} + K_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = 0$$

Nilai variasi massa, konstanta kekakuan pegas, dan konstanta kekakuan ekuivalen piezoelektrik menjadi input pada matriks tersebut untuk mencari besar frekuensi natural dari model sistem. Nilai konstanta pegas ditunjukkan pada tabel 3.2, kemudian nilai konstanta kekakuan pegas piezoelektrik ditunjukkan pada tabel 3.3 dan dikalikan sesuai jumlah variasi piezoelektrik yang digunakan, lalu nilai variasi massa ditunjukkan pada tabel 3.6.

Tabel 3.1 menunjukkan nilai frekuensi natural dari model sistem dimana frekuensi natural terendah model sistem adalah sebesar 4.76 Hz dan frekuensi natural tertinggi model sistem adalah sebesar 45.76 Hz. Nilai tersebut berada diatas frekuensi natural gelombang yaitu sebesar 0.09-0.1 Hz maka model sistem dikatakan dapat bekerja dengan baik karena nilai frekuensi natural model sistem lebih besar dari frekuensi natural gelombang. Karena jika nilai frekuensi

natural model sistem kurang dari frekuensi natural gelombang akan terjadi resonansi yang menyebabkan respon pembangkit tidak dapat ditentukan.

Tabel 3. 1 Nilai Frekuensi Natural Model Sistem

No.	Variabel		Frekuensi Natural		
	Massa Base (kg)	keq2	w1 (Hz)	w2 (Hz)	w3 (Hz)
1	5	20832.00	8.17	36.09	36.57
2		26040.00	8.48	39.02	39.39
3		31248.00	8.70	41.74	42.05
4		39060.00	8.94	45.52	45.76
5	10	20832.00	5.81	36.09	36.32
6		26040.00	6.02	39.02	39.20
7		31248.00	6.17	41.74	41.89
8		39060.00	6.34	45.52	45.64
9	15	20832.00	4.76	36.09	36.24
10		26040.00	4.54	33.17	33.36
11		31248.00	5.05	41.74	41.84
12		39060.00	5.18	45.52	45.60

3.4 Penentuan Parameter dan Variabel

Sebelum melakukan proses simulasi, diperlukan penentuan parameter serta variasi agar simulasi dapat dilaksanakan. Parameter yang ditentukan adalah parameter utama model sistem pembangkit energi, parameter piezoelektrik, dan parameter gelombang laut. Parameter utama model sistem pembangkit energi ditunjukkan pada tabel 3.2, parameter piezoelektrik ditunjukkan pada tabel 3.3 berdasarkan pada parameter piezoelektrik *Minisense 100 Vibration Sensor*, dan tabel 3.4 menunjukkan parameter gelombang laut yang digunakan.

Tabel 3. 2 Tabel parameter utama model sistem

Panjang	Lebar	Tinggi	Konstanta Pegas
1 m	0.5 m	0.5 m	10,000 N/M

Tabel 3. 3 Tabel parameter piezoelektrik

Keterangan	Parameter	Nilai
Massa Piezoelektrik	M_{pzt}	6×10^{-4} kg
Tebal Piezoelektrik	t_{pzt}	1×10^{-3} m
Lebar Piezoelektrik	w_{pzt}	6×10^{-3} m
Panjang Piezoelektrik	L_{pzt}	12×10^{-3} m
Kapasitansi	c_{pzt}	244×10^{-10} F
Konstanta Regangan Piezoelektrik	d_{31}	110×10^{-12} C/N
<i>Electromechanical Coupling Factor</i>	k_{31}	12%

Konstanta Pegas	k_{pzt}	2604 N/m
Konstanta Peredam	C_{pzt}	2.5 Ns/m
Modulus Young	E	3×10^9 N/m ²
Frekuensi Resonansi	fr	75 Hz

Tabel 3. 4 Tabel parameter gelombang

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

Tabel 3. 5 Tabel parameter ukuran perangkat massa pegas

Massa		
Panjang	Lebar	Tinggi
400 mm	150 mm	190 mm
Pegas		
Panjang	Diameter	Tebal
245 mm	50 mm	5 mm
Blok Massa Piezoelektrik		
Panjang	Lebar	Tinggi
51 mm	80 mm	30 mm
Linear Guide		
Panjang	Lebar	Tinggi
1000 mm	51 mm	37.5 mm
Bantalan Linear Guide		
Panjang	Lebar	Tinggi
237 mm	106 mm	51 mm

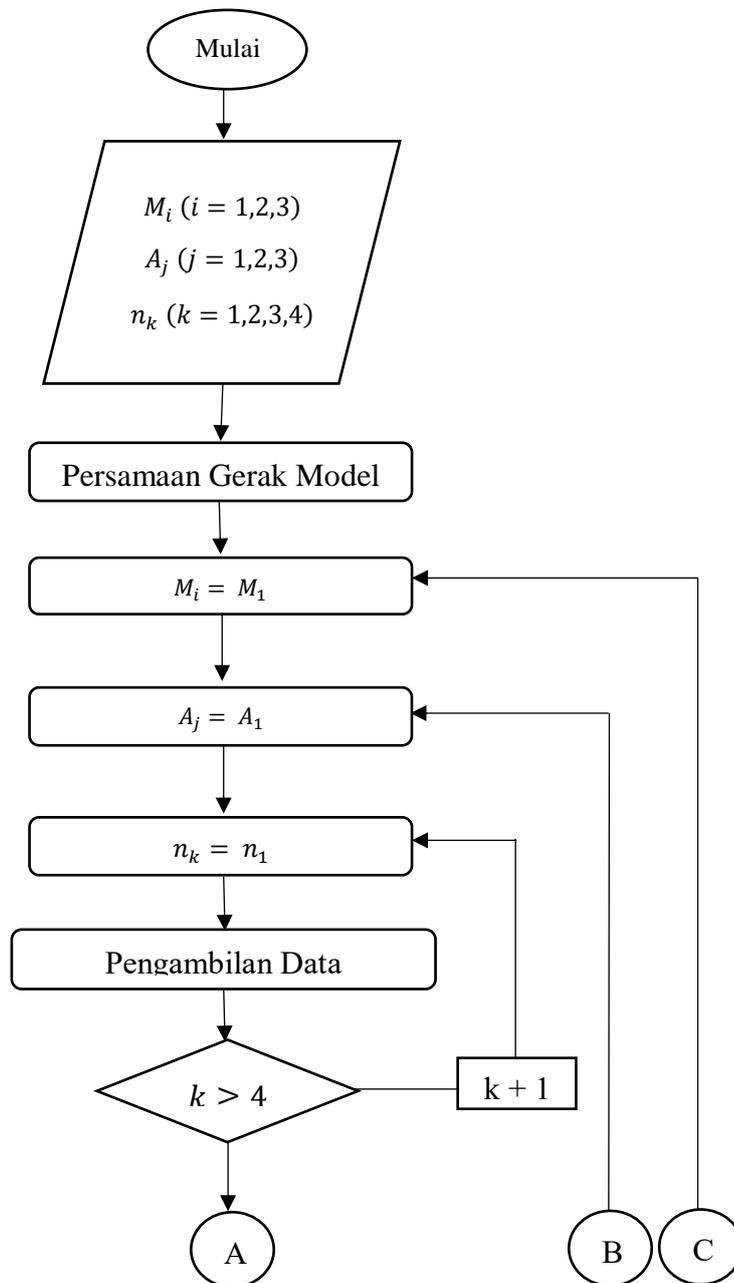
Setelah menentukan parameter, dilakukan penentuan variabel untuk dapat mengetahui pengaruh dari variasi yang diberikan terhadap hasil simulasi. Variabel yang digunakan pada penelitian ini adalah berat massa utama, amplitudo gelombang laut, dan jumlah piezoelektrik. Variasi nilai gelombang laut diambil dari data BMKG pada tanggal 5 Januari 2022 (*Pusat Meteorologi Maritim / BMKG*, n.d.). Variasi yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada tabel 3.6.

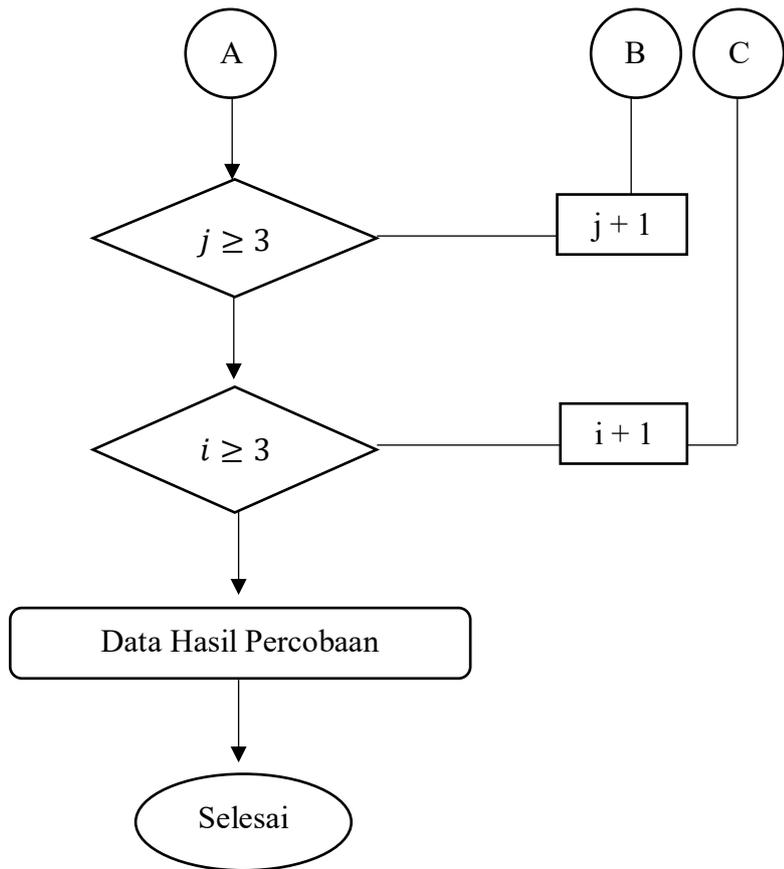
Tabel 3. 6 Tabel variasi penelitian

Massa		Amplitudo		Jumlah Piezoelektrik	
Variabel	Nilai	Variabel	Nilai	Variabel	Nilai
M_{b1}	5 kg	A_1	0.5 m	n_1	8
M_{b2}	10 kg	A_2	1.00 m	n_2	10
M_{b3}	15 kg	A_3	1.50 m	n_3	12
				n_4	15

3.5 Tahapan Simulasi

Dalam pelaksanaan simulasi agar dapat berjalan secara sistematis, dibutuhkan penyusunan tahapan yang sesuai. Tahapan simulasi ditunjukkan pada gambar





Gambar 3. 11 Flowchart Simulasi

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisa Kekuatan Statis

Untuk mengetahui kekuatan piezoelektrik dalam menerima beban berdefleksi, dilakukan analisa menggunakan *software Ansys Workbench static structural* dengan langkah awal melakukan *input engineering data* yang ditunjukkan pada tabel 4.1. Kemudian melakukan *input geometry* piezoelektrik yang digunakan sebagaimana ditunjukkan pada gambar 4.1. Langkah berikutnya adalah melakukan proses *meshing*, penentuan *fixed support*, dan input gaya terhadap komponen piezoelektrik. Kemudian simulasi dilakukan dengan *output total deformation* pada piezoelektrik searah sumbu-y positif.

4.1.1 Engineering Data

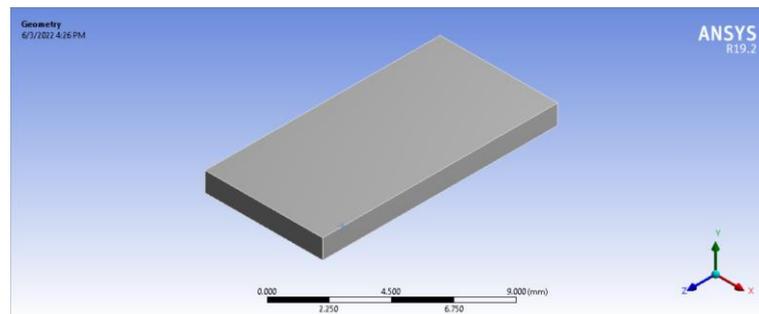
Berikut tabel 4.1 menunjukkan properti mekanis yang digunakan pada *engineering data*. Properti mekanis piezoelektrik diperoleh berdasarkan parameter piezoelektrik yang terdapat pada tabel 3.2.

