

TUGAS AKHIR - TM184835

## PEMODELAN DAN ANALISIS ENERGI LISTRIK BANGKITAN MEKANISME PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GELOMBANG LAUT TIPE MASSA PIEZOELEKTRIK KANTILEVER BERTINGKAT

ABRAR ANANDIKKA JOESWARHDHANA  
NRP 02111840000104

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

JURUSAN TEKNIK MESIN  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2022



**TUGAS AKHIR - TM 184835**

**PEMODELAN DAN ANALISIS ENERGI LISTRIK BANGKITAN MEKANISME  
PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GELOMBANG LAUT TIPE MASSA  
PIEZOELEKTRIK KANTILEVER BERTINGKAT**

**Abrar Anandikka Joeswardhana**  
NRP 02111840000104

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

**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI DAN REKAYASA SISTEM  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA 2022**

## LEMBAR PENGESAHAN

### PEMODELAN DAN ANALISIS ENERGI LISTRIK BANGKITAN MEKANISME PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GELOMBANG LAUT TIPE MASSA PIEZOELEKTRIK KANTILVER BERTINGKAT

#### TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**Abrar Anandikka Joeswardhana**  
NRP: 02111840000104

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Aida Annisa Amin Daman, ST., MT.  
NIP. 198907052015042005 ..... (Pembimbing)
2. Dr. Wiwick Hendrowati, ST., MT.  
NIP. 197004121997032003 ..... (Penguji I)
3. Prof. Dr. Harus Laksana Guntur, ST., M.Eng.  
NIP. 197505111999031001 ..... (Penguji II)
4. Prof. Ir. I Nyoman Sutantra, M.sc., Ph.D.  
NIP. 195106051978031002 ..... (Penguji III)



SURABAYA  
2022

## APPROVAL SHEET

### MODELLING AND ANALYSIS OF ELECTRICAL ENERGI HARVESTED BY OCEAN WAVE POWERED STACKED MASS AND CANTILEVER PIEZOELECTRIC MECHANISM

#### FINAL PROJECT

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

By : **ABRAR ANANDIKKA JOESWARDHANA**  
NRP. 02111840000104

Approved by Final Project Examiner Team :

1. Aida Annisa Amin Daman, S.T., M.T. (Advisor)  
NIP. 198907052015042005
2. Dr. Wiwiek Hendrowati, S.T., M.T. (Examiner 1)  
NIP. 197004121997032003
3. Prof. Dr. Harus Laksana Guntur, S.T., M.T. (Examiner 2)  
NIP. 197505111999031001
4. Prof. Ir. I Nyoman Sutantra, M.Sc., Ph.D. (Examiner 3)  
NIP. 195106051978031002

SURABAYA

July, 2022

## PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa / NRP : Abrar Anandikka Joeswardhana / 02111840000104  
Departemen : Teknik Mesin  
Dosen Pembimbing / NIP : Aida Annisa Amin Daman, S.T., M.T. / 198907052015042005

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul "PEMODELAN DAN ANALISIS ENERGI LISTRIK BANGKITAN MEKANISME TENAGA GELOMBANG LAUT TIPE MASSA PIEZOELEKTRIK KANTILEVER BERTINGKAT" adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

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

Surabaya, 21 Juli 2022

Mengetahui

Dosen pembimbing



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

Mahasiswa,



(Abrar Anandikka J)  
NRP. 02111840000104

## STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

Name of student / NRP : Abrar Anandikka Joeswardhana/02111840000104

Departement : Mechanical Engineering

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

Hereby declare that the Final Project with the title of "*MODELLING AND ANALYSIS OF ELECTRICAL ENERGI HARVESTED BY OCEAN WAVE POWERED STACKED MASS AND CANTILEVER PIEZOELECTRIC MECHANISM*" 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 Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 21 Juli 2022

Acknowledged

Advisor



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

Student,



(Abrar Anandikka Joeswardhana)  
NRP. 02111840000104

**PEMODELAN DAN ANALISIS ENERGI LISTRIK BANGKITAN MEKANISME  
PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GELOMBANG LAUT TIPE MASSA PIEZOELEKTRIK  
KANTILVER BERTINGKAT**

Nama Mahasiswa : Abrar Anandikka Joeswardhana  
NRP : 02111840000104  
Department : Teknik Mesin FTIRS-ITS  
Dosen Pembimbing : Aida Annisa Amin Daman S.T., M.T.

**ABSTRAK**

Perkembangan jumlah penduduk di Indonesia menyebabkan suatu masalah yang sangat berdampak yaitu peningkatan kebutuhan energi. Melihat potensi sumber energi listrik dari sumber Energi Baru Terbarukan (EBT) Indonesia yang cukup tinggi, maka pemerintah melalui kebijakan “Energi Nasional” akan meningkatkan penggunaan EBT sebagai sumber energi listrik menjadi 30%. Salah satu sumber EBT yang dapat dimanfaatkan yaitu gelombang laut, namun amplitudo gelombang laut di Indonesia relatif rendah sehingga potensi ini belum banyak diteliti. Sehingga untuk memanfaatkan sumber tersebut, dibutuhkan mekanisme yang dapat mengubah amplitudo yang rendah menjadi energi listrik yang optimal. Dikarenakan kurangnya penelitian yang meneliti pemanfaatan gelombang laut di Indonesia, maka pada penelitian ini akan mensimulasikan sistem menggunakan piezoelektrik sebagai alat dalam sistem *energy harvesting*. Piezoelektrik dipilih dalam penelitian ini karena alat tersebut dapat menghasilkan energi listrik dengan defleksi atau getaran yang rendah.

Pada penelitian ini, dilakukan simulasi pada perancangan sistem piezoelektrik kantilever yang dikopel terhadap massa yang bertingkat. Sistem ini menggunakan eksitasi dari gelombang laut yang dapat menggerakkan sistem. Pergerakan yang dihasilkan oleh gelombang laut tersebut kemudian akan membuat bergeraknya massa-massa pada sistem yang akan membuat piezoelektrik pada sistem terdefleksi dan menghasilkan tegangan listrik. Penelitian ini dimulai dengan membuat perancangan model dinamis sistem, setelah itu maka *state variable* akan diperoleh. Setelah nilai *state variable* diperoleh, nilai tersebut akan diinput menjadi *block diagram* pada Simulink. Analisis variasi yang dilakukan pada penelitian ini berupa tinggi input gelombang laut, jumlah massa sistem dan jumlah piezoelektrik perbaris pada sistem.

Dari penelitian yang sudah dilakukan, didapatkan bahwa penambahan jumlah variasi berupa tinggi input gelombang laut, jumlah massa, dan jumlah piezoelektrik dapat meningkatkan nilai bangkitan RMS voltase sistem. Nilai RMS voltase bangkitan sistem berkisar dari yang paling kecil yaitu 0,0967 volt yang dibangkitkan oleh sistem dengan 2 massa, 1 piezoelektrik perbaris dan dengan tinggi gelombang 0,5 meter sampai 0,739 volt yang dibangkitkan oleh sistem dengan 4 massa, 3 piezoelektrik perbaris, dan dengan tinggi gelombang 1,5 meter.

**Kata Kunci: Energi Terbarukan, Gelombang Laut, Piezoelektrik.**

# **MODELLING AND ANALYSIS OF ELECTRICAL ENERGY HARVESTED BY OCEAN WAVE POWERED STACKED MASS AND CANTILEVER PIEZOELECTRIC MECHANISM**

Nama Mahasiswa : Abrar Anandikka Joeswardhana  
NRP : 02111840000104  
Department : Teknik Mesin FTIRS-ITS  
Dosen Pembimbing : Aida Annisa Amin Daman S.T., M.T.

## **ABSTRACT**

The rapid increase in population in Indonesia leads to an increase in the energy required in the future. Looking at the potential of sustainable energy in Indonesia, the government will increase the use of sustainable energy sources to 30% through the "National Energy" policy. One of the sustainable energy sources in Indonesia is its ocean wave energy, but with the low wave height, researchers tend to ignore this potential so that only a few studies have been conducted to observe this potential. Therefore, to utilize the potential of ocean waves in Indonesia, technologies and mechanisms are needed to generate electricity from the low height of ocean waves. In this case, the use of piezoelectricity may be the right choice for this research to utilize the potential of Indonesia's low ocean wave characteristics because piezoelectric only requires a slight deflection to generate electricity.

This research simulates a system with vertically stacked masses that is coupled with piezoelectric between the masses. The system in this research utilizes the movement from the ocean wave to create an excitation to the masses, thus the movement of the masses creates a deflection on the piezoelectric that could generate electricity. In this research, several variables such as the amount of the mass, the height of the ocean wave, and the amount of piezoelectric on each mass are observed and analysed on its affect to generate electricity.

The test of each variation with the simulation shown that the adding of every variable such as the height of the wave, the amount of mass in the system, and the amount of the piezoelectric on the mass could increase the RMS voltage that is generated by the system. The data of the RMS voltage generated by the system with each different variation shown that the system could produce the amount of 0,0967 volt produced by the variation of 2 masses, 1 piezoelectric on each mass, and wave height at 0,5 meter to 0,739 volt produced by the system with 4 masses, 3 piezoelectric on each mass and wave height at 1,5 meter.

***Keywords: Sustainable Energy, Ocean Wave, Piezoelectric.***

## KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Allah SWT, oleh karena kenikmatan-Nya penulis dapat menjalankan studi di tempat ini dan mampu menyelesaikan tugas akhir ini. Kemampuan penulis dalam menyelesaikan studi beserta tugas akhir ini tidak lepas dari dukungan dari berbagai pihak. Melalui kesempatan ini penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu dan mendukung baik secara moral maupun material dalam proses penyusunan tugas akhir ini, antara lain:

1. Ibu Kokom Komariah dan Bapak Ekananta Joeswardhana Joesoepadi sebagai orang tua penulis yang tanpa hentinya memberi semangat dan juga dukungan moril dan materil dari awal penulis lahir di bumi hingga dapat mampu menyelesaikan studi sarjana ini.
2. Saudari Annissa Tayara Callista selaku kakak dari penulis yang selalu memberi dukungan dan dorongan agar penulis mampu sampai di titik ini serta kesabarannya yang tiada henti.
3. Ibu Tien Suartini sebagai nenek dari penulis dan keluarga besar Bapak Momon Nurdjaman yang terus menyemangati dan membantu penulis secara langsung dan tidak langsung.
4. Prof. Ir. Joni Hermana, M. Sc, ES. Ph. D dan keluarga yang kebbaikannya selalu membantu penulis semenjak memulai studi tahap sarjana sampai dapat menyelesaikannya.
5. Keluarga besar Bapak Joesoepadi Koesoemodirdjo yang selalu senantiasa berbaik hati membantu perjalanan hidup dan studi penulis sampai tahap ini.
6. Siti Rhanita Putri Ramadani dan Muhammad Yogi Prananda sebagai kerabat dekat penulis yang senantiasa sabar dan mendampingi penulis setiap saat sampai tahap ini.
7. Ibu Aida Annisa Amin Daman sebagai pembimbing penulis yang selalu memberikan saran, motivasi, dan ilmu-ilmu yang sangat bermanfaat bagi penulis
8. Saudara Mochammad Izhar Murti sebagai kerabat penulis semenjak memulai studi sarjana ini.
9. Saudara Daffa Ramli, Natanael Dimas, Dasa Novianto dan Bagas Dian Anggoro sebagai rekan seperjuangan tugas akhir yang senantiasa bekerja sama dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
10. Saudara dan saudari Maple, Milo, Messie, Max, dkk yang telah memberi dukungan moril mental yang tiada hentinya tanpa mereka sadari.
11. Seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan satu-persatu oleh penulis

## DAFTAR ISI

<b>ABSTRAK .....</b>	<b>v</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>vi</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>vii</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>viii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>x</b>
<b>DAFTAR TABEL.....</b>	<b>xii</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN .....</b>	<b>13</b>
1.1 Latar Belakang .....	13
1.2 Rumusan Masalah .....	14
1.3 Batasan Masalah.....	14
1.4 Tujuan Penelitian.....	14
1.5 Manfaat Penelitian.....	14
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>15</b>
2.1 Tinjauan Pustaka.....	15
2.1.1 Analisis Penelitian <i>Piezoelectric Energy Harvester</i> dari Gelombang Air Laut.....	15
2.1.2 Analisis Penelitian <i>Energy Harvesting</i> dengan Sistem Pendulum Piezoelektrik.....	19
2.2 Dasar Teori .....	27
2.2.1 Definisi Gelombang Laut .....	27
2.2.1.1 Analisis Perumusan Data pada Gelombang Laut .....	27
2.2.2 Analisa Mekanika Getaran.....	29
2.2.2.1 <i>Harmonically Excited Vibration</i> .....	29
2.2.2.2 Derajat Kebebasan.....	29
2.2.3 Piezoelektrik.....	30
2.2.3 Stabilitas pada <i>Buoy</i> atau Benda Terapung.....	31
2.2.3.1 Stabilitas.....	33
<b>BAB III METODOLOGI .....</b>	<b>36</b>
3.1 Tahapan Penelitian .....	36
3.1.1 Diagram Alir .....	36
3.1.2 Penjelasan Diagram Alir .....	37
3.2 Rancangan Model .....	38
3.2.1 Perancangan Mekanisme .....	38
3.2.4 Skema Gerak Sistem oleh Gelombang Laut pada Percobaan .....	39
3.2.2 Persamaan Gerak Model.....	41
3.2.2.1 Persamaan Gerak Model Variasi 2 Massa (2 DOF).....	42

3.2.2.2 Persamaan Gerak Model Variasi 3 Massa.....	45
3.2.2.3 Persamaan Gerak Model Variasi 4 Massa.....	47
3.2.4 Perhitungan Nilai Perpindahan Relatif Tiap Massa.....	50
3.3 Frekuensi Natural Sistem .....	51
3.4 Parameter dan Variabel Sistem.....	53
3.5 Tahapan Simulasi.....	54
<b>BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>56</b>
4.1 Pengaruh Tinggi Gelombang Laut Terhadap Perpindahan dan Voltase .....	56
4.2 Pengaruh Jumlah Piezoelektrik Terhadap Perpindahan dan Voltase.....	60
4.3 Pengaruh Jumlah Massa Terhadap Perpindahan dan Voltase .....	63
4.4 Analisis Voltase Bangkitan Sistem pada Setiap Variasi .....	66
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>70</b>
5.1 Kesimpulan .....	70
5.2 Saran .....	71
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>72</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>73</b>
<b>BIODATA PENULIS.....</b>	<b>84</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Skema sistem penelitian Energy harvesting from ocean waves by a floating energy harvester (Viet et al., 2016). .....	15
Gambar 2.2 Skema dalam sistem penelitian energy harvesting from ocean waves by a floating energy harvester (Viet et al., 2016).....	16
Gambar 2.3 Grafik Nilai Hasil Penelitian Energy harvesting from ocean waves by a floating energy harvester dalam Nilai RMS (Viet et al., 2016).....	17
Gambar 2.4 Skema Sistem Penelitian <i>Ocean wave energy harvesting with a piezoelectric coupled buoy structure</i> (N. Wu et al., 2015). .....	17
Gambar 2.5 Hasil Penelitian Ocean wave energy harvesting with a piezoelectric coupled buoy structure (N. Wu et al., 2015) dengan nilai parameter $Y_0 = 10$ m, $Y_0 = 2$ m and $D_1 = 9$ m <sup>2</sup> .....	18
Gambar 2.6 Hasil Penelitian Ocean wave energy harvesting with a piezoelectric coupled buoy structure (N. Wu et al., 2015) .....	19
Gambar 2.7 Skema Sistem pada Penelitian Piezoelectric Spring Pendulum Oscillator Used for Multi-directional and Ultra-low frequency Vibration Energy Harvesting (Y. Wu et al., 2018). (a) Tampak depan (b) Tampak samping .....	20
Gambar 2.8 Ilustrasi Konsep Operasi Sistem Penelitian Piezoelectric Spring Pendulum Oscillator Used for Multi-directional and Ultra-low frequency Vibration Energy Harvesting (Y. Wu et al., 2018). (a) Eksitasi horizontal (b) Eksitasi vertikal. ....	20
Gambar 2.9 Data hasil percobaan sistem Penelitian Piezoelectric Spring Pendulum Oscillator Used for Multi-directional and Ultra-low frequency Vibration Energy Harvesting (Y. Wu et al., 2018) .....	21
Gambar 2.10 Skema sistem pada penelitian Nonlinear dynamics of a pendulum-beam coupling piezoelectric energy harvesting system (Haitao & Qin, 2019). .....	22
Gambar 2.11 Respons dinamis dan respon voltase untuk massa pendulum (M) yang berbeda pada struktur sistem. (a) Diagram percabangan terhadap nilai RMS dan M, (b) Diagram fase massa 0.03kg, (c) Diagram fase massa 0.05kg, (d) Diagram fase massa 0.09kg.....	23
Gambar 2.12 Grafik respons dinamis dan respons voltase sistem di saat percobaan eksitasi acak dengan $\sigma = 0.5$ dan $l = 0.07$ m. (a) Perpindahan terhadap waktu. (b) Spektrum kapasitas daya perpindahan, (c) Voltase, (d) Spektrum kapasitas daya. ....	24
Gambar 2.13 Hasil pengujian Shaker Test (a) percepatan eksitasi, (b) Output Voltage PEHCB, (c) Output Voltage PEHSP, (d) Output voltage PEHDP penelitian Improving efficiency of piezoelectric based energy harvesting from human motions using double pendulum system (Izadgoshasb et al., 2019) .....	26
Gambar 2.14 Nilai hasil akhir pada penelitian penelitian Improving efficiency of piezoelectric based energy harvesting from human motions using double pendulum system (Izadgoshasb et al., 2019) berupa Output power yang dihasilkan, (a) Gerakan kaki, (b) Gerakan tangan..	26
Gambar 2.15 Skema parameter gelombang laut.....	28
Gambar 2.16 Sistem spring-mass-damper.....	29
Gambar 2.17 Respons massa pada sistem dengan dua derajat kebebasan.....	29
Gambar 2.18 Respon material piezoelektrik terhadap gaya yang diberikan (a) muatan tanpa diberikan gaya (b) muatan diberi gaya Tarik (c) muatan diberi gaya tekan.....	30
Gambar 2.19 Piezoelektrik Kantilever .....	30
Gambar 2.20 Titik-titik pada stabilitas <i>buoy</i> .....	32
Gambar 2.21 Titik metasentris pada <i>buoy</i> .....	33
Gambar 2.22 Posisi <i>buoy</i> seimbang .....	33
Gambar 2.23 <i>Buoy</i> Stabil.....	34
Gambar 2.24 <i>Buoy</i> Keseimbangan Indifferen. ....	34
Gambar 2.25 Keseimbangan <i>Buoy</i> Labil.....	35

Gambar 3.1 Diagram Alir Metodologi Penulisan.....	37
Gambar 3.2 Piezoelektrik Minisense 100 pada Percobaan .....	38
Gambar 3.3 (a) Ilustrasi Sistem (b) Ilustrasi system pada <i>Buoy</i> .....	39
Gambar 3.4 Dimensi <i>Buoy</i> pada Percobaan .....	39
Gambar 3.5 Ilustrasi Kemiringan <i>Buoy</i> pada Gelombang.....	40
Gambar 3.6 Penjabaran Gaya pada Kemiringan <i>Buoy</i> .....	40
Gambar 3.7 (a) Pengaruh Kemiringan Gelombang Terhadap <i>Buoy</i> (b) Pengaruh Kemiringan <i>Buoy</i> Terhadap Sistem .....	41
Gambar 3.8 (a) Ilustrasi sistem dengan variasi 3 Massa dan 2 Piezoelektrik/baris (b) Skema Gerak Sistem 3 Massa saat Terdapat Perpindahan.....	42
Gambar 3.9 Free Body Diagram Model Variasi 2 Massa .....	42
Gambar 3.10 Free Body Diagram Massa 1 Variasi 2 Massa.....	43
Gambar 3.11 Free Body Diagram Massa 2 Variasi 2 Massa.....	44
Gambar 3.12 Free Body Diagram Model Variasi 3 Massa .....	45
Gambar 3.13 Free Body Diagram Massa 1 Variasi 3 Massa.....	45
Gambar 3.14 Free Body Diagram Massa 2 Variasi 3 Massa.....	46
Gambar 3.15 Free Body Diagram Massa 3 Variasi 3 Massa.....	46
Gambar 3.16 Free Body Diagram Variasi Sistem 4 Massa .....	47
Gambar 3.17 Free Body Diagram Massa 1 Variasi Sistem 4 Massa.....	48
Gambar 3.18 Free Body Diagram Massa 2 Variasi Sistem 4 Massa.....	48
Gambar 3.19 Free Body Diagram Massa 3 Variasi Sistem 4 Massa.....	49
Gambar 3.20 Free Body Diagram Massa 4 Variasi Sistem 4 Massa.....	49
Gambar 3.21 Perpindahan Relatif Baris.....	51
Gambar 3.23 Diagram Metodologi Penelitian.....	55
Gambar 4.1 Perpindahan Massa pada Variasi Tinggi Gelombang (a) $X_1$ (b) $X_2$ (c) $X_3$ .....	58
Gambar 4.2 RMS Voltase Bangkitan Variasi Tinggi Gelombang.....	59
Gambar 4.3 Nilai perpindahan Massa dan Voltase Bangkitan pada Variasi Jumlah Piezoelektrik (a) $X_1$ (b) $X_2$ (c) $X_3$ .....	61
Gambar 4.4 Grafik nilai <i>RMS</i> voltase yang dihasilkan oleh variasi jumlah piezoelektrik perbaris.....	62
Gambar 4.5 Perpindahan Massa pada Variasi Jumlah Massa (a) $X_1$ (b) $X_2$ (c) $X_3$ (d) $X_4$ .....	64
Gambar 4.6 Grafik nilai <i>RMS</i> Voltase yang dihasilkan oleh variasi jumlah massa.....	66
Gambar 4.7 Nilai <i>RMS</i> voltase yang dihasilkan sistem pada variasi tinggi gelombang.....	67
Gambar 4.8 Nilai <i>RMS</i> Voltase Bangkitan Sistem pada Variasi Jumlah Piezoelektrik Perbaris .....	68
Gambar 4.9 Nilai <i>RMS</i> Voltase yang dihasilkan oleh variasi jumlah massa .....	68

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Nilai parameter pada penelitian Energy harvesting from ocean waves by a floating energy harvester (Viet et al., 2016) .....	16
Tabel 2.2 Nilai Parameter Pada Sistem Penelitian Piezoelectric Spring Pendulum Oscillator Used for Multi-directional and Ultra-low frequency Vibration Energy Harvesting (Y. Wu et al., 2018) yang Ditentukan.....	21
Tabel 2.3 Nilai Parameter pada struktur sistem penelitian penelitian Nonlinear dynamics of a pendulum-beam coupling piezoelectric energy harvesting system (Haitao & Qin, 2019).....	22
Tabel 2.4 Hasil analisa variabel panjang lengan dan massa (a) double pendulum (b) single pendulum pada penelitian Improving efficiency of piezoelectric based energy harvesting from human motions using double pendulum system (Izadgoshasb et al., 2019).....	25
Tabel 3.1 Frekuensi Natural Variasi Sistem .....	53
Tabel 3.2 Massa pada Percobaan .....	53
Tabel 3.3 Parameter Piezoelektrik Minisense 100 .....	54
Tabel 3.4 Parameter Gelombang Laut. ....	54
Tabel 3.5 Parameter Percobaan .....	54

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Pesatnya peningkatan penduduk di Indonesia yang sudah meningkat 32.7 juta jiwa pada 10 tahun terakhir sangat berpengaruh pada peningkatan kebutuhan energi yang diperlukan. (Cadangan Energi Fosil Indonesia Tinggal 9 Tahun - Bisnis Liputan6.Com, n.d.) Dari total 70.96 GW kapasitas kebutuhan energi di Indonesia, 89,1% sumber energi masih didominasi dari penggunaan sumber energi tak terbarukan seperti energi fosil, batu bara dan minyak bumi, dan hanya 10.9% sumber energi yang berasal dari Energi Baru Terbarukan (EBT). Seiring dengan berjalannya waktu, semua sumber energi tak terbarukan tersebut akan habis.. Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral, Arifin Tasrif mengatakan bahwa cadangan minyak bumi yang ada di Indonesia hanya tersisa 3.77 miliar barel atau akan habis dalam waktu 9 tahun dengan rata-rata pemakaian seperti saat ini. Oleh karena itu, ia menegaskan bahwa eksplorasi sumber energi baru yang berkelanjutan diperlukan untuk memenuhi kebutuhan energi negeri ini dan menghilangkan krisis energi di masa yang akan datang.

Sebagaimana disebutkan dalam Pasal 33 UUD 1945, sumber daya energi merupakan kekayaan yang dimiliki seluruh rakyat Indonesia yang kuasanya dimiliki oleh pemerintah untuk sebesar-besarnya kemakmuran rakyat. Oleh karena itu, pemerintah saat ini melalui Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral sedang mengupayakan penggunaan energi terbarukan untuk memenuhi kebutuhan energi negeri ini. Tercatat bahwa Indonesia memiliki potensi EBT lebih dari 400 GW, namun dari jumlah tersebut baru 2.5% potensi tersebut yang sudah digunakan. Angka potensi tersebut sangat dipengaruhi oleh keberadaan Indonesia sebagai negara kepulauan dan luas laut sekitar 3.5 juta m<sup>2</sup> yang didalamnya terdapat potensi-potensi sumber energi seperti panas laut, energi pasang surut dan energi gelombang yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi. Jika potensi penggunaan EBT dapat dimaksimalkan, secara teori penggunaan sumber energi tak terbarukan di Indonesia dapat seluruhnya tergantikan. Hal tersebut akan sangat berpengaruh pada ekonomi, kebaikan iklim dan keberlanjutan kehidupan generasi-generasi selanjutnya yang akan datang.

Namun untuk mewujudkan penggunaan potensi-potensi EBT tersebut, ditemukan beberapa kendala seperti kendala aspek penelitian. Seperti yang dijelaskan dalam jurnal “Ringkasan Permasalahan dan Tantangan Program Peningkatan Kontribusi Energi Baru dan Terbarukan dalam Bauran Energi Nasional” yang diterbitkan oleh Badan Dewan Keahlian DPR RI, menyebutkan bahwa salah satu kendala dalam mewujudkan penggunaan EBT adalah kurang memadainya teknologi-teknologi untuk mewujudkan penggunaan tersebut. Selain itu, Menteri ESDM juga menyebutkan bahwa penggunaan EBT masih dibidang cukup mahal dibandingkan dengan penggunaan sumber energi konvensional. Oleh karena itu, penelitian-penelitian baru yang dapat mendorong penggunaan EBT dengan lebih efisien dan rendah biaya sangat diperlukan. Dengan adanya teknologi piezoelektrik yang dapat menghasilkan energi listrik dengan struktur yang lebih sederhana dibandingkan dengan teknologi lain seperti elektromagnetik, dan memanfaatkan sumber gelombang air laut di Indonesia yang sangat berpotensi, penelitian penggunaan EBT dengan memanfaatkan teknologi dan sumber daya tersebut perlu dilakukan.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Mengacu pada latar belakang tentang pemanfaatan energi laut, diperlukan penelitian lebih lanjut. Dengan mekanisme piezoelektrik dan massa bertingkat, pergerakan gelombang air laut dapat ditransmisi ke dalam sistem sehingga menghasilkan energi listrik. Maka dari itu perumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana merancang dan mensimulasikan sistem mekanisme osilator kantilever piezoelektrik bertingkat?
2. Bagaimana pengaruh tinggi gelombang air laut terhadap energi listrik yang dihasilkan?
3. Bagaimana pengaruh jumlah massa pada sistem terhadap energi listrik yang dihasilkan?
4. Bagaimana pengaruh jumlah piezoelektrik pada sistem terhadap energi listrik yang dihasilkan?

## **1.3 Batasan Masalah**

Untuk simulasi penelitian ini dibutuhkan beberapa batasan masalah seperti berikut:

1. Model menggunakan dimensi skala simulasi.
2. Eksitasi berupa gelombang air laut yang disimulasikan dianggap konstan.
3. Pengaruh gaya vertikal pada sistem diabaikan.
4. Redaman dan gesekan pada sistem sangat kecil sehingga dapat diabaikan.
5. Gerak pada sistem yang diakibatkan gelombang laut diasumsikan hanya dua dimensi.
6. Proses manufaktur sistem dapat diabaikan.

## **1.4 Tujuan Penelitian**

Berdasarkan rumusan masalah yang sudah ada, didapatkan tujuan masalah pada penelitian ini sebagai berikut:

1. Memperoleh rancangan dan mensimulasikan sistem osilator kantilever piezoelektrik yang sesuai dengan gelombang air laut di Indonesia.
2. Mengetahui pengaruh tinggi gelombang terhadap energi listrik yang dihasilkan
3. Mengetahui pengaruh jumlah massa pada sistem terhadap energi listrik yang dihasilkan
4. Mengetahui pengaruh jumlah piezoelektrik pada sistem terhadap energi listrik yang dihasilkan.

## **1.5 Manfaat Penelitian**

Manfaat dilakukannya simulasi penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memajukan perkembangan EBT di Indonesia, sehingga pemanfaatan potensi-potensi yang ada dapat terwujud.
2. Mengoptimalkan sumber daya gelombang laut di Indonesia dengan memanfaatkan piezoelektrik.
3. Solusi untuk krisis energi di Indonesia yang saat ini masih mengandalkan sumber energi yang tidak berkelanjutan.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

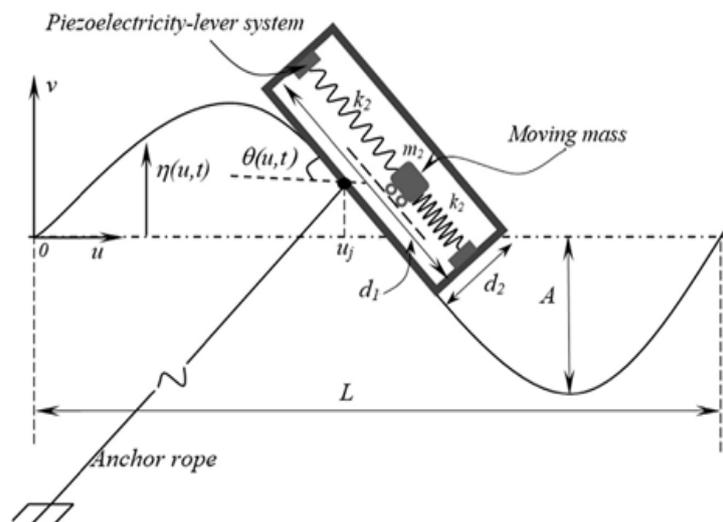
#### 2.1 Tinjauan Pustaka

##### 2.1.1 Analisis Penelitian *Piezoelectric Energy Harvester* dari Gelombang Air Laut.

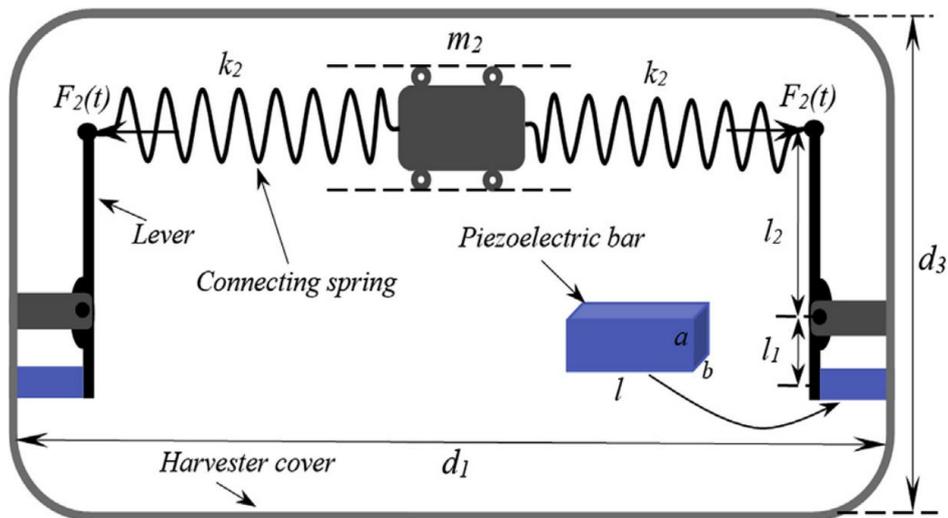
Kemajuan sains dan teknologi yang sangat pesat membuat kebutuhan energi semakin dibutuhkan, oleh karena itu penelitian-penelitian untuk *energy harvesting* dibutuhkan guna mencari teknologi atau sistem baru yang dapat memanfaatkan sumber daya yang ada untuk dijadikan sumber energi listrik yang dapat digunakan. Salah satu sumber daya yang dapat dimanfaatkan adalah getaran yang ada di sekitar kita. Untuk memanfaatkan energi berupa getaran menjadi energi listrik, telah dilakukan beberapa penelitian dengan menggunakan sistem pendulum piezoelektrik atau piezoelektrik bertingkat dengan beberapa variasi.

