



TUGAS AKHIR - TM184730

**ANALISA RESPON DINAMIS DAN TEGANGAN BANGKITAN
MEKANISME PLTGL TIPE *VERTICAL-CANTILEVER BEAM*
*PIEZOELEKTRIK***

**Bagas Dian Anggoro
NRP 0211184000173**

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

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



TUGAS AKHIR– TM184730

**ANALISA RESPON DINAMIS DAN TEGANGAN
BANGKITAN MEKANISME PLTGL TIPE
VERTICAL-CANTILEVER BEAM PIEZOELEKTRIK**

**Bagas Dian Anggoro
NRP 02111840000173**

**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

**ANALISA RESPON DINAMIS DAN TEGANGAN BANGKITAN MEKANISME
PLTGL TIPE VERTICAL-CANTILEVER BEAM PIEZOELEKTRIK**

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: **BAGAS DIAN ANGGORO**

NRP: 02111840000173

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir:

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

SURABAYA

Juli, 2022

APPROVAL SHEET

**ANALYSIS OF DYNAMIC RESPONSE AND ENERGY VOLTAGE MECHANISM
OF VERTICAL-CANTILEVER BEAM 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 : **BAGAS DIAN ANGGORO**

NRP. 02111840000173

Approved by Final Project Examiner Team :

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

SURABAYA

July, 2022

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa / NRP : Bagas Dian Anggoro / 02111840000173

Departemen : Teknik Mesin

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

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul "ANALISA RESPON DINAMIS DAN TEGANGAN BANGKITAN MEKANISME PLTGL TIPE VERTICAL-CANTILEVER BEAM PIEZOELEKTRIK" 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,



(Bagas Dian Anggoro)

NRP. 02111840000173

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

Name of student / NRP : Bagas Dian Anggoro / 02111840000173
Departement : Mechanical Engineering
Advisor / NIP : Aida Annisa Amin Daman, S.T., M.T. / 198907052015042005

Hereby declare that the Final Project with the title of "ANALYSIS OF DYNAMIC RESPONSE AND ENERGY VOLTAGE MECHANISM OF VERTICAL-CANTILEVER BEAM 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,



(Bagas Dian Anggoro)

NRP. 02111840000173

ANALISA RESPON DINAMIS DAN TEGANGAN BANGKITAN MEKANISME PLTGL TIPE VERTICAL-CANTILEVER BEAM PIEZOELEKTRIK

Nama Mahasiswa / NRP : **Bagas Dian Anggoro / 02111840000173**
Departemen : **Teknik Mesin FTIRS – ITS**
Dosen Pembimbing : **Aida Annisa Amin Daman S.T., M.T.**

Abstrak

Indonesia merupakan negara dengan penduduk sebesar 273,5 juta jiwa yang memnuat masyarakat membutuhkan sumber energi yang besar. Diperkirakan produksi bahan bakar fosil akan habis dalam Sembilan tahun, gas bumi akan habis dalam 22 tahun, dan batu bara akan habis dalam 65 tahun mendatang dengan asumsi tidak ada penemuan cadangan baru. Namun di Indonesia sendiri terdapat beberapa potensi energi terbarukan (EBT) yang dapat dikembangkan seperti pada potensi panas bumi terbesar dan energi gelombang laut. Gelombang laut di Indonesia sangat berpotensi dikembangkan dan penggunaan teknologi *piezoelectric* dapat dibilang cukup efisien karena ukuran yang kecil namun dapat menghasilkan energi yang cukup besar dari gelombang air laut.

Penelitian ini dilakukan dengan metode simulasi menggunakan perangkat lunak. Mekanisme PLTGL terdiri dari massa, *cantilever beam*, piezoelektrik, dan batang penyangga. Pada sistem, piezoelektrik disusun secara berbaris dan kolom. Variasi pada piezoelektrik yaitu dua, tiga, dan empat, variasi pada massa yaitu satu, dan variasi pada susunan piezoelektrik. Eksitasi pada gelombang laut dengan variasi sebesar 0,5, 1, dan 1,5 m. Analisa yang dilakukan adalah analisa statis untuk memperoleh defleksi maksimum pada piezoelektrik. Kemudian dilanjutkan dengan Analisa harmonic response pada sistem dan tegangan bangkitan yang dihasilkan.

Dari penelitian yang telah dilakukan dan didapatkan nilai defleksi maksimal dari piezoelektrik yang terjadi pada dua *cantilever-beam* piezoelektrik susunan baris pada ketinggian amplitudo setinggi 1,5 m dengan nilai sebesar 2,2709 mm dengan tegangan maksimum sebesar 60,858 MPa. Dan dari hasil simulasi, voltase terhadap amplitudo, susunan piezoelektrik, dan jumlah piezoelektrik, didapat nilai voltase tertinggi terjadi ketika empat *cantilever-beam* piezoelektrik pada ketinggian amplitudo setinggi 1,5 m dengan nilai voltase maksimum sebesar 6,486 V.