Tabel 4. 1 Tabel Properti Mekanis Piezoelektrik

<i>Mechanical Properties</i>	
<i>Material</i>	Piezoelectric
<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

4.1.2 Geometry

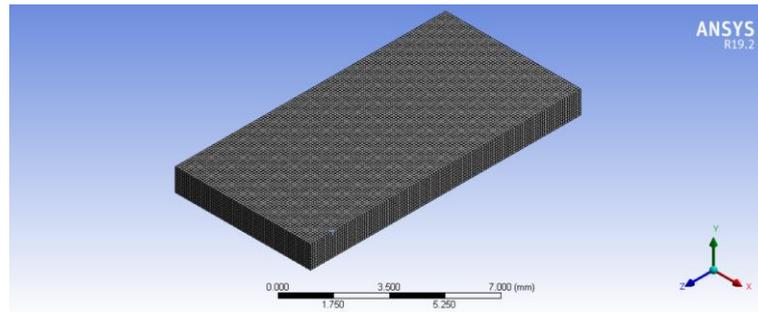
Geometri piezoelektrik pada gambar 4.1 didesain berdasarkan parameter dari piezoelektrik jenis *piezoelectric minisense 100 vibrator* yang terdapat pada tabel 3.2.



Gambar 4. 1 Geometri Piezoelektrik

4.1.3 Meshing

Proses *meshing* merupakan sebuah metode *finite element* sebagai pendekatan terhadap geometri asli dari benda yang akan diuji. Proses *meshing* dilakukan dengan menentukan *body sizing* dari geometri piezoelektrik. Penentuan *body sizing* berpengaruh pada ketelitian proses analisa pada geometri, dimana semakin kecil ukuran *body sizing* yang digunakan maka analisa terhadap geometri akan semakin teliti. Hasil proses *meshing* ditunjukkan pada gambar 4.2 dan kualitas *meshing* ditunjukkan oleh gambar 4.3.



Gambar 4. 2 Mesh

Details of "Mesh"	
Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
Error Limits	Standard Mechanical
<input type="checkbox"/> Target Quality	Default (0.050000)
Smoothing	Medium
Mesh Metric	Orthogonal Quality
<input type="checkbox"/> Min	1.
<input type="checkbox"/> Max	1.
<input type="checkbox"/> Average	1.
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0.

(a)

Mesh Quality Legend					
Unacceptable	Bad	Acceptable	Good	Very good	Excellent
0-0.001	0.001-0.14	0.15-0.20	0.20-0.69	0.70-0.95	0.95-1.00

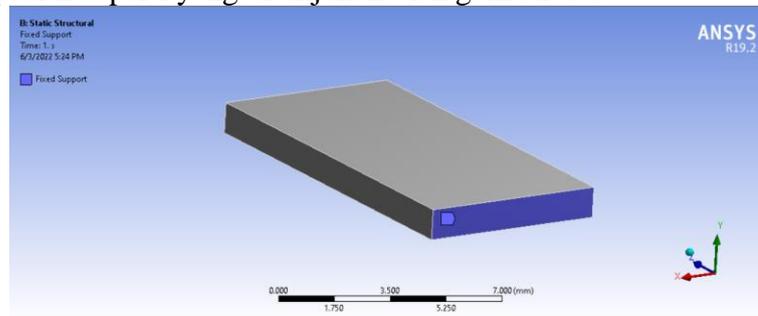
(b)

Gambar 4. 3 (a) *Mesh Quality* (b) Parameter Kualitas *Orthogonal Quality*

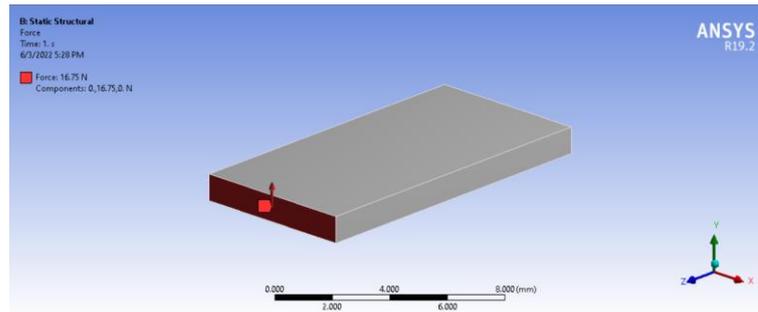
Berdasarkan gambar 4.3 (a) dan (b) dapat diketahui bahwa kualitas *mesh* dari simulasi piezoelektrik berada pada angka 1. Angka 1 pada kualitas *mesh* tergolong pada region *excellent* berdasarkan parameter kualitas dari *orthogonal quality*. Berdasarkan hal tersebut dapat dikatakan bahwa kualitas *meshing* sudah baik dan memenuhi syarat untuk hasil simulasi dapat diterima.

4.1.4 Setup *Fixed Position* dan *Force*

Proses ini menentukan posisi *fixed support* dan letak gaya yang bekerja pada piezoelektrik. *Fixed support* terletak pada bagian yang ditunjukkan oleh gambar 4.4 dan gaya yang bekerja searah sumbu-y positif seperti yang ditunjukkan oleh gambar 4.5.



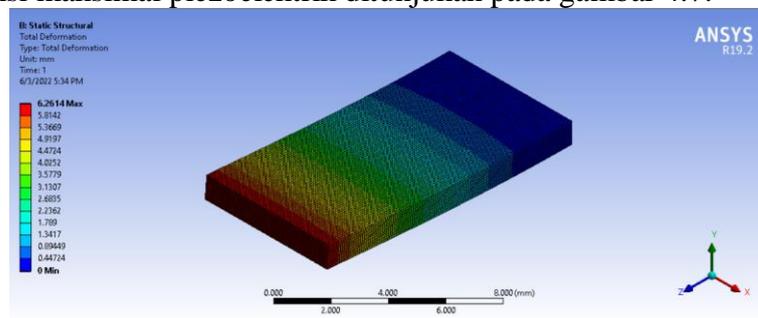
Gambar 4. 4 Posisi *Fixed Support*



Gambar 4. 5 Posisi Gaya yang Bekerja

4.1.5 Solution

Hasil dari proses analisa *static structural* piezoelektrik ditunjukkan pada gambar 4.6. Hasil tersebut menunjukkan defleksi maksimal dari piezoelektrik dengan pembebanan gaya yang telah diberikan. Defleksi maksimal piezoelektrik ditunjukkan pada gambar 4.7.



Gambar 4. 6 Hasil Analisa *Static Structural*

Tabular Data			
Time [s]	<input checked="" type="checkbox"/> Minimum [mm]	<input checked="" type="checkbox"/> Maximum [mm]	<input checked="" type="checkbox"/> Average [mm]
1	0.	6.2614	2.3404

Gambar 4. 7 Besar Defleksi Piezoelektrik

Berdasarkan gambar 4.7 diketahui defleksi maksimal dari piezoelektrik jenis *minisense 100 vibrator* adalah 6.2614 mm. Dari hasil pengujian tersebut dapat dikatakan piezoelektrik mampu menahan beban maksimal yang diberikan dari rangkaian model sistem. Dimana menurut katalog piezoelektrik dan penelitian terdahulu, defleksi maksimal dari piezoelektrik jenis *minisense 100 vibrator* sebesar 6 mm.

4.1.6 Uji Konvergensi

Uji konvergensi dilakukan untuk mengetahui apakah proses *meshing* yang dilakukan sudah memenuhi kriteria dengan nilai error dibawah 5%. Tabel 4.2 menunjukkan hasil uji konvergensi yang menunjukkan nilai element size 0.25 sebagai nilai yang valid dengan error dibawah 5%.

Tabel 4. 2 Hasil Uji Konvergensi Mesh

Unit	Mesh Element Size (mm)	Maximum Deformation (mm)	Maximum Deformation Error	Percentage
DP0	2	6.1084	0	0
DP1	1.5	6.1495	0.00668347	0.66834702
DP2	1	6.1895	0.006462558	0.646255756
DP3	0.5	6.2484	0.009426413	0.942641316
DP4	0.25	6.2579	0.001518081	0.151808115

4.2 Simulasi dan Analisa Model Sistem

Simulasi model sistem menggunakan *software Matlab R2021b* dengan memodelkan persamaan gerak yang diperoleh dari *free body diagram* dan *steady state equation*. Simulasi dilakukan dengan memodelkan persamaan gerak dari *steady state equation* menjadi *block diagram*. Hasil simulasi akan menunjukkan hasil berupa respon defleksi piezoelektrik, dan besar voltase yang dihasilkan berdasarkan variasi pada parameter.

Pada sub-bab ini akan dibahas mengenai pengaruh dari variasi berupa massa, amplitudo gelombang, dan jumlah piezoelektrik yang digunakan terhadap respon defleksi piezoelektrik serta voltase bangkitan. Data yang ditampilkan pada pembahasan menggunakan sampel variasi yang ditunjukkan pada tabel 4.3.

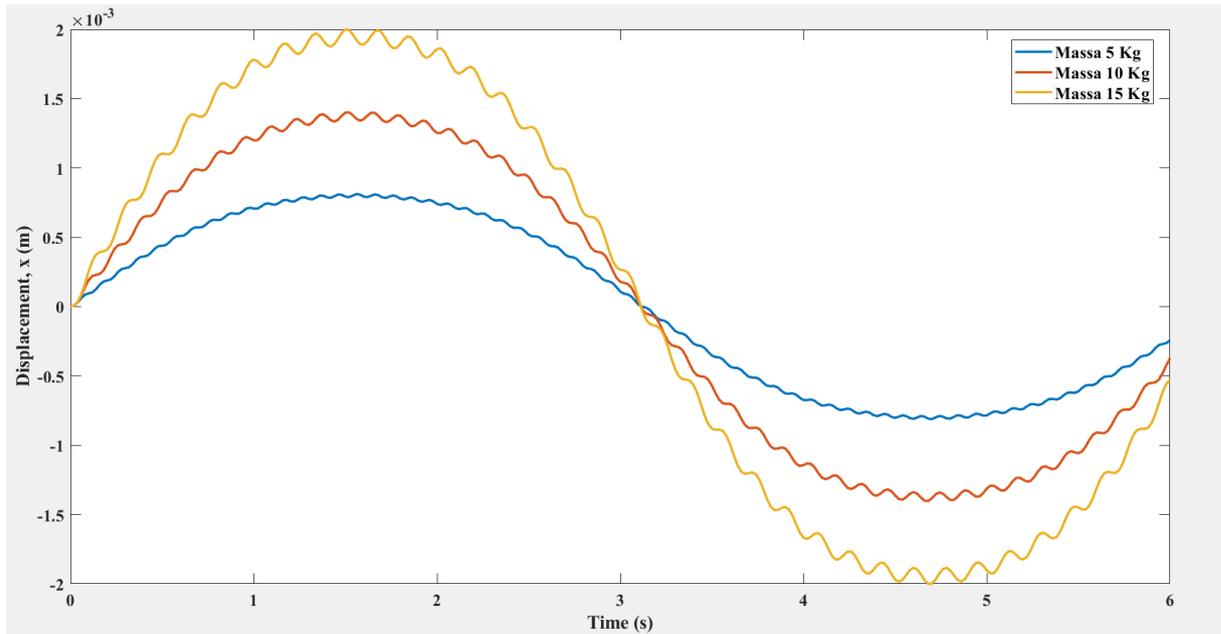
Tabel 4. 3 Sampel variasi yang digunakan pada pembahasan

Variasi		
Massa	Amplitudo	Jumlah Piezoelektrik
5	1	10
10		
15		
10	0.5	12
	1	
	1.5	
15	1.5	8
		10
		12

4.2.1 Respon Defleksi Piezoelektrik

4.2.1.1 Respon Defleksi Piezoelektrik Terhadap Variasi Massa

Gambar 4.8 merupakan grafik yang diperoleh dari plot hasil simulasi pada *matlab simulink*. Grafik menunjukkan respon defleksi piezoelektrik terhadap variasi massa sebesar 5 kg, 10 kg dan 15 kg dengan nilai amplitudo tetap sebesar 1 m dan variasi jumlah piezoelektrik tetap sebanyak 10 buah. Tren grafik menunjukkan bahwa penggunaan massa yang bervariasi memberikan respon yang berbeda pada defleksi piezoelektrik. Dimana semakin besar massa beban yang digunakan dan parameter lain yang digunakan sama, maka respon defleksi piezoelektrik menjadi semakin besar.