Beberapa penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya menyatakan bahwa sumber energi terbarukan seperti energi matahari dan energi udara memiliki kapasitas energi yang lebih rendah dibandingkan energi dari gelombang laut yang memiliki kapasitas energi sekitar 2-3kW/m<sup>2</sup> (Viet et al., 2016).

Dengan bertambahnya kebutuhan energi untuk fasilitas lepas pantai, *energy harvesting* dari energi gelombang laut mulai bermunculan, diantaranya terdapat beberapa teknologi yang mampu untuk mengkonversi energi tersebut. Oleh karena itu pada tahun 2016, N.V. Viet melakukan penelitian dengan menggunakan teknologi piezoelektrik.



Gambar 2.1 Skema sistem penelitian *Energy harvesting from ocean waves by a floating energy harvester* (Viet et al., 2016).



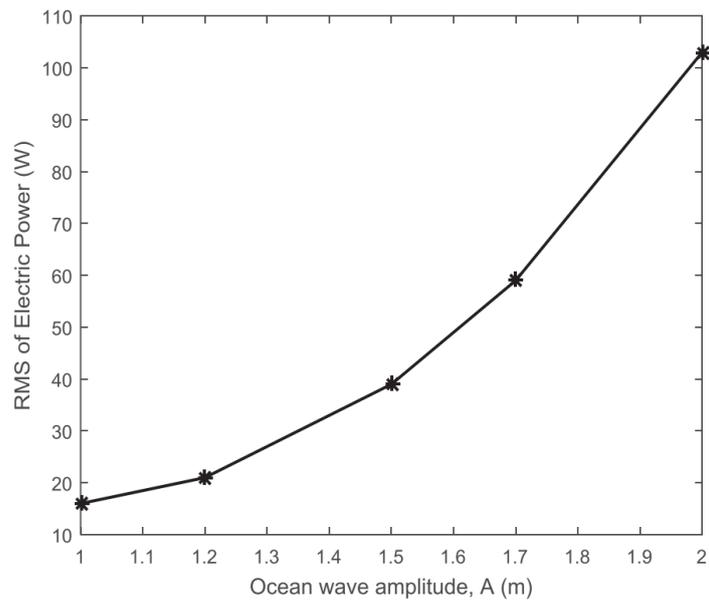
**Gambar 2.2 Skema dalam sistem penelitian energy harvesting from ocean waves by a floating energy harvester (Viet et al., 2016).**

Penelitian ini mengembangkan sistem massa dan pegas yang terhubung ke modul piezoelektrik untuk mengubah energi getaran gelombang laut menjadi energi listrik atau disebut *floating energy harvester* (FEH). Pada penelitian ini dilakukan simulasi dengan parameter gelombang laut dan dimensi FEH seperti yang tercantum pada Tabel 2.1. Penelitian ini dimulai dengan mengembangkan metode matematika berdasarkan metode Lagrangian-Euler dan metode iterasi untuk menyelesaikan model yang dikembangkan untuk mendapatkan nilai akhir yaitu nilai RMS voltase dan nilai daya yang dapat dihasilkan sistem. Setelah mendapatkan model persamaan tersebut, penelitian ini juga membandingkan beberapa parameter seperti amplitudo gelombang (A), periode gelombang (T), material lever, tinggi lever pada sistem (s) dan perbandingan massa sistem (m).

**Tabel 2.1 Nilai parameter pada penelitian Energy harvesting from ocean waves by a floating energy harvester (Viet et al., 2016)**

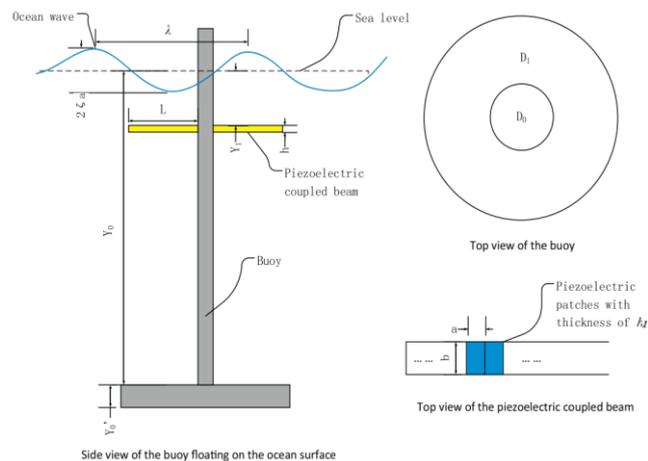
Ocean wave properties			FEH dimensions		
A(m)	T(s)	L(m)	d <sub>1</sub> (m)	d <sub>2</sub> (m)	d <sub>3</sub> (m)
1.3	6	3	1	0.5	1

Hasil yang didapatkan dengan menggunakan sistem FEH dengan lever baja dan parameter  $d_1 = 1$  m,  $d_2 = 0.5$  m,  $d_3 = 1$  m,  $n = 20$ ,  $s_1 = 0.015$  m,  $s_2 = 0.04$  m,  $a = 0.015$  m,  $b = 0.015$  m,  $l = 0.1$  m, nilai RMS yang dihasilkan dapat mencapai 103 W seperti yang tercantum pada Gambar 2.3. Nilai tersebut tercapai saat amplitudo gelombang laut setinggi 2 meter dan massa 2 pada sistem 100 kg. Hal ini membuktikan bahwa dengan mengembangkan sistem FEH ini seperti menambah massa pada sistem, dapat menjadikan peluang baru untuk teknologi *energy harvesting* pada aplikasi sipil dan kelautan



**Gambar 2.3 Grafik Nilai Hasil Penelitian Energy harvesting from ocean waves by a floating energy harvester dalam Nilai RMS (Viet et al., 2016)**

Penelitian selanjutnya mengenai piezoelektrik *energy harvester* dari gelombang air laut adalah jurnal berjudul *Ocean Wave Energy Harvesting with a Piezoelectric Coupled Buoy Structure* (N. Wu et al., 2015). Penelitian ini dilakukan karena piezoelektrik memiliki struktur yang simpel dan dapat menghasilkan energi yang jauh lebih besar dibandingkan teknologi energy harvesting lainnya seperti *electrostatic* dan *electromagnetic*.

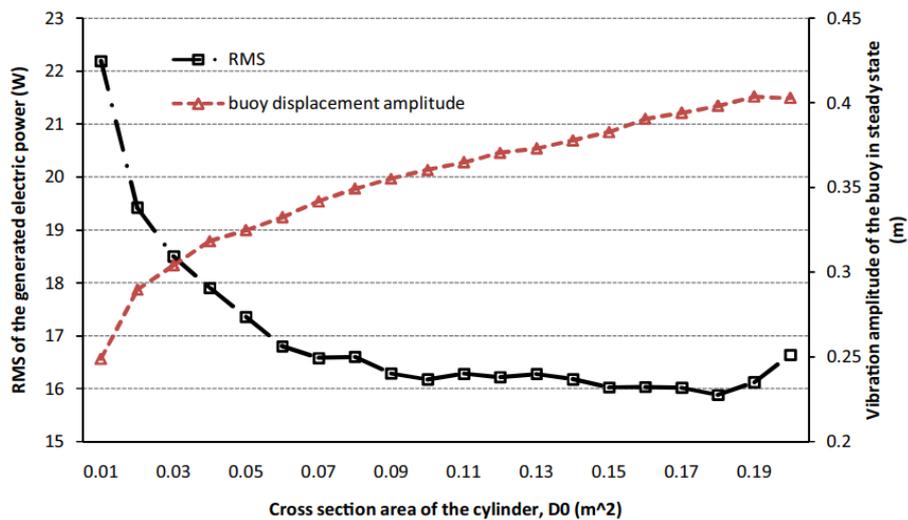


**Gambar 2.4 Skema Sistem Penelitian Ocean wave energy harvesting with a piezoelectric coupled buoy structure (N. Wu et al., 2015).**

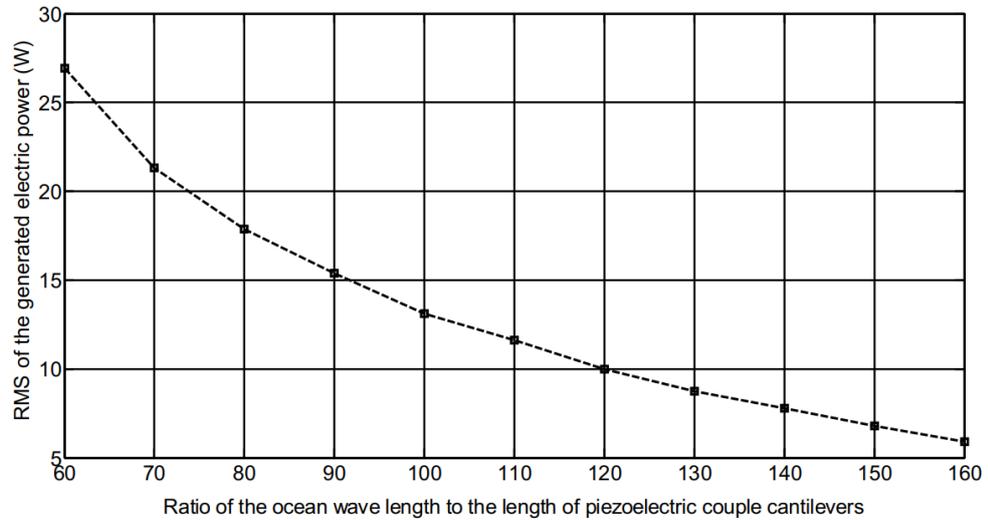
Penelitian ini dimulai dengan mengembangkan suatu model untuk mengetahui efisiensi dari sistem yang terdiri dari benda terapung yang tersambung ke *piezoelectric coupled cantilevers* untuk mengkonversi energi gelombang air laut menjadi energi listrik. Penelitian ini dilakukan menggunakan simulasi untuk mencari voltase dan nilai RMS yang dihasilkan oleh sistem dengan parameter tinggi gelombang air laut setinggi 3m, panjang gelombang sepanjang 80m dan kedalaman laut sedalam 40m. Dalam penelitian ini dilakukan beberapa simulasi untuk

membandingkan parameter-parameter seperti panjang cylinder terapung ( $Y_0$ ), diameter cylinder terapung ( $D_0$ ), tinggi dasar sistem ( $Y_0'$ ), diameter dasar sistem ( $D_1$ ) dan rasio panjang gelombang terhadap panjang piezoelektrik cantilever dalam menghasilkan nilai RMS.

Pada penelitian ini didapatkan bahwa sistem dapat menghasilkan energi listrik sebesar 24W dengan menggunakan 1 *piezoelectric buoy harvester* dengan nilai parameter  $Y_0 = 20$  m,  $Y_0' = 2$  m,  $D_0 = 0.04$  m<sup>2</sup>,  $D_1 = 9$  m<sup>2</sup>,  $Y_1 = 2$  m,  $l = 1$  m,  $b = 0.2$  m,  $h = 0.006$  m,  $h_1 = 0.0006$  m,  $a = 0.05$  m,  $N = 4$  dan  $m = l/a = 20$ . Nilai output tersebut didapatkan dengan nilai gelombang dengan tinggi gelombang air laut setinggi 3 meter, panjang gelombang sepanjang 80 meter dan kedalaman laut sedalam 40 meter. Nilai output tersebut cukup untuk menyalakan lampu LED dan beberapa perangkat nirkabel. Namun, penelitian ini juga membuktikan dengan simulasi bahwa semakin tinggi rasio panjang gelombang dan panjang kantilever piezoelektrik, maka akan semakin rendah nilai RMS yang akan dihasilkan seperti yang dinyatakan pada Gambar 2.6.



**Gambar 2.5 Hasil Penelitian Ocean wave energy harvesting with a piezoelectric coupled buoy structure (N. Wu et al., 2015) dengan nilai parameter  $Y_0 = 10$  m,  $Y_0' = 2$  m and  $D_1 = 9$  m<sup>2</sup>**

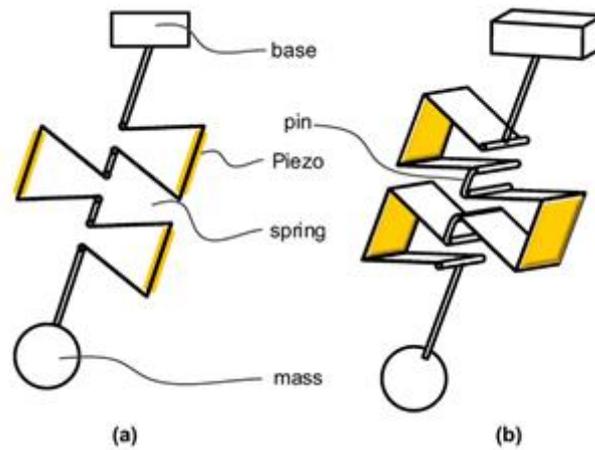


**Gambar 2.6 Hasil Penelitian Ocean wave energy harvesting with a piezoelectric coupled buoy structure (N. Wu et al., 2015)**

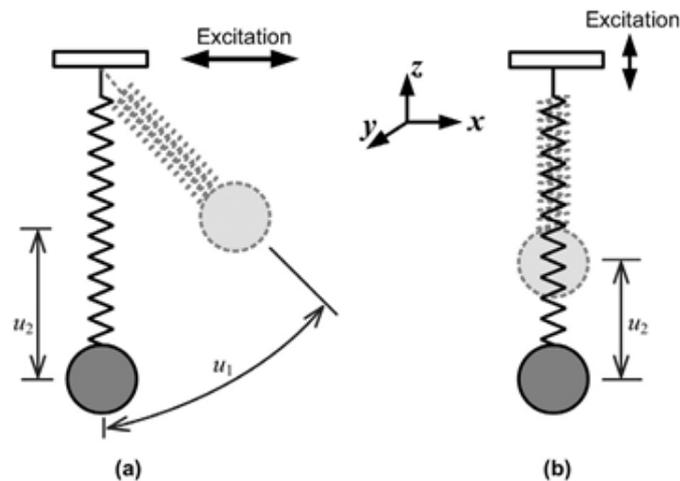
Kedua penelitian ini membuktikan bahwa dengan menggunakan sistem piezoelektrik yang sederhana, energi gelombang air laut dapat dikonversi menjadi energi listrik. Kedua penelitian ini juga masih dapat dikembangkan dengan melakukan penelitian lebih lanjut seperti terhadap struktur sistem dan ketahanan sistem agar dapat digunakan lebih baik.

### 2.1.2 Analisis Penelitian *Energy Harvesting* dengan Sistem Pendulum Piezoelektrik

Penelitian mengenai *energy harvesting* dengan sistem pendulum piezoelektrik atau piezoelektrik bertingkat pertama yang akan dibahas adalah penelitian berjudul *Piezoelectric Spring Pendulum Oscillator Used for Multi-directional and Ultra-low frequency Vibration Energy Harvesting* (Y. Wu et al., 2018). Penelitian ini memiliki tujuan untuk memanifestasi getaran frekuensi rendah dengan sistem paperclip sederhana yang disusun secara seri menggunakan piezoelektrik.



**Gambar 2.7 Skema Sistem pada Penelitian Piezoelectric Spring Pendulum Oscillator Used for Multi-directional and Ultra-low frequency Vibration Energy Harvesting (Y. Wu et al., 2018). (a) Tampak depan (b) Tampak samping**



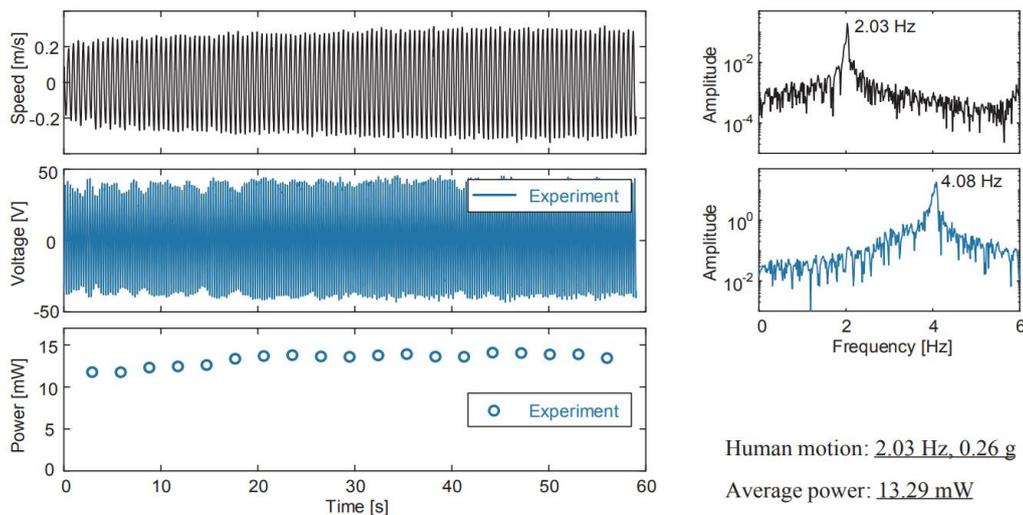
**Gambar 2.8 Ilustrasi Konsep Operasi Sistem Penelitian Piezoelectric Spring Pendulum Oscillator Used for Multi-directional and Ultra-low frequency Vibration Energy Harvesting (Y. Wu et al., 2018). (a) Eksitasi horizontal (b) Eksitasi vertikal.**

Penelitian ini dimulai dengan melakukan perhitungan-perhitungan untuk mencari parameter-parameter yang optimal pada sistem agar sistem dapat memberi nilai output terbaik. Nilai parameter yang sudah ditentukan pada perhitungan tersebut telah ditentukan dan dapat dilihat pada Tabel 2.2.

**Tabel 2.2 Nilai Parameter Pada Sistem Penelitian Piezoelectric Spring Pendulum Oscillator Used for Multi-directional and Ultra-low frequency Vibration Energy Harvesting (Y. Wu et al., 2018) yang Ditentukan.**

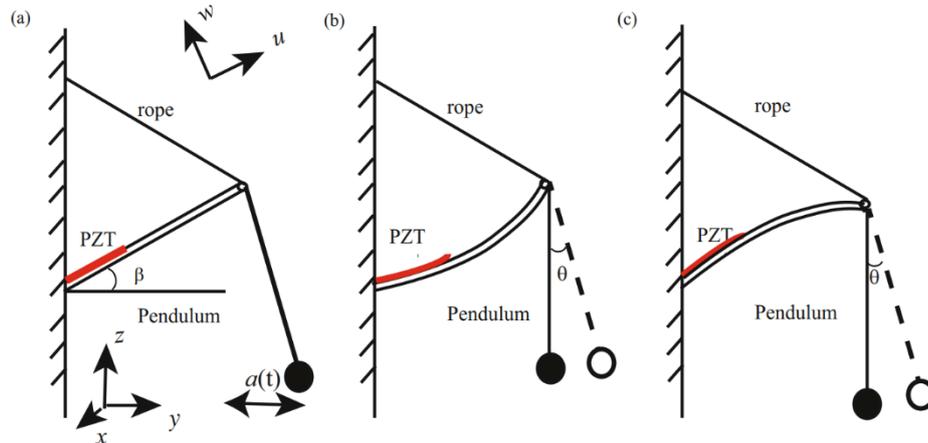
Practical parameters of the PSPH device.			
Parameters	Values	Parameters	Values
$l_0$	112 mm	$K$	982 N/m
$g$	9.8 N/m	$M$	2.03 kg
$f_1$	1.49 Hz	$f_2$	3.50 Hz
$\xi_1$	0.005	$\xi_2$	0.01
		$k_m^2$	0.015
		$C_p$	840 nF

Pada percobaan ini, eksitasi pada sistem diberikan dari gerakan tangan manusia yang menggerakkan pendulum dan menggunakan *self-powered demonstration platform* dengan frekuensi yang beragam. Setelah dilakukan percobaan dengan kedua metode tersebut dengan beragam nilai frekuensi, didapatkan nilai rata-rata daya yang dihasilkan sejumlah 13.29 mW, nilai tersebut dihasilkan dari percobaan metode *self-powered demonstration platform* dengan frekuensi 2.03 Hz dan nilai RMS 0.26g. Nilai output pada percobaan ini membuktikan bahwa dengan menggunakan piezoelektrik, hasil output yang dihasilkan oleh sistem dapat lebih tinggi dibandingkan dengan penelitian acuan yang menggunakan elektromagnetik. Sistem piezoelektrik pendulum juga terbukti dapat menghasilkan output yang lebih besar dengan ukuran sistem yang lebih ringkas seperti yang tertera pada Gambar 2.9.



**Gambar 2.9 Data hasil percobaan sistem Penelitian Piezoelectric Spring Pendulum Oscillator Used for Multi-directional and Ultra-low frequency Vibration Energy Harvesting (Y. Wu et al., 2018)**

Penelitian selanjutnya yang akan dibahas berjudul *Nonlinear Dynamics of a Pendulum-Beam Coupling Piezoelectric Energy Harvesting System* (Haitao & Qin, 2019). Penelitian ini memiliki tujuan untuk meningkatkan efisiensi sistem piezoelektrik kantilever beam dengan menambahkan pendulum di ujung sistem, sehingga sistem dapat menerima eksitasi dari arah horizontal. Gaya dari arah horizontal tersebut akan memberikan tegangan pada tali pendulum dan menyebabkan gaya tekan pada beam. Gaya tekan tersebut lalu akan memberi gaya tekuk dinamis pada *beam* yang dapat menyebabkan getaran dengan amplitudo tinggi pada *beam* dan dapat menyebabkan sistem menghasilkan voltase yang tinggi.



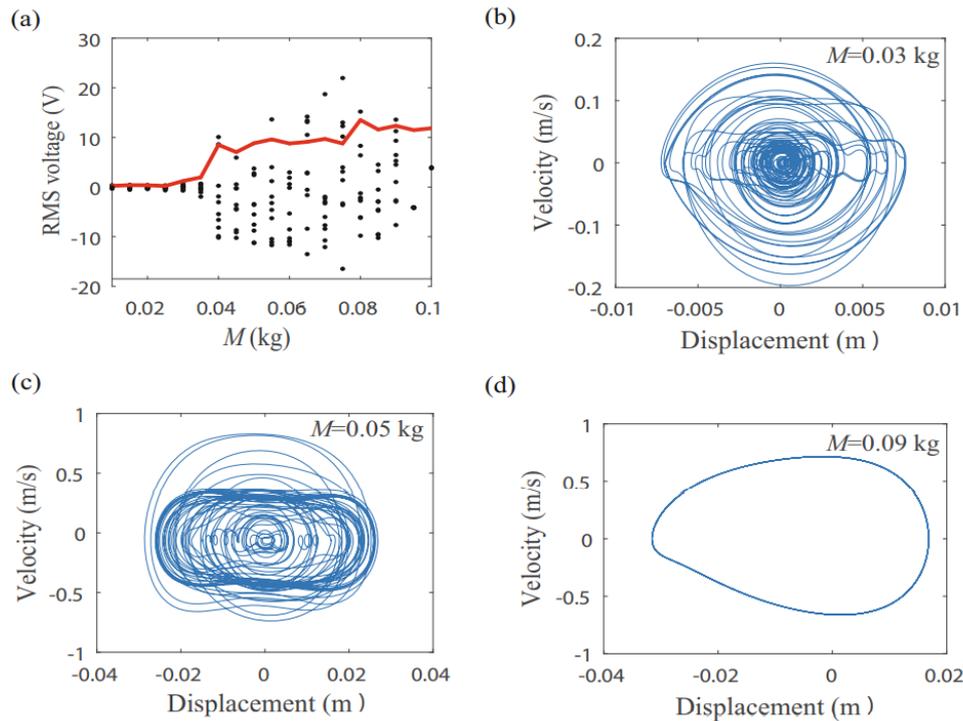
**Gambar 2.10** Skema sistem pada penelitian *Nonlinear dynamics of a pendulum-beam coupling piezoelectric energy harvesting system* (Haitao & Qin, 2019).

Penelitian ini dimulai dengan mendapatkan perumusan energi kinetik dan potensial pada sistem. Kemudian persamaan *electromechanical coupling* diturunkan berdasarkan *Hamilton's Principle*. Setelah itu ditentukan dan didapatkan parameter-parameter pada sistem untuk dilakukan percobaan secara matematis dengan eksitasi harmonis dan eksitasi secara acak. Parameter-parameter yang akan diuji dalam percobaan matematis adalah jenis eksitasi, panjang pendulum ( $l$ ) dan massa pendulum ( $M$ ). Nilai dari semua parameter-parameter sistem yang didapatkan dapat dilihat di Tabel 2.3.

**Tabel 2.3** Nilai Parameter pada struktur sistem penelitian *Nonlinear dynamics of a pendulum-beam coupling piezoelectric energy harvesting system* (Haitao & Qin, 2019).

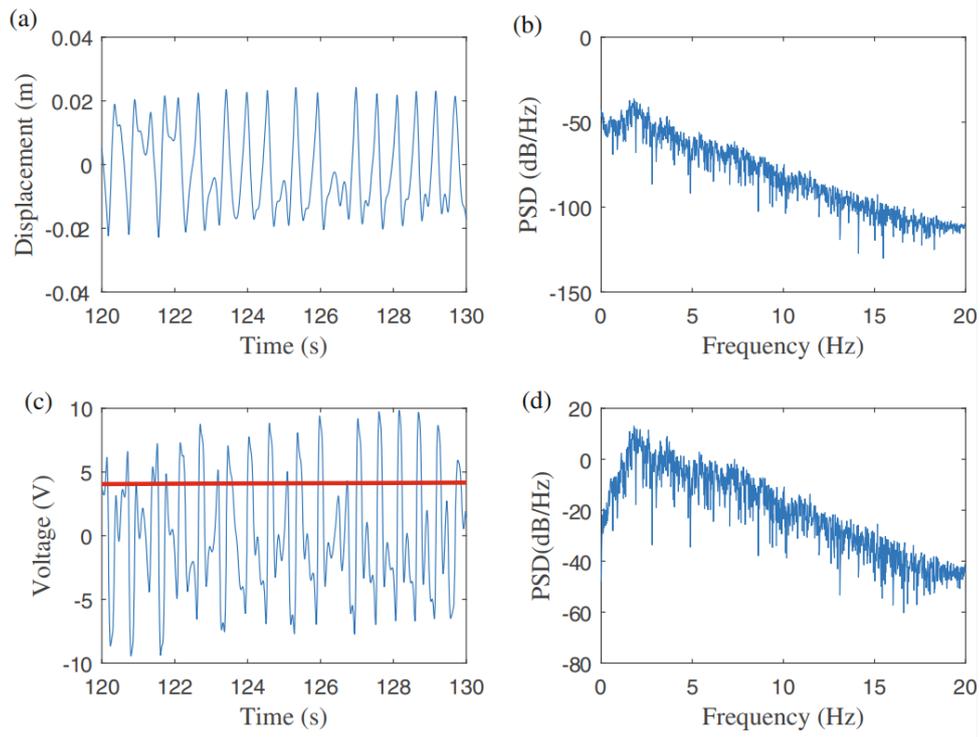
Description	Symbol	Value
Length of piezoelectric beam	$L$	0.3 m
Length of piezoelectric layer	$L_p$	0.015 m
Width of piezoelectric beam	$b$	0.016 m
Thickness of piezoelectric layer	$\delta_1$	0.0002 m
Thickness of steel substrate	$\delta_2$	0.00075 m
Density of piezoelectric layer	$\rho_1$	$2270 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Density of steel substrate	$\rho_2$	$7800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Young's modulus of piezoelectric layer	$E_1$	40 Gpa
Young's modulus of steel substrate	$E_2$	210 Gpa
Linear damping coefficient	$c_1$	$0.05 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$
Nonlinear damping coefficient	$c_2$	$0.05 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$
Coupling coefficient	$d_{31}$	$-240 \times 10^{-12} \text{ C} \cdot \text{N}^{-1}$
Electrical permittivity	$\epsilon_{33}$	$-1.2 \times 10^{-8} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$
Length of pendulum	$l$	0.03 m-0.07 m
Mass of pendulum	$M$	0.03 kg-0.07 kg
Gravity constant	$g$	$9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

Percobaan pertama pada penelitian adalah dengan memberi eksitasi harmonis pada struktur sistem. Pada percobaan ini dilakukan uji dengan variasi massa pendulum dengan rentang 0.01 kg-0.1kg, dengan selisih variasi 0.0005kg dan panjang tali pendulum  $l = 0.05\text{m}$ . Setelah dilakukan percobaan eksitasi harmonis, didapatkan dalam Gambar 2.11 bahwa struktur sistem tidak dapat menghasilkan voltase secara teratur saat massa di bawah 0.09kg. Sementara itu saat struktur pendulum berada pada 0.05kg, voltase yang dihasilkan dapat menunjukkan sebesar 9 V karena amplitudo yang tinggi pada beam. Saat massa dinaikkan hingga mencapai 0.09kg, respon struktur sistem dapat menunjukkan gerakan yang harmonik. Dapat disimpulkan bahwa dalam simulasi harmonik, sistem ini menunjukkan respons nonlinier yang kompleks, termasuk kekacauan yang dapat menyebabkan defleksi besar dan tegangan.



**Gambar 2.11 Respons dinamis dan respon voltase untuk massa pendulum ( $M$ ) yang berbeda pada struktur sistem. (a) Diagram pencabangan terhadap nilai RMS dan  $M$ , (b) Diagram fase massa 0.03kg, (c) Diagram fase massa 0.05kg, (d) Diagram fase massa 0.09kg.**

Selanjutnya pada penelitian ini dilakukan eksitasi secara acak terhadap struktur sistem. Pada percobaan ini didapatkan bahwa merancang panjang bandul dapat menyebabkan sistem untuk koherensi resonansi pada intensitas eksitasi acak yang lebih rendah. Hasilnya, juga terbukti bahwa energi pemanen dengan panjang pendulum yang lebih panjang memiliki tegangan permanen yang lebih tinggi. Pada percobaan ini didapatkan bahwa hasil voltase terbesar didapatkan saat sistem diberi eksitasi 0.5g dan panjang tali pendulum sepanjang 0.07m sebesar 8.5V seperti pada Gambar 2.12 dibandingkan saat panjang tali pendulum 0.05m, sistem hanya dapat menghasilkan voltase 6.1V.



**Gambar 2.12** Grafik respons dinamis dan respons voltase sistem di saat percobaan eksitasi acak dengan  $\sigma_a = 0.5$  dan  $l = 0.07$  m. (a) Perpindahan terhadap waktu. (b) Spektrum kapasitas daya perpindahan, (c) Voltase, (d) Spektrum kapasitas daya.

Penelitian terakhir mengenai energy harvesting dengan sistem piezoelektrik pendulum berjudul *Improving Efficiency of Piezoelectric Based Energy Harvesting from Human Motions Using Double Pendulum System* (Izadgoshasb et al., 2019). Penelitian dimulai dengan membandingkan variasi panjang lengan dan massa *piezoelectric energy harvester with single pendulum* (PEHSP) dan *piezoelectric energy harvester with double pendulum* (PEHDP) terhadap output berupa energi kinetik dan percepatan sudutnya. Hasil dari perbandingan variabel panjang lengan dan massa pendulum dapat dilihat di tabel berikut.

**Tabel 2.4 Hasil analisa variabel panjang lengan dan massa (a) double pendulum (b) single pendulum pada penelitian Improving efficiency of piezoelectric based energy harvesting from human motions using double pendulum system (Izadgoshasb et al., 2019)**

Parameters adopted for double pendulum in numerical analysis.