Gambar 4. 8 Grafik Defleksi Piezoelektrik Terhadap Variasi Massa

Tabel 4. 4 Data Statistik Defleksi Piezoelektrik Terhadap Massa

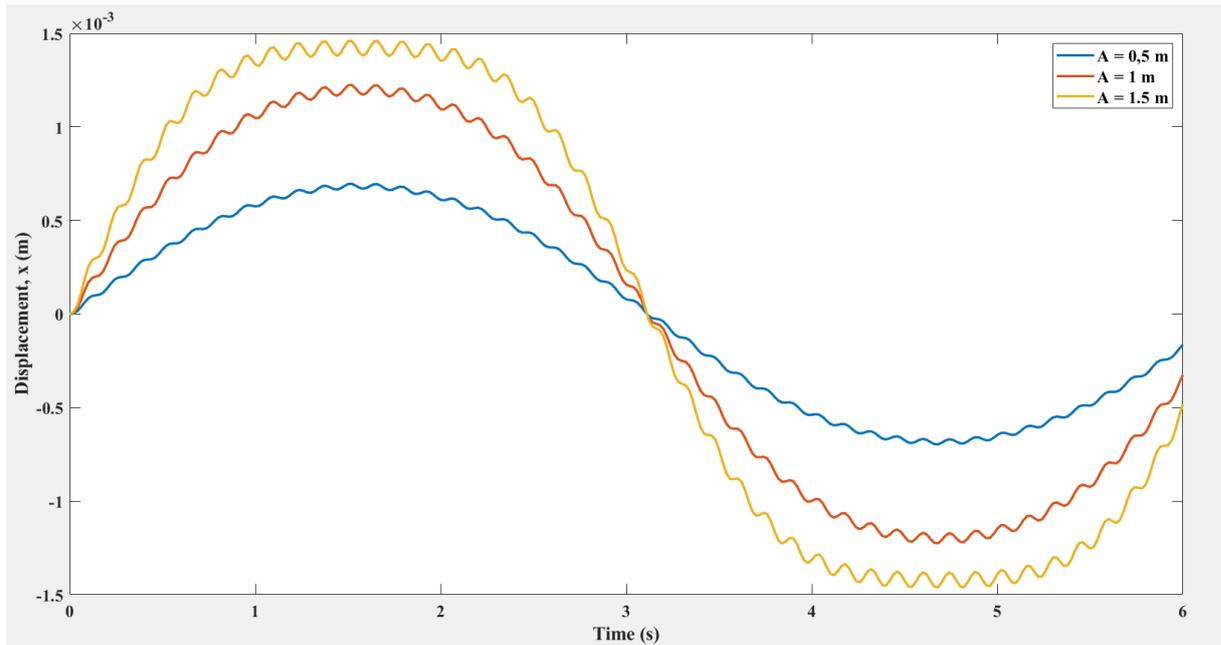
Data Statistik Defleksi Variasi Massa (m)		
Massa (kg)	Min	Max
5	-0.0008118	0.0008118
10	-0.001402	0.001402
15	-0.002	0.001999

Pada tabel 4.4 menunjukkan data statistik dari plot simulasi pada *Matlab*. Diketahui defleksi maksimal yang dihasilkan dari tiap variasi massa beban yang digunakan. Pada massa sebesar 5 kg defleksi maksimal piezoelektrik sebesar 0.0008118 m, pada massa sebesar 10 kg defleksi maksimal piezoelektrik sebesar 0.001402 m, dan pada massa sebesar 15 kg defleksi maksimal piezoelektrik 0.001999 m.

Dari data pada grafik dan tabel dapat diketahui bahwa besar massa beban memberikan pengaruh pada besar defleksi piezoelektrik yang semakin besar juga. Penemuan ini sesuai dengan persamaan 3.10 dimana massa berbanding lurus dengan besar gaya yang bekerja pada sistem. Dalam hal ini massa dari beban akan memberikan gaya dan menyebabkan defleksi pada rangkaian piezoelektrik.

4.2.1.2 Respon Defleksi Piezoelektrik Terhadap Variasi Amplitudo

Berikutnya adalah hasil respon defleksi piezoelektrik terhadap perubahan amplitudo gelombang. Pada gambar 4.9 ditunjukkan grafik respon defleksi piezoelektrik terhadap variasi amplitudo 0.5 m, 1 m, dan 1.5 m dengan penggunaan massa sebesar 10 kg dan variasi jumlah piezoelektrik sebanyak 12 buah. Grafik tersebut menunjukkan bahwa setiap kenaikan amplitudo gelombang namun dengan variasi parameter lainnya tetap, menghasilkan respon defleksi piezoelektrik yang berbeda. Dengan peningkatan amplitudo gelombang maka defleksi piezoelektrik akan semakin besar.



Gambar 4. 9 Grafik Defleksi Piezoelektrik Terhadap Variasi Amplitudo

Tabel 4. 5 Data Statistik Defleksi Piezoelektrik Terhadap Amplitudo

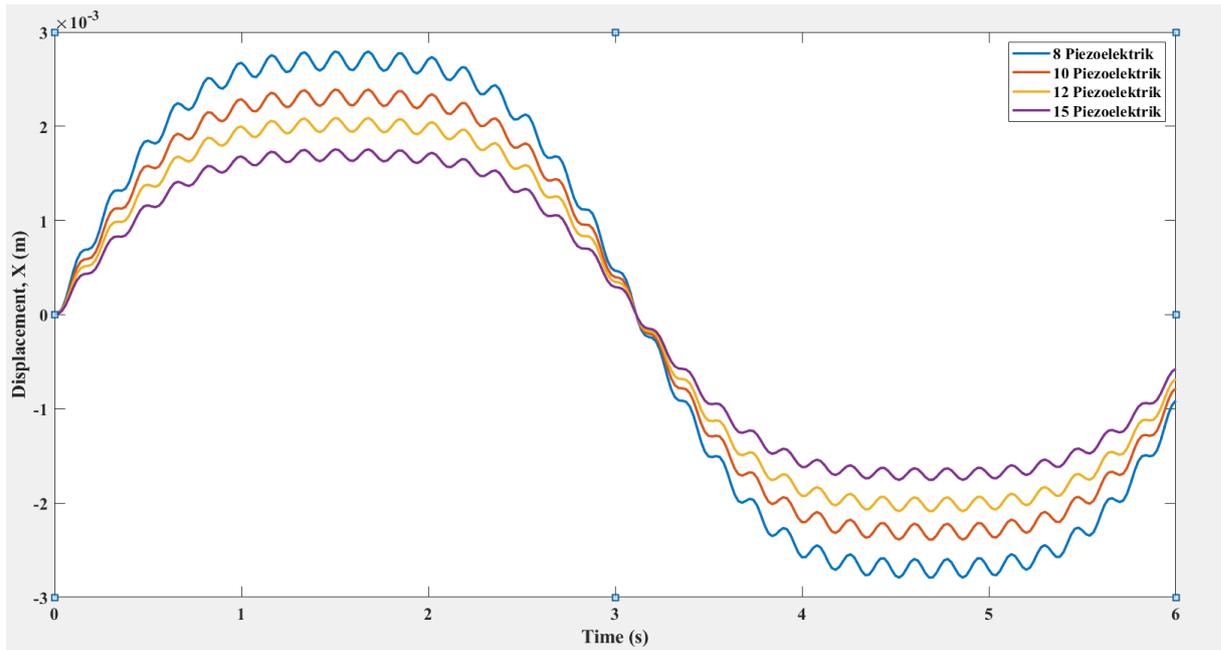
Data Statistik Defleksi Variasi Amplitudo (m)		
Amplitudo (m)	Min	Max
0.5	-0.0006966	0.0006958
1	-0.001226	0.001224
1.5	-0.001461	0.00146

Pada tabel 4.5 diketahui defleksi maksimal yang dihasilkan dari tiap variasi amplitudo yang digunakan. Pada amplitudo sebesar 0.5 m defleksi maksimal piezoelektrik sebesar 0.0006958 m, pada amplitudo sebesar 1 m defleksi maksimal piezoelektrik sebesar 0.001224 m, dan pada amplitudo sebesar 1.5 m defleksi maksimal piezoelektrik sebesar 0.00146 m.

Berdasarkan pada data grafik dan tabel data statistik diketahui peningkatan defleksi pada setiap peningkatan variasi nilai amplitudo. Nilai amplitudo berpengaruh pada besar kemiringan model sistem akibat gelombang laut. Hal tersebut sesuai dengan persamaan 3.11. dimana nilai amplitudo gelombang berbanding lurus dengan semakin besarnya nilai θ .

4.2.1.3 Respon Defleksi Piezoelektrik Terhadap Variasi Jumlah Piezoelektrik

Kemudian adalah respon defleksi piezoelektrik terhadap variasi jumlah piezoelektrik yang digunakan. Pada gambar 4.10 ditunjukkan grafik respon defleksi terhadap variasi jumlah piezoelektrik. Dimana variasi piezoelektrik yang digunakan adalah 8, 10, dan 12 piezoelektrik namun dengan parameter tetap massa sebesar 15 kg dan amplitudo 1.5. Berdasarkan gambar 4.10 diketahui semakin banyak jumlah piezoelektrik yang digunakan namun parameter massa dan amplitudo tetap maka defleksi piezoelektrik menjadi semakin kecil.



Gambar 4. 10 Grafik Defleksi Piezoelektrik Terhadap Variasi Jumlah Piezoelektrik

Tabel 4. 6 Data Statistik Defleksi Piezoelektrik Terhadap Jumlah Piezoelektrik

Data Statistik Defleksi Variasi Jumlah Piezoelektrik (m)		
Piezoelektrik	Min	Max
8	-0.002791	0.002794
10	-0.002388	0.00239
12	-0.002086	0.002088
15	-0.001752	0.001755

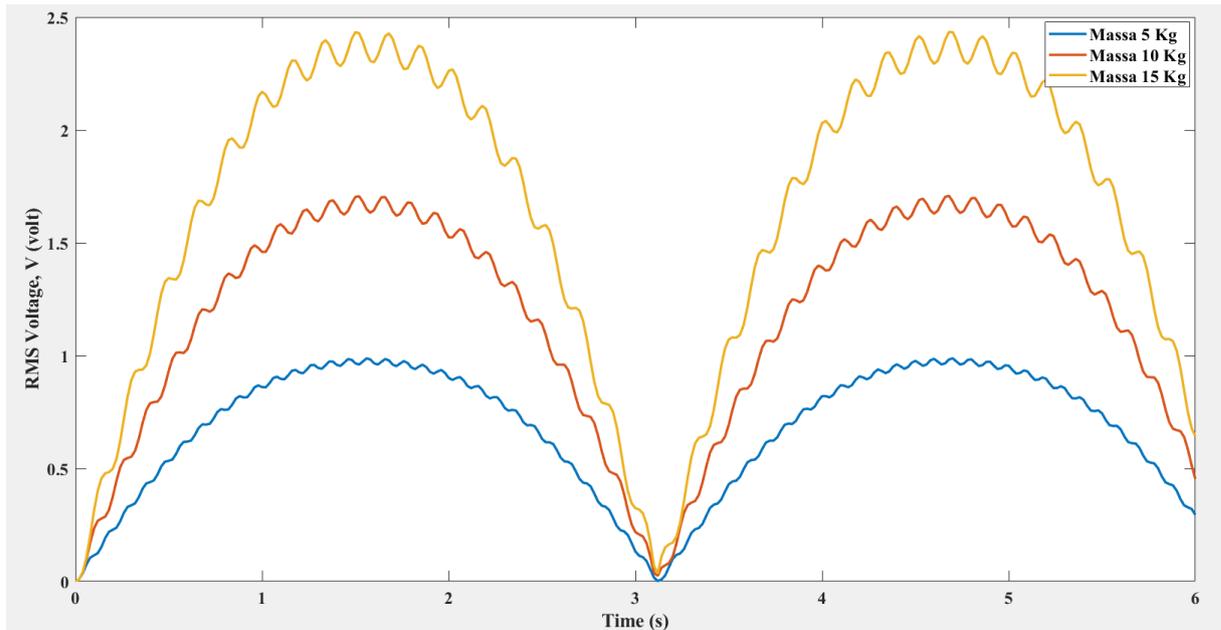
Pada tabel 4.6 defleksi maksimal yang dihasilkan dari tiap variasi jumlah piezoelektrik yang digunakan. Pada jumlah piezoelektrik sebanyak 8 buah maksimal defleksi sebesar 0.002794 m, pada jumlah piezoelektrik sebanyak 10 buah maksimal defleksi sebesar 0.00239 m, pada jumlah piezoelektrik sebanyak 12 buah maksimal defleksi sebesar 0.002088 m, dan pada jumlah piezoelektrik sebanyak 15 buah maksimal defleksi sebesar 0.001755 m.

Berdasarkan data pada grafik serta tabel dapat diketahui bahwa penambahan jumlah piezoelektrik mengakibatkan penurunan terhadap defleksi piezoelektrik. Hal tersebut karena nilai konstanta kekakuan ekuivalen piezoelektrik akan bertambah tinggi dan mengakibatkan kekakuan dari rangkaian piezoelektrik semakin besar. Semakin tinggi nilai kekakuan dari rangkaian piezoelektrik menyebabkan rangkaian semakin kaku dan sulit untuk berdefleksi.

4.2.2 Respon Voltase Bangkitan Piezoelektrik

4.2.2.1 Respon Voltase Terhadap Variasi Massa

Gambar 4.11 merupakan grafik yang diperoleh dari plot hasil simulasi pada *matlab simulink*. Grafik menunjukkan respon voltase bangkitan piezoelektrik terhadap variasi massa beban yang digunakan. Variasi massa yang digunakan sebesar 5 kg, 10 kg, dan 15 kg dengan parameter variasi amplitudo tetap sebesar 1 m dan jumlah piezoelektrik tetap sebanyak 12 buah. Grafik tersebut menunjukkan bahwa peningkatan massa beban menyebabkan voltase bangkitan yang semakin besar.



Gambar 4. 11 Grafik Voltase Terhadap Variasi Massa

Tabel 4. 7 Data Statistik Respon Voltase Terhadap Massa

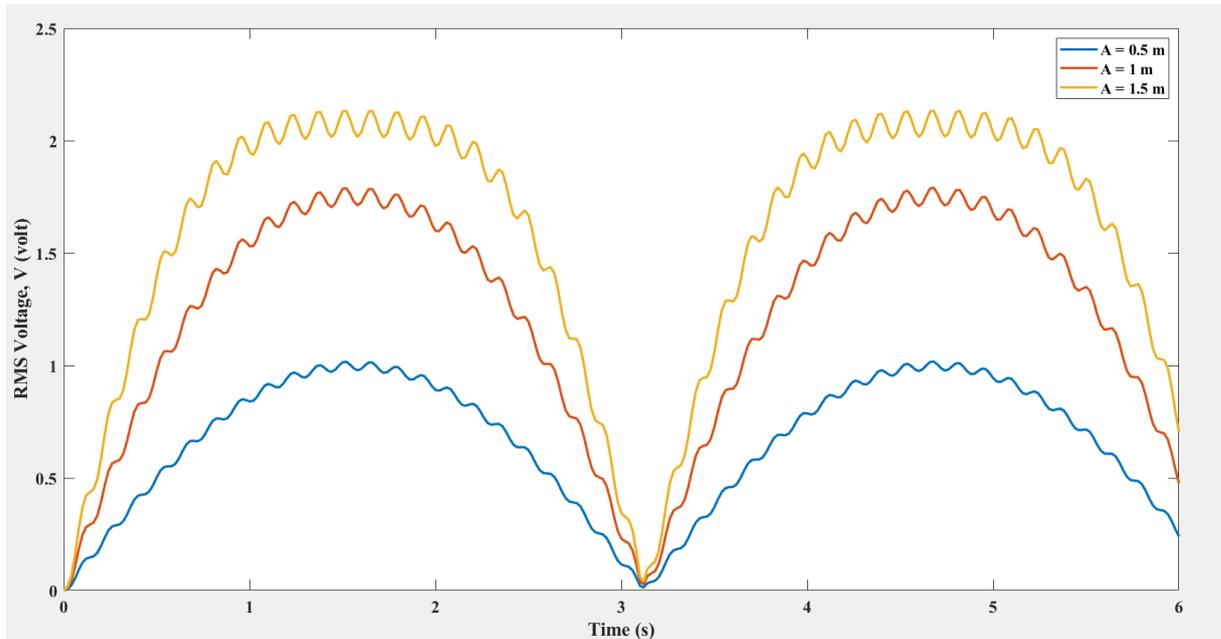
Data Statistik Respon Voltase Variasi Massa		
Massa (Kg)	Min	Max
5	0	0.9882
10	0	1.708
15	0	2.434

Pada tabel 4.7 diketahui maksimal voltase yang dihasilkan dari variasi serta parameter yang digunakan. Pada variasi massa 5 kg diketahui maksimal voltase yang dihasilkan sebesar 0.9882 volt, pada variasi massa 10 kg diketahui maksimal voltase yang dihasilkan sebesar 1.708 volt, dan pada variasi massa 15 kg diketahui maksimal voltase yang dihasilkan sebesar 2.434 volt.

Peningkatan massa yang digunakan sebagaimana disebutkan pada pembahasan sub-bab 4.2.1.1 berakibat pada peningkatan defleksi piezoelektrik, dan semakin besar defleksi piezoelektrik akan semakin besar juga voltase bangkitan dari rangkaian piezoelektrik. Hal tersebut ditunjukkan oleh gambar 4.11 yang menunjukkan tren kenaikan *RMS voltage* pada variasi massa yang digunakan.

4.2.2.2 Respon Voltase Terhadap Variasi Amplitudo

Kemudian grafik yang ditunjukkan oleh gambar 4.12 merupakan grafik respon voltase bangkitan piezoelektrik terhadap variasi amplitudo gelombang. Variasi amplitudo gelombang yang digunakan adalah 0.5 m, 1 m dan 1.5 m dengan parameter lainnya berupa massa tetap sebesar 10 kg dan jumlah piezoelektrik sebanyak 12 buah. Grafik menunjukkan dengan peningkatan amplitudo gelombang maka voltase bangkitan piezoelektrik menjadi semakin besar.



Gambar 4. 12 Grafik Voltase Terhadap Variasi Amplitudo

Tabel 4. 8 Data Statistik Respon Voltase Terhadap Amplitudo

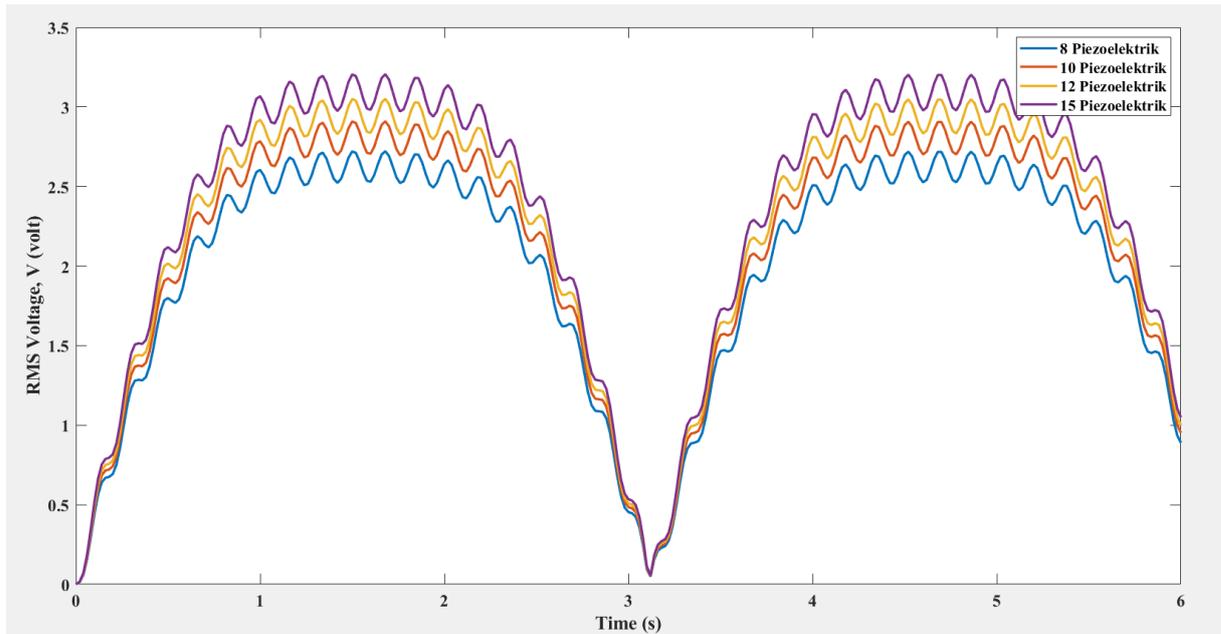
Data Statistik Respon Voltase Variasi Amplitudo		
Amplitudo (m)	Min	Max
0.5	0	1.018
1	0	1.79
1.5	0	2.134

Pada tabel 4.8 diketahui maksimal voltase yang dihasilkan dari variasi serta parameter yang digunakan. Pada variasi amplitudo 0.5 m diketahui maksimal voltase yang dihasilkan sebesar 1.018 volt, pada variasi amplitudo 1 m diketahui maksimal voltase yang dihasilkan sebesar 1.79 volt, dan pada variasi amplitudo 1.5 m diketahui maksimal voltase yang dihasilkan sebesar 2.134 volt.

Peningkatan amplitudo gelombang yang digunakan sebagaimana disebutkan pada pembahasan sub-bab 4.2.1.2 berakibat pada peningkatan defleksi piezoelektrik, dan semakin besar defleksi piezoelektrik akan semakin besar juga voltase bangkitan dari rangkaian piezoelektrik. Hal tersebut ditunjukkan oleh gambar 4.12 yang menunjukkan tren kenaikan *RMS voltage* pada variasi amplitudo yang digunakan.

4.2.2.3 Respon Voltase Terhadap Variasi Jumlah Piezoelektrik

Kemudian respon voltase bangkitan piezoelektrik terhadap variasi jumlah piezoelektrik. Grafik respon voltase terhadap variasi jumlah piezoelektrik ditunjukkan pada gambar 4.13 dimana variasi jumlah piezoelektrik yang digunakan adalah 8, 10, 12 dan 15 buah dengan parameter massa beban tetap sebesar 15 kg dan amplitudo gelombang 1.5 m. Berdasarkan grafik diketahui bahwa penambahan jumlah piezoelektrik menghasilkan voltase bangkitan yang semakin besar jika parameter lainnya yang digunakan adalah sama.



Gambar 4. 13 Grafik Voltase Terhadap Variasi Jumlah Piezoelektrik

Tabel 4. 9 Data Statistik Respon Voltase Terhadap Jumlah Piezoelektrik

Data Statistik Respon Voltase Variasi Jumlah Piezoelektrik		
Piezoelektrik	Min	Max
8	0	2.721
10	0	2.909
12	0	3.05
15	0	3.205

Pada tabel 4.9 diketahui maksimal voltase yang dihasilkan dari variasi serta parameter yang digunakan. Pada variasi jumlah piezoelektrik 8 buah diketahui maksimal voltase yang dihasilkan sebesar 2.721 volt, pada variasi jumlah piezoelektrik 10 buah diketahui maksimal voltase yang dihasilkan sebesar 2.909 volt, pada variasi jumlah piezoelektrik 12 buah diketahui maksimal voltase yang dihasilkan sebesar 3.05 volt, dan pada variasi jumlah piezoelektrik 15 buah diketahui maksimal voltase yang dihasilkan sebesar 3.205 volt.

Penambahan jumlah piezoelektrik menurunkan defleksi piezoelektrik karena kekakuan yang bertambah sesuai yang disebutkan pada sub-bab 4.2.1.3 namun semakin banyak piezoelektrik yang digunakan maka piezoelektrik akan menghasilkan voltase semakin besar karena setiap mekanisme piezoelektrik yang digunakan menghasilkan voltase.

4.3 Hasil Keseluruhan Simulasi

Dengan melakukan simulasi pada *software Matlab R2021b* diperoleh hasil berupa *RMS Voltage*, defleksi piezoelektrik, daya yang dibangkitkan, serta kecepatan dan percepatan massa utama ditunjukkan pada tabel 4.10, 4.11 dan 4.12.