Design No.	$l_1$ (mm)	$l_2$ (mm)	$m_1$ (g)	$m_2$ (g)	$\alpha$ (rad/s <sup>2</sup> ) Max	$E_k$ (mJ) Max
1	50	50	60	120	3213.0	226.8
2	50	50	60	60	1968.1	187.6
3	50	50	120	120	1980.0	248.3
4	65	65	60	120	2100.3	255.1
5	65	65	60	60	1102.7	181.0
6	65	65	120	120	1264.4	284.3
7	75	75	60	120	1296.3	219.1
8	75	75	60	60	885.7	197.3
9	75	75	120	120	1303.2	360.2
10	90	90	60	120	1216.3	510.8
11	90	90	60	60	873.2	420.9
12	90	90	120	120	1311.8	577.3

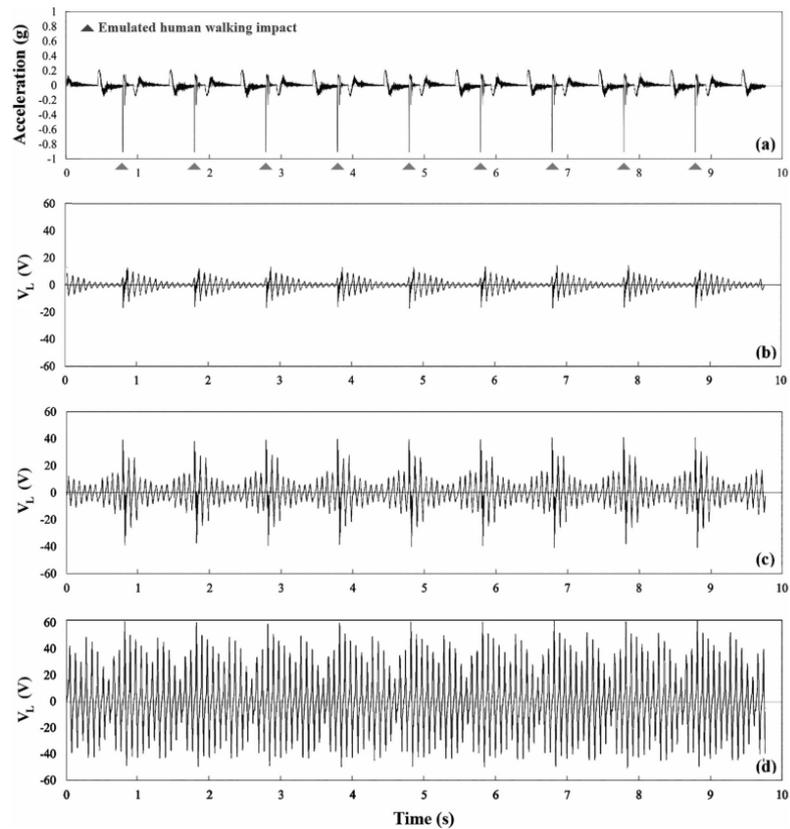
Parameters adopted for single pendulum in numerical analysis.

Design No.	$l$ (mm)	$m$ (g)	$\alpha$ (rad/s <sup>2</sup> ) Max	$E_k$ (mJ) Max
1	100	120	99.7	124.2
2	100	240	99.1	241.2
3	130	120	77.2	165.0
4	130	240	76.3	268.1
5	150	120	67.2	192.2
6	150	240	66.3	348.3
7	180	120	56.5	233.0
8	180	240	55.6	391.1

Dari perbandingan pada Tabel 2.4, didapatkan parameter untuk panjang lengan dan massa terbaik untuk kedua sistem, yaitu design no 7 untuk PEHSP dan design no 12 untuk PEHDP.

Selanjutnya kedua sistem tersebut diuji coba dengan menggunakan uji *shaker test* dan uji gerakan manusia langsung dengan tolak ukur gerakan jalan dan jogging manusia dengan kisaran eksitasi 1g untuk percepatannya dan 1 Hz untuk frekuensi gerak agar didapatkan variabel hasil berupa *output voltage* (VL), *idle time* dan *harvested power* (W). Pengujian ini juga menambahkan sistem *piezoelectric energy harvester with cantilever beam* (PEHCB) sebagai tolak ukur variasi sistem.

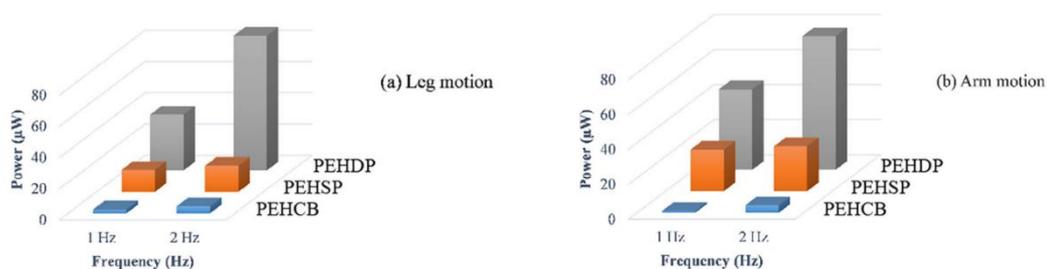
Dalam pengujian *shaker test* dengan eksitasi percepatan 1g dan frekuensi 1 Hz, didapatkan bahwa PEHDP dapat menghasilkan *output voltage* sebesar hampir 60 V, angka tersebut 1.5 kali lebih besar dari PEHSP dan 6 kali lebih besar dari PEHCB. Selanjutnya dalam variabel pengujian *idle test*, PEHDP tercatat masih dapat menghasilkan *output voltage* sebesar 20 V di awal dan akhir *cycle*, sementara itu PEHCB hanya dapat menghasilkan sekitar 10 V pada awal dan akhir *cycle*. Hal tersebut menunjukkan bahwa PEHDP dapat menghasilkan rata-rata *output voltage* lebih besar dibandingkan PEHCB. Variabel pengujian terakhir adalah untuk mengetahui *output voltage* (VL) sepanjang *load resistance* ( $RL = 1M\Omega$ ) saat *idle time*. Dalam pengujian terakhir dapat dilihat bahwa *double pendulum system* sangat efektif untuk meningkatkan daya yang dihasilkan. Seluruh hasil data dengan menggunakan *shaker test* dapat dilihat pada Gambar 2.13;



**Gambar 2.13 Hasil pengujian Shaker Test (a) percepatan eksitasi, (b) Output Voltage PEHCB, (c) Output Voltage PEHSP, (d) Output voltage PEHDP penelitian Improving efficiency of piezoelectric based energy harvesting from human motions using double pendulum system (Izadgoshab et al., 2019)**

Dalam pengujian dengan menggunakan gerakan manusia dengan karakteristik subjek berupa manusia dengan berat 80 kg dan tinggi 160 cm, PEHDP juga menunjukkan hasil yang lebih baik dibandingkan PEHCB dan PEHSP. Pada percobaan ini diuji coba juga variasi dengan sumber eksitasi dari gerakan kaki dan lengan manusia yang sedang jogging dengan frekuensi 2 Hz .

Hasil percobaan tersebut juga menunjukkan bahwa PEHDP dapat menghasilkan output power yang lebih tinggi dibandingkan dengan PEHSP dan PEHCB pada kedua gerakan tangan dan kaki saat jalan maupun jogging. Hasil percobaan tersebut dapat dilihat pada gambar berikut;



**Gambar 2.14 Nilai hasil akhir pada penelitian penelitian Improving efficiency of piezoelectric based energy harvesting from human motions using double pendulum system (Izadgoshab et al., 2019) berupa Output power yang dihasilkan, (a) Gerakan kaki, (b) Gerakan tangan**

Setelah meninjau ketiga hasil penelitian energy harvesting dengan menggunakan sistem piezoelektrik pendulum, dapat disimpulkan bahwa dari penelitian *Piezoelectric Spring Pendulum Oscillator Used for Multi-directional and Ultra-low frequency Vibration Energy Harvesting* (Y. Wu et al., 2018) dengan hanya menggunakan sistem piezoelektrik pendulum yang sederhana dapat menghasilkan energi listrik dengan sumber getaran yang rendah, dari penelitian *Nonlinear dynamics of a pendulum-beam coupling piezoelectric energy harvesting system* (Haitao & Qin, 2019), didapatkan bahwa sistem pendulum dapat meningkatkan energi listrik yang dihasilkan dari sistem *energy harvesting* yang menggunakan *cantilever beam* sederhana, Kesimpulan terakhir yang didapatkan dari hasil penelitian *Improving efficiency of piezoelectric based energy harvesting from human motions using double pendulum system* (Izadgoshasb et al., 2019), dengan menambah jumlah massa pada sistem piezoelektrik pendulum atau piezoelektrik bertingkat, akan meningkatkan nilai output atau energi listrik yang dihasilkan. Nilai yang dihasilkan pada percobaan dengan dua massa pendulum terbukti lebih baik dibandingkan yang hanya menggunakan satu massa. Oleh karena itu, penelitian yang membahas sistem piezoelektrik pendulum atau piezoelektrik bertingkat yang bervariasi dibutuhkan untuk terus melanjutkan pencarian sistem yang lebih baik dalam menghasilkan energi listrik.

## 2.2 Dasar Teori

### 2.2.1 Definisi Gelombang Laut

Gelombang adalah pergerakan naik dan turunnya air dengan arah tegak lurus permukaan air laut yang membentuk kurva/grafik sinusoidal. Gelombang laut disebabkan oleh angin. Angin di atas lautan mentransfer energinya ke perairan, menyebabkan riak-riak, alun/bukit, dan berubah menjadi apa yang kita sebut sebagai gelombang. Bhat (1978), Garisson (1993), dan Gross (1993) mengemukakan bahwa ada 4 bentuk besaran yang berkaitan dengan gelombang. Yakni;

- Amplitudo gelombang (T) 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 (biasanya didefinisikan dalam satuan detik).
- Kecepatan gelombang (C) adalah jarak yang ditempuh gelombang dalam satu satuan waktu tertentu.
- Kemiringan gelombang ( $H/\lambda$ ) adalah perbandingan antara tinggi gelombang dengan panjang gelombang

#### 2.2.1.1 Analisis Perumusan Data pada Gelombang Laut

Penelitian ini akan menggunakan gelombang laut di Indonesia sebagai sumber eksitasi dari sistem. Oleh karena itu, digunakanlah data tinggi gelombang laut yang diterbitkan oleh Pusat Meteorologi Maritim BMKG. Setelah didapatkan data tinggi gelombang (H), digunakan beberapa perumusan berikut yang dapat mencari periode (T), panjang gelombang ( $\lambda$ ), kecepatan gelombang (v) dan energi kinetik ( $E_k$ ) yang dihasilkan oleh gelombang.

- Periode Gelombang (T)

Setelah didapatkan tinggi gelombang (H), dapat dicari amplitudo gelombang (T) yang merupakan jarak antara puncak gelombang dengan permukaan rata-rata air dengan persamaan yang disarankan oleh Kim Nielsen [8] yaitu;

$$T = 3.55\sqrt{H}$$

(2. 1)

- Panjang Gelombang ( $\lambda$ ) dan Kecepatan Gelombang ( $v$ )

Dengan mengetahui periode gelombang, maka dapat dihitung panjang gelombang ( $\lambda$ ) dan kecepatan gelombang ( $v$ ) dengan persamaan yang disarankan oleh David Ross [9] yaitu;

$$\lambda = 5.12 T \quad (2.2)$$

Jika panjang gelombang dan periode diketahui, maka kecepatan gelombang dapat diperoleh dengan menggunakan rumus;

$$v = \frac{\lambda}{T} \quad (2.3)$$

- Sudut Kemiringan Maksimum pada Gelombang ( $\theta$ )

Setelah diketahui tinggi gelombang, dengan mengacu pada referensi (Viet et al., 2016), dapat dicari sudut kemiringan maksimum pada gelombang sebagai berikut.

$$\theta(u, t) = \arctan (A \cdot q \cdot \cos(q \cdot u - \omega \cdot t)) \quad (2.4)$$

Dimana:

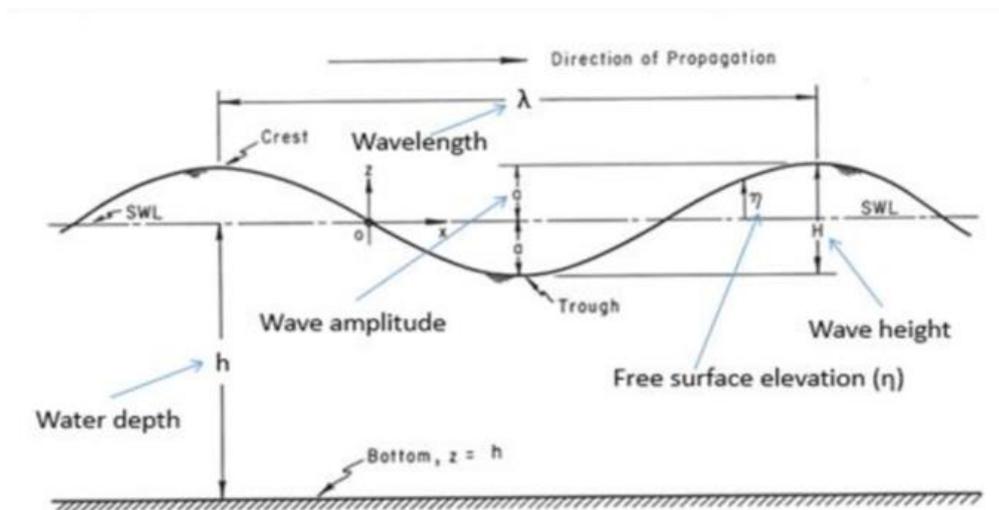
$A$ = Amplitudo gelombang

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

$u$ = Jarak sistem pada sumbu  $u$

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

$t$ = waktu

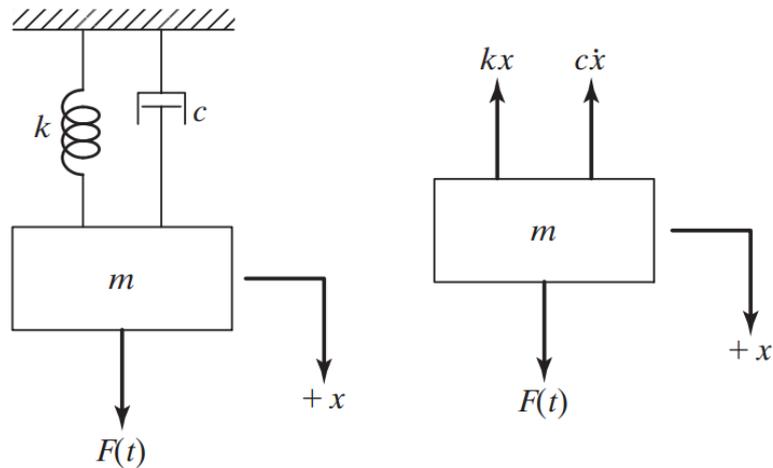


**Gambar 2.15** Skema parameter gelombang laut

## 2.2.2 Analisa Mekanika Getaran

### 2.2.2.1 Harmonically Excited Vibration

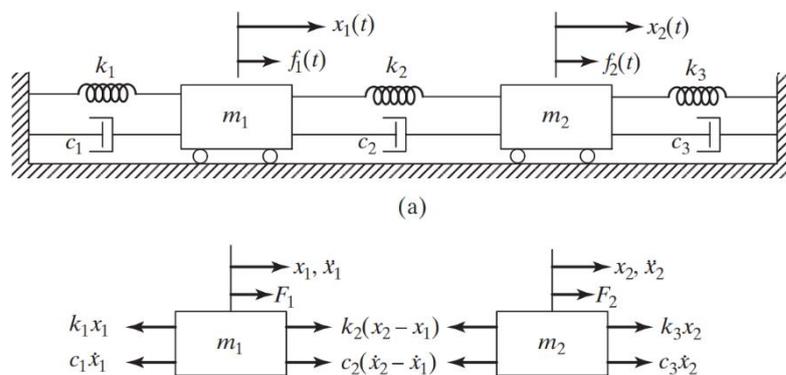
Suatu sistem mekanis atau struktural, dapat dikatakan mengalami *excited vibration* (getaran paksa) apabila *external energy* disuplai ke sistem baik melalui gaya yang diterapkan atau eksitasi perpindahan yang dipaksakan. Respon sistem tersebut terhadap *excited vibration* disebut *harmonic response*. Pada Gambar 2.16, dapat dilihat bagaimana pengaruh *external energy* terhadap respon dari suatu sistem.



Gambar 2.16 Sistem spring-mass-damper

### 2.2.2.2 Derajat Kebebasan

Derajat kebebasan adalah mekanisme kebebasan pergerakan suatu sistem. Jenis mekanisme kebebasan yang paling sederhana adalah jenis sistem yang memiliki satu derajat kebebasan atau “1 DOF”, artinya sistem tersebut hanya memiliki satu arah pergerakan massa. Jenis mekanisme kebebasan dapat bervariasi tergantung dari jumlah pergerakan massa pada sistem tersebut. Pada penerapannya tidak selamanya sistem dengan derajat kebebasan lebih dari satu memiliki jumlah arah pergerakan yang sama dan sistem yang memiliki lebih dari satu arah gerak massa atau satu derajat kebebasan, dapat saling mempengaruhi antara tiap gerak massanya. Contohnya dapat dilihat pada Gambar 2.17. Pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa sistem memiliki dua derajat kebebasan yang bergerak ke arah yang sama dan gerak massa 1 ( $m_1$ ) dan gerak massa 2 ( $m_2$ ) saling berpengaruh dalam gerak ke arah sumbu  $x$ .

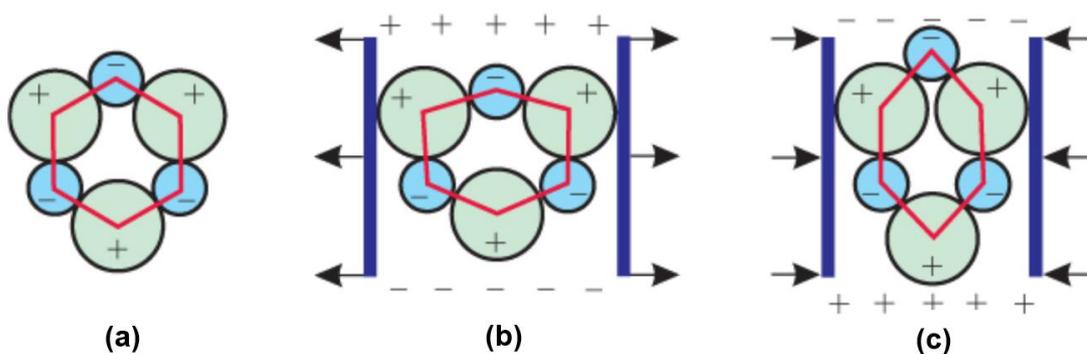


Gambar 2.17 Respons massa pada sistem dengan dua derajat kebebasan.

### 2.2.3 Piezoelektrik

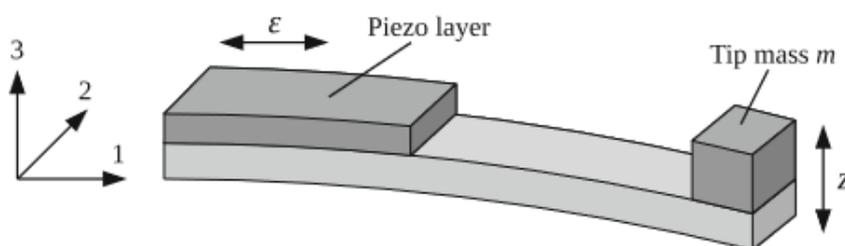
Piezoelektrik adalah jenis suatu bahan yang dapat menghasilkan tegangan listrik saat mengalami defleksi akibat getaran, tekanan, atau tarikan. Hal tersebut dapat terjadi karena material piezoelektrik memungkinkan terjadinya polarisasi muatan saat material diberikan defleksi, sehingga material tersebut dapat menghasilkan listrik. Pemilihan penggunaan piezoelektrik pada percobaan penelitian ini disebabkan oleh beberapa faktor, seperti strukturnya yang ringkas jika dibandingkan dengan elektromagnetik, dapat menghasilkan output listrik yang cukup tinggi, dan terdapat beberapa pilihan jenis tergantung dengan pengaplikasiannya.

Pada material piezoelektrik, terdapat susunan muatan positif dan negatif yang tersebar. Pada Gambar 2.18(a) dapat dilihat susunan muatan dalam material piezoelektrik saat tidak terjadi gaya atau defleksi pada material tersebut. Namun saat material tersebut mendapat gaya berupa gaya tarik maupun gaya tekan seperti pada Gambar 2.18(b) dan Gambar 2.18(c), muatan pada material piezoelektrik bergerak sehingga terjadi polarisasi yang dapat menghasilkan tegangan listrik. Polarisasi akibat gaya tersebut juga menyebabkan terbentuknya dua kutub positif dan negatif pada material tersebut.



**Gambar 2.18 Respon material piezoelektrik terhadap gaya yang diberikan (a) muatan tanpa diberikan gaya (b) muatan diberi gaya Tarik (c) muatan diberi gaya tekan**

Pada percobaan pembangkit listrik tenaga gelombang laut ini menggunakan jenis piezoelektrik kantilever. Piezoelektrik kantilever merupakan jenis piezoelektrik berbentuk kantilever dengan jenis material piezoelectric transducer (PZT) di bagian atas atau bawah. Piezoelektrik kantilever ini dapat dimodelkan sebagai pegas kantilever yang memiliki konstanta kekakuan.



**Gambar 2.19 Piezoelektrik Kantilever**

Menurut Gambar 2.19, dapat dilihat bahwa piezoelektrik kantilever memiliki dua arah sumber getaran yaitu arah  $z$  yang merupakan defleksi pada material dan arah  $x$  yang merupakan regangan pada material. Untuk mengetahui jumlah besaran tegangan listrik yang dihasilkan oleh piezoelektrik kantilever, dapat digunakan persamaan (2.5).

Dimana:

$V_p$  = Voltase *piezoelectric*

$d_{31}$  = Konstanta voltase

$E_p$  = Modulus elastisitas

$w_p$  = Lebar *piezoelectric*

$t$  = Tebal *piezoelectric*

$C$  = *Piezoelectric capacitance*

$X_p$  = Defleksi *piezoelectric*

### 2.2.3 Stabilitas pada *Buoy* atau Benda Terapung

Stabilitas pada *buoy* atau benda terapung merupakan kemampuan benda tersebut untuk mengapung atau melayang untuk kembali ke posisi semula setelah mengalami kemiringan. Pada pembahasan ini ada tiga titik penting dalam teori stabilitas benda terapung, yaitu titik berat (*centre of gravity*), titik apung (*centre of buoyancy*), dan titik metasentris.

#### a) Titik Berat (*Centre of Gravity*)

Titik berat (*centre of gravity*) merupakan titik di mana semua gaya-gaya yang menekan ke bawah. Pada *buoy* atau benda terapung, titik ini dapat diketahui dengan menghitung pada semua bagian benda tersebut, semakin berat bagian atas dari benda maka akan semakin tinggi juga posisi titik berat pada benda tersebut. Titik berat ini juga letaknya akan selalu sama selama benda tidak bergerak, namun jika bergerak seperti jika benda terapung mengalami *rolling* atau *trim*, maka titik berat akan bergeser.

#### b) Titik Apung (*Centre of Bouyancy*)

Titik apung (*centre of buoyancy*) merupakan titik pada *buoy* atau benda terapung di mana resultan gaya-gaya yang bekerja pada *buoy* yang menekan ke atas. Titik apung ini bukanlah titik yang berada pada satu posisi yang tetap, namun dengan adanya kemiringan pada *buoy*, maka titik ini dapat berubah juga. Titik apung pada *buoy* atau benda terapung inilah yang dapat membuat *buoy* balik ke posisi semula setelah benda mengalami *trim* atau *rolling*.

#### c) Titik Metasentris

Titik metasentris merupakan titik perpotongan vector gaya ke atas pada keadaan seimbang dengan vector gaya ke atas pada keadaan miring. Titik metasentris ini posisinya dapat berubah-ubah tergantung dari sudut kemiringan benda. Pada keadaan seimbang, titik metasentris dapat diketahui dengan persamaan berikut:

$$MG = KB + BM - KG$$

$$MG = KB + \frac{I}{V} - KG$$

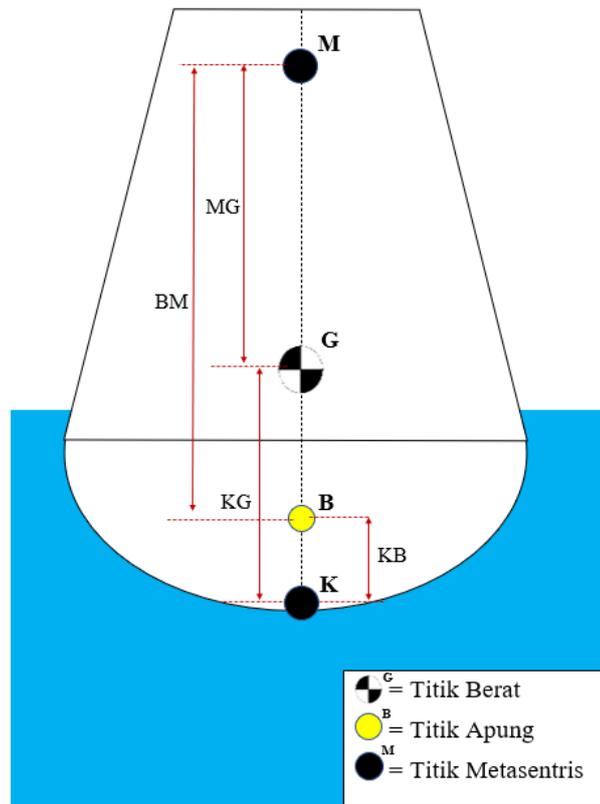
(2. 6)

Di mana:

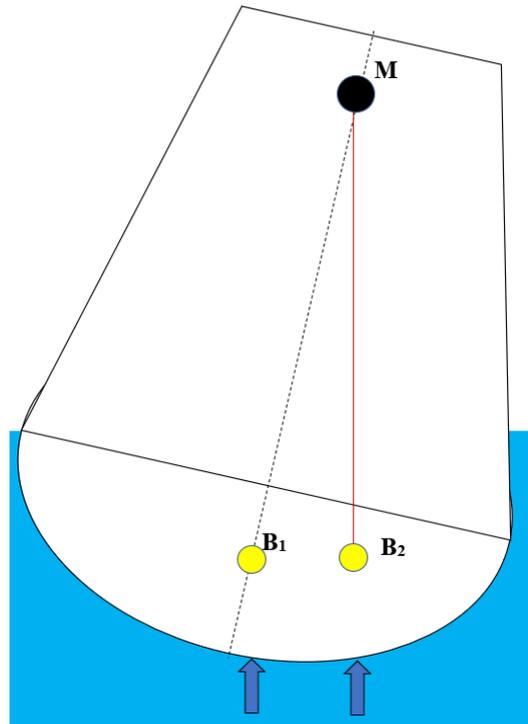
I = Inersia penampang ( $m^4$ )

V = Volume tercelup ( $m^3$ )

Untuk memperjelas penjelasan ini, maka dapat dilihat ilustrasi dari ketiga titik pada Gambar 2.19.



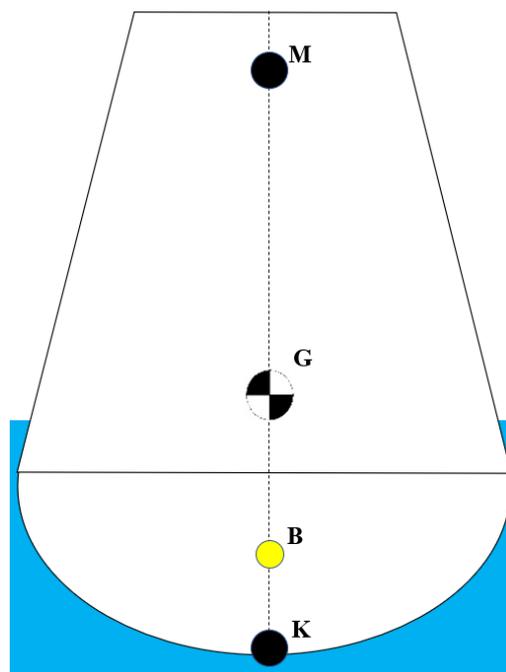
Gambar 2.20 Titik-titik pada stabilitas *buoy*.



Gambar 2.21 Titik metasentris pada *buoy*.

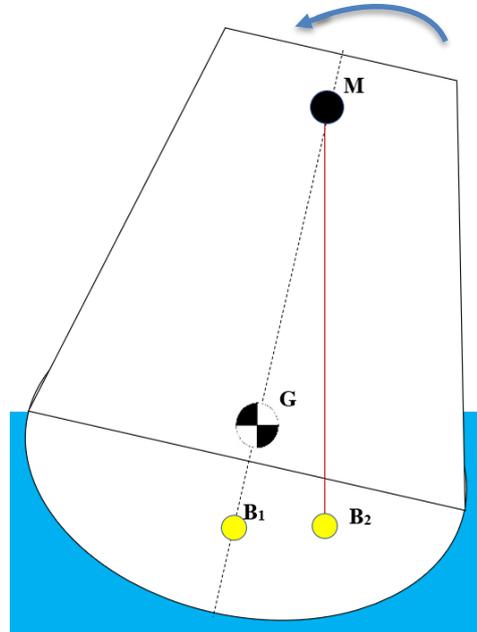
### 2.2.3.1 Stabilitas

Stabilitas adalah kemampuan *buoy* atau benda terapung untuk mengapung atau melayang dan kembali ke posisi semula setelah mengalami gangguan. Stabilitas pada *buoy* dibagi menjadi dua, yaitu stabilitas memanjang dan stabilitas melintang. Stabilitas memanjang adalah stabilitas yang terjadi saat *buoy* mengalami *trim*, sedangkan stabilitas melintang adalah stabilitas yang terjadi jika *buoy* mengalami *rolling*.



Gambar 2.22 Posisi *buoy* seimbang

*Buoy* dinyatakan seimbang jika titik berat dan titik apung berada pada satu garis yang tegak lurus dengan permukaan air seperti pada Gambar 2.22. Keseimbangan dari *buoy* ditentukan oleh titik metasentris terhadap titik beratnya. Adapun terdapat tiga kemungkinan letak kedua titik tersebut seperti:

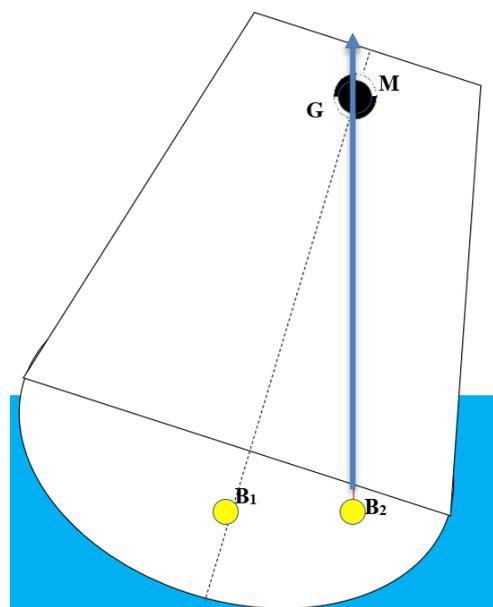


**Gambar 2.23 Buoy Stabil**

**a) Titik Metasentris di atas Titik Berat**

Dapat dilihat pada Gambar 2.23 di mana dalam keadaan ini keseimbangan benda dinyatakan stabil, sebab gaya apung keatas dan gaya berat *buoy* merupakan koppel yang menyebabkan benda tersebut akan kembali berdiri tegak lagi. Maka Stabilitasnya adalah positif.

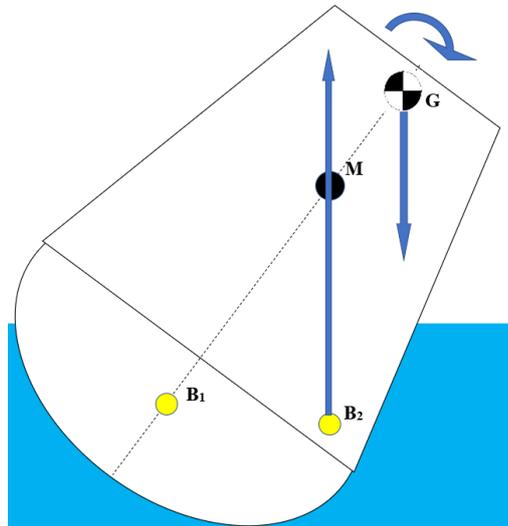
**b) Titik Metasentris pada Titik Berat**



**Gambar 2.24 Buoy Keseimbangan Indifferen.**

Dapat dilihat pada Gambar 2.22 keseimbangan semacam pada *buoy* dapat dinyatakan indifferen, sebab garis gaya apung dan garis gaya berat benda tidak membentuk momen koppel (momen Koppel = 0). Dengan demikian kedudukanya seimbang sehingga stabilitasnya = 0.

c) **Titik Metasentris di bawah Titik Berat**



**Gambar 2.25 Keseimbangan *Buoy* Labil**

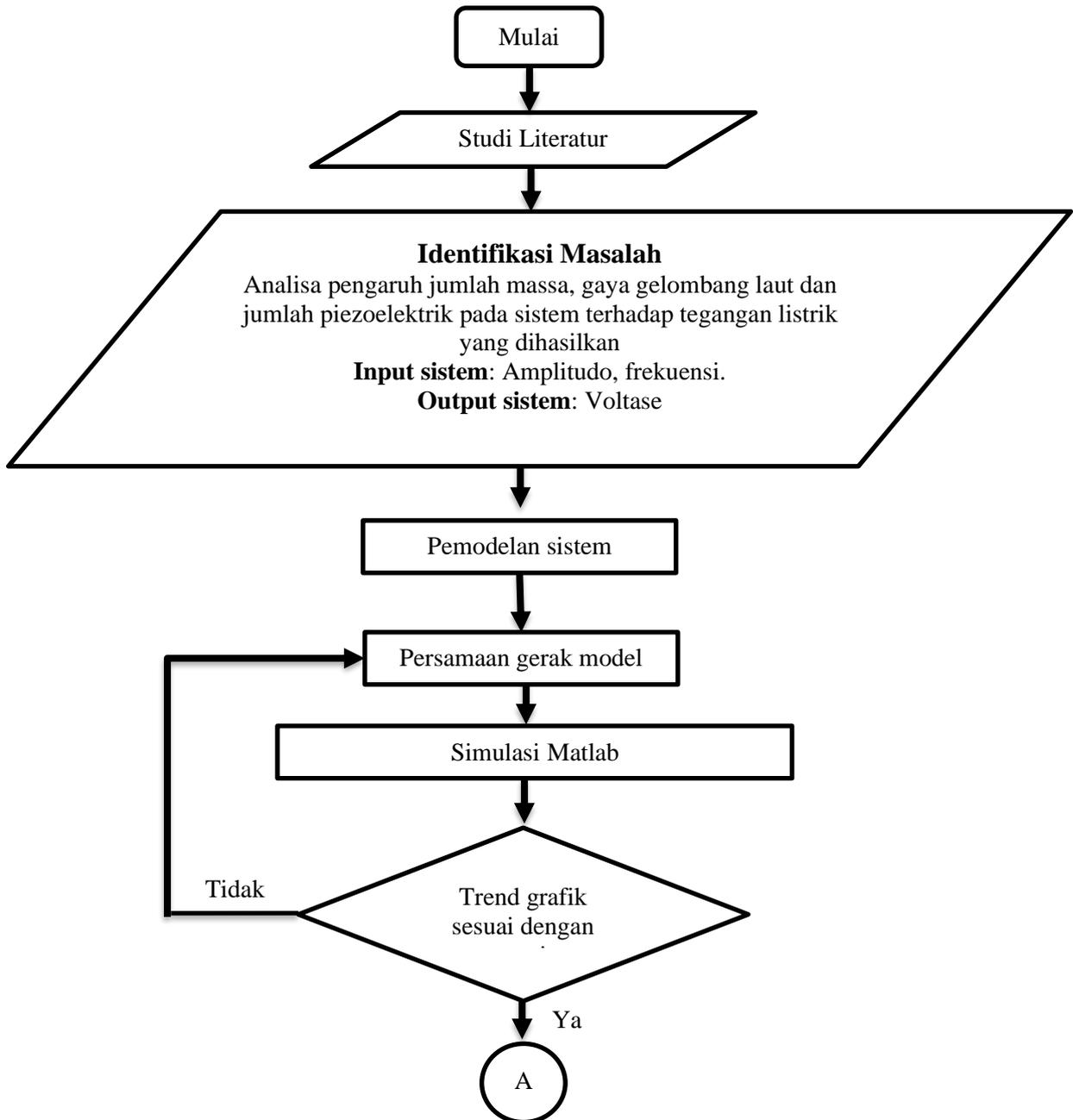
Dapat dilihat pada Gambar 2.25 keseimbangan *buoy* adalah labil, sebab koppel yang dibentuk oleh gaya apung dan berat benda akan memperbesar sudut kemiringan lambungnya. Maka stabilitasnya dinyatakan negative.

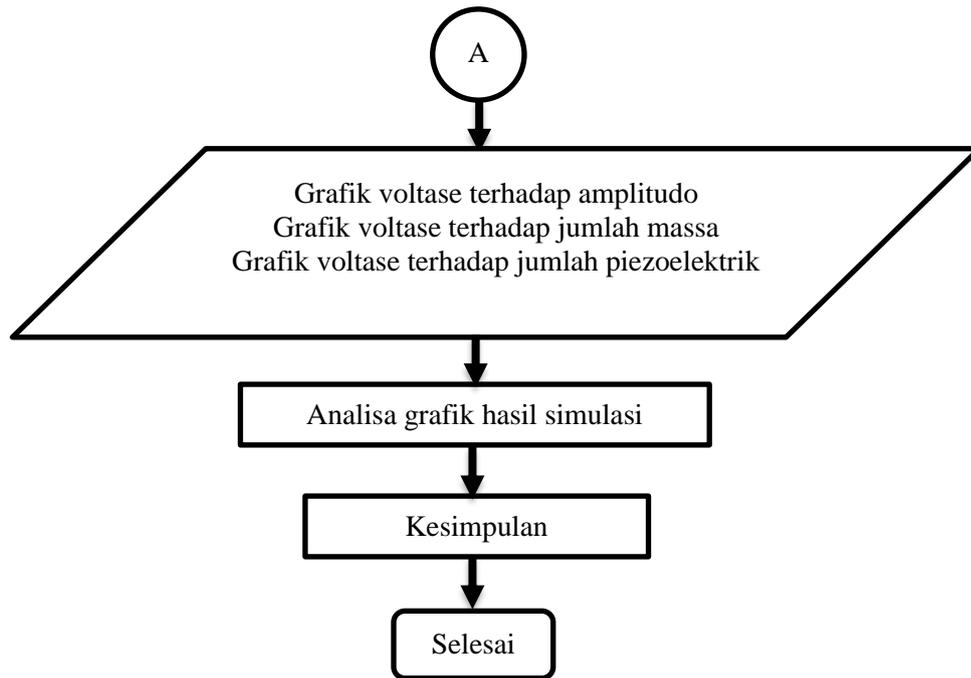
## BAB III METODOLOGI

### 3.1 Tahapan Penelitian

#### 3.1.1 Diagram Alir

Untuk mencapai hasil penulisan tugas akhir yang sistematis dilakukan beberapa langkah-langkah demi tercapainya tujuan penulisan. Langkah-langkah tersebut dapat dilihat pada gambar berikut,





**Gambar 3.1 Diagram Alir Metodologi Penulisan**

### 3.1.2 Penjelasan Diagram Alir

Berikut adalah penjelasan terkait diagram alir pada Gambar 3.1:

1. Studi literatur

Sebelum penelitian dilakukan, diperlukan adanya tinjauan pustaka mengenai penelitian-penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya. Topik studi yang ditinjau berkaitan dengan gelombang sebagai input dari sistem yang akan dipakai, piezoelektrik sebagai teknologi yang dipakai sistem, derajat kebebasan pada sistem, dan contoh pembangkit listrik tenaga gelombang laut.

2. Identifikasi Masalah

Pada penelitian tugas akhir ini, masalah yang diidentifikasi dibagi menjadi dua bagian, yaitu input dan output. Input merupakan suatu masukan yang diberikan pada simulasi, yaitu berupa variasi variabel pada gelombang laut. Sedangkan output merupakan hasil yang didapatkan dalam simulasi, yaitu berupa voltase yang dihasilkan dari *energy harvesting*.

3. Pemodelan sistem

Pada penelitian ini, pemodelan yang dilakukan menggunakan sistem massa piezoelektrik kantilever bertingkat.

4. Persamaan gerak model

Setelah mendapatkan pemodelan sistem, persamaan gerak dianalisa melalui *free-body diagram* sampai ke tahap *state variable*.

5. Simulasi MATLAB

Persamaan yang sudah didapat kemudian dibuat menjadi blok diagram pada MATLAB Simulink.

6. Trend grafik sesuai teori

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

7. Grafik respon terhadap variasi

Dari simulasi sebelumnya yang sudah dilakukan, akan didapatkan hasil berupa voltase. Hasil tersebut kemudian dibuat kedalam grafik yang bertujuan untuk melihat *trendline* dan membandingkan hasil dari variasi parameter. Ada tiga grafik akhir yang akan dianalisa yaitu grafik voltase terhadap tinggi gelombang laut, grafik voltase terhadap jumlah massa dan grafik voltase terhadap jumlah piezoelektrik perbaris

8. Analisa grafik

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

9. Kesimpulan

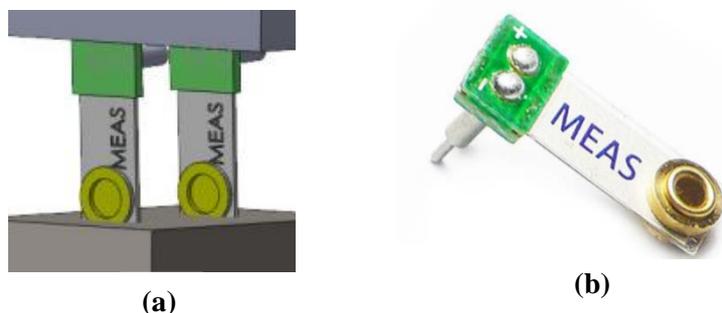
Dari hasil analisa grafik dapat disimpulkan pengaruh-pengaruh variasi pada *output* pembangkit. Mulai dari *trendline* hingga parameter yang menghasilkan voltase paling optimal.

### 3.2 Rancangan Model

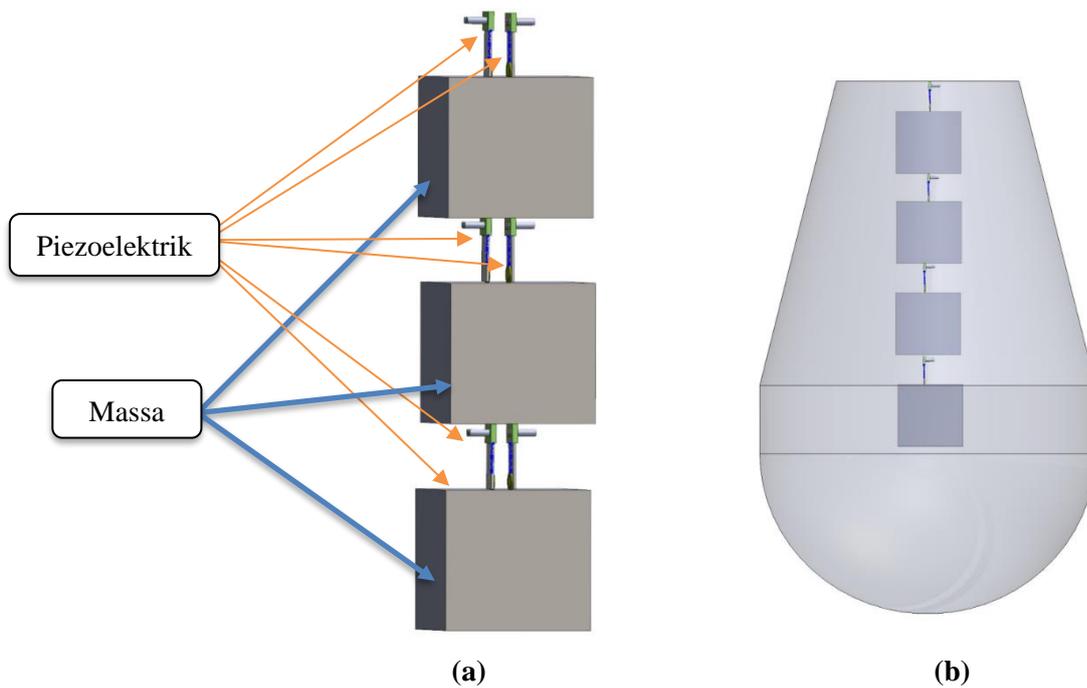
#### 3.2.1 Perancangan Mekanisme

Pada penelitian ini, sistem memanfaatkan input dari gaya horizontal gerak gelombang laut. Saat sistem mendapatkan gaya dari gelombang, massa sistem akan bergerak dan membuat adanya defleksi dan getaran pada plat piezoelektrik yang dapat menghasilkan tegangan listrik.

Perancangan sistem ini merupakan rancangan pembangkit listrik tenaga gelombang laut (PLTGL) dengan sistem massa piezoelektrik kantilever bertingkat pada mekanisme apung. Perancangan model dilakukan menggunakan *software Solidworks 2020*. Rancangan PLTGL berikut dapat diaplikasikan pada *bouy* karena ukurannya yang relatif kecil dan membutuhkan energi yang tidak besar.



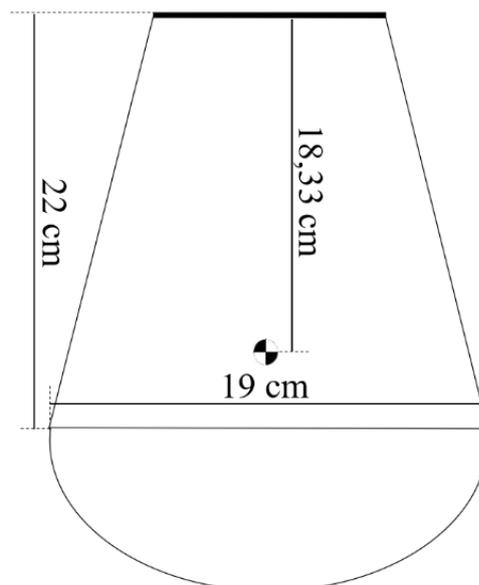
Gambar 3.2 Piezoelektrik Minisense 100 pada Percobaan



Gambar 3.3 (a) Ilustrasi Sistem (b) Ilustrasi system pada *Buoy*

### 3.2.4 Skema Gerak Sistem oleh Gelombang Laut pada Percobaan

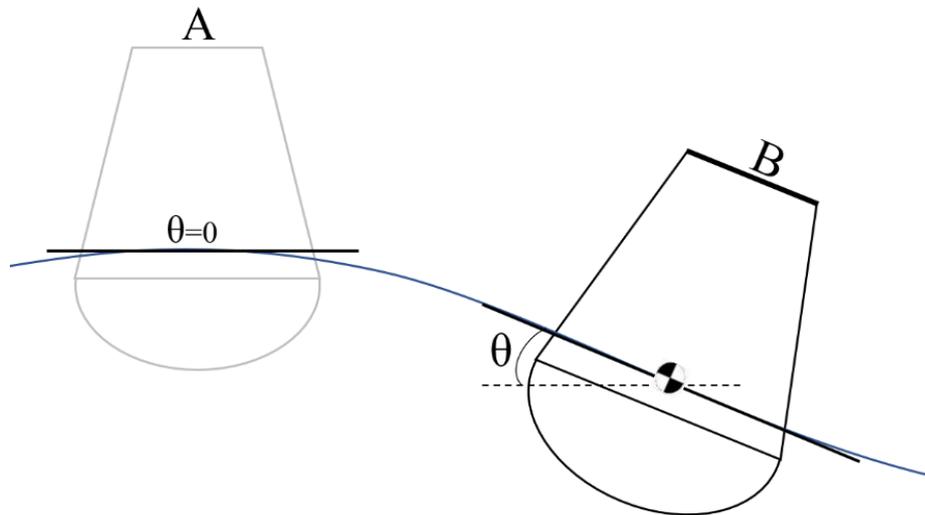
Pada percobaan ini, sistem yang berada di dalam benda terapung seperti ponton akan diuji gerakannya yang diakibatkan oleh gelombang laut yang memiliki variabel-variabel seperti tinggi gelombang dan sudut kemiringan gelombang seperti yang sudah dibahas sebelumnya. Oleh karena itu untuk mengetahui pengaruh gelombang terhadap sistem, pertama-tama perlu diketahui mengenai asumsi sistem benda terapung atau *buoy* yang digunakan pada percobaan ini.



Gambar 3.4 Dimensi *Buoy* pada Percobaan

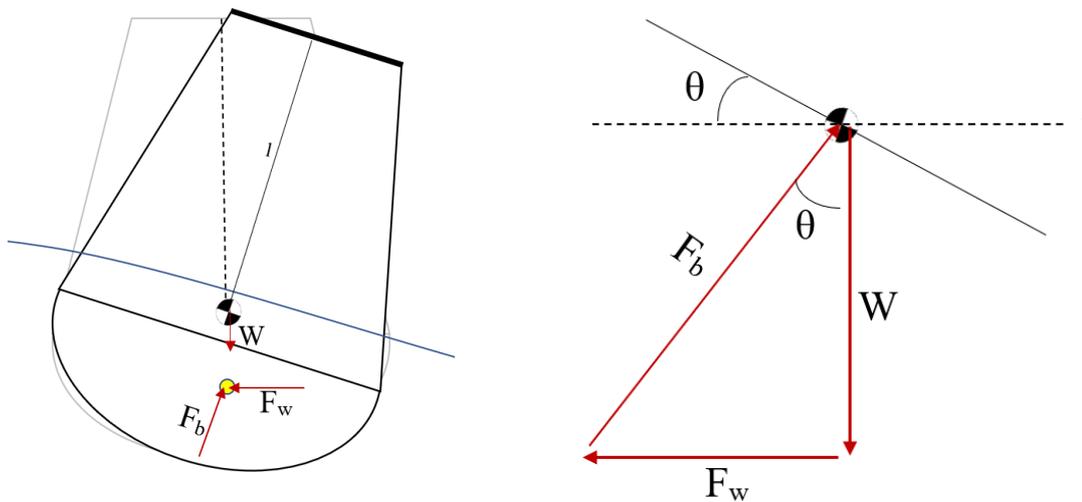
Dalam perhitungan untuk mencari perpindahan pada tiap massa yang nantinya akan dibahas, perlu diketahui terlebih dahulu dimensi dari *buoy* yang menyangkut jarak dari titik berat dan titik apung *buoy* yang dianggap menjadi satu, terhadap titik *top plate* dari *buoy*. Jarak tersebut memiliki nilai 18,33cm seperti yang dapat dilihat pada Gambar 3.4.

Berikutnya untuk perumusan yang nanti akan dibahas, perlu juga dicari nilai sudut kemiringan *buoy* yang terpengaruh oleh gradien kemiringan dari pengaruh gelombang. Ilustrasi kemiringan *buoy* pada saat terjadinya gelombang dapat dilihat pada Gambar 3.5



**Gambar 3.5 Ilustrasi Kemiringan Buoy pada Gelombang**

Seperti yang dapat dilihat pada Gambar 3.5, di saat *buoy* berada di suatu sudut kemiringan gelombang ( $\theta$ ), nilai gradien kemiringan gelombang tersebut juga akan berdampak pada kemiringan dari *buoy*. Nilai kemiringan *buoy* tersebut juga disebabkan oleh sudut dari gaya apung ( $F_b$ ) dan gaya gelombang ( $F_w$ ) yang berpengaruh pada *buoy* seperti yang dapat dilihat pada Gambar 3.6,



**Gambar 3.6 Penjabaran Gaya pada Kemiringan Buoy**

Untuk nilai perpindahan *top plate* searah sumbu x yang nantinya akan dijadikan sumber eksitasi *base motion*, nilai tersebut dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} X_b(t) &= A \sin(\omega t) \\ A &= l\theta \\ X_b(t) &= l\theta \sin(\omega t) \end{aligned} \tag{3.1}$$

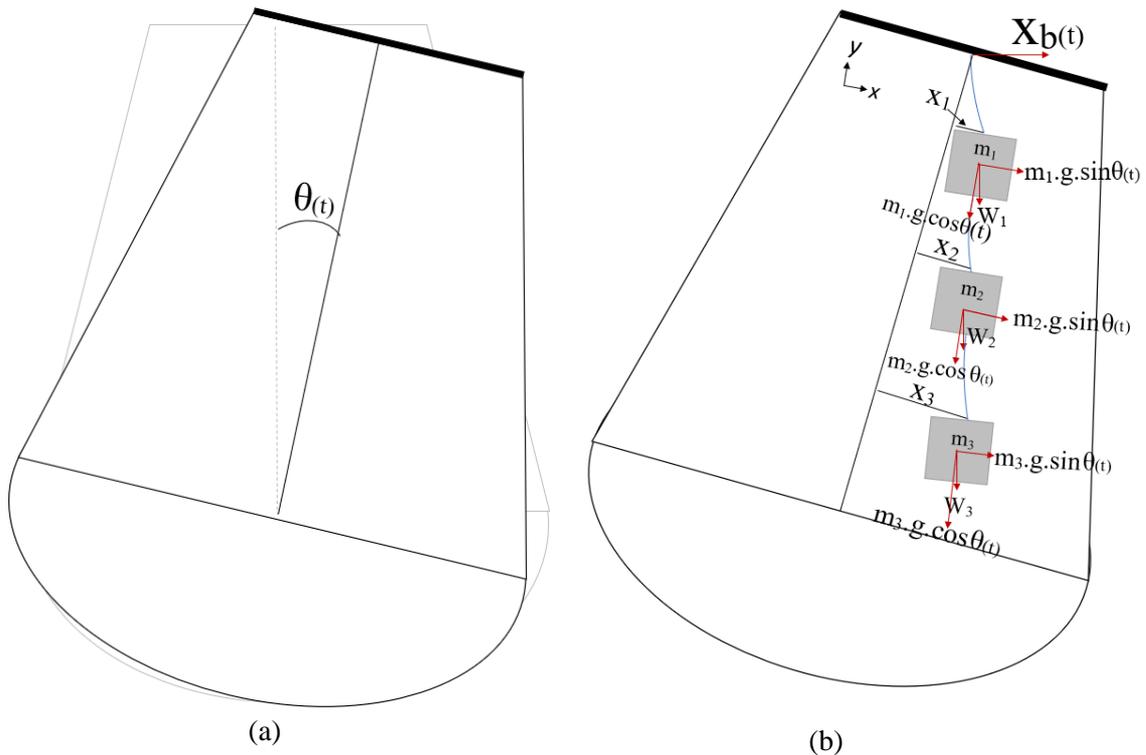
di mana:

$l$  = Jarak titik berat *buoy* terhadap *top plate*.

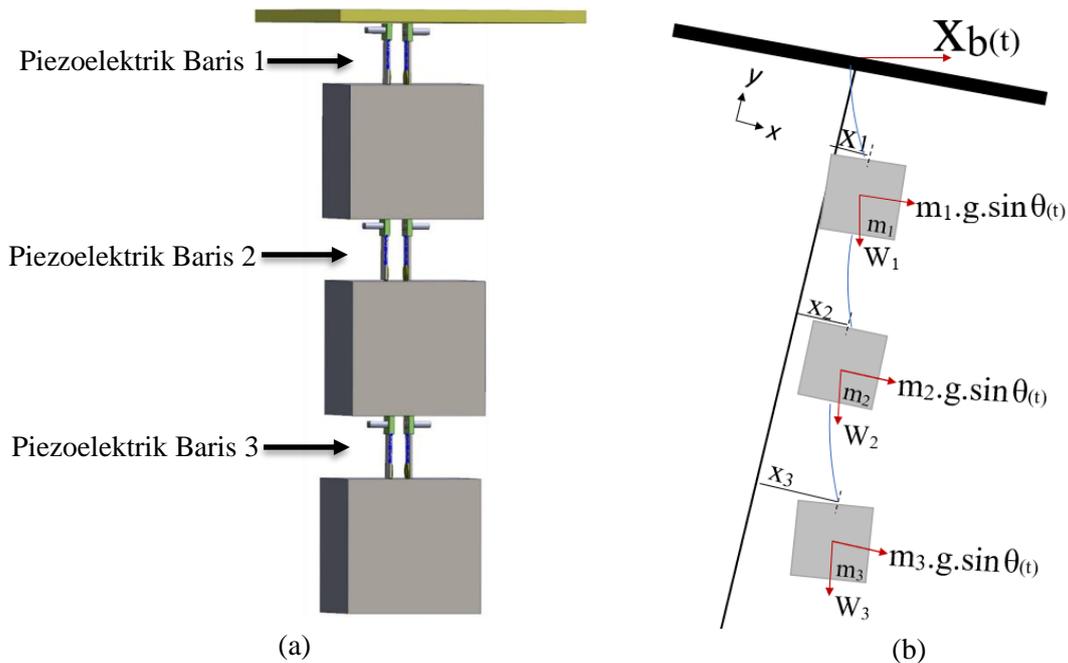
Setelah didapatkan nilai perpindahan *top plate* yang dianggap sebagai *base motion* maka dapat dibuat perumusan sistem pada subbab berikutnya.

### 3.2.2 Persamaan Gerak Model

Pada penelitian ini, gerakan arah vertikal (y) pada sistem dan massa piezoelektrik diabaikan. Pada penelitian ini juga terdapat beberapa variasi sistem seperti pada jumlah piezoelektrik perbaris dan jumlah massa pada sistem yang akan berpengaruh pada *free-body diagram*.



**Gambar 3.7 (a) Pengaruh Kemiringan Gelombang Terhadap Buoy (b) Pengaruh Kemiringan Buoy Terhadap Sistem**

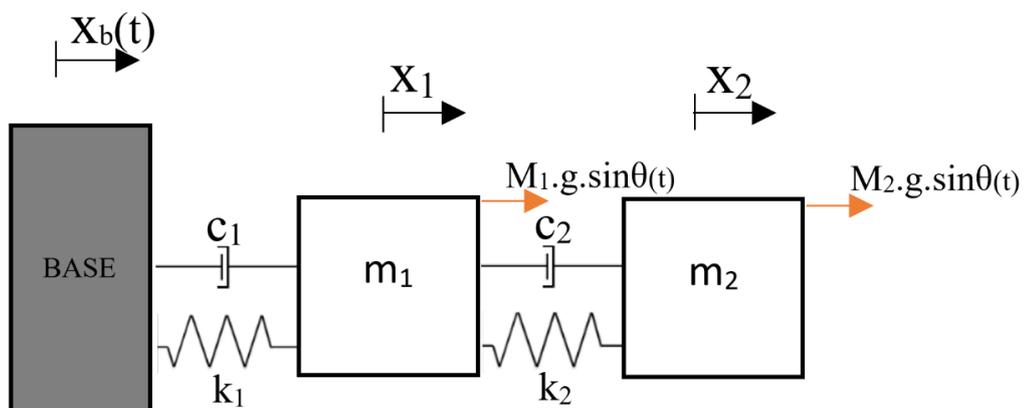


**Gambar 3.8 (a) Ilustrasi sistem dengan variasi 3 Massa dan 2 Piezoelektrik/baris (b) Skema Gerak Sistem 3 Massa saat Terdapat Perpindahan**

Sebagai contoh pembuatan skema *free-body diagram* pada penelitian ini. Digunakan sistem dengan variasi 3 massa dan 1 piezoelektrik sebagai acuan gaya dan respons yang ada pada sistem jika terdapat gaya eksitasi. Skema *free-body diagram* pada sistem dapat terlihat seperti pada Gambar 3.8(b).

Pada Gambar 3.8 dapat dilihat bahwa sistem memiliki tiga derajat kebebasan (3 DOF) karena variasinya dengan tiga massa. Selanjutnya untuk perumusan pada setiap variasi dari massa dan derajat kebebasan akan dijelaskan di subbab berikutnya. Untuk variasi pada jumlah piezoelektrik, dalam perumusan tidak dicantumkan karena variasi piezoelektrik dianggap tidak mempengaruhi *free-body diagram* dan penulisan perumusan dari sistem, karena variasi tersebut hanya berpengaruh pada jumlah konstanta gaya redaman. Seluruh persamaan memiliki kesamaan hipotesa yaitu piezoelektrik tidak bermassa.

### 3.2.2.1 Persamaan Gerak Model Variasi 2 Massa (2 DOF)



**Gambar 3.9 Free Body Diagram Model Variasi 2 Massa**

Keterangan:

$X_b(t)$  = Eksitasi *base motion*

$m_1$  = Massa 1

$m_2$  = Massa 2

$k_1$  = Konstanta kekakuan piezoelektrik 1

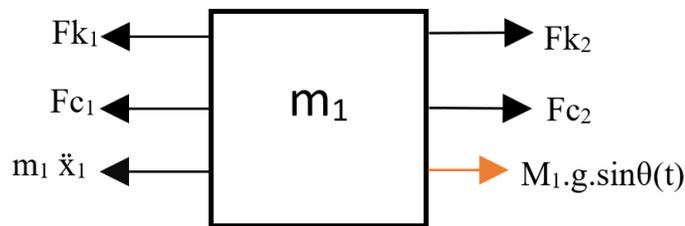
$k_2$  = Konstanta kekakuan piezoelektrik 2

$c_1$  = Konstanta redaman piezoelektrik 1

$c_2$  = Konstanta redaman piezoelektrik 2

$\theta(t)$  = Sudut Kemiringan Gelombang

Mengacu pada *free body diagram* pada Gambar 3.9, perumusan pada percobaan ini digunakan rumus dasar hukum Newton II pada setiap massa pada sistem, maka untuk penjabaran perumusan pada massa pertama ( $m_1$ ) pada variasi sistem 2 massa seperti berikut:



**Gambar 3.10 Free Body Diagram Massa 1 Variasi 2 Massa**

$$\Sigma F = m_1 \ddot{x}_1$$

$$-F_{k1} - F_{c1} + F_{k2} + F_{c2} + M_1 g \sin \theta(t) = m_1 \ddot{x}_1$$

di mana:

$$F_{k1} = k_1(x_1 - x_b)$$

$$F_{k2} = k_1(x_2 - x_1)$$

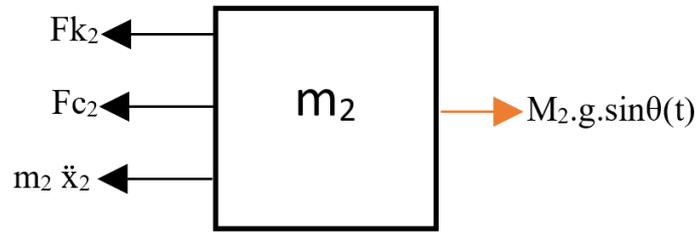
$$F_{c1} = c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_b)$$

$$F_{c2} = c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1)$$

Sehingga:

$$\begin{aligned} -k_1(x_1 - x_b) - c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_b) + k_2(x_2 - x_1) + c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + M_1 g \sin \theta(t) &= m_1 \ddot{x}_1 \\ -k_1 x_1 + k_1 x_b - c_1 \dot{x}_1 + c_1 \dot{x}_b + k_2 x_2 - k_2 x_1 + c_2 \dot{x}_2 - c_2 \dot{x}_1 + M_1 g \sin \theta(t) &= m_1 \ddot{x}_1 \end{aligned} \quad (3.2)$$

Selanjutnya, untuk penjabaran perumusan pada massa kedua ( $m_2$ ) pada variasi sistem 2 massa seperti berikut:



Gambar 3.11 Free Body Diagram Massa 2 Variasi 2 Massa

$$\begin{aligned} \Sigma F &= m_2 \ddot{x}_2 \\ -F_{k_2} - F_{c_2} + M_2 g \sin \theta(t) &= m_2 \ddot{x}_2 \end{aligned}$$

di mana:

$$F_{k_2} = k_1(x_2 - x_1)$$

$$F_{c_2} = c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1)$$

Sehingga:

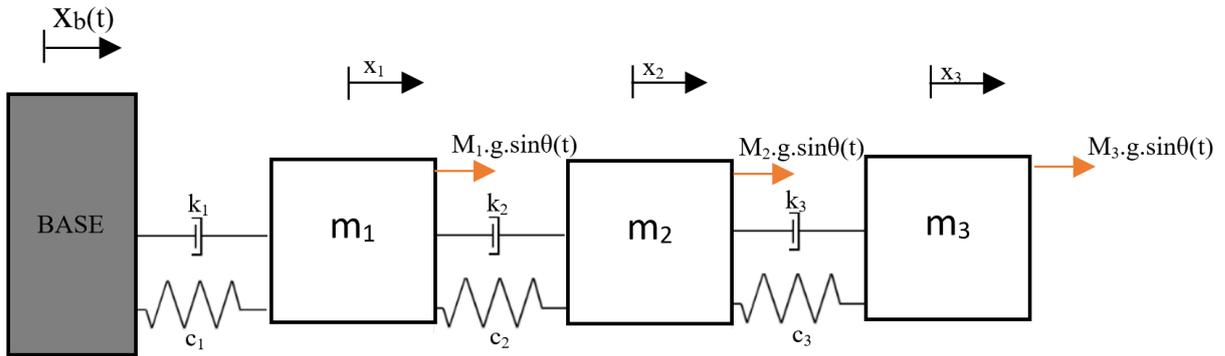
$$\begin{aligned} -k_2(x_2 - x_1) - c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + M_2 g \sin \theta(t) &= m_2 \ddot{x}_2 \\ -k_2 x_2 + k_2 x_1 - c_2 \dot{x}_2 + c_2 \dot{x}_1 + M_2 g \sin \theta(t) &= m_2 \ddot{x}_2 \end{aligned} \quad (3.3)$$