Tabel 4. 10 Tabel data voltase RMS dan defleksi piezoelektrik yang dihasilkan dengan variasi massa, amplitudo, dan jumlah piezoelektrik

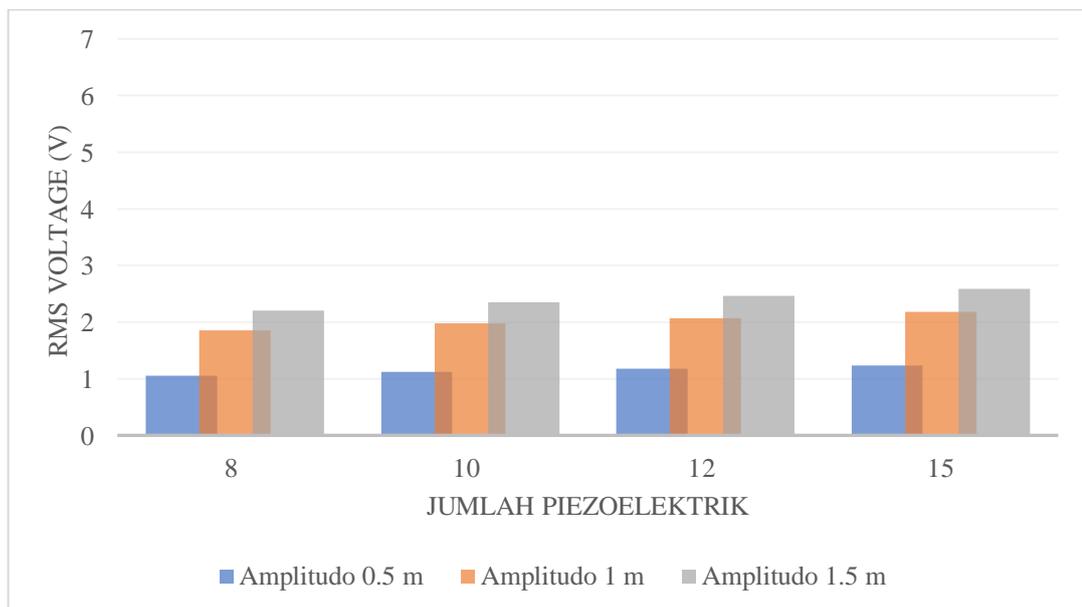
No	Variasi				
	Massa (Kg)	Amplitudo (m)	Jumlah Piezoelektrik	RMS Voltage	Defleksi
1	5	0.5	8	1.0514	0.0005399
2			10	1.1242	0.0004618
3			12	1.1786	0.0004034
4			15	1.2386	0.0003392
5		1	8	1.8484	0.0009491
6			10	1.9764	0.0008118
7			12	2.072	0.0007086
8			15	2.178	0.0005962
9		1.5	8	2.198	0.001129
10			10	2.35	0.0009657
11			12	2.464	0.0008429
12			15	2.59	0.0007092
13	10	0.5	8	1.8154	0.000931
14			10	1.941	0.0007964
15			12	2.036	0.0006958
16			15	2.138	0.0005849
17		1	8	3.194	0.001638
18			10	3.416	0.001402
19			12	3.58	0.001224
20			15	3.762	0.001029
21		1.5	8	3.808	0.001954
22			10	4.07	0.001671
23			12	4.268	0.00146
24			15	4.484	0.001227
25	15	0.5	8	2.586	0.001327
26			10	2.764	0.001135
27			12	2.898	0.0009905
28			15	3.046	0.0008334
29		1	8	4.552	0.002337
30			10	4.868	0.001999
31			12	5.104	0.001745
32			15	5.364	0.001468
33		1.5	8	5.442	0.002794
34			10	5.818	0.00239
35			12	6.1	0.002088
36			15	6.41	0.001755

Tabel 4.10 menunjukkan nilai *RMS voltage* dan defleksi piezoelektrik dari setiap variasi yang digunakan pada *software Matlab R2021b*. Pada setiap variasi yang digunakan diperoleh hasil yang berbeda. Nilai minimal yang dihasilkan sebesar 1.0514-volt dengan parameter variasi massa 5 kg, amplitudo 0.5 m dan jumlah piezoelektrik 8 buah. Sedangkan nilai maksimal yang dihasilkan sebesar 6.41-volt dengan parameter variasi massa 15 kg, amplitudo 1.5 m dan jumlah piezoelektrik 15 buah pada rangkaian.

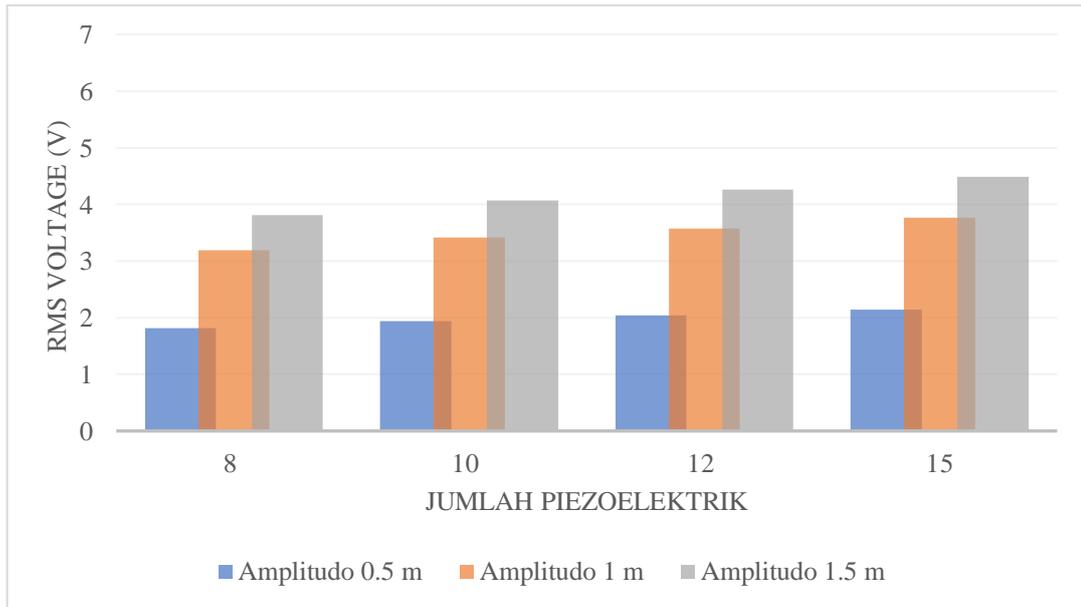
Gambar 4.14 menunjukkan perbandingan voltase bangkitan dengan setiap variasi pada massa beban 5kg, 10 kg, dan 15 kg. Dapat diketahui berdasarkan grafik bahwa penambahan jumlah piezoelektrik menyebabkan voltase bangkitan yang dihasilkan meningkat meskipun parameter massa yang digunakan sama. Kemudian peningkatan voltase bangkitan juga terjadi pada setiap peningkatan amplitudo gelombang jika massa yang digunakan sama.

Peningkatan jumlah piezoelektrik yang digunakan memberikan pengaruh pada ikut meningkatnya juga voltase bangkitan, namun defleksi dari piezoelektrik justru menurun. Penurunan defleksi terjadi karena nilai kekakuan ekuivalen piezoelektrik meningkat dan menyebabkan rangkaian sulit berdefleksi. Tetapi tetap terjadi peningkatan voltase bangkitan karena jumlah piezoelektrik yang menghasilkan voltase menjadi semakin banyak.

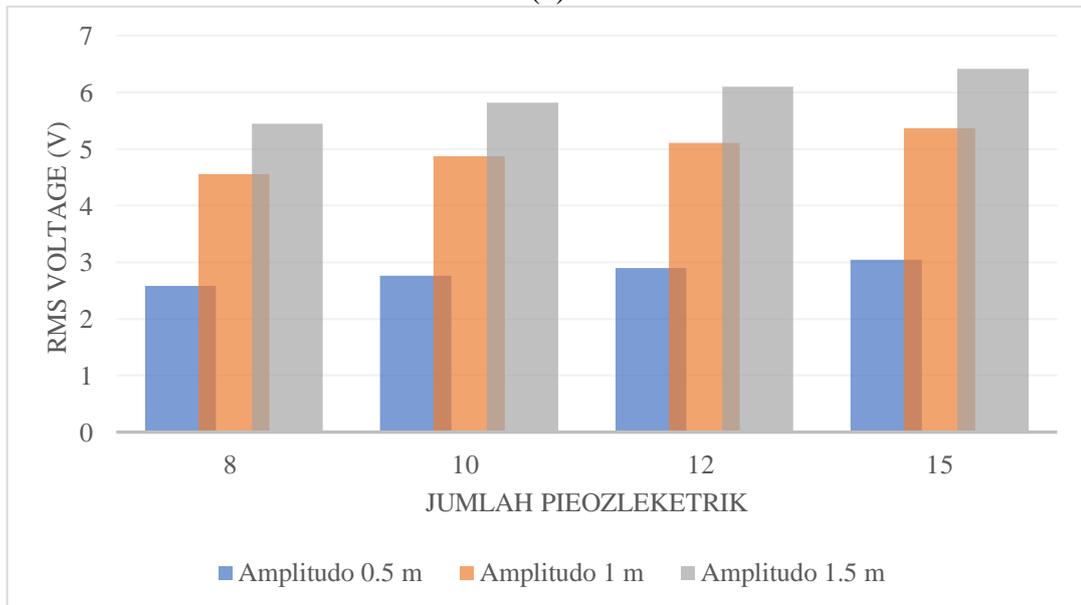
Meskipun jumlah piezoelektrik menyebabkan peningkatan terhadap voltase bangkitan, peningkatan yang signifikan hanya terjadi pada jumlah piezoelektrik 8 ke jumlah piezoelektrik 10 buah. Pada peningkatan dari 10 menjadi 12 tidak terjadi peningkatan voltase bangkitan yang signifikan, pada peningkatan 12 menjadi 15 juga tidak terjadi peningkatan yang signifikan. Hal tersebut karena nilai konstanta kekakuan ekuivalen piezoelektrik menjadi semakin besar, dan defleksi piezoelektrik tidak bertambah secara signifikan juga.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4. 14 Perbandingan Voltase Bangkitan Variasi Massa (a) Massa 5 Kg, (b) Massa 10 Kg, (c) Massa 15 Kg

Tabel 4.11 menunjukkan besar daya bangkitan rangkaian piezoelektrik terhadap setiap variasi yang digunakan. Nilai daya diperoleh dengan mensimulasikan rangkaian pada *software matlab simulink* dan didapatkan hasil sebagai berikut:

Tabel 4. 11 Tabel Daya Bangkitan Piezoelektrik

No	Variasi			
	Massa (Kg)	Amplitudo (m)	Jumlah Piezoelektrik	Daya Bangkitan (watt)
1	5	0.5	8	0.0000302
2			10	0.00002748
3			12	0.00002508
4			15	0.00002194
5		1	8	0.0001184
6			10	0.00010784
7			12	0.00009842
8			15	0.0000864
9		1.5	8	0.0002584
10			10	0.000235
11			12	0.0002144
12			15	0.00018802
13	10	0.5	8	0.00003962
14			10	0.00003636
15			12	0.0000334
16			15	0.00002942
17		1	8	0.00015344
18			10	0.00014086
19			12	0.00012938
20			15	0.00011398
21		1.5	8	0.0003268
22			10	0.0003
23			12	0.0002756
24			15	0.0002422
25	15	0.5	8	0.00015764
26			10	0.00014758
27			12	0.0001375
28			15	0.00012032
29		1	8	0.0005452
30			10	0.0005122
31			12	0.0004782
32			15	0.0004192
33		1.5	8	0.0009148
34			10	0.0008666
35			12	0.000814
36			15	0.0006954

Berdasarkan pada data yang ditampilkan pada tabel 4.11 diketahui bahwa peningkatan massa beban dengan nilai variasi amplitudo dan jumlah piezoelektrik tetap memberikan pengaruh pada semakin besar daya yang dibangkitkan oleh rangkaian piezoelektrik. Kemudian pada peningkatan amplitudo gelombang dengan variasi massa dan jumlah piezoelektrik tetap menunjukkan peningkatan yang cukup signifikan pada daya yang dibangkitkan. Tetapi pada penambahan jumlah piezoelektrik dengan variasi massa dan amplitudo tetap memberikan pengaruh sebaliknya yaitu dengan terjadinya penurunan pada daya yang dibangkitkan.

Seperti halnya pengaruh massa dan amplitudo terhadap voltase, variasi massa dan amplitudo memberikan pengaruh pada peningkatan daya bangkitan dari rangkaian piezoelektrik. Karena dengan besarnya massa dan amplitudo maka besar gaya yang menggerakkan rangkaian massa-pegas-piezoelektrik menjadi semakin besar juga. Namun penambahan jumlah piezoelektrik pada rangkaian menyebabkan rangkaian piezoelektrik tidak terdefleksi dengan baik karena nilai kekakuan ekuivalen yang semakin meningkat sehingga daya yang dibangkitkan menjadi menurun.

Tabel 4. 12 Respon Kecepatan dan Percepatan Massa Utama

No	Variasi				
	Massa (Kg)	Amplitudo (m)	Jumlah Piezoelektrik	Kecepatan (m/s)	Percepatan (m/s^2)
1	5	0.5	8	0.002412	0.001661
2			10	0.002412	0.00166
3			12	0.002412	0.00166
4			15	0.002414	0.001844
5		1	8	0.004774	0.003725
6			10	0.004774	0.003725
7			12	0.004774	0.003726
8			15	0.004777	0.004091
9		1.5	8	0.007037	0.006572
10			10	0.007037	0.006578
11			12	0.007037	0.006581
12			15	0.007041	0.007128
13	10	0.5	8	0.001959	0.1078
14			10	0.001959	0.1078
15			12	0.001969	0.1078
16			15	0.00196	0.1078
17		1	8	0.003817	0.2149
18			10	0.003817	0.2149
19			12	0.003817	0.2149
20			15	0.003818	0.2149
21		1.5	8	0.005476	0.3205
22			10	0.005476	0.3205
23			12	0.005476	0.3205
24			15	0.005478	0.3206
25	15	0.5	8	0.0002478	0.05848
26			10	0.0002478	0.05848

27			12	0.0002478	0.05848
28			15	0.0002477	0.05849
29		1	8	0.0003421	0.1158
30			10	0.0003421	0.1158
31			12	0.0003421	0.1158
32			15	0.0003418	0.1158
33		1.5	8	0.0001323	0.1709
34			10	0.0001323	0.1709
35			12	0.0001323	0.1709
36			15	0.0001319	0.171

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan dan saran yang dapat diberikan terkait tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Rancangan model *floating energy harvester* telah dibuat menggunakan *software solidworks 2020*. Hasil yang ditunjukkan pada proses simulasi adalah besar defleksi dan voltase bangkitan yang terjadi pada rangkaian piezoelektrik. Besar defleksi dan voltase dipengaruhi oleh parameter berupa massa, amplitudo gelombang, dan jumlah piezoelektrik yang digunakan.
2. Massa beban yang digunakan memberikan pengaruh pada besar defleksi serta besar voltase yang dihasilkan. Dimana semakin besar massa beban yang digunakan maka defleksi yang terjadi dan voltase bangkitan semakin besar. Dengan variasi massa 15 kg dengan parameter konstan amplitudo 1.5 m dan jumlah piezoelektrik 8 buah diperoleh daya maksimal sebesar 0.0009148 watt.
3. Amplitudo gelombang memberikan pengaruh pada besar defleksi dan voltase bangkitan. Dimana semakin besar amplitudo gelombang maka kemiringan model sistem akan semakin besar. kemiringan model sistem berpengaruh pada semakin besar gaya potensial massa beban. Dengan variasi amplitudo 1.5 m dengan parameter konstan massa 15 kg dan jumlah rangkaian piezoelektrik 15 buah diperoleh daya maksimal sebesar 0.0009148 watt.
4. Variasi jumlah piezoelektrik memberikan pengaruh pada besar defleksi dan voltase bangkitan. Dimana semakin banyak jumlah piezoelektrik yang digunakan maka defleksi rangkaian akan semakin kecil, namun voltase yang dihasilkan semakin besar karena semakin banyak piezoelektrik yang menghasilkan voltase listrik. Meskipun nilai voltase semakin besar daya yang dihasilkan berbanding terbalik. Daya maksimal diperoleh pada penggunaan 8 rangkaian piezoelektrik dengan parameter konstan massa 15 kg dan amplitudo 1.5 m sebesar 0.0009148 watt.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan untuk kelanjutan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Perlu dilakukan analisa secara menyeluruh terkait model sistem serta mekanisme perangkat terapung menggunakan *base motion* dari gelombang laut.
2. Perlu dilakukan eksperimen secara langsung sebagai perbandingan data antara proses simulasi dan eksperimen.
3. Lakukan analisa konfigurasi optimal rangkaian massa, amplitudo dan jumlah piezoelektrik terhadap besar voltase yang dibangkitkan.
4. Lakukan analisa dinamis terhadap model sistem.

DAFTAR PUSTAKA

- Direktorat Jenderal EBTKE - Kementerian ESDM. n.d. Dikutip pada October 20, 2021. <https://ebtke.esdm.go.id/post/2011/04/25/138/pengembangan.energi.arus.laut>
- Aninsi, N. (2021, September 23). Pengertian, Jenis dan Sifat Gelombang, Materi Fisika SMA Kelas XI - Nasional. Katadata.co.id. <https://katadata.co.id/safrezi/berita/614b69ad95728/pengertian-jenis-dan-sifat-gelombang-materi-fisika-sma-kelas-xi>
- Pusat Meteorologi Maritim | BMKG. (n.d.). Retrieved January 5, 2022, from https://maritim.bmkg.go.id/prakiraan/satu_minggu_kedepan
- Base motions in modal-based procedures. (n.d.). Retrieved November 20, 2021, from <https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/SIMACAETHERefMap/simathe-c-basemotions.htm#simathe-c-basemotions-t-PrimaryBaseMotions-sma-topic1>
- Hwang, Won Seop, Jung Hwan Ahn, Se Yeong Jeong, Hyun Jun Jung, Seong Kwang Hong, Jae Yoon Choi, Jae Yong Cho, Jung Hun Kim, and Tae Hyun Sung. 2017. "Design of Piezoelectric Ocean-Wave Energy Harvester Using Sway Movement." *Sensors and Actuators, A: Physical* 260, no. June (June): 191–97. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2017.04.026>.
- Nabavi, Seyedeh Fatemeh, Anooshiravan Farshidianfar, and Aref Afsharfard. 2018. "Novel Piezoelectric-Based Ocean Wave Energy Harvesting from Offshore Buoys." *Applied Ocean Research* 76, no. July (July): 174–83. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2018.05.005>.
- Nabavi, Seyedeh Fatemeh, Anooshiravan Farshidianfar, Aref Afsharfard, and Hamed Haddad Khodaparast. 2019. "An Ocean Wave-Based Piezoelectric Energy Harvesting System Using Breaking Wave Force." *International Journal of Mechanical Sciences* 151, no. February (February): 498–507. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.12.008>.
- Viet, N. v., X. D. Xie, K. M. Liew, N. Banthia, and Q. Wang. 2016. "Energy Harvesting from Ocean Waves by a Floating Energy Harvester." *Energy* 112, no. October (October): 1219–26. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.019>.
- Yusup, Yusup. 2016. "Pemodelan dan Analisa Energi Listrik yang Dihasilkan Mekanisme Pembangkit Listrik Gelombang Laut Tipe Kayuh Dayung – Piezoelektrik". Dikutip pada November 2021.

LAMPIRAN

MiniSense 100 Vibration Sensor



- High Sensitivity
- Good Frequency Response
- Excellent Linearity
- Shielded Construction
- Analog Output
- Withstands High Shock

The **Minisense 100** is a low-cost cantilever-type vibration sensor loaded by a mass to offer high sensitivity at low frequencies. The pins are designed for easy installation and are solderable. Horizontal and vertical mounting options are offered as well as a reduced height version. The active sensor area is shielded for improved RFI/EMI rejection. Rugged, flexible PVDF sensing element withstands high shock overload. Sensor has excellent linearity and dynamic range, and may be used for detecting either continuous vibration or impacts.

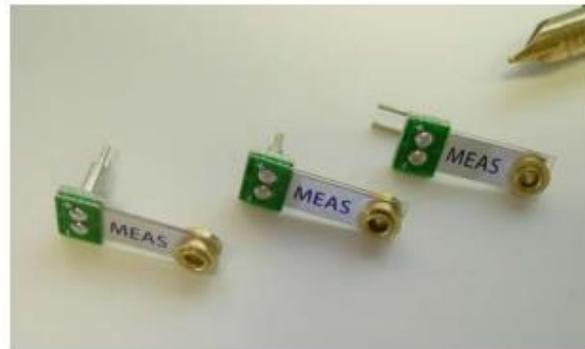
The mass may be modified to obtain alternative frequency response and sensitivity selection (consult factory).

APPLICATIONS

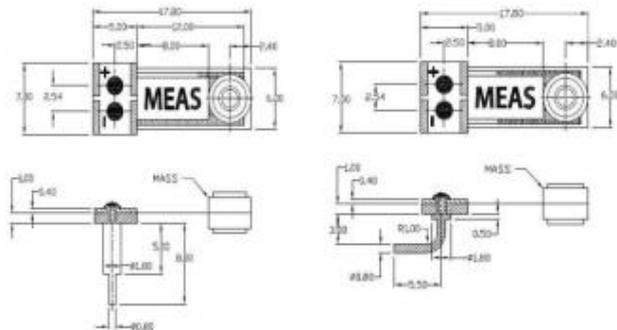
- Washing Machine Load Imbalance
- Vehicle Motion Sensor
- Anti-Theft Devices
- Vital Signs Monitoring
- Tamper Detection
- Impact Sensing

FEATURES

- High Voltage Sensitivity (1 V/g)
- Over 5 V/g at Resonance
- Horizontal or Vertical Mounting
- Shielded Construction
- Solderable Pins, PCB Mounting
- Low Cost
- < 1% Linearity
- Up to 40 Hz (2,400 rpm) Operation Below Resonance



Dimensions (in millimeters)

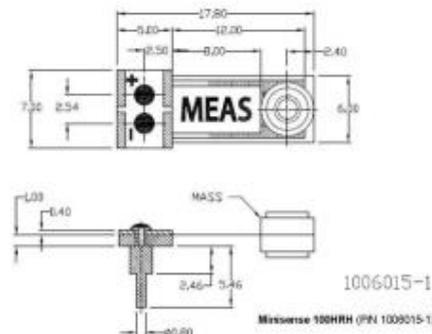


1005939-1

Minisense 100H (PIN 101005939-1)

1005940-1

Minisense 100V (PIN 1005940-1)



1006015-1

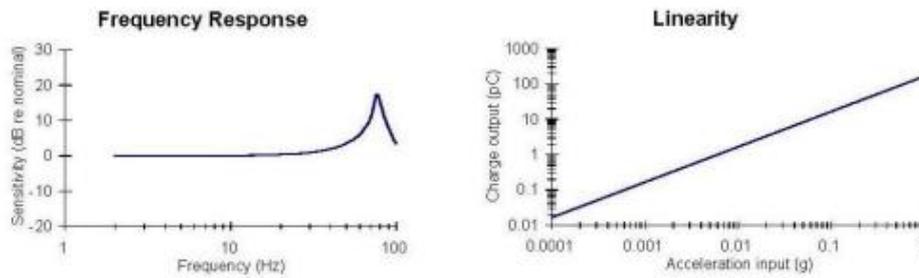
Minisense 100HRH (PIN 1006015-1)