Setelah didapatkan persamaan (3.2) dan (3.3), maka untuk memudahkan penyusunan sistem saat simulasi, maka dapat dibuat menjadi *state variable* seperti berikut:

$$\begin{aligned} V_1 &= \dot{x}_1 \\ \dot{V}_1 &= \frac{1}{m_1} (-k_1 x_1 + k_1 x_b - c_1 V_1 + c_1 \dot{x}_b + k_2 x_2 - k_2 x_1 + c_2 \dot{x}_2 - c_2 V_1 + M_1 g \sin \theta(t)) \end{aligned} \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} V_2 &= \dot{x}_2 \\ \dot{V}_2 &= \frac{1}{m_2} (-k_2 x_2 + k_2 x_1 - c_2 V_2 + c_2 \dot{x}_1 + M_2 g \sin \theta(t)) \end{aligned} \quad (3.5)$$

### 3.2.2.2 Persamaan Gerak Model Variasi 3 Massa



Gambar 3.12 Free Body Diagram Model Variasi 3 Massa

Keterangan:

$X_b(t)$  = Eksitasi *base motion*

$m_1$  = Massa 1

$m_2$  = Massa 2

$m_3$  = Massa 3

$k_1$  = Konstanta kekakuan piezoelektrik 1

$k_2$  = Konstanta kekakuan piezoelektrik 2

$k_3$  = Konstanta kekakuan piezoelektrik 3

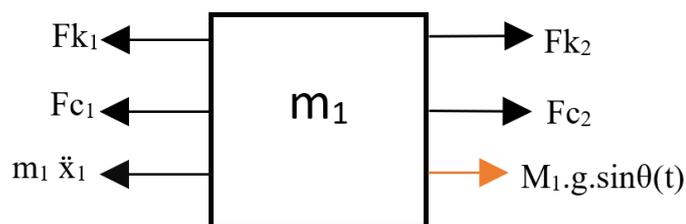
$c_1$  = Konstanta redaman piezoelektrik 1

$c_2$  = Konstanta redaman piezoelektrik 2

$c_3$  = Konstanta redaman piezoelektrik 3

$\theta(t)$  = Sudut Kemiringan Gelombang

Mengacu pada *free body diagram* pada Gambar 3.12, perumusan pada percobaan ini digunakan rumus dasar hukum Newton II pada setiap massa pada sistem maka untuk penjabaran perumusan pada massa pertama ( $m_1$ ) pada variasi sistem 3 massa seperti berikut:



Gambar 3.13 Free Body Diagram Massa 1 Variasi 3 Massa

$$\Sigma F = m_1 \ddot{x}_1$$

$$-F_{k1} - F_{c1} + F_{k2} + F_{c2} + M_1 g \sin \theta(t) = m_1 \ddot{x}_1$$

di mana:

$$F_{k1} = k_1(x_1 - x_b)$$

$$F_{k2} = k_2(x_2 - x_1)$$

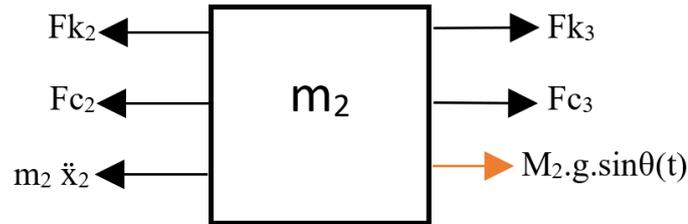
$$F_{c1} = c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_b)$$

$$F_{c2} = c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1)$$

Sehingga:

$$\begin{aligned}
 -k_1(x_1-x_b) - c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_b) + k_2(x_2-x_1) + c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + M_1g\sin\theta(t) &= m_1 \ddot{x}_1 \\
 -k_1x_1 + k_1x_b - c_1\dot{x}_1 + c_1\dot{x}_b + k_2x_2 - k_2x_1 + c_2\dot{x}_2 - c_2\dot{x}_1 + M_1g\sin\theta(t) &= m_1 \ddot{x}_1
 \end{aligned}
 \tag{3.6}$$

Selanjutnya, untuk penjabaran perumusan pada massa kedua( $m_2$ ) pada variasi sistem 3 massa seperti berikut:



**Gambar 3.14 Free Body Diagram Massa 2 Variasi 3 Massa**

$$\begin{aligned}
 \Sigma F &= m_2 \ddot{x}_2 \\
 -Fk_2 - Fc_2 + Fk_3 + Fc_3 + M_2g\sin\theta(t) &= m_2 \ddot{x}_2
 \end{aligned}$$

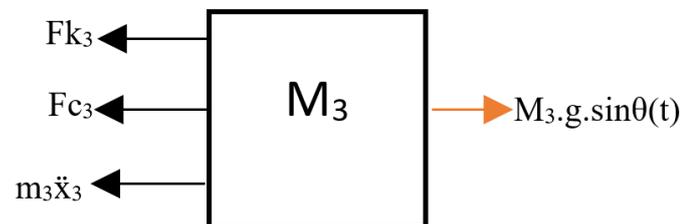
di mana:

$$\begin{aligned}
 Fk_2 &= k_2(x_2-x_1) \\
 Fk_3 &= k_3(x_3-x_2) \\
 Fc_2 &= c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) \\
 Fc_3 &= c_3(\dot{x}_3 - \dot{x}_2)
 \end{aligned}$$

Sehingga:

$$\begin{aligned}
 -k_2(x_2-x_1) - c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_3(x_3-x_2) + c_3(\dot{x}_3 - \dot{x}_2) + M_2g\sin\theta(t) &= m_2 \ddot{x}_2 \\
 -k_2x_2 + k_2x_1 - c_2\dot{x}_2 + c_2\dot{x}_1 + k_3x_3 - k_3x_2 + c_3\dot{x}_3 - c_3\dot{x}_2 + M_2g\sin\theta(t) &= m_2 \ddot{x}_2
 \end{aligned}
 \tag{3.7}$$

Terakhir, untuk penjabaran perumusan pada massa ketiga( $m_3$ ) pada variasi sistem 3 massa seperti berikut:



**Gambar 3.15 Free Body Diagram Massa 3 Variasi 3 Massa**

$$\begin{aligned}
 \Sigma F &= m_3 \ddot{x}_3 \\
 -Fk_3 - Fc_3 + M_3g\sin\theta(t) &= m_3 \ddot{x}_3
 \end{aligned}$$

di mana:

$$\begin{aligned}
 Fk_3 &= k_3(x_3-x_2) \\
 Fc_3 &= c_3(\dot{x}_3 - \dot{x}_2)
 \end{aligned}$$

Sehingga:

$$\begin{aligned}
 & -k_3(x_3-x_2) - c_3(\dot{x}_3 - \dot{x}_2) + M_3\sin\theta(t) = m_3\ddot{x}_3 \\
 & -k_3x_3 + k_3x_2 - c_3\dot{x}_3 + c_3\dot{x}_2 + M_3\sin\theta(t) = m_3\ddot{x}_3
 \end{aligned}
 \tag{3.8}$$

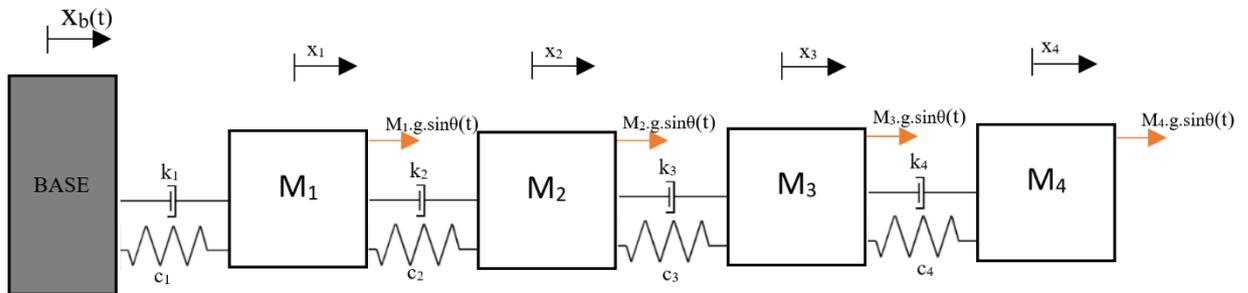
Setelah didapatkan persamaan (3.6), (3.7) dan (3.8), maka untuk memudahkan penyusunan sistem saat simulasi, maka dapat dibuat menjadi *state variable* seperti berikut:

$$\begin{aligned}
 V_1 &= \dot{x}_1 \\
 \dot{V}_1 &= \frac{1}{m_1}(-k_1x_1 + k_1x_b - c_1V_1 + c_1\dot{x}_b + k_2x_2 - k_2x_1 + c_2\dot{x}_2 - c_2V_1 + M_1g\sin\theta(t))
 \end{aligned}
 \tag{3.9}$$

$$\begin{aligned}
 V_2 &= \dot{x}_2 \\
 \dot{V}_2 &= \frac{1}{m_2}(-k_2x_2 + k_2x_1 - c_2V_2 + c_2\dot{x}_1 + k_3x_3 - k_3x_2 + c_3\dot{x}_3 - c_3V_2 + M_2g\sin\theta(t))
 \end{aligned}
 \tag{3.10}$$

$$\begin{aligned}
 V_3 &= \dot{x}_3 \\
 \dot{V}_3 &= \frac{1}{m_3}(-k_3x_3 + k_3x_2 - c_3V_3 + c_3\dot{x}_2 + M_3\sin\theta(t))
 \end{aligned}
 \tag{3.11}$$

### 3.2.2.3 Persamaan Gerak Model Variasi 4 Massa



Gambar 3.16 Free Body Diagram Variasi Sistem 4 Massa

Keterangan:

$X_b(t)$  = Eksitasi *base motion*

$m_1$  = Massa 1

$m_2$  = Massa 2

$m_3$  = Massa 3

$m_4$  = Massa 4

$k_1$  = Konstanta kekakuan piezoelektrik 1

$k_2$  = Konstanta kekakuan piezoelektrik 2

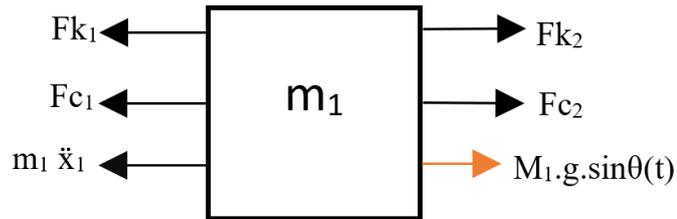
$k_3$  = Konstanta kekakuan piezoelektrik 3

$k_4$  = Konstanta kekakuan piezoelektrik 4

$c_1$  = Konstanta redaman piezoelektrik 1

- $c_2$  = Konstanta redaman piezoelektrik 2
- $c_3$  = Konstanta redaman piezoelektrik 3
- $c_4$  = Konstanta redaman piezoelektrik 4
- $\theta$  = Sudut Kemiringan Gelombang

Mengacu pada *free body diagram* pada Gambar 3.16, perumusan pada percobaan ini digunakan rumus dasar hukum Newton II pada setiap massa pada sistem maka untuk penjabaran perumusan pada massa pertama( $m_1$ ) pada variasi sistem 4 massa seperti berikut berikut:



**Gambar 3.17 Free Body Diagram Massa 1 Variasi Sistem 4 Massa**

$$\Sigma F = m_1 \ddot{x}_1$$

$$-F_{k1} - F_{c1} + F_{k2} + F_{c2} + M_1 g \sin\theta(t) = m_1 \ddot{x}_1$$

di mana:

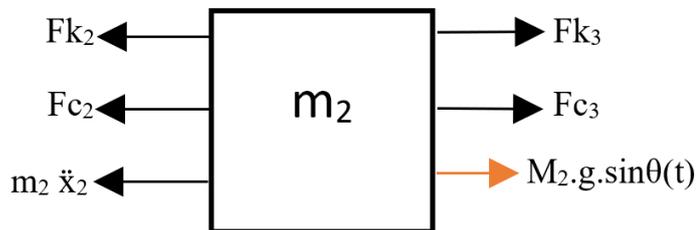
- $F_{k1} = k_1(x_1 - x_b)$
- $F_{k2} = k_1(x_2 - x_1)$
- $F_{c1} = c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_b)$
- $F_{c2} = c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1)$

Sehingga:

$$-k_1(x_1 - x_b) - c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_b) + k_2(x_2 - x_1) + c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + M_1 g \sin\theta(t) = m_1 \ddot{x}_1$$

$$-k_1 x_1 + k_1 x_b - c_1 \dot{x}_1 + c_1 \dot{x}_b + k_2 x_2 - k_2 x_1 + c_2 \dot{x}_2 - c_2 \dot{x}_1 + M_1 g \sin\theta(t) = m_1 \ddot{x}_1 \quad (3.12)$$

Selanjutnya, untuk penjabaran perumusan pada massa kedua( $m_2$ ) pada variasi sistem 4 massa seperti berikut:



**Gambar 3.18 Free Body Diagram Massa 2 Variasi Sistem 4 Massa**

$$\Sigma F = m_2 \ddot{x}_2$$

$$-F_{k2} - F_{c2} + F_{k3} + F_{c3} + M_2 g \sin\theta(t) = m_2 \ddot{x}_2$$

di mana:

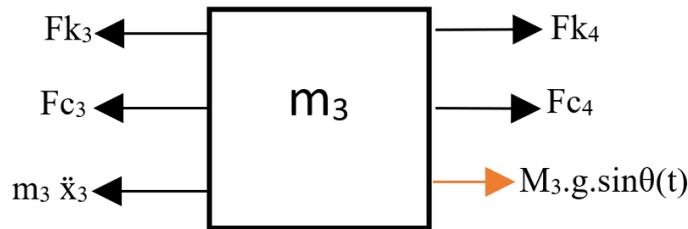
- $F_{k2} = k_2(x_2 - x_1)$
- $F_{k3} = k_3(x_3 - x_2)$
- $F_{c2} = c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1)$

$$F_{c3} = c_3 (\dot{x}_3 - \dot{x}_2)$$

Sehingga:

$$\begin{aligned} -k_2(x_2 - x_1) - c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_3(x_3 - x_2) + c_3(\dot{x}_3 - \dot{x}_2) + M_2 g \sin\theta(t) &= m_2 \ddot{x}_2 \\ -k_2 x_2 + k_2 x_1 - c_2 \dot{x}_2 + c_2 \dot{x}_1 + k_3 x_3 - k_3 x_2 + c_3 \dot{x}_3 - c_3 \dot{x}_2 + M_2 g \sin\theta(t) &= m_2 \ddot{x}_2 \end{aligned} \quad (3.13)$$

Kemudian, untuk penjabaran perumusan pada massa ketiga ( $m_3$ ) pada variasi sistem 4 massa seperti berikut:



**Gambar 3.19 Free Body Diagram Massa 3 Variasi Sistem 4 Massa**

$$\begin{aligned} \Sigma F &= m_3 \ddot{x}_3 \\ -F_{k3} - F_{c3} + F_{k4} + F_{c4} + M_3 g \sin\theta(t) &= m_3 \ddot{x}_3 \end{aligned}$$

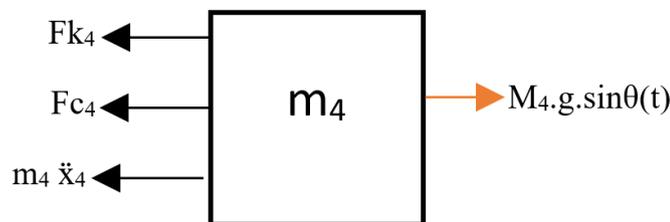
di mana:

$$\begin{aligned} F_{k3} &= k_3(x_3 - x_2) \\ F_{c3} &= c_3(\dot{x}_3 - \dot{x}_2) \\ F_{k4} &= k_4(x_4 - x_3) \\ F_{c4} &= c_4(\dot{x}_4 - \dot{x}_3) \end{aligned}$$

Sehingga:

$$\begin{aligned} -k_3(x_3 - x_2) - c_3(\dot{x}_3 - \dot{x}_2) + k_4(x_4 - x_3) + c_4(\dot{x}_4 - \dot{x}_3) + M_3 g \sin\theta(t) &= m_3 \ddot{x}_3 \\ -k_3 x_3 + k_3 x_2 - c_3 \dot{x}_3 + c_3 \dot{x}_2 + k_4 x_4 - k_4 x_3 + c_4 \dot{x}_4 - c_4 \dot{x}_3 + M_3 g \sin\theta(t) &= m_3 \ddot{x}_3 \end{aligned} \quad (3.14)$$

Terakhir, untuk penjabaran perumusan pada massa keempat ( $m_4$ ) pada variasi sistem 4 massa seperti berikut:



**Gambar 3.20 Free Body Diagram Massa 4 Variasi Sistem 4 Massa**

$$\begin{aligned} \Sigma F &= m_4 \ddot{x}_4 \\ -F_{k4} - F_{c4} + M_4 g \sin\theta(t) &= m_4 \ddot{x}_4 \end{aligned}$$

di mana:

$$Fk_4 = k_4(x_4 - x_3)$$

$$Fc_4 = c_4 (\dot{x}_4 - \dot{x}_3)$$

Sehingga:

$$\begin{aligned} -k_4(x_4 - x_3) - c_4(\dot{x}_4 - \dot{x}_3) + M_4 g \sin\theta(t) &= m_4 \ddot{x}_4 \\ -k_4 x_4 + k_4 x_3 - c_4 \dot{x}_4 + c_4 \dot{x}_3 + M_4 g \sin\theta(t) &= m_4 \ddot{x}_4 \end{aligned} \quad (3.15)$$

Setelah didapatkan persamaan (3.12), (3.13), (3.14) dan (3.15), maka untuk memudahkan penyusunan sistem saat simulasi, maka dapat dibuat menjadi *state variable* seperti berikut:

$$\begin{aligned} V_1 &= \dot{x}_1 \\ \dot{V}_1 &= \frac{1}{m_1} (-k_1 x_1 + k_1 x_b - c_1 V_1 + c_1 \dot{x}_b + k_2 x_2 - k_2 x_1 + c_2 \dot{x}_2 - c_2 V_1 + M_1 g \sin\theta(t)) \end{aligned} \quad (3.16)$$

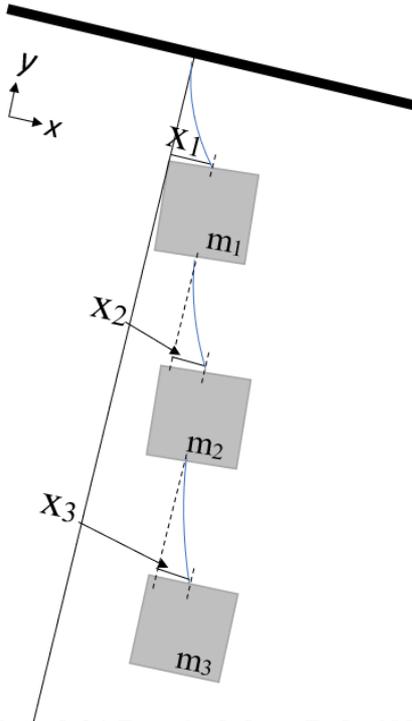
$$\begin{aligned} V_2 &= \dot{x}_2 \\ \dot{V}_2 &= \frac{1}{m_2} (-k_2 x_2 + k_2 x_1 - c_2 V_2 + c_2 \dot{x}_1 + k_3 x_3 - k_3 x_2 + c_3 \dot{x}_3 - c_3 V_2 + M_2 g \sin\theta(t)) \end{aligned} \quad (3.17)$$

$$\begin{aligned} V_3 &= \dot{x}_3 \\ \dot{V}_3 &= \frac{1}{m_3} (-k_3 x_3 + k_3 x_2 - c_3 V_3 + c_3 \dot{x}_2 + k_4 x_4 - k_4 x_3 + c_4 \dot{x}_4 - c_4 V_3 + M_3 g \sin\theta(t)) \end{aligned} \quad (3.18)$$

$$\begin{aligned} V_4 &= \dot{x}_4 \\ \dot{V}_4 &= \frac{1}{m_4} (-k_4 x_4 + k_4 x_3 - c_4 V_4 + c_4 \dot{x}_3 + M_4 g \sin\theta(t)) \end{aligned} \quad (3.19)$$

### 3.2.4 Perhitungan Nilai Perpindahan Relatif Tiap Massa

Setelah didapatkan seluruh nilai  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  dan  $x_4$  dari perumusan sebelumnya, satu-persatu nilai tersebut akan dihitung ulang untuk mendapatkan nilai perpindahan massa yang merepresentasikan nilai defleksi pada piezoelektrik tiap baris massa tersebut Seperti pada Gambar 3.21.



**Gambar 3.21 Perpindahan Relatif Baris**

Untuk mendapatkan nilai gerak relatif dari tiap massa, maka hasil akhir dari perhitungan sebelumnya akan dihitung ulang dengan perumusan:

$$\begin{aligned} X_1 &= x_1 \\ X_2 &= x_2 - x_1 \\ X_3 &= x_3 - x_2 \\ X_4 &= x_4 - x_3 \end{aligned}$$

(3.20)

Di mana;

$X_1$  = Nilai perpindahan massa 1

$X_2$  = Nilai perpindahan massa 2

$X_3$  = Nilai perpindahan massa 3

$X_4$  = Nilai perpindahan massa 4

### 3.3 Frekuensi Natural Sistem

Pada subbab ini akan dibahas mengenai frekuensi natural sistem pada setiap variasi. Contoh perumusan untuk pencarian frekuensi natural tersebut dapat diwakilkan dengan menggunakan sistem variasi 3 massa (3 DOF). Berdasarkan persamaan (3.6), (3.7), dan (3.8) pada variasi sistem 3 massa, maka dapat dibuat persamaan untuk mencari frekuensi natural sebagai berikut:

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 + k_1 x_1 - k_2 x_2 + k_2 x_1 &= 0 \\ m_2 \ddot{x}_2 + k_2 x_2 - k_2 x_1 - k_3 x_3 + k_3 x_2 &= 0 \\ m_3 \ddot{x}_3 + k_3 x_3 - k_3 x_2 &= 0 \end{aligned}$$

(3.21)

Di mana:

$$m_1=m_2=m_3=m$$

$$k_1=k_2=k_3=k$$

$$\begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2k & -k & 0 \\ -k & 2k & -k \\ 0 & -k & k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Dengan *Harmonic Motion*:  $x=Asin(\omega t)$ ;  $\ddot{x}=-A\omega^2\cos(\omega t)$

$$\begin{bmatrix} -m\omega^2 + 2k & -k & 0 \\ -k & -m\omega^2 + 2k & -k \\ 0 & -k & -m\omega^2 + k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Dengan asumsi  $\lambda = \frac{m\omega^2}{k}$

$$\begin{bmatrix} -\lambda + 2 & -1 & 0 \\ -1 & -\lambda + 2 & -1 \\ 0 & -1 & -\lambda + 1 \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

$$=-\lambda^3+5\lambda^2-6\lambda+1$$

$$\lambda_1= 0,198$$

$$\lambda_2=1,554$$

$$\lambda_3=3,246$$

Sehingga:  $w=\sqrt{\frac{\lambda k}{m}}$

$$w_1= 0,444 \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$w_2= 1,2465 \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$w_2= 1,801 \sqrt{\frac{k}{m}}$$

(3.25)

Dengan menggunakan contoh perumusan seperti berikut, maka dapat dicari frekuensi natural pada setiap variasi sistem seperti pada Tabel 3.1.

**Tabel 3.1 Frekuensi Natural Variasi Sistem**

Variasi Massa	Variasi Piezoelektrik/Baris			Frekuensi Natural
	1	2	3	
	Piezoelektrik/Baris	Piezoelektrik/Baris	Piezoelektrik/Baris	
2 Massa	49,78	70,40	80,52	$w_1$
	130,55	184,62	226,12	$w_2$
3 Massa	35,82	50,66	62,05	$w_1$
	100,57	142,23	174,20	$w_2$
	145,31	205,50	251,69	$w_3$
4 Massa	28,01	39,62	48,52	$w_1$
	80,68	114,11	139,75	$w_2$
	123,61	174,81	214,10	$w_3$
	151,61	214,40	262,59	$w_4$

### 3.4 Parameter dan Variabel Sistem

Sebelum melakukan perhitungan matematis dan simulasi, terdapat beberapa parameter percobaan yang harus diketahui terlebih dahulu. Parameter-parameter tersebut antara lain seperti parameter pada sistem utama, parameter piezoelektrik dan parameter gelombang laut. Parameter pada sistem utama pada sistem ini yang akan dibutuhkan adalah berat massa. Untuk parameter berat massa utama sistem dapat dilihat pada Tabel 3.1.

**Tabel 3.2 Massa pada Percobaan**

Berat Massa pada Sistem
0,4 kg

Pada simulasi ini, setiap massa pada sistem diasumsikan terbuat dari *stainless steel 305* yang memiliki parameter massa jenis  $8 \text{ gr/cm}^3$ , sehingga untuk balok seberat 0.4 kg berbentuk kubus, massa pada sistem akan berukuran  $3,68\text{cm} \times 3,68\text{cm} \times 3,68\text{cm}$ . Parameter selanjutnya yang dibutuhkan dalam perhitungan sistem adalah parameter piezoelektrik. Dalam penelitian ini, piezoelektrik yang digunakan mengacu pada jenis yang sudah ada yaitu *Minisense 100 Vibration Sensor* dengan nilai defleksi maksimal sebesar  $6,08 \times 10^{-3}$  meter, selain nilai defleksi maksimal, parameter piezoelektrik lainnya dapat dilihat sebagai berikut:

**Tabel 3.3 Parameter Piezoelektrik Minisense 100**

Keterangan	Parameter	Nilai
Massa <i>piezoelectric</i>	$M_{pzt}$	$6 \times 10^{-4}$ kg
Tebal <i>piezoelectric</i>	$t_{pzt}$	$1 \times 10^{-3}$ m
Lebar <i>piezoelectric</i>	$w_{pzt}$	$6 \times 10^{-3}$ m
Panjang <i>piezoelectric</i>	$L_{pzt}$	$12 \times 10^{-3}$ m
Kapasitansi	$c_{pzt}$	$244 \times 10^{-10}$ F
Konstanta regangan <i>piezoelectric</i>	$d_{31}$	$1.1 \times 10^{-10}$ 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	$3 \times 10^9$ N/m <sup>2</sup>
Frekuensi resonansi	fr	75 Hz

Parameter terakhir yang dibutuhkan dalam percobaan ini adalah parameter gelombang laut sebagai sumber gaya pada sistem. Parameter ini juga digunakan untuk pencarian variasi pada percobaan sistem. Data untuk parameter tersebut diambil dari data BMKG pada tanggal 9 Januari 2022. Titik pengambilan data tinggi gelombang laut diambil dari data gelombang laut di sekitar Surabaya dan Madura, data tersebut bervariasi mulai dari 0,5 meter, 1 meter hingga 1,5 meter. Sehingga dari data tersebut dapat diolah dengan persamaan (2.1) sebagai berikut:

**Tabel 3.4 Parameter Gelombang Laut.**

Tinggi Gelombang (Amplitudo)	Frekuensi Gelombang
0,5 m	2,503 rad/s
1 m	1,7699 rad/s
1,5 m	1,4451 rad/s

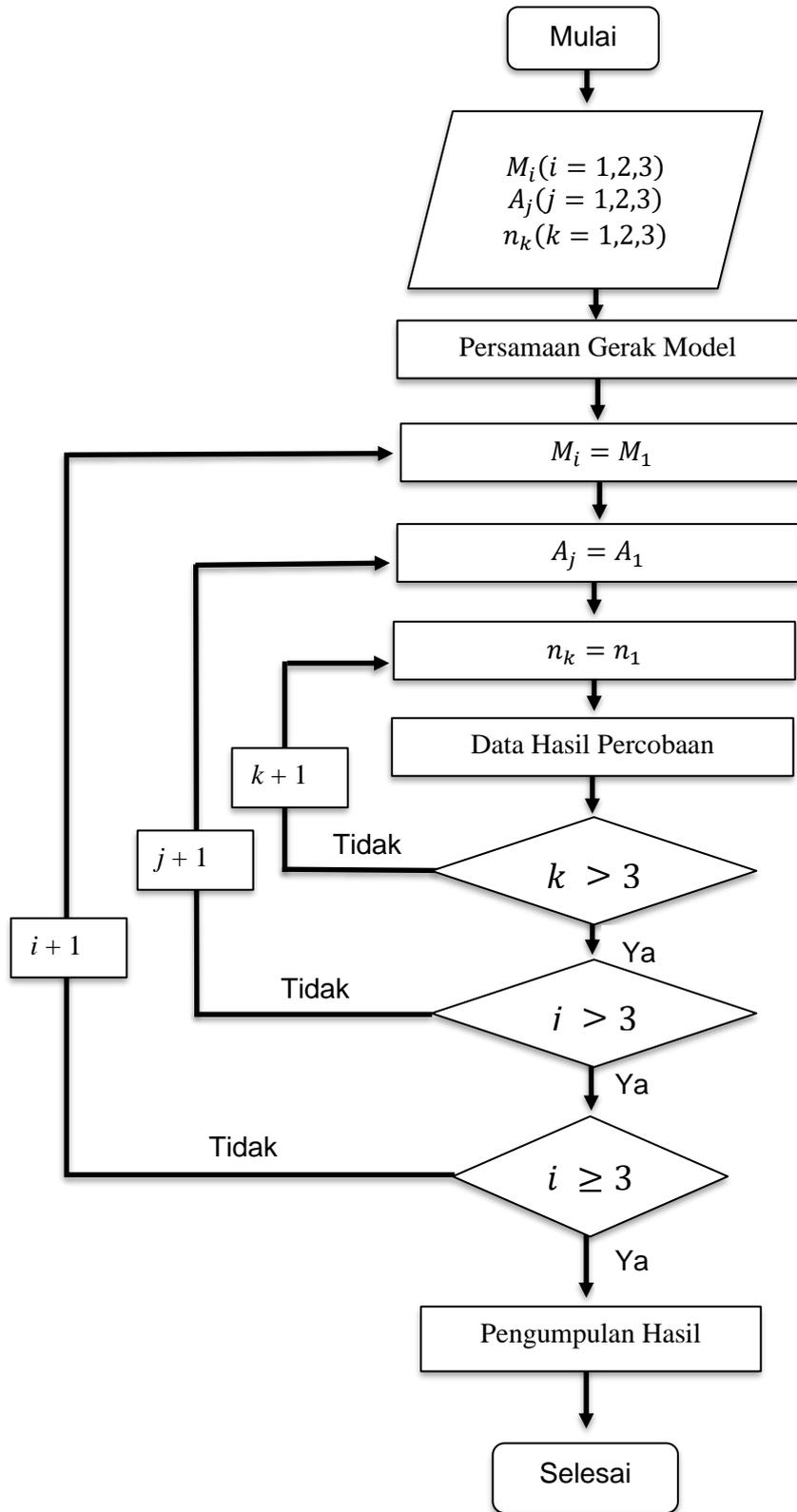
Dengan parameter-parameter yang sudah didapatkan, dapat dirumuskan variasi-variasi yang akan digunakan pada percobaan sebagai berikut:

**Tabel 3.5 Parameter Percobaan**

Massa		Amplitudo		Jumlah piezoelektrik	
Variabel	Jumlah Massa	Variabel	Nilai	Variabel	Nilai
$M_{i1}$	2	$A_1$	0.5 m	$n_1$	1
$M_{i2}$	3	$A_2$	1 m	$n_2$	2
$M_{i3}$	4	$A_3$	1,5 m	$n_3$	3

### 3.5 Tahapan Simulasi

Agar percobaan simulai dapat berjalan secara sistematis dan sesuai tujuan, diperlukan langkah-langkah yang sesuai dan tepat. Oleh karena itu, langkah-langkah tersebut dapat dibuat seperti pada Gambar 3.22.



Gambar 3.22 Diagram Metodologi Penelitian

## BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

Pada pembahasan bab 4 ini, akan dibahas pengaruh pada setiap variasi yang sudah ditentukan dan pengaruhnya terhadap perpindahan massa dan voltase bangkitannya. Dalam pembahasan pengaruh variasi jumlah massa pada sistem, tinggi gelombang, dan jumlah piezoelektrik pada sistem, akan ditampilkan hasil pada beberapa variasi saja seperti yang dapat dilihat pada Tabel 4.1.

**Table 4.1 Variabel pada Setiap Uji Variasi**

PENGARUH VARIABEL		
MASSA	TINGGI GELOMBANG	JUMLAH PIEZOELEKTRIK
<b>2</b>		
<b>3</b>	1	2
<b>4</b>		
3	<b>0.5</b>	2
	<b>1</b>	
	<b>1.5</b>	
3	1	<b>1</b>
		<b>2</b>
		<b>3</b>

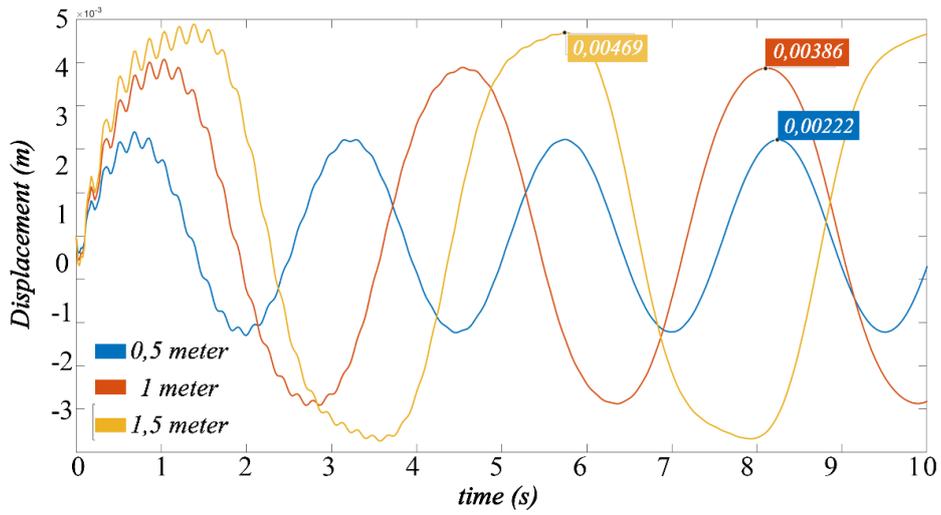
Seperti yang tertera pada Tabel 4.1 dapat dilihat bahwa pada pengujian variasi seperti pengujian variasi massa, variabel lainnya seperti tinggi gelombang dan jumlah piezoelektrik disamakan. Begitu pula dengan pengujian variasi tinggi gelombang dan jumlah piezoelektrik. Oleh karena itu pada pembahasan setiap variasi selanjutnya, Tabel 4.1 akan menjadi acuan untuk melihat pengaruh dari variasi tersebut.

Untuk mencari hasil dari voltase bangkitan sistem pada simulasi ini, perhitungan voltase bangkitan didapatkan dari jarak perpindahan setiap piezoelektrik menggunakan persamaan (2.5). Setelah didapatkan nilai voltase bangkitan, nilai tersebut dapat dicari nilai *RMS (Root Mean Square)* dari nilai voltase bangkitan tersebut. Pada simulasi ini, rangkaian piezoelektrik dirangkai seri, sehingga nilai voltase bangkitan pada seluruh piezoelektrik dapat dijumlah untuk mendapatkan total voltase bangkitan sistem.

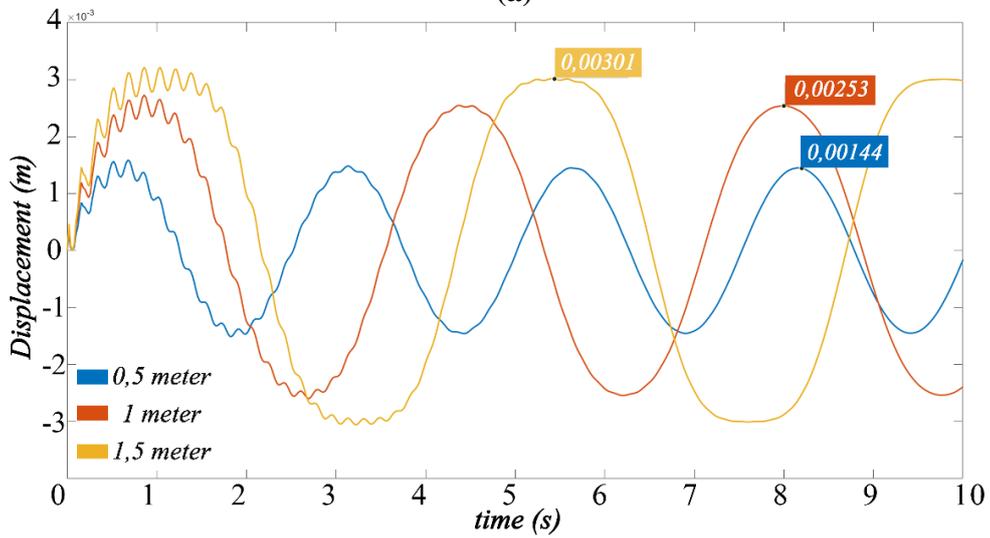
### **4.1 Pengaruh Tinggi Gelombang Laut Terhadap Perpindahan dan Voltase**

Variasi pertama yang dapat dianalisa adalah pengaruh variasi input tinggi gelombang. Nilai variasi yang akan diuji adalah input gelombang dengan nilai 0,5 meter, 1 meter, dan 1,5 meter. Pada simulasi pengujian variasi ini, variabel lainnya seperti jumlah massa dan jumlah piezoelektrik perbaris disamakan yaitu menggunakan variasi sistem 3 massa dan 2 piezoelektrik perbaris. Dikarenakan pada pengujian variasi ini yang digunakan adalah sistem dengan 3 massa pada sistem atau 3 DOF, maka nilai yang akan dianalisa adalah nilai defleksi piezoelektrik baris

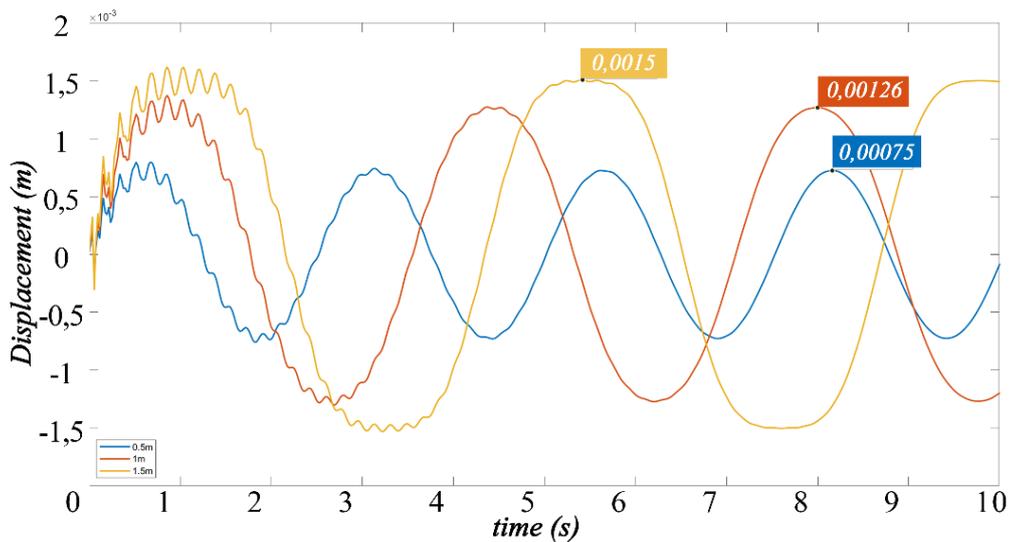
1 ( $X_1$ ), nilai defleksi piezoelektrik baris 2 ( $X_2$ ), dan nilai defleksi piezoelektrik baris 3 ( $X_3$ ) pada Nilai  $X_1$ ,  $X_2$ , dan  $X_3$  dari simulasi pengujian tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.1.



(a)



(b)



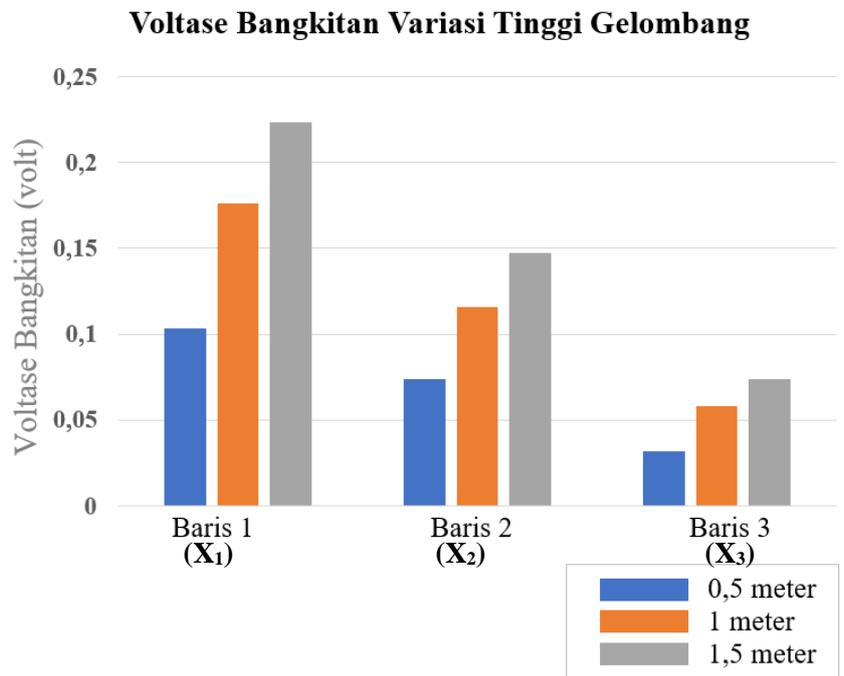
(c)

Gambar 4.1 Perpindahan Massa pada Variasi Tinggi Gelombang (a)  $X_1$  (b)  $X_2$  (c)  $X_3$

Pada Gambar 4.1(a) dapat dilihat bahwa perpindahan massa pertama ( $X_1$ ) memiliki nilai  $4,69 \times 10^{-3}$  meter sampai  $-4,69 \times 10^{-3}$  meter pada saat input gelombang 1,5 meter,  $3,86 \times 10^{-3}$  meter sampai  $-3,86 \times 10^{-3}$  meter pada saat nilai tinggi gelombang 1 meter, dan  $2,2 \times 10^{-3}$  meter sampai  $-2,2 \times 10^{-3}$  meter pada saat tinggi gelombang 0,5 meter. Selanjutnya pada Gambar 4.1(b) terdapat grafik yang menunjukkan perpindahan massa kedua ( $X_2$ ) pada nilai  $3 \times 10^{-3}$  meter sampai  $-3 \times 10^{-3}$  meter pada saat tinggi gelombang 1,5 meter,  $2,5 \times 10^{-3}$  meter sampai  $-2,5 \times 10^{-3}$  meter pada saat tinggi gelombang 1 meter, dan  $1,4 \times 10^{-3}$  meter sampai  $-1,4 \times 10^{-3}$  meter pada saat tinggi gelombang 0,5 meter. Grafik terakhir yang dapat dianalisa pada variasi ini ada pada Gambar 4.1(c) yang menunjukkan perpindahan massa ketiga ( $X_3$ ). Grafik tersebut menunjukkan perpindahan massa pada nilai  $1,5 \times 10^{-3}$  meter sampai  $-1,5 \times 10^{-3}$  meter pada tinggi gelombang 1,5 meter,  $1,26 \times 10^{-3}$  meter sampai  $-1,26 \times 10^{-3}$  meter pada tinggi gelombang 1 meter, dan  $0,7 \times 10^{-3}$  meter sampai  $-0,7 \times 10^{-3}$  meter pada tinggi gelombang 0,5 meter

Dari nilai-nilai perpindahan tersebut, dapat dilihat bahwa input gelombang dengan nilai tinggi gelombang 1,5 meter dapat mengakibatkan perpindahan pada  $X_1$ ,  $X_2$ , dan  $X_3$  paling besar, kemudian disusul oleh tinggi gelombang 1 meter dan 0,5 meter. Hal ini menunjukkan bahwa besarnya input nilai tinggi gelombang berbanding lurus dengan nilai perpindahan setiap massa pada sistem.

Setelah didapatkan nilai dari  $X_1$ ,  $X_2$ , dan  $X_3$  pada variasi ini, maka nilai tersebut dapat diproses untuk untuk mengetahui perbandingan variasi tinggi gelombang pada variabel hasil selanjutnya yaitu nilai RMS voltase bangkitan dari tiap variasi seperti pada Gambar 4.2.



**Gambar 4.2 RMS Voltase Bangkitan Variasi Tinggi Gelombang**

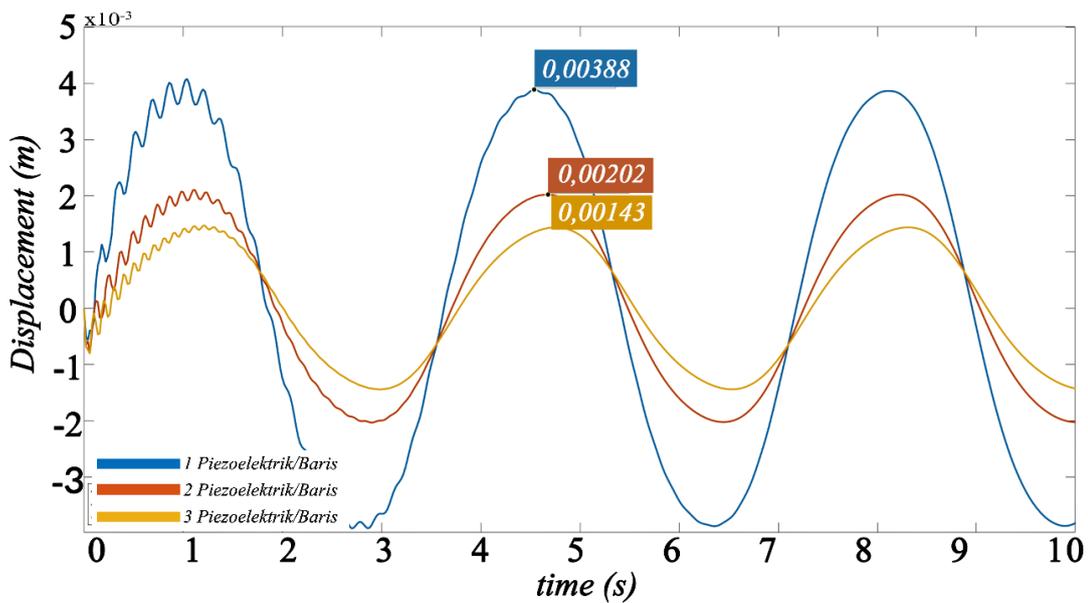
Pada grafik tersebut dapat dilihat bahwa pada baris pertama ( $X_1$ ) nilai RMS voltase bangkitan paling besar dihasilkan oleh sistem saat input tinggi gelombang 1,5 meter dengan nilai 0,2232 volt, disusul oleh variasi tinggi gelombang 1 meter dengan 0,1762 volt, dan voltase bangkitan paling kecil pada baris pertama dihasilkan oleh variasi tinggi gelombang 0,5 meter dengan nilai 0,098 volt.

Untuk voltase bangkitan variasi tinggi gelombang pada baris kedua ( $X_2$ ), dapat dilihat bahwa variasi tinggi gelombang 1,5 meter juga dapat menghasilkan voltase bangkitan paling besar pada nilai 0,1471 volt, kemudian disusul oleh variasi tinggi gelombang 1 meter pada nilai 0,116 volt dan yang terakhir variasi tinggi gelombang 0,5 meter pada nilai 0,0639 volt. Selanjutnya untuk baris terakhir ( $X_3$ ), dapat dilihat bahwa variasi tinggi gelombang 1,5 meter tetap dapat menghasilkan voltase bangkitan sebesar 0,0735 volt, kemudian disusul juga oleh variasi gelombang 1 meter pada nilai 0,05804 volt, dan 0,032 volt oleh variasi tinggi gelombang 0,5 meter.

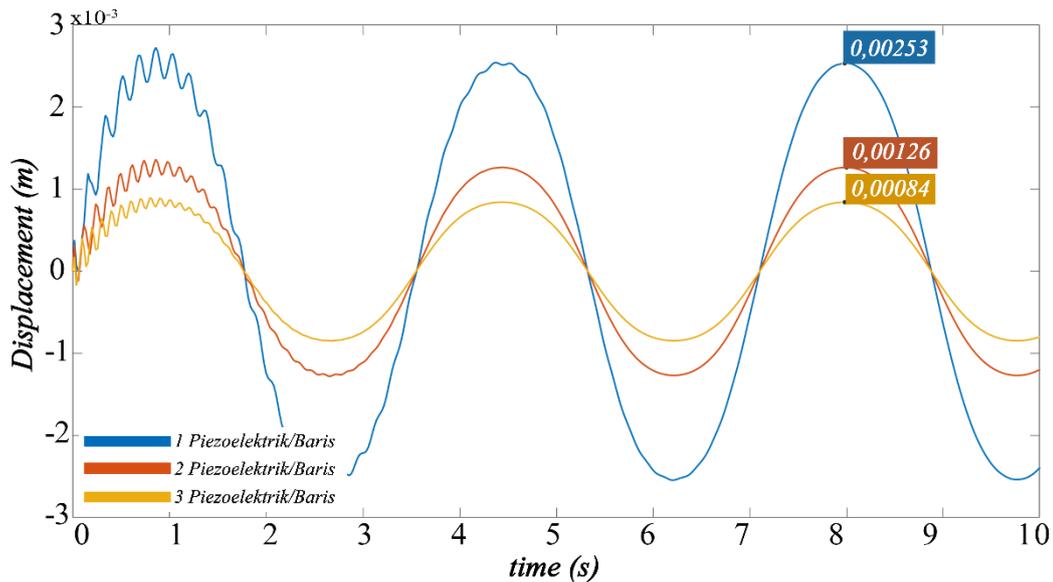
Dapat dilihat dari nilai perpindahan dan grafik voltase bangkitan variasi tinggi gelombang oleh piezoelektrik pada setiap baris sistem, bahwa *trendline* grafik voltase bangkitan menunjukkan hal yang sama yaitu nilai tinggi gelombang berbanding lurus dengan nilai perpindahan dan nilai RMS voltase pada uji variasi ini. Hasil yang berbanding lurus tersebut terjadi karena dipengaruhi oleh 2 hal, yaitu nilai besaran input *base motion* dan nilai besaran input gaya dari energi potensial pada tiap massa yang sangat dipengaruhi oleh nilai dari input tinggi gelombang tersebut.

#### 4.2 Pengaruh Jumlah Piezoelektrik Terhadap Perpindahan dan Voltase

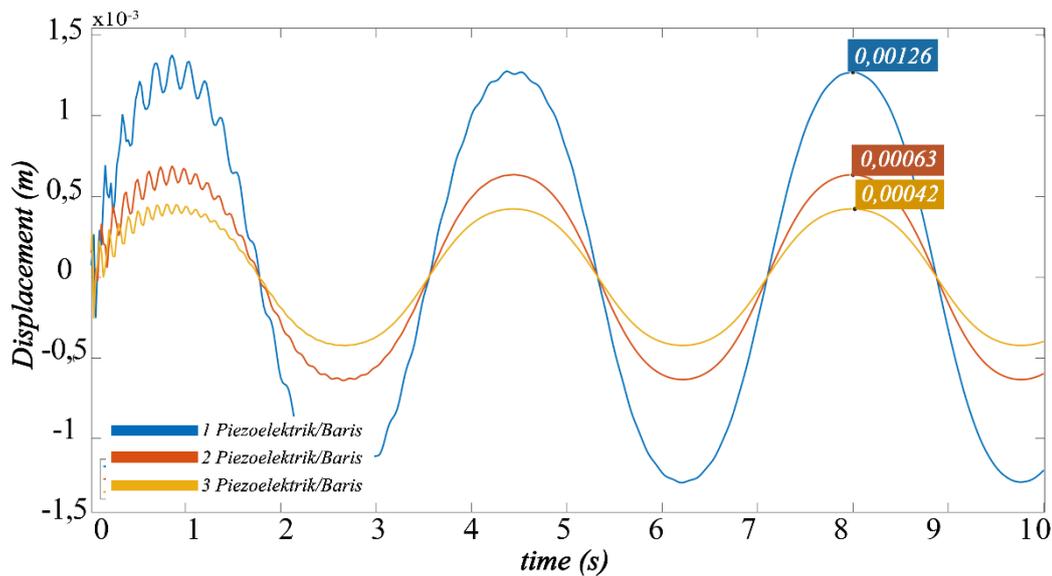
Variasi selanjutnya yang akan dibahas adalah variasi jumlah piezoelektrik yang mempengaruhi perpindahan massa dan nilai RMS voltase bangkitan sistem. Pada uji variasi ini, disimulasikan uji variasi jumlah piezoelektrik perbaris dengan jumlah piezoelektrik 1, 2, dan 3 piezoelektrik perbaris. Nilai variabel lainnya seperti jumlah massa dan input tinggi gelombang disamakan yaitu menggunakan sistem dengan 3 massa dan input tinggi gelombang 1 meter. Oleh karena itu, pada analisa nilai perpindahan massa pada uji variasi piezoelektrik ini, nilai yang akan dianalisa adalah nilai defleksi piezoelektrik baris 1 ( $X_1$ ), nilai defleksi piezoelektrik baris 2 ( $X_2$ ), dan nilai defleksi piezoelektrik baris 3 ( $X_3$ ) pada sistem dengan 3 massa.



(a)



(b)



(c)

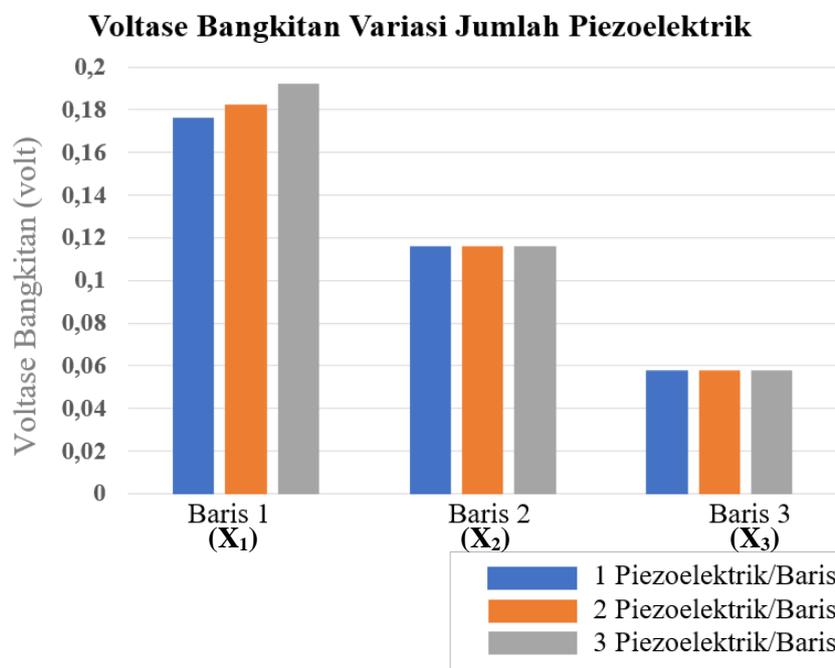
**Gambar 4.3 Nilai perpindahan Massa dan Voltase Bangkitan pada Variasi Jumlah Piezoelektrik (a)  $X_1$  (b)  $X_2$  (c)  $X_3$**

Pada Gambar 4.3(a) dapat dilihat grafik perpindahan massa pertama ( $X_1$ ) dengan variasi 1, 2 dan 3 piezoelektrik. Pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa grafik menunjukkan nilai perpindahan maksimal pada  $3,889 \times 10^{-3}$  meter sampai  $-3,889 \times 10^{-3}$  meter saat variasi 1 piezoelektrik,  $2,02 \times 10^{-3}$  meter sampai  $-2,02 \times 10^{-3}$  meter saat variasi 2 piezoelektrik, dan  $1,43 \times 10^{-3}$  meter sampai  $-1,43 \times 10^{-3}$  meter pada variasi 3 piezoelektrik. Kemudian pada Gambar 4.3(b) dapat dilihat bahwa grafik perpindahan massa kedua ( $X_2$ ) dengan variasi jumlah piezoelektrik. Grafik tersebut menunjukkan nilai perpindahan pada  $2,53 \times 10^{-3}$  meter sampai  $-2,53 \times 10^{-3}$  meter pada variasi 1 piezoelektrik,  $1,26 \times 10^{-3}$  meter sampai  $-1,26 \times 10^{-3}$  pada variasi 2 piezoelektrik, dan  $0,8 \times 10^{-3}$  meter sampai  $-0,8 \times 10^{-3}$  meter pada variasi 3 piezoelektrik. Grafik terakhir adalah perpindahan massa ketiga ( $X_3$ ) yang dapat dilihat di Gambar 4.3(c). Grafik

tersebut menunjukkan nilai perpindahan  $1,26 \times 10^{-3}$  meter sampai  $-1,26 \times 10^{-3}$  meter pada variasi 1 piezoelektrik,  $0,63 \times 10^{-3}$  meter sampai  $-0,63 \times 10^{-3}$  meter pada variasi 2 piezoelektrik, dan  $0,42 \times 10^{-3}$  meter sampai  $-0,42 \times 10^{-3}$  meter pada variasi 3 piezoelektrik.

Dari nilai tersebut dapat dianalisa bahwa jumlah piezoelektrik perbaris memiliki nilai yang berbanding terbalik dengan perpindahan dari massa pada sistem. Hal ini disebabkan oleh koefisien pegas dan koefisien redaman yang dimiliki oleh setiap piezoelektrik yang semakin besar jika jumlah piezoelektrik semakin banyak. Nilai koefisien pegas dan redaman pada piezoelektrik akan mereduksi gerak dari tiap massa, sehingga dapat memperkecil perpindahan dari massa tersebut.

Setelah didapatkan nilai perpindahan pada uji variasi jumlah piezoelektrik perbaris yang sudah didapat, maka dari nilai tersebut dapat dicari nilai RMS voltase bangkitan dari sistem pada tiap variasi. Hasil dari nilai RMS voltase bangkitan tiap baris dari variasi jumlah piezoelektrik dapat dilihat pada Gambar 4.4.



**Gambar 4.4** Grafik nilai *RMS* voltase yang dihasilkan oleh variasi jumlah piezoelektrik perbaris

Pada Gambar 4.4 dapat dilihat pada baris pertama ( $X_1$ ) bahwa nilai voltase bangkitan paling besar oleh variasi piezoelektrik permassa dihasilkan oleh sistem dengan variasi 3 piezoelektrik/perbaris dengan nilai 0,17892 volt, kemudian nilai voltase bangkitan kedua paling besar pada baris pertama dihasilkan oleh sistem dengan variasi 2 piezoelektrik yaitu pada nilai 0,17634 volt, dan voltase bangkitan yang paling kecil pada baris pertama dihasilkan oleh variasi 1 piezoelektrik/baris dengan nilai 0,1749 volt.

Untuk baris kedua ( $X_2$ ). Pada Gambar 4.4 terlihat bahwa variasi jumlah piezoelektrik perbaris tidak memiliki nilai yang berbeda secara signifikan ketiganya memiliki nilai voltase bangkitan sebesar 0,116 volt. Hal yang sama juga ditunjukkan oleh voltase bangkitan pada baris ketiga ( $X_3$ ), ketiganya memiliki nilai voltase bangkitan sebesar 0,058 volt

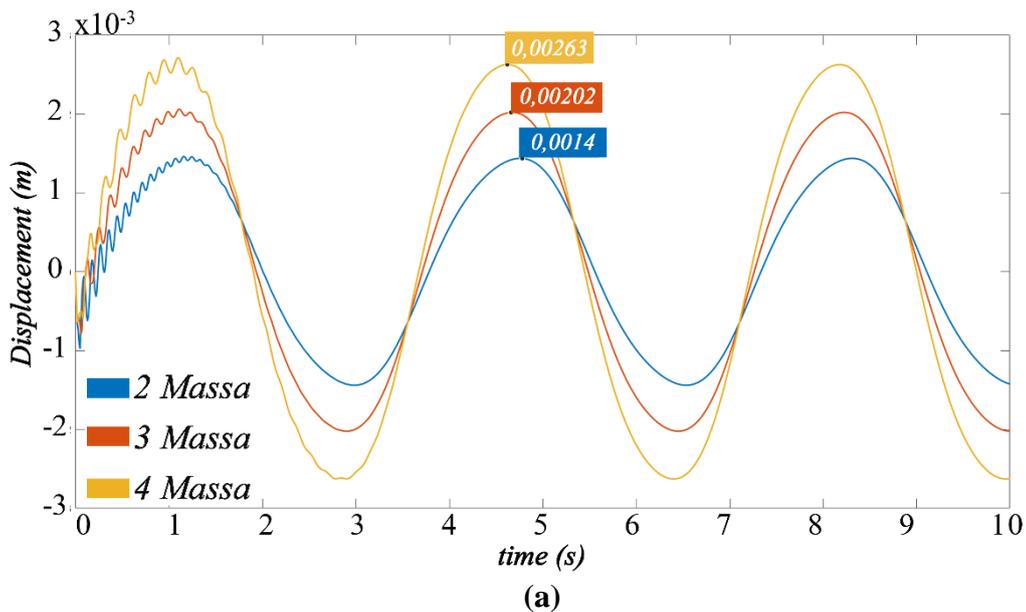
Seperti yang sudah dibahas sebelumnya, dengan menambah jumlah piezoelektrik pada setiap baris, maka ekivalen konstanta pegas dan redaman pada sistem akan bertambah sehingga

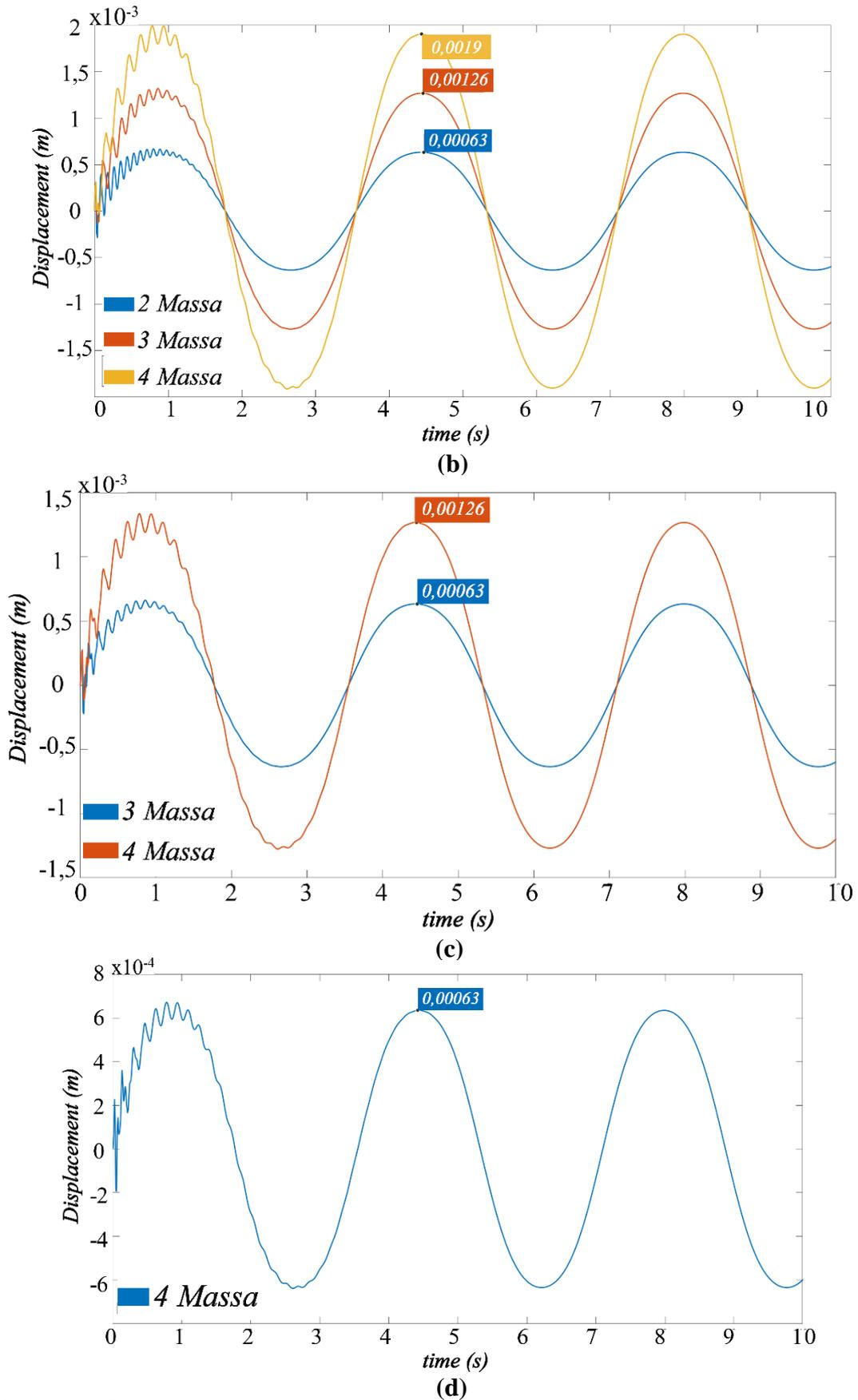
perpindahan pada tiap massa akan tereduksi. Oleh karena itu dengan menambah piezoelektrik pada tiap baris, voltase bangkitan dari sistem tidak dapat bertambah secara signifikan.