Lampiran 1 Katalog Piezoelektrik *Minisense*

MiniSense 100 Vibration Sensor



performance specifications



Typical properties/specifications

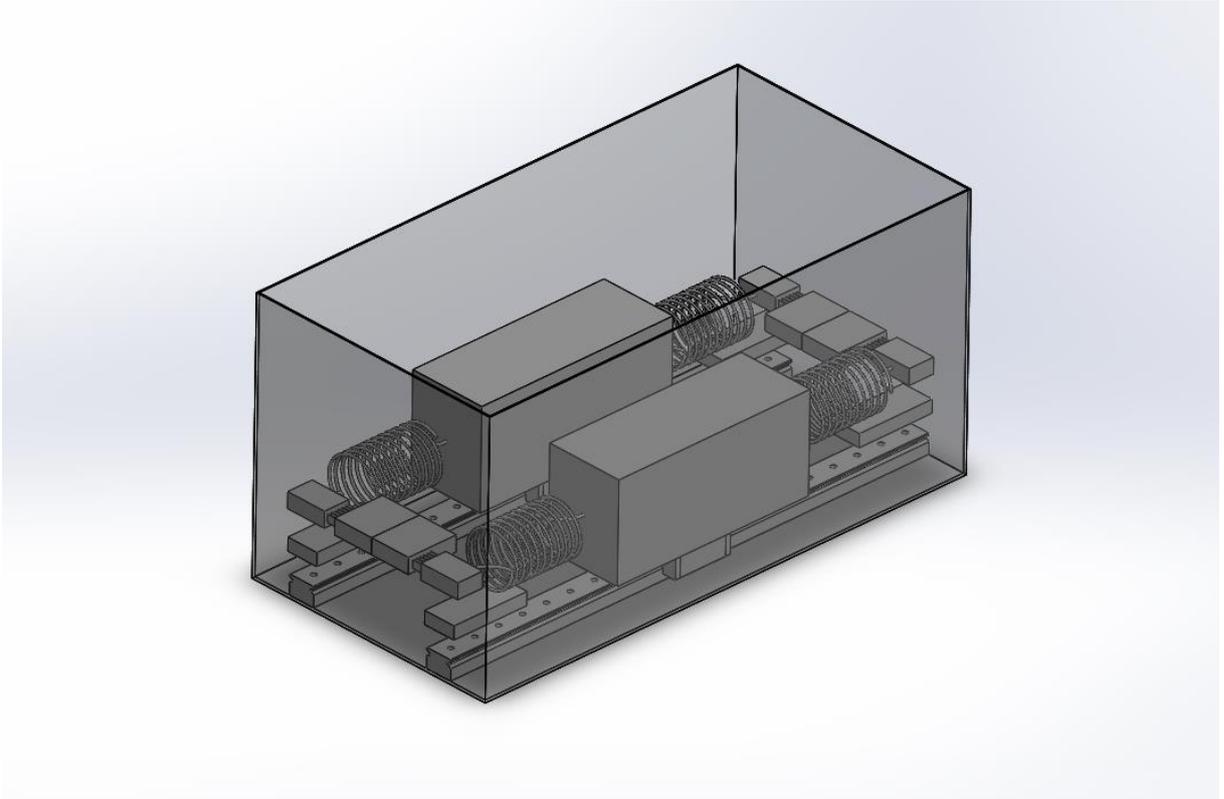
Typical Properties (at 25 °C)

Parameter	Value	Units
Voltage Sensitivity (open-circuit, baseline)	1.1	V/g
Charge Sensitivity (baseline)	260	pC/g
Resonance Frequency	75	Hz
Voltage Sensitivity (open-circuit, at resonance)	6	V/g
Upper Limiting Frequency (+3 dB)	42	Hz
Linearity	+/-1	%
Capacitance	244	pF
Dissipation Factor	0.018	(none)
Inertial Mass	0.3	gram

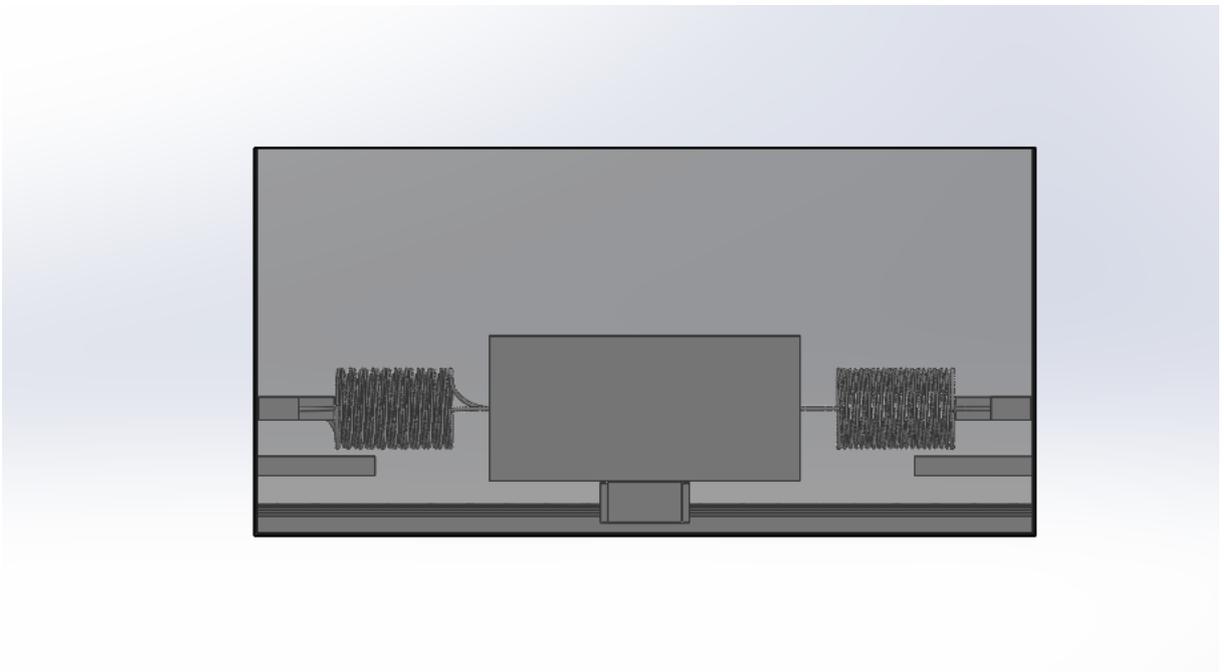
Environmental Specifications

Storage Temperature	-40 to +80 deg C	
Operating Temperature	-20 to +60 deg C	
Weight	Minisense 100H	0.5 gram
	Minisense 100V	0.6 gram

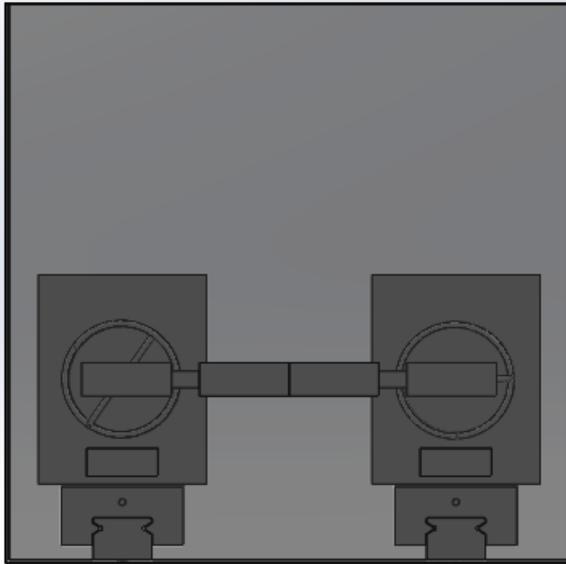
Lampiran 2 Katalog Piezoelektrik Minisense



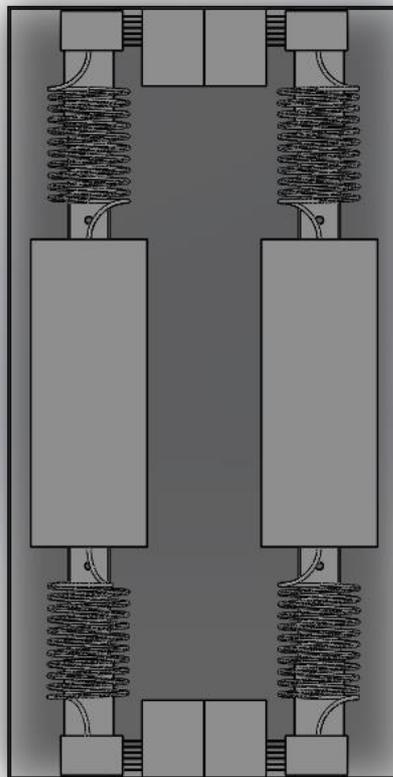
Lampiran 3 Tampak Keseluruhan Model Sistem