### 4.3 Pengaruh Jumlah Massa Terhadap Perpindahan dan Voltase

Variasi terakhir yang akan dijelaskan pada pembahasan ini adalah variasi jumlah massa pada sistem dan pengaruhnya terhadap perpindahan setiap massa pada sistem dan hasil RMS voltase bangkitannya. Pada pengujian variasi ini, akan dibandingkan hasil dari variasi sistem dengan 2 massa, 3 massa, dan 4 massa. Oleh karena itu hasil dari simulasi pada variasi ini akan menganalisa nilai  $X_1$  dan  $X_2$  pada ketiga variasi,  $X_3$  dan  $X_4$  pada variasi 3 massa dan 4 massa dan nilai  $X_4$  hanya pada variasi sistem 4 massa. Simulasi percobaan ini dilakukan dengan menetapkan variabel input tinggi gelombang yang sama yaitu pada tinggi gelombang 1 meter dan variasi jumlah piezoelektrik 2 piezoelektrik perbaris.

Pada Gambar 4.5 dapat dilihat beberapa grafik yang menggambarkan perpindahan setiap baris massa pada variasi sistem seperti  $X_1$  yang mewakili nilai defleksi piezoelektrik baris pertama atau paling atas,  $X_2$  yang mewakili nilai defleksi piezoelektrik baris kedua relatif terhadap baris pertama,  $X_3$  yang mewakili nilai defleksi piezoelektrik baris ketiga relatif terhadap massa kedua, dan  $X_4$  yang mewakili nilai defleksi piezoelektrik baris keempat relatif terhadap massa ketiga.





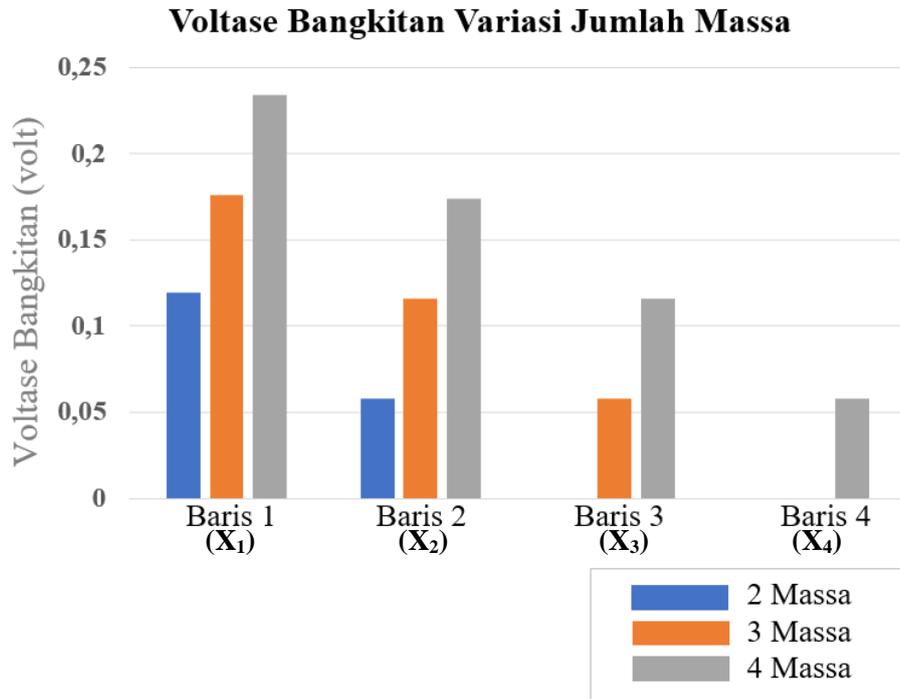
Gambar 4.5 Perpindahan Massa pada Variasi Jumlah Massa (a)  $X_1$  (b)  $X_2$  (c)  $X_3$  (d)  $X_4$

Untuk perpindahan massa pertama ( $X_1$ ) seperti yang terlihat di Gambar 4.5(a), perpindahan massa pertama pada variasi sistem 4 massa memiliki perpindahan yang paling besar di angka  $2,63 \times 10^{-3}$  meter disusul dengan variasi sistem dengan 3 massa pada  $2 \times 10^{-3}$  meter dan 2 massa pada  $0,14 \times 10^{-3}$  meter. Seluruh variasi dari simulasi percobaan pengaruh jumlah massa memiliki nilai input yang mengakibatkan perpindahan yang sama. Yaitu perpindahan *base motion* dan gaya dari energi potensial pada setiap massa. Dari kedua hal tersebut, perpindahan dari energi potensial pada setiap massa yang berpengaruh pada nilai perpindahan massa lebih besar saat variasi jumlah massa pada sistem lebih banyak. Sebagai contoh pada variasi sistem dengan 4 massa, terdapat 3 massa di bawah massa pertama yang massa dan pergerakannya akan berpengaruh pada perpindahan massa pertama tersebut. Pergerakan dari 3 massa di bawah massa pertama tersebut dapat berpengaruh pada massa pertama dikarenakan adanya konstanta kekakuan dan redaman dari piezoelektrik yang menjadi penghubung antar massa sehingga gaya dari gaya eksitasi yang berpengaruh ke massa lainnya akan berpengaruh ke massa pertama.

Untuk perpindahan massa kedua ( $X_2$ ) pada Gambar 4.5(b), dapat dilihat bahwa keseluruhan perpindahan massa kedua pada setiap variasi memiliki nilai yang lebih kecil dari  $X_1$ , hal ini disebabkan karena massa pertama berada di posisi yang lebih dekat dengan sumber gaya atau input *base motion*, sehingga  $X_1$  dapat memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan  $X_2$ . Pada perpindahan massa kedua ( $X_2$ ), setiap variasi sistem dengan 4 massa terlihat memiliki nilai perpindahan terbesar pada angka  $1,9 \times 10^{-3}$  meter, kemudian disusul oleh variasi 3 massa pada angka  $1,2 \times 10^{-3}$  meter, dan yang terakhir adalah variasi 2 massa pada angka  $0,6 \times 10^{-3}$  meter. Urutan nilai  $X_2$  pada setiap variasi terlihat sama dengan urutan nilai perpindahan  $X_1$ . Hal ini disebabkan oleh alasan yang sama seperti pada nilai  $X_1$ , yaitu jumlah massa di bawah massa kedua yang berpengaruh pada nilai  $X_2$ . Seperti yang diketahui bahwa pada variasi sistem 4 massa, jumlah massa di bawah massa kedua adalah 2 massa dan pada variasi sistem 3 massa hanya terdapat 1 massa.

Pada Gambar 4.5(c) dapat dilihat bahwa nilai perpindahan massa ketiga ( $X_3$ ) pada variasi sistem dengan tiga dan empat massa. Pada grafik tersebut terlihat juga bahwa massa ketiga pada sistem dengan variasi 4 massa memiliki nilai perpindahan yang lebih besar pada angka  $1,26 \times 10^{-3}$  meter dibandingkan perpindahan massa ketiga sistem dengan variasi 3 massa pada angka  $0,63 \times 10^{-3}$  meter. Hal ini disebabkan karena pada sistem dengan empat massa terdapat satu massa di bawah massa ketiga yang dapat mempengaruhi perpindahan dari massa ketiga tersebut. Grafik terakhir yang ditunjukkan pada Gambar 4.5(d) menunjukkan perpindahan massa keempat ( $X_4$ ) yang hanya dimiliki oleh variasi sistem dengan 4 massa. Perpindahan massa keempat pada variasi sistem empat massa menunjukkan perpindahan pada angka  $0,6 \times 10^{-3}$  meter.

Setelah didapatkan nilai dari perpindahan massa pada variasi ini, maka dapat dianalisa nilai variabel hasil berikutnya yaitu nilai RMS voltase bangkitan setiap baris pada variasi jumlah massa. Nilai tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.6



**Gambar 4.6 Grafik nilai RMS Voltase yang dihasilkan oleh variasi jumlah massa.**

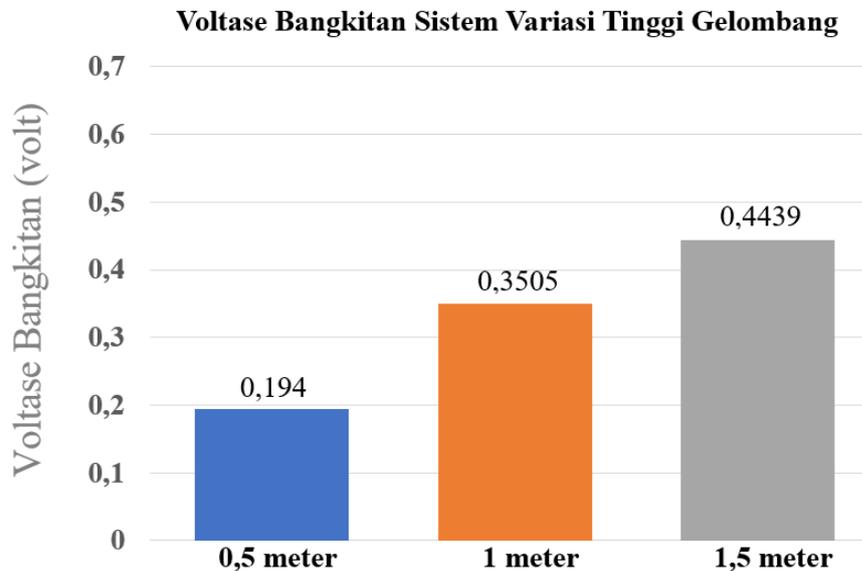
Dari Gambar 4.6 dapat dilihat bahwa pada baris pertama ( $X_1$ ), voltase bangkitan paling besar dihasilkan oleh variasi sistem dengan 4 massa dengan nilai 0,2339 volt, disusul dengan variasi sistem 3 massa dengan nilai 0,1763 volt, dan yang terakhir variasi sistem dengan 2 massa dengan nilai 0,1192 volt. Untuk baris kedua ( $X_2$ ), nilai voltase bangkitan paling besar juga dihasilkan oleh variasi sistem dengan 4 massa yaitu pada nilai 0,1742 volt, kemudian disusul oleh sistem 3 massa dengan nilai 0,116 volt, dan variasi sistem 2 massa dengan nilai paling kecil yaitu 0,058 volt. Selanjutnya untuk baris ketiga ( $X_3$ ), dapat dilihat bahwa nilai voltase bangkitan oleh sistem dengan variasi 4 massa lebih besar dibandingkan dengan voltase bangkitan variasi sistem 3 massa, yaitu 0,1161 volt oleh variasi sistem 4 massa dan 0,05805 volt oleh sistem dengan 3 massa. Baris terakhir yang akan dianalisa adalah baris keempat ( $X_4$ ) yang hanya dimiliki oleh variasi sistem dengan 4 massa, baris tersebut dapat menghasilkan voltase sebesar 0,0581 volt.

Dari nilai-nilai yang didapat, terlihat bahwa sistem dengan 4 massa dapat menghasilkan nilai RMS voltase paling besar pada setiap baris, hal ini berbanding lurus dengan nilai perpindahan tiap massa.

#### 4.4 Analisis Voltase Bangkitan Sistem pada Setiap Variasi

Setelah didapatkan nilai voltase bangkitan pada setiap baris seperti yang sudah dibahas pada pembahasan sebelumnya. Nilai-nilai tersebut dapat dihitung untuk mendapatkan nilai voltase bangkitan total dari sistem. Dalam simulasi ini, setiap piezoelektrik disusun secara seri sehingga untuk mendapatkan nilai voltase bangkitan total dari sistem, nilai voltase bangkitan dari setiap baris akan dijumlah.

Hasil voltase bangkitan sistem pertama yang akan dibahas adalah nilai voltase bangkitan sistem pada setiap variasi tinggi gelombang pada Gambar 4.7.

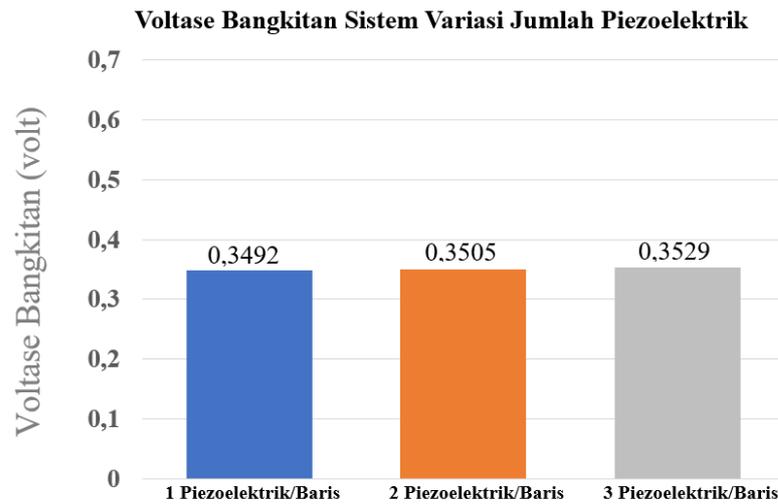


**Gambar 4.7** Nilai *RMS* voltase yang dihasilkan sistem pada variasi tinggi gelombang

Hasil dari *RMS* voltase bangkitan sistem yang tertera pada Gambar 4.7 menunjukkan bahwa nilai *RMS* voltase dari sistem saat input tinggi gelombang 1,5 meter menghasilkan nilai *RMS* voltase paling besar yaitu 0,44397 volt, sementara itu sistem dapat menghasilkan nilai *RMS* voltase 0,35055 volt saat tinggi gelombang 1 meter dan 0,194 volt saat tinggi gelombang 0,5 meter.

Seperti yang dibahas sebelumnya, nilai perpindahan setiap massa dan voltase bangkitan sistem yang berbanding lurus dengan nilai tinggi gelombang disebabkan oleh 2 hal, yaitu input *base motion* dan perpindahan akibat energi potensial yang sangat dipengaruhi oleh nilai tinggi gelombang. Input *base motion* pada sistem yang sangat dipengaruhi oleh tinggi gelombang karena pada gaya input ini digunakan persamaan (2.4) dan dapat dilihat bahwa tinggi gelombang berbanding lurus dengan besaran input *base motion* yang nantinya akan diterima oleh sistem. Hal kedua yang membuat nilai tinggi gelombang berbanding lurus adalah nilai input berikutnya yaitu input gaya dari energi potensial yang berpengaruh pada setiap massa. Pada perpindahan akibat energi potensial pada massa, tinggi gelombang juga akan berbanding lurus dengan gaya potensial yang diterima, di mana semakin tinggi input gelombang maka semakin besar energi potensial tersebut. Oleh karena kedua hal tersebut, tinggi gelombang akan berbanding lurus dengan nilai perpindahan dari tiap massa pada sistem dan nilai *RMS* voltase bangkitannya.

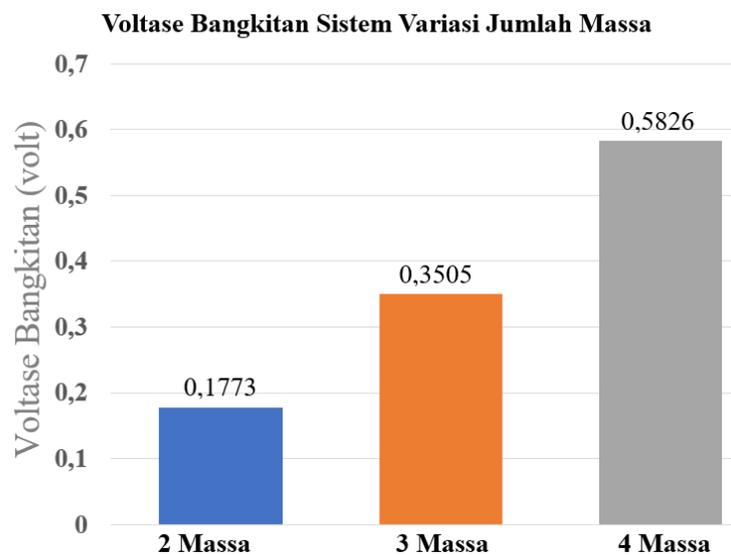
Nilai voltase bangkitan dari sistem berikutnya yang akan dibahas adalah nilai pada variasi jumlah piezoelektrik perbaris pada Gambar 4.8



**Gambar 4.8 Nilai RMS Voltase Bangkitan Sistem pada Variasi Jumlah Piezoelektrik Perbaris**

Pada variasi jumlah piezoelektri perbaris, dapat dilihat bahwa nilai voltase bangkitan oleh sistem dengan variasi 3 piezoelektrik perbaris memiliki nilai paling besar yaitu 0,35292 volt, disusul dengan sistem dengan 2 piezoelektrik perbaris dengan nilai 0,35055 volt, dan yang terakhir sistem dengan 1 piezoelektrik perbaris dengan nilai 0,34924 volt. Nilai ini menunjukkan bahwa penambahan piezoelektrik pada setiap baris dapat menghasilkan total nilai voltase bangkitan yang lebih besar, namun jika dilihat dari total dan selisih voltase bangkitan sistem pada setiap variasi, penambahan jumlah piezoelektrik perbaris tidak berpengaruh secara signifikan. Hal ini disebabkan oleh, semakin banyaknya piezoelektrik perbaris maka perpindahan massa pada sistem semakin tereduksi. Oleh karena itu piezoelektrik tidak dapat menghasilkan voltase bangkitan secara maksimal.

Nilai voltase bangkitan sistem terakhir yang akan dibahas adalah nilai voltase bangkitan pada variasi jumlah massa pada sistem pada Gambar 4.9



**Gambar 4.9 Nilai RMS Voltase yang dihasilkan oleh variasi jumlah massa**

Dapat dilihat pada Gambar 4.9 bahwa sistem dengan variasi 2 massa menghasilkan nilai RMS paling kecil dengan nilai 0.1773 volt, sementara itu variasi dengan 3 massa dapat nilai RMS senilai 0,35055volt, dan sistem dengan 4 massa dapat menghasilkan nilai RMS yang paling besar yaitu 0,58261 volt.

Pada variasi ini dapat dilihat bahwa penambahan jumlah massa dalam sistem memiliki nilai yang berbanding lurus dengan nilai voltase bangkitannya. Hal ini disebabkan oleh nilai perpindahan setiap massa yang juga berbanding lurus dengan penambahan massa seperti yang sudah dibahas pada pembahasan sebelumnya. Selain itu, sistem dengan variasi 4 massa memiliki jumlah piezoelektrik yang lebih banyak dibandingkan dengan variasi 3 massa dan 2 massa. Pada uji variasi massa sistem dengan 2 piezoelektrik perbaris ini, sistem dengan 4 massa memiliki total 8 piezoelektrik pada sistem, sementara itu sistem dengan variasi 3 massa hanya memiliki 6 piezoelektrik dan sistem dengan 2 massa hanya memiliki total 4 piezoelektrik.

Oleh karena itu dapat disimpulkan bahwa pada uji variasi jumlah massa pada sistem ini, variasi dengan 4 massa dapat menghasilkan nilai RMS voltase paling besar. Hasil nilai RMS voltase bangkitan tersebut juga berbanding lurus dengan perpindahan dari tiap massa pada sistem jika dibandingkan dengan sistem dengan 3 massa atau 2 massa. Terlebih pada variasi sistem dengan 4 massa, jumlah piezoelektrik pada sistem jumlahnya lebih banyak, maka nilai bangkitan yang diperoleh dapat lebih besar.

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Dari percobaan simulasi sistem yang sudah dilakukan maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut;

1. Dari pengujian variasi sistem tanpa memperhitungkan proses manufaktur sistem dan dengan menggunakan sumber eksitasi gaya gelombang laut, dapat disimpulkan bahwa sistem dapat bergerak harmonik sesuai seperti input gelombang yang berbentuk sinusoidal dan nilai perpindahan piezoelektrik terbesar senilai  $6,08 \times 10^{-3}$  meter masih dibawah nilai defleksi maksimal dari piezoelektrik Minisense 100 yaitu  $6,8 \times 10^{-3}$
2. Pengaruh tinggi gelombang pada simulasi ini terbukti bahwa dengan bertambahnya nilai tinggi gelombang maka perpindahan setiap massa pada sistem juga akan bertambah. Hal ini disebabkan karena nilai tinggi gelombang pada simulasi ini merupakan sumber eksitasi dari pergerakan sistem. Dengan bertambahnya nilai perpindahan pada setiap massa pada sistem, berdampak juga pada nilai voltase bangkitan dari sistem yang bertambah 0.09 volt dan 0.15 volt pada kedua uji variasi.
3. Penambahan jumlah massa pada simulasi ini terbukti berbanding lurus dengan besarnya perpindahan tiap baris massa pada sistem. Hal tersebut terjadi karena terdapat pembebanan lebih pada tiap massa pada sistem dan sumber gaya energi potensial yang berpengaruh pada tiap massa jika massa sistem lebih banyak. Dengan bertambahnya perpindahan pada sistem maka nilai voltase bangkitan dari variasi jumlah massa pada sistem juga semakin besar. Terbukti bahwa dengan variabel 2 piezoelektrik perbaris dan input tinggi gelombang 1 meter, sistem dengan 4 massa dapat menghasilkan nilai voltase bangkitan total sebesar 0,5826 volt, sementara itu sistem dengan 3 massa dan 2 massa hanya dapat menghasilkan 0,35055 volt dan 0,17731 volt. Namun hal ini juga dipengaruhi oleh bertambahnya jumlah total piezoelektrik pada sistem jika massa pada sistem bertambah.
4. Simulasi ini juga membuktikan bahwa pengaruh jumlah piezoelektrik perbaris pada sistem berbanding terbalik dengan nilai perpindahan dari tiap massa. Hal ini disebabkan oleh konstanta pegas dan konstanta pegas dan redaman pada piezoelektrik yang dapat mereduksi nilai perpindahan pada massa tersebut. Namun jika dilihat dari nilai voltase bangkitan sistem pada variasi ini, sistem dengan 3 piezoelektrik perbaris dapat menghasilkan nilai voltase bangkitan lebih besar senilai 0,3529, dengan nilai bangkitan variasi 2 dan 1 piezoelektrik perbaris senilai 0,35055 volt dan 0,34924 volt. Namun penambahan nilai voltase bangkitan tersebut tidak signifikan dengan bertambahnya jumlah piezoelektrik perbaris.

## **5.2 Saran**

Adapun saran-saran yang didapatkan dari percobaan ini untuk percobaan-percobaan serupa yang akan dilakukan untuk mendapatkan hasil percobaan yang lebih baik seperti;

1. Metode dan perhitungan manufaktur sistem dapat dibuat lebih rinci agar mendapatkan hasil yang lebih akurat.
2. Diperlukan pengembangan untuk perumusan gaya input dari gelombang laut seperti pencarian sudut pada gelombang pada tiap titik gelombang dan dampaknya terhadap sistem agar didapatkan hasil yang lebih akurat.
3. Penggunaan piezoelektrik jenis lainnya yang lebih cocok untuk mendapatkan hasil voltase bangkitan lebih besar dapat dilakukan.
4. Variasi seperti penggunaan massa-massa yang berbeda dapat dilakukan

## DAFTAR PUSTAKA

- Liputan6. (2020, 21 Oktober). Cadangan Energi Fosil Indonesia Tinggal 9 Tahun, <https://www.liputan6.com/bisnis/read/4387986/cadangan-energi-fosil-indonesia-tinggal-9-tahun>
- Pribadi Agung. (2020, 22 Oktober). *Menteri Arifin: Transisi Energi Mutlak Diperlukan*. Direktorat Jenderal Energi Baru Terbarukan dan Konservasi Energi (ETBKE). <https://ebtke.esdm.go.id/post/2020/10/22/2667/menteri.arifin.transisi.energi.mutlak.di-perlukan?lang=en>
- Sudarno, Achmad. (2019, 22 Agustus), 2 *Masalah Utama yang Hambat Perkembangan Energi Terbarukan*: Liputan 6 Bisnis, Liputan 6. <https://www.liputan6.com/bisnis/read/4044407/2-masalah-utama-yang-hambat-perkembangan-energi-terbarukan>
- Azhar, Muhamad, and Dendy Adam Satriawan. (2018) “Implementasi Kebijakan Energi Baru Dan Energi Terbarukan Dalam Rangka Ketahanan Energi Nasional.” *Administrative Law and Governance Journal*, vol. 1, no. 4, 2018, pp. 398–412. Crossref, <https://doi.org/10.14710/alj.v1i4.398-412>
- Wu, Yipeng, et al. (2018) “A Piezoelectric Spring Pendulum Oscillator Used for Multi-Directional and Ultra-Low Frequency Vibration Energy Harvesting.” *Applied Energy*, vol. 231, 2018, pp. 600–14. Crossref, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.082>.
- Izadgoshasb, Iman, et al. “Improving Efficiency of Piezoelectric Based Energy Harvesting from Human Motions Using Double Pendulum System.” *Energy Conversion and Management*, vol. 184, 2019, pp. 559–70. Crossref, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.02.001>.
- Kelautan, Admin-Teknik. (2017) “Gelombang Laut.” Departemen Teknik Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, [www.its.ac.id/tkelautan/gelombang-laut](http://www.its.ac.id/tkelautan/gelombang-laut).
- Kim Nielsen, (1986) “On the Performance of Wave Power Converter.” *Int. Sym. Util.of Ocean Waves*, Jun-86
- David Ross. (1980) “Energy from The Waves.” 2nd Edition Revised & Enlarged, Pergamon Press.
- Hidayatullah, W., & Syukri, M. (2016). *PERANCANGAN PROTOTYPE PENGHASIL ENERGI LISTRIK BERBAHAN DASAR PIEZOELECTRIK*. 1(3), 2016.
- Wacher, Abigail & Nielsen, Kim. (2010) “Mathematical and Numerical Modeling of the AquaBuOY Wave Energy Converter”.
- C. B,Barras and D.R., Derret. 2001 *Ship Stability for Masters And Mates*. Stanford Maritime, Tottenham.

## LAMPIRAN

*Lampiran 1:* TABEL RMS VOLTASE BANGKITAN SIMULASI PADA SELURUH VARIASI

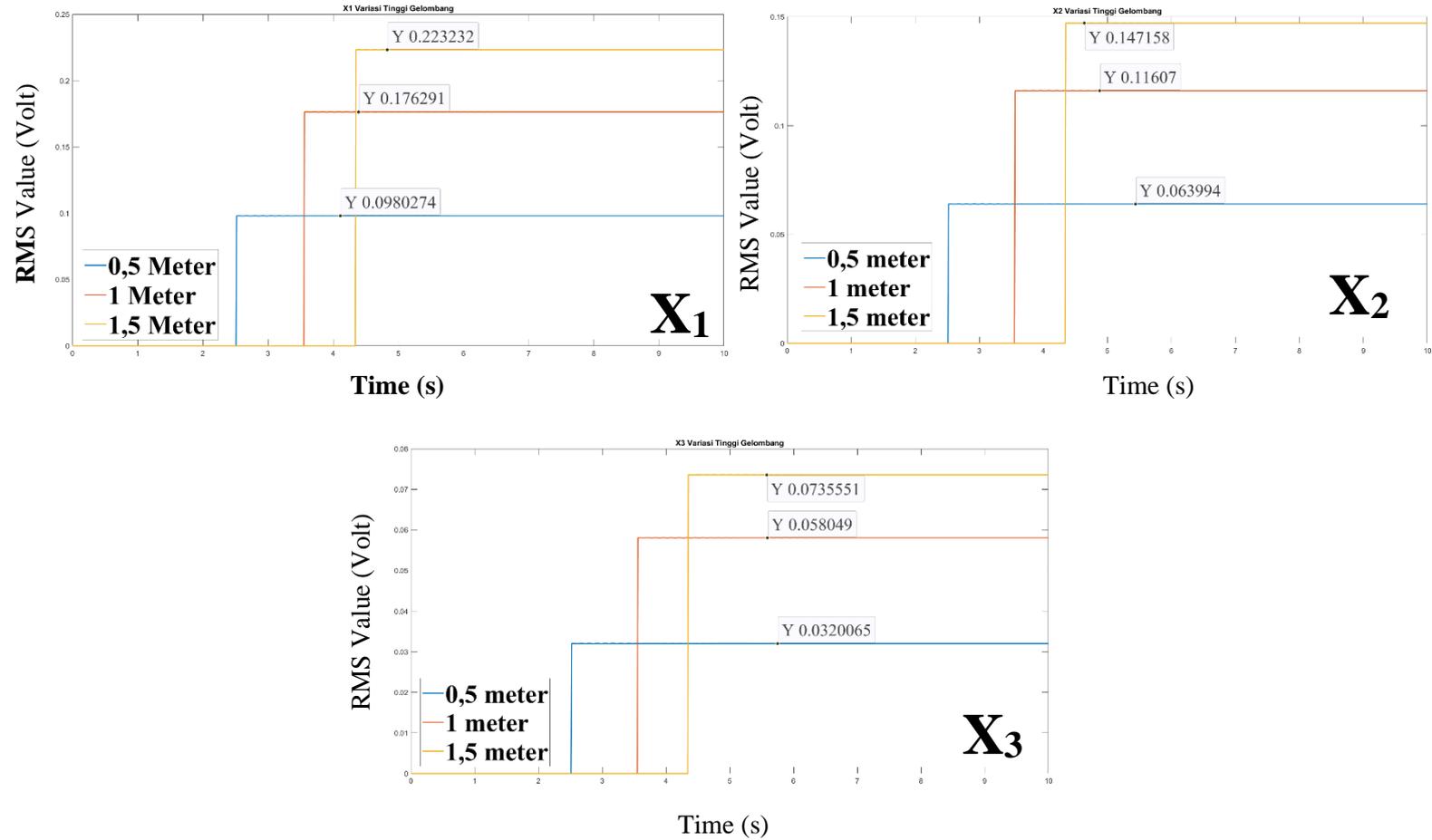
Variasi			Voltase Bangkitan
Jumlah Massa	Amplitudo	Jumlah Piezo	
<b>2</b>	<b>0.5</b>	1	0.09678
		2	0.09884
		3	0.10224
	<b>1</b>	1	0.17495
		2	0.17731
		3	0.18109
	<b>1.5</b>	1	0.22167
		2	0.22443
		3	0.22902
<b>3</b>	<b>0.5</b>	1	0.19303
		2	0.194
		3	0.20161
	<b>1</b>	1	0.34924
		2	0.35055
		3	0.35292
	<b>1.5</b>	1	0.44254
		2	0.44397
		3	0.44704
<b>4</b>	<b>0.5</b>	1	0.32229
		2	0.32203
		3	0.32335
	<b>1</b>	1	0.5825
		2	0.58261
		3	0.58416
	<b>1.5</b>	1	0.73753
		2	0.73801
		3	0.73997

Lampiran 2: TABEL RMS VOLTASE BANGKITAN SIMULASI PADA PERCOBAAN UJI VARIASI

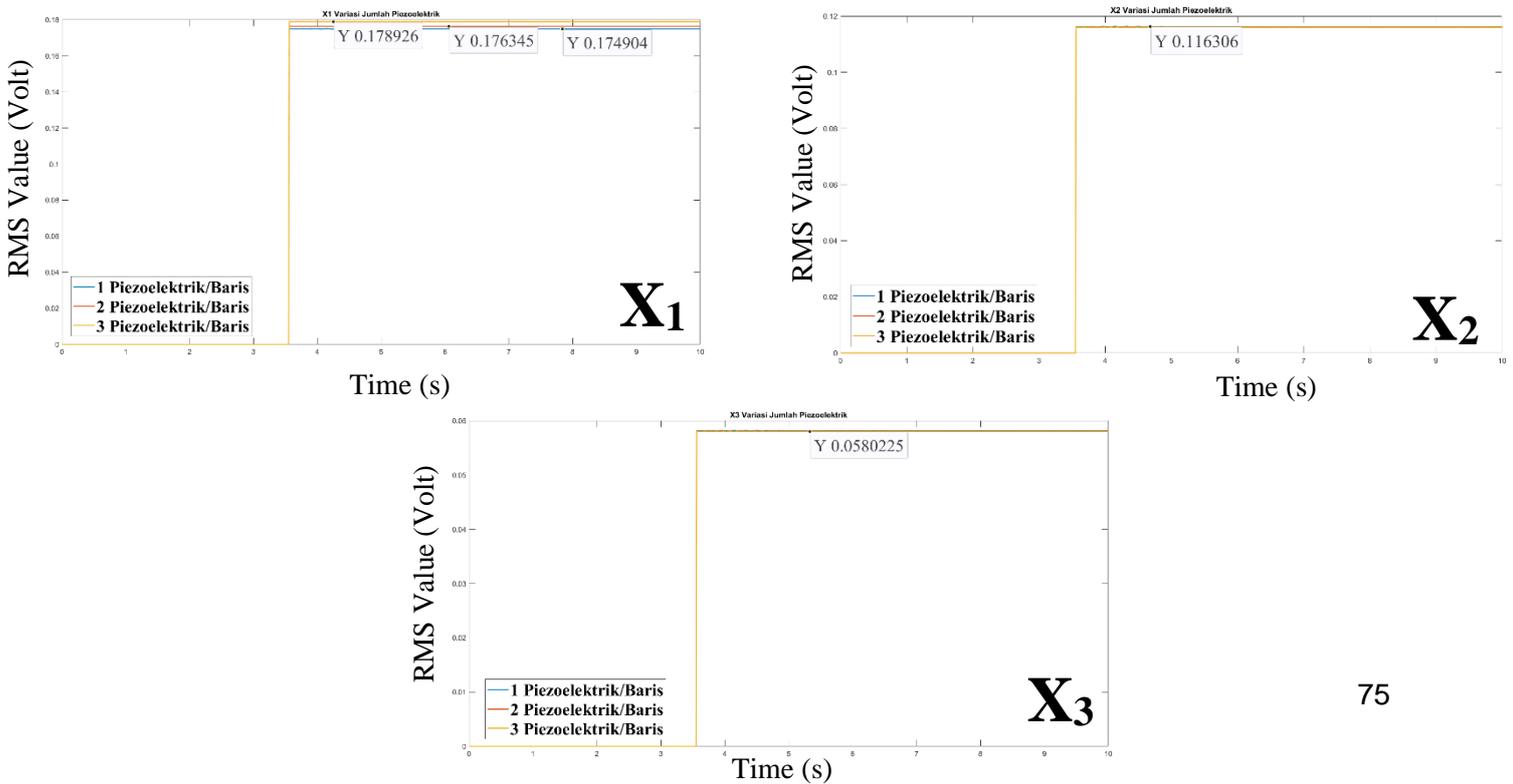
PENGARUH VARIABEL			Voltase Bangkitan
MASSA	AMPLITUDO	PIEZO	
<b>2</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	0.17731
<b>3</b>			0.35055
<b>4</b>			0.58261
<b>3</b>	0.5	<b>2</b>	0.194
	1		0.35055
	1.5		0.44397
<b>3</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	0.34924
		<b>2</b>	0.35055
		<b>3</b>	0.35292