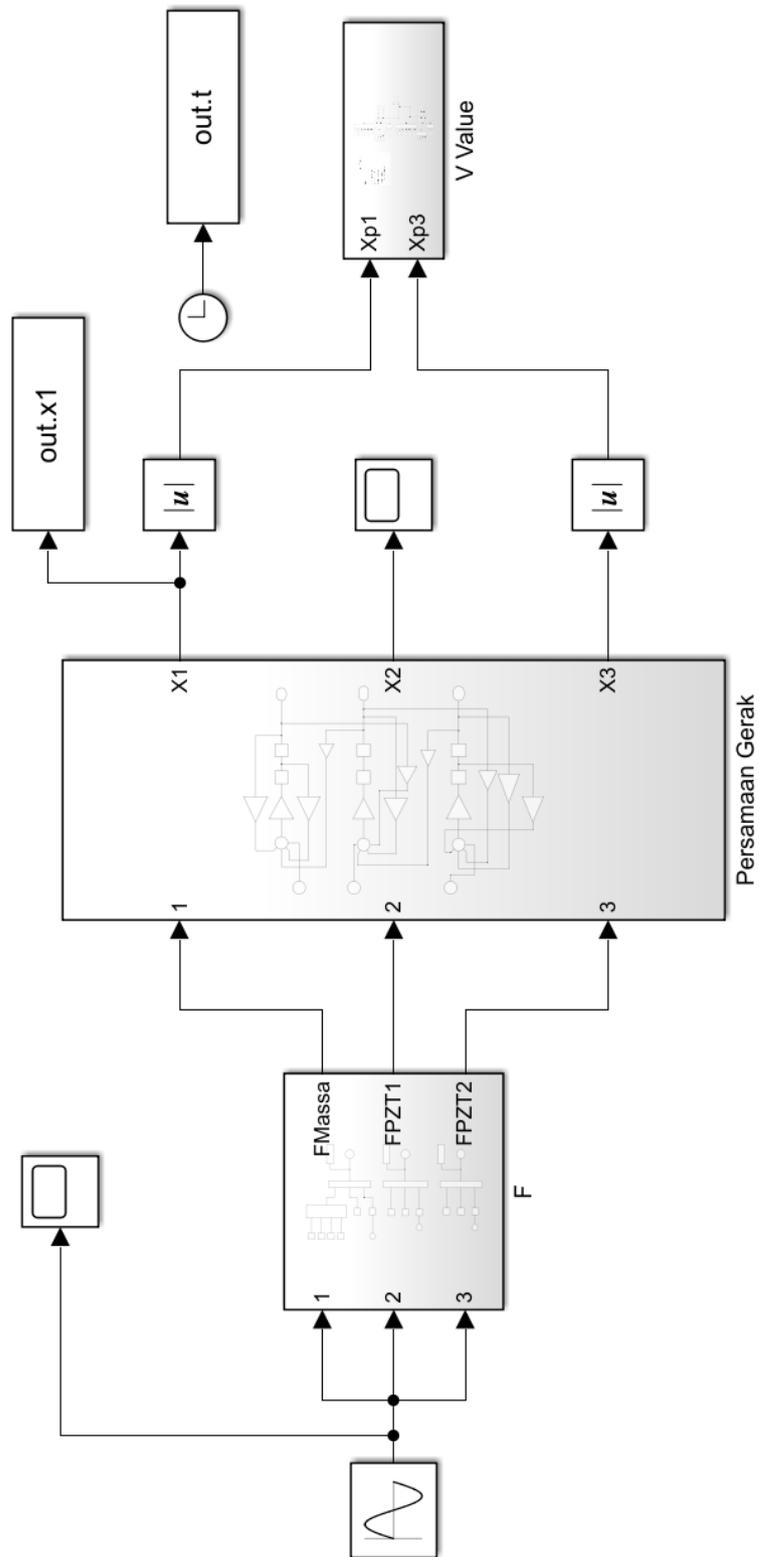
Lampiran 4 Tampak Samping Model Sistem



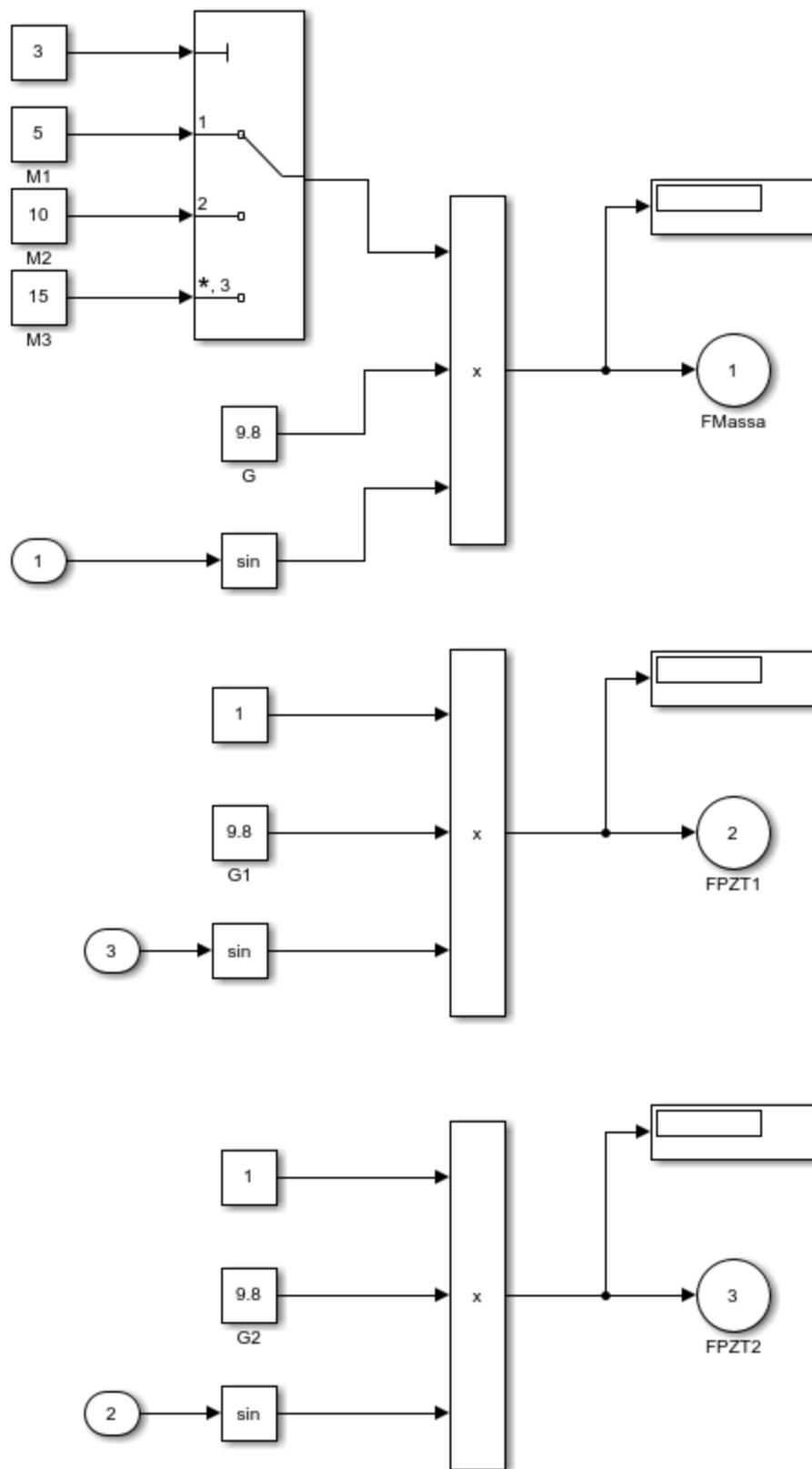
Lampiran 5 Tampak Depan Model Sistem



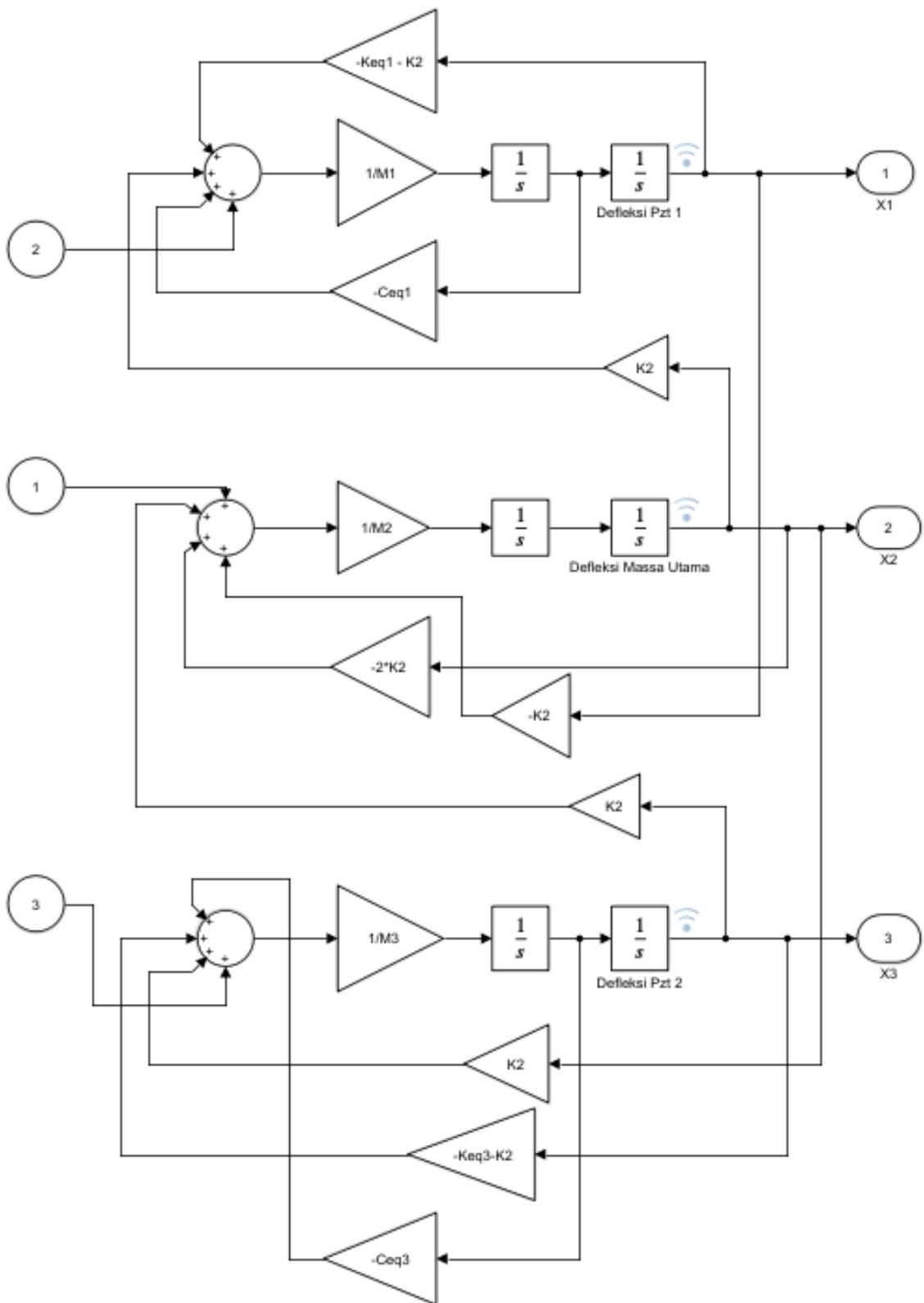
Lampiran 6 Tampak Atas Model Sistem



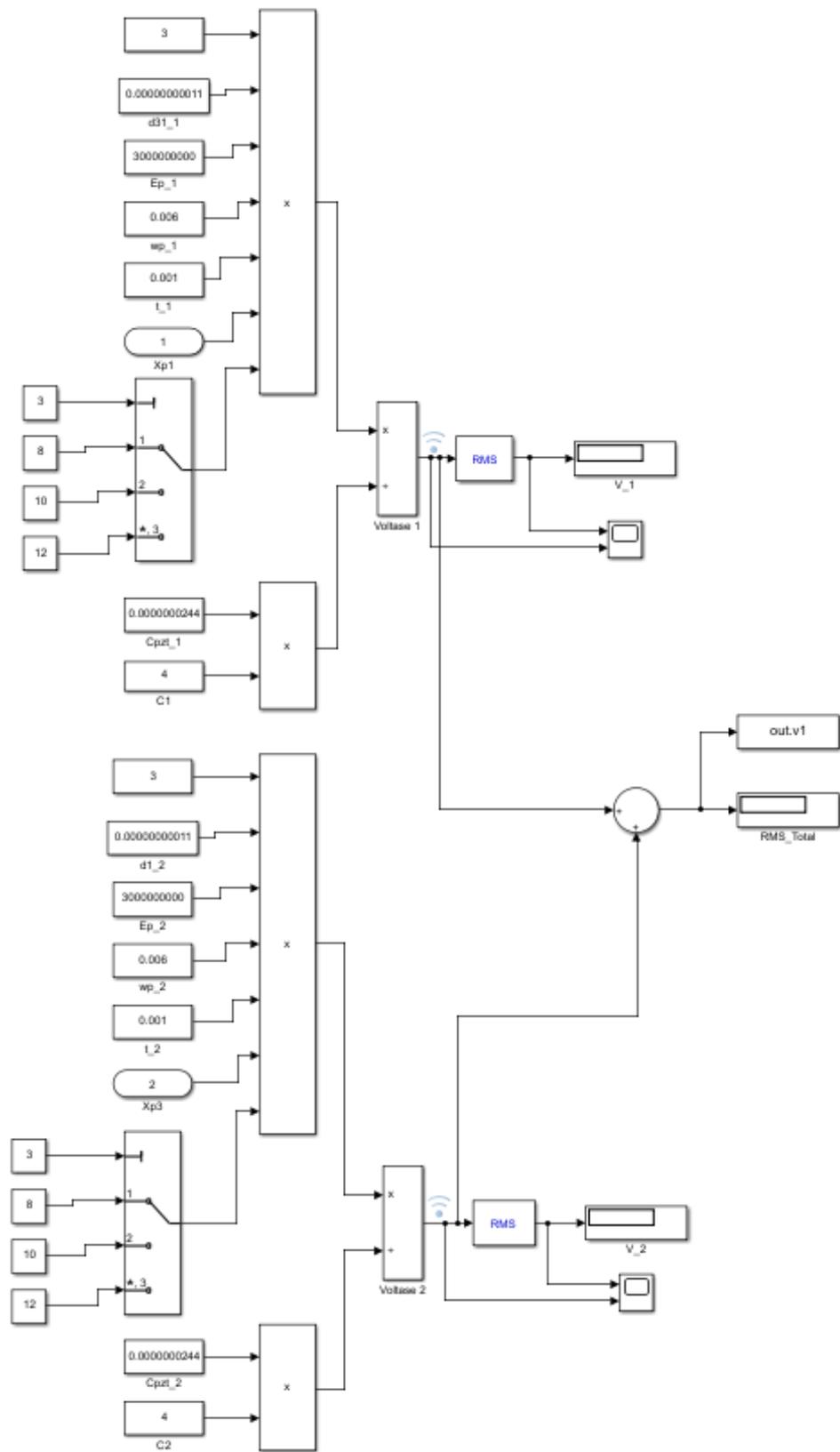
Lampiran 7 Blok Diagram Simulink Matlab



Lampiran 8 Sub-Sistem F



Lampiran 9 Sub-sistem Persamaan Gerak



Lampiran 10 Sub-sistem V-Value

BIODATA PENULIS



Daffa Ramli dilahirkan di Serang, 26 November 1999. Penulis merupakan putra kedua dari pasangan Teddy Ramli dan Yessi Asdeliza.

Penulis memulai pendidikan dasar di SD Islam Al-Azhar 10 Serang dan lulus pada tahun 2012. Kemudian melanjutkan ke jenjang pendidikan menengah pertama SMPIT Al-Izzah Serang dan lulus pada tahun 2015, setelah itu penulis melanjutkan pendidikan menengah atas di MAN 2 Kota Serang dan lulus pada tahun 2018. Penulis melanjutkan pendidikan tinggi di S1 Teknik Mesin FTIRS Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya.

Selama berkuliah penulis aktif mengikuti kegiatan organisasi dan pernah menjabat sebagai Kepala Biro Event Internal Departemen Umum Himpunan Mahasiswa Mesin. Penulis juga memiliki ketertarikan dalam bidang olahraga dan terdaftar dalam Unit Kegiatan Mahasiswa (UKM) Flag Football.