Lampiran 4: Variasi Nilai RMS Voltase Bangkitan pada Setiap Baris

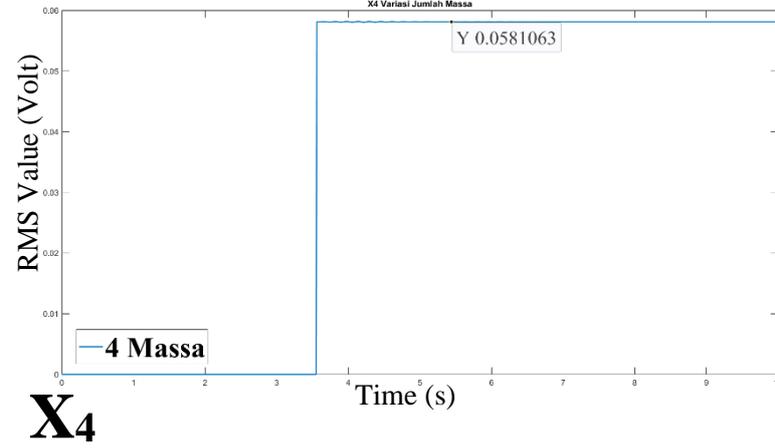
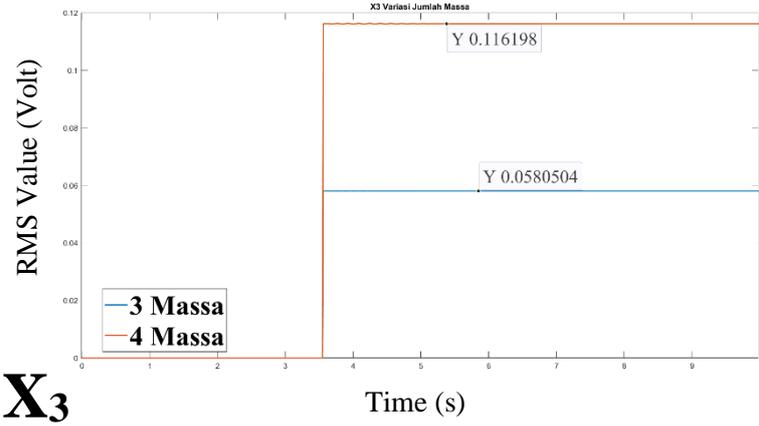
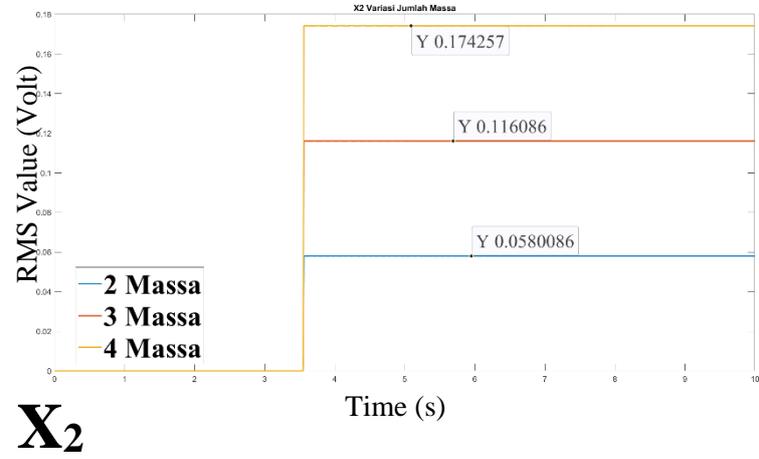
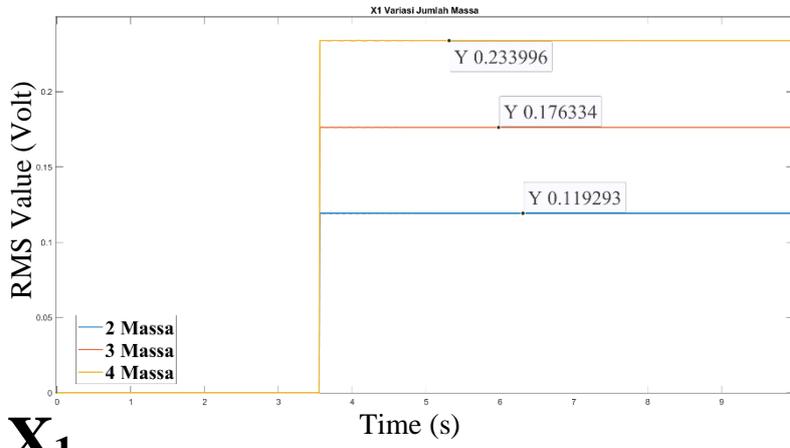
**VARIASI TINGGI GELOMBANG**



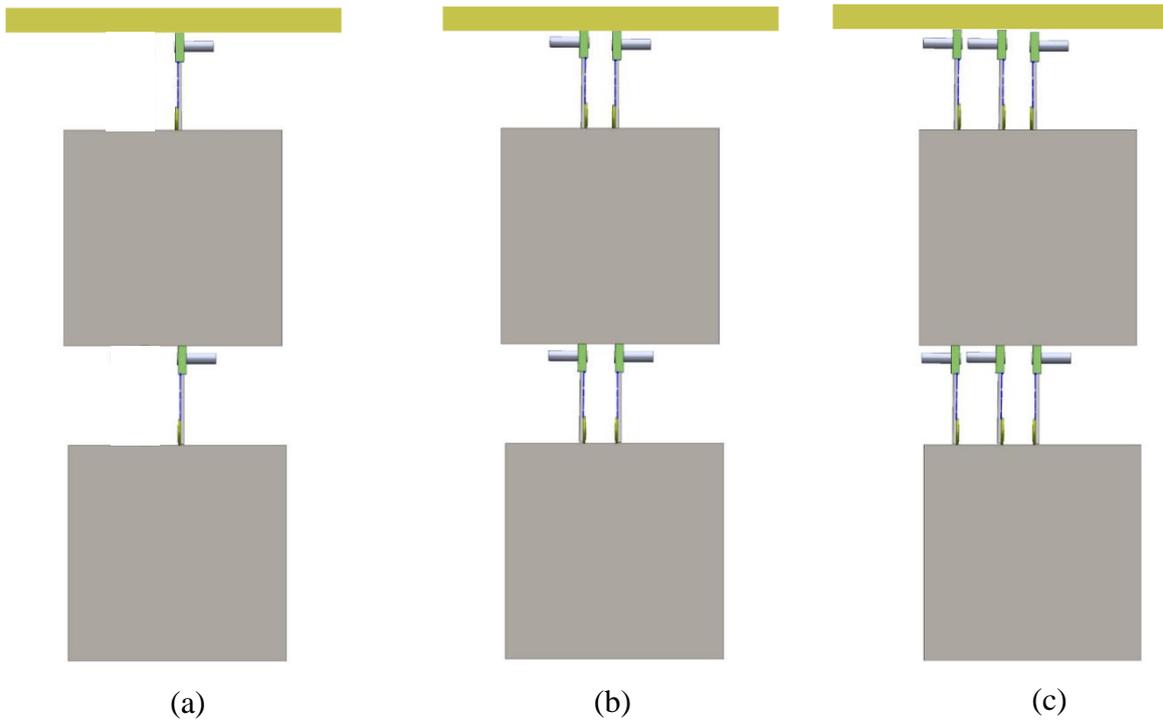
**VARIASI JUMLAH PIEZOELEKTRIK**



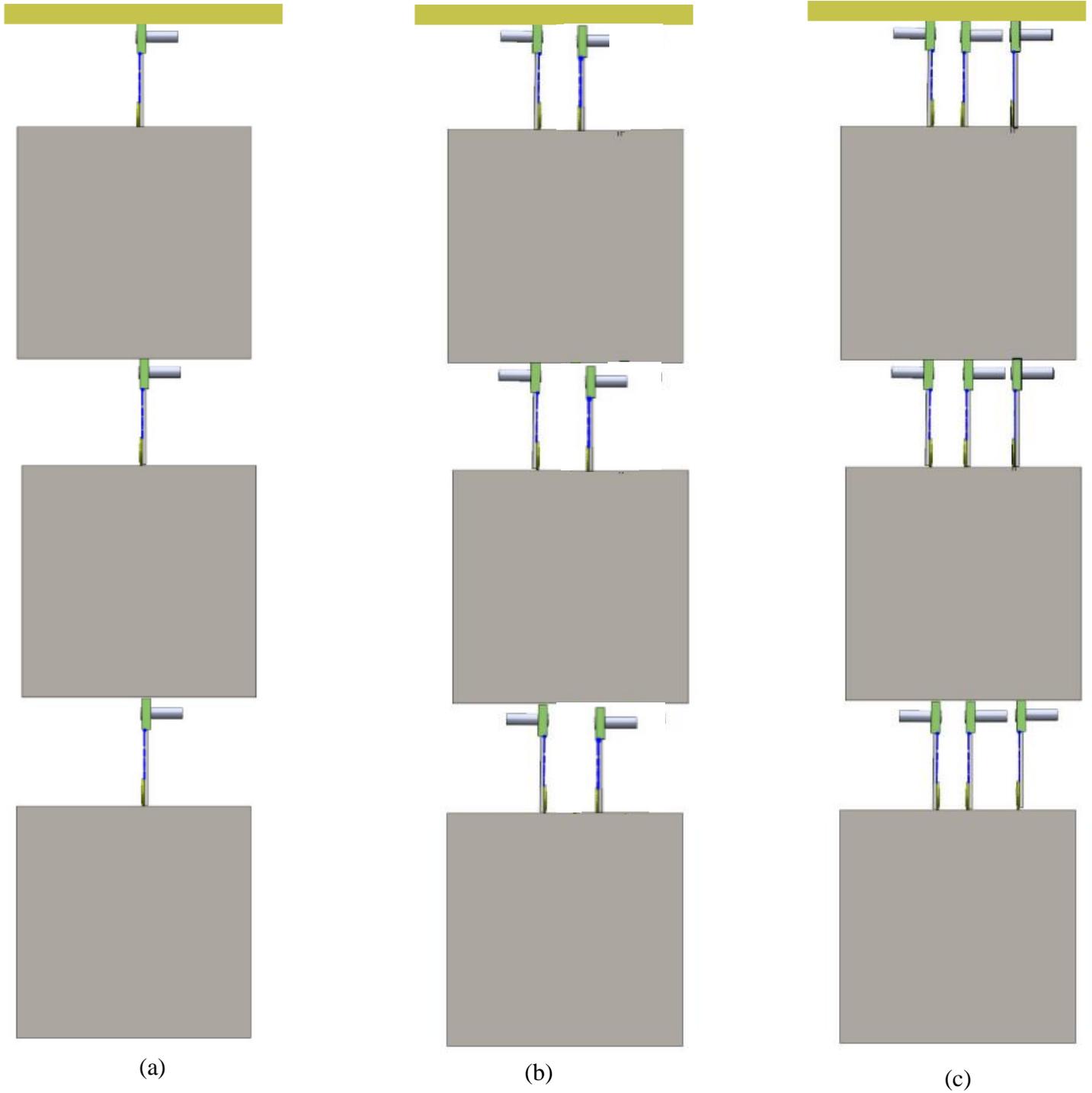
# VARIASI JUMLAH PIEZOELEKTRIK



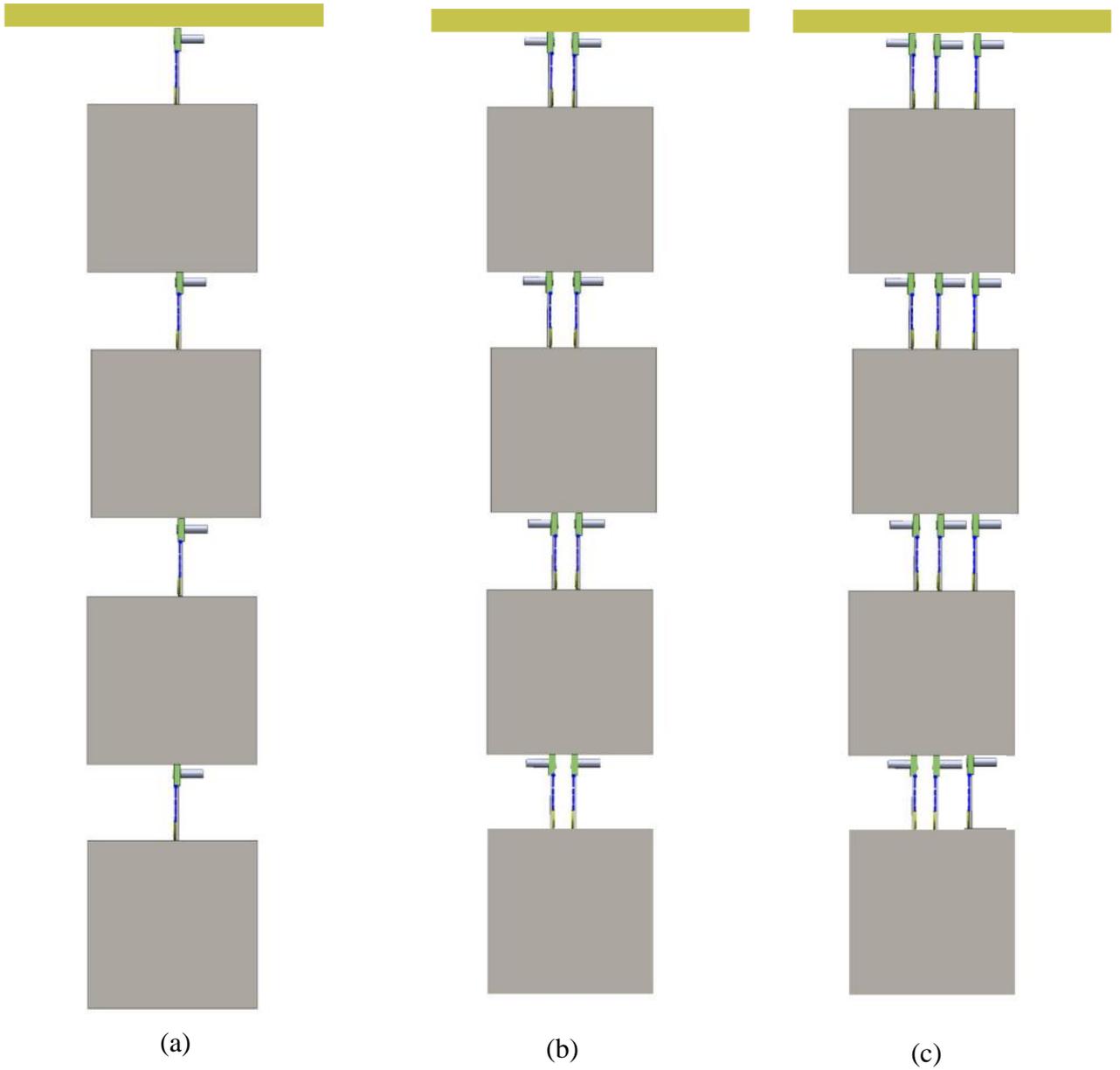
Lampiran 4: Sketsa Sistem 2 Massa (a) Variasi 1 Piezoelektrik/baris (b) Variasi 2 piezoelektrik/baris (c) Variasi 3 piezoelektrik/baris



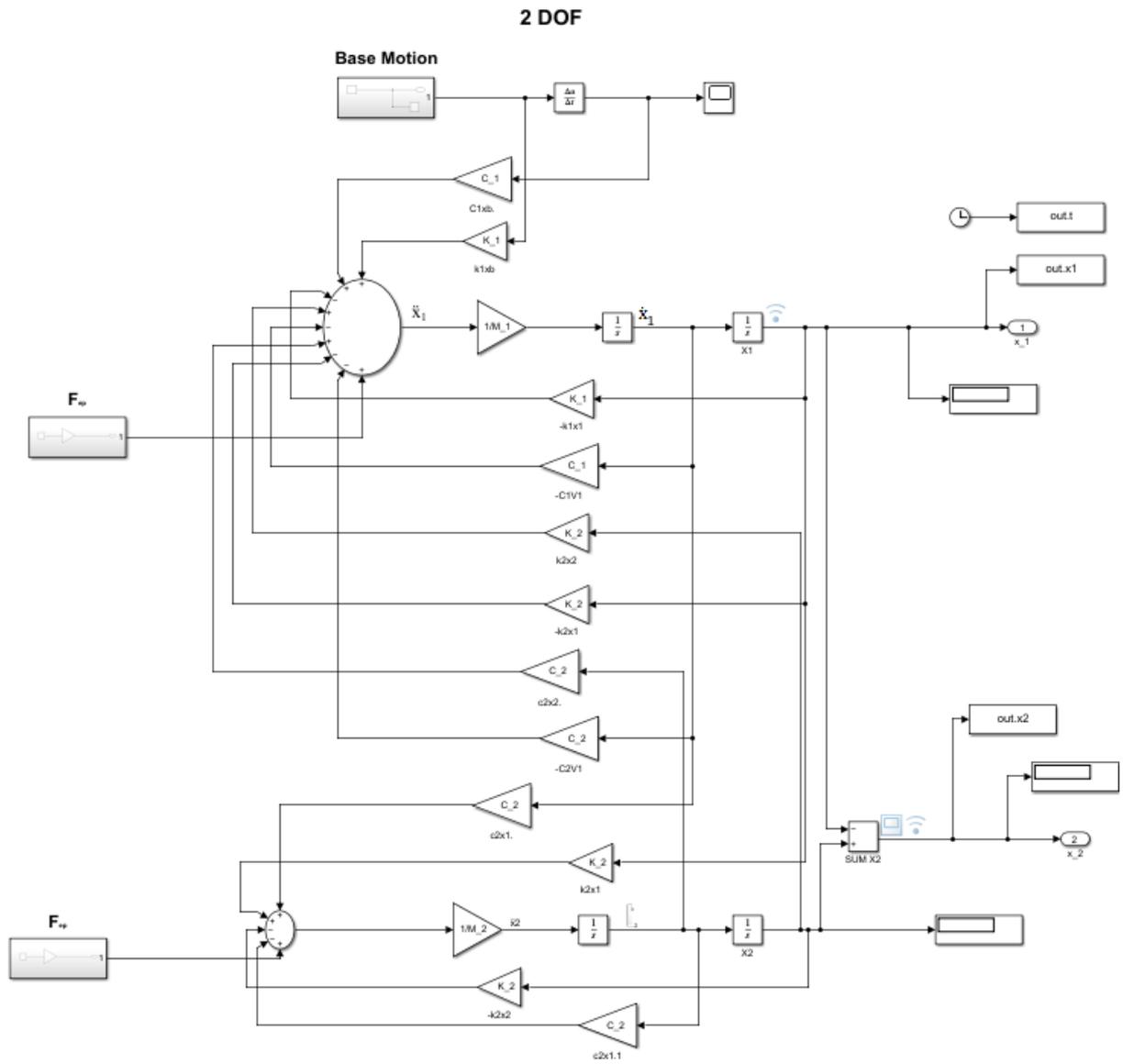
Lampiran 5: Sketsa Sistem 3 Massa (a) Variasi 1 Piezoelektrik/baris (b) Variasi 2 piezoelektrik/baris (c) Variasi 3 piezoelektrik/baris



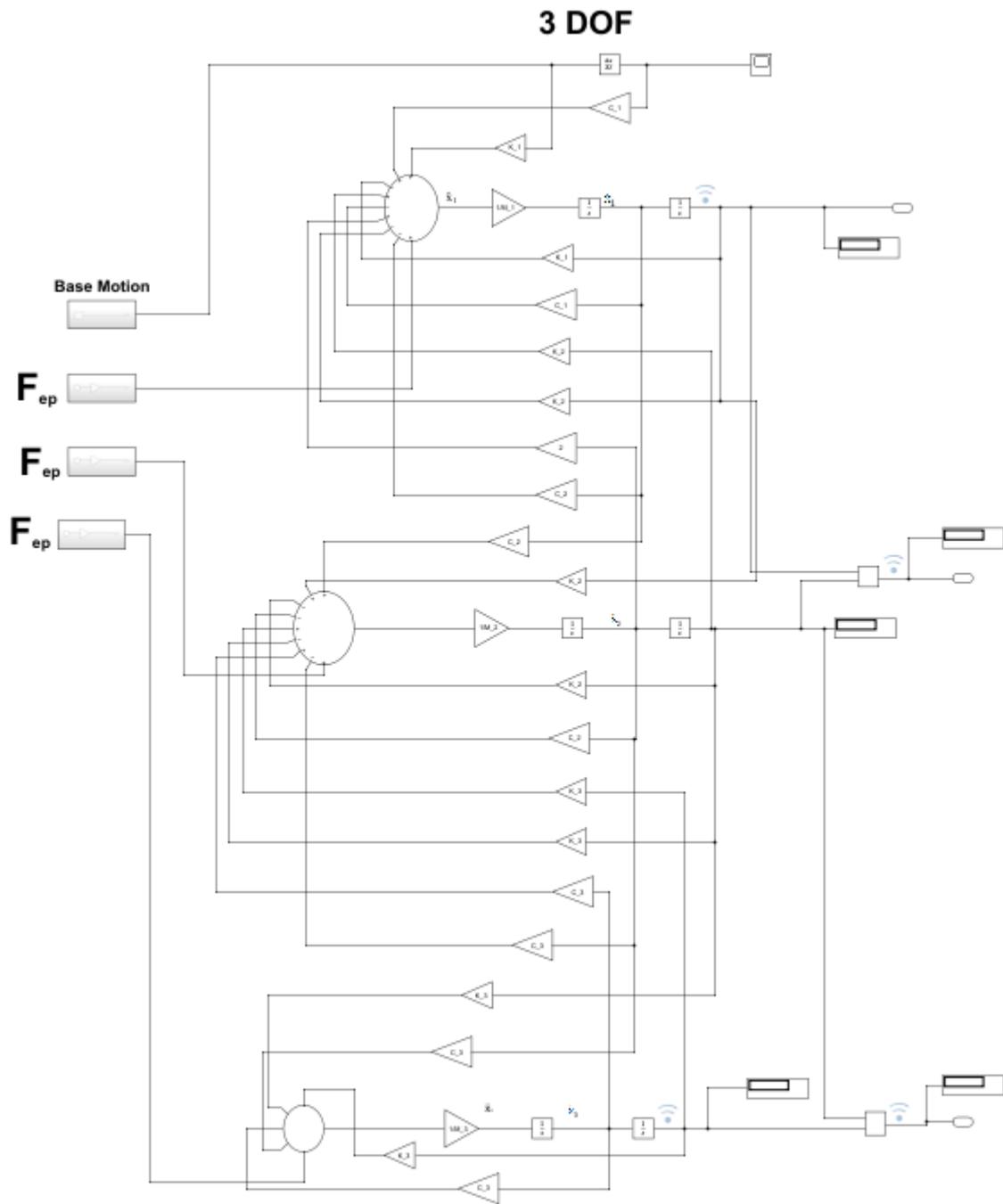
Lampiran 6: Sketsa Sistem 4 Massa (a) Variasi 1 Piezoelektrik/baris (b) Variasi 2 piezoelektrik/baris (c) Variasi 3 piezoelektrik/baris



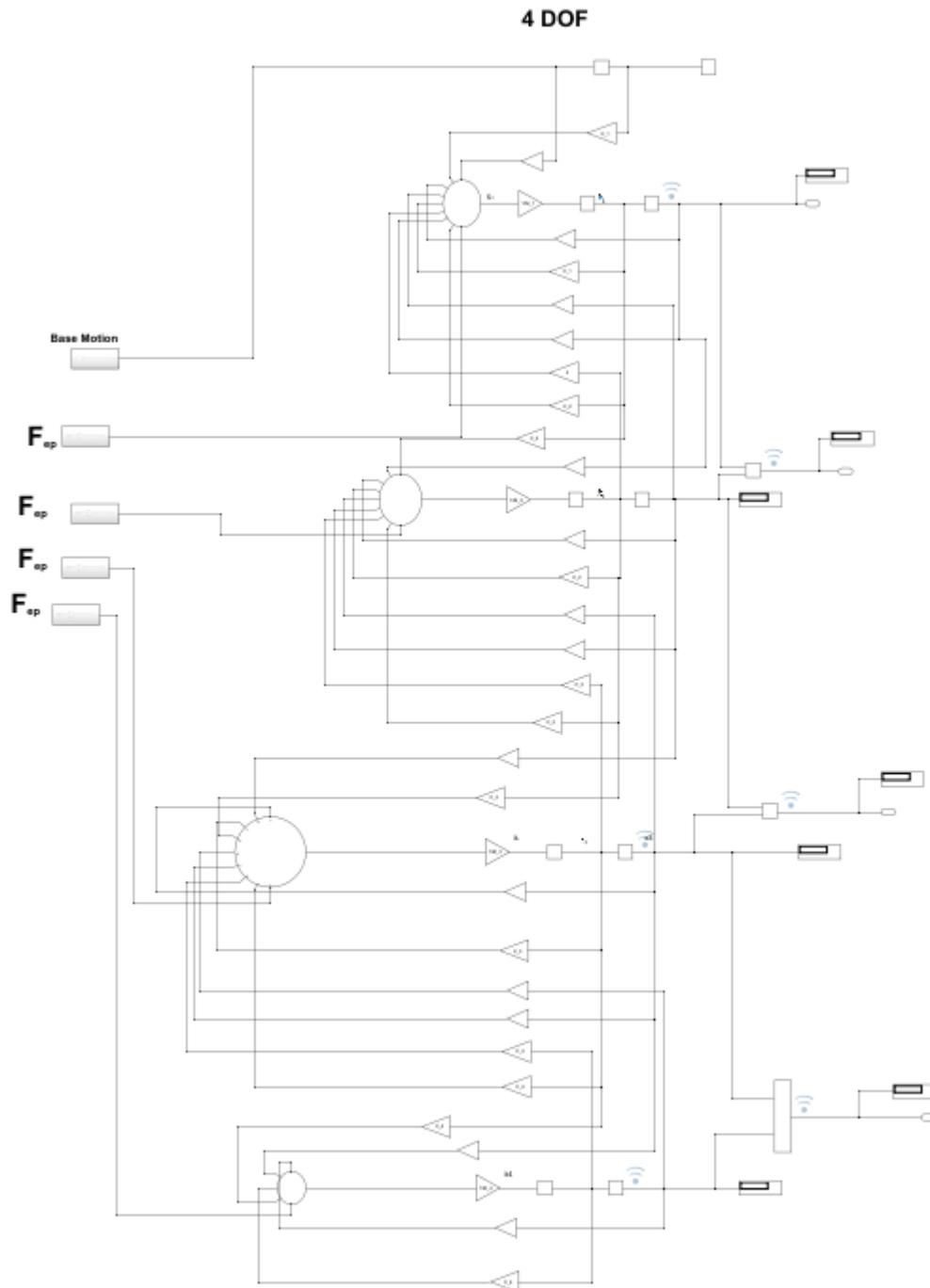
Lampiran 7: Block Diagram Sistem 2 Massa (2 DOF)



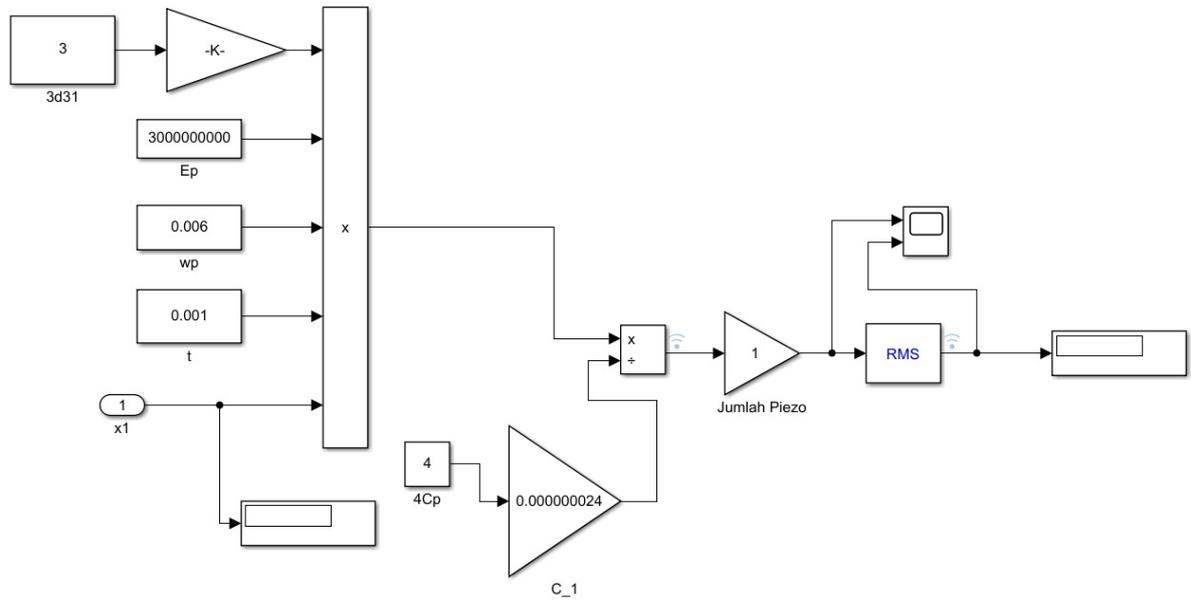
Lampiran 8: Block Diagram Sistem 3 Massa (3 DOF)



Lampiran 9: Block Diagram Sistem 4 Massa (4 DOF)



Lampiran 10: Block Diagram Voltase



## BIODATA PENULIS



Abrar Anandikka Joeswardhana dilahirkan di Bekasi pada tanggal 21 Mei 2000. Penulis merupakan putra dari dua bersaudara pasangan Ekananta Joeswardhana Joesoepadi dan Kokom Komariah.

Penulis memulai pendidikan dasar di SD Al-Hanief Bekasi dan SDS Global Mandiri Cibubur dan lulus pada tahun 2012, lalu penulis melanjutkan pendidikan studi ke SMPS Global Mandiri Cibubur dan lulus pada tahun 2015, kemudian penulis menyelesaikan studi di SMAS Global Mandiri Cibubur dan lulus pada tahun 2018. Setelah menyelesaikan studi SMA, penulis melanjutkan studi untuk meraih gelar sarjana di Institut Teknologi Sepuluh Nopember jurusan Teknik Mesin pada tahun 2018.

Saat ini penulis aktif menjadi anggota Laboratorium Rekayasa Vibrasi dan Sistem Otomotif. Selama masa perkuliahan, penulis telah aktif menjadi anggota organisasi AIESEC in Surabaya dan panitia beberapa acara seperti panitia Wisuda dan acara-acara yang diselenggarakan oleh AIESEC in Surabaya.