Kata Kunci: *Cantilever-beam, piezoelektrik, amplitudo, static structural, harmonic response*

ANALYSIS OF DYNAMIC RESPONSE AND ENERGY VOLTAGE MECHANISM OF VERTICAL-CANTILEVER BEAM PIEZOELECTRIC MECHANISM

Student's Name : **Bagas Dian Anggoro**
NRP : **0211184000173**
Departement : **Teknik Mesin FTIRS-ITS**
Advisory Lecturer : **Aida Annisa Amin Daman S.T., M.T.**

Abstract

Indonesia is a country with a population of 273.5 million people, which makes people need a large source of energy. It is estimated that fossil fuel production will run out in nine years, natural gas will run out in 22 years, and coal will run out in the next 65 years assuming no new reserves are discovered. However, in Indonesia itself, there are several renewable energy potentials (EBT) that can be developed, such as the largest geothermal potential and water energy. Wave energy in Indonesia has the potential to be developed and the use of piezoelectric technology can be said to be quite efficient because of its small size but can produce considerable energy from sea waves.

This research was conducted using a simulation method using software. The ocean wave power plant mechanism consists of mass, *cantilever beam*, piezoelectric, and support rods. In the system, the piezoelectrics are arranged in rows and columns. Variations in piezoelectric are 2, 3, and 4. And variations in mass are one mass. Excitation on ocean waves with a variation of 0.5 m, 1 m, and 1,5 m. The analysis carried out is a static analysis to obtain the maximum deflection of the piezoelectric. Then proceed with the analysis of the harmonic response of the system.

From the research that has been done and obtained the maximum deflection value of the piezoelectric that occurs in two cantilever-beam piezoelectric arrays at an amplitude height of 1.5 m with a value of 2.2709 mm with a maximum stress of 60.858 MPa. And from the simulation results, voltage to amplitude, piezoelectric arrangement, and number of piezoelectrics, the highest voltage value was obtained when four piezoelectric *cantilever-beams* at an amplitude height of 1.5 m with a maximum voltage value of 6.486 V.

Keywords: *Cantilever-beam*, piezoelectric, amplitude, static structure, harmonic response

KATA PENGANTAR

Puji Syukur kehadirat Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat serta hidayah-Nya, serta shalawat dan salam kepada Nabi Muhammad SAW. Penulis telah banyak memperoleh bantuan dari berbagai pihak dalam penyelesaian Tugas Akhir ini. Penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Keluarga tercinta, Ayah tercinta Widodo Teguh, Ibu tercinta Yossi Irawati, dan saudara tercinta Intan, Tegar, dan Gibran. Terima kasih atas dorongan dan semangatnya.
2. Ibu Aida Annisa A. Daman S.T., M.T., selaku dosen pembimbing penulis. Terima kasih atas saran, ide, diskusi, dan kesabaran yang besar dalam membimbing.
3. Bapak Prof. Dr. Harus Laksana Guntur, S.T., M.T., Ibu Dr. Wiwiek Hendrowati, S.T., M.T., dan bapak Prof. Ir. I Nyoman Sutantra, M.Sc., Ph.D. selaku dosen penguji, terima kasih atas saran-sarannya untuk tugas akhir ini.
4. Teman-teman terdekat Dimas Hw, Reeno, Tarran, Sarah, Audrey, Dinda, Hakim, Hanif, dan Edin. Terima kasih selalu memberi semangat.
5. Teman seperjuangan dalam tugas akhir ini Daffa, Dimas, Abrar, dan Dasa. Terima kasih sudah mau belajar bersama dan bingung bersama.

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

Surabaya, 9 Juli 2022
penulis

DAFTAR ISI

Abstrak	v
Abstract.....	vi
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR.....	x
DAFTAR TABEL	xii
BAB I.....	1
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	1
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	2
1.5 Manfaat Penelitian	2
BAB II	3
DAFTAR PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....	3
2.2.1 Gelombang Laut.....	16
2.2.2 Gelombang Laut.....	16
2.2.3 Derajat Kebebasan.....	17
2.2.4 Piezoelektrik	17
BAB III.....	19
METODOLOGI	19
3.1 Tahap Penelitian	19
3.2 Parameter dan variabel sistem	30
BAB IV	31
HASIL DAN PEMBAHASAN	31
4.2.1 Respon harmonic terhadap amplitude	38
4.2.2 Respon harmonic terhadap jumlah piezoelektrik	43
4.2.3 Respon harmonic terhadap susunan piezoelektrik.....	46
BAB V	53
KESIMPULAN DAN SARAN	53
5.1 Kesimpulan	53

5.2	Saran	53
	DAFTAR PUSTAKA.....	54
	LAMPIRAN	55
	BIODATA PENULIS.....	64

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Skema sistem penelitian	3
Gambar 2.2 Skema dalam Sistem Penelitian Energy harvesting from ocean waves by a floating energy harvester (Viet et al., 2016)	4
Gambar 2.3 Grafik amplitudo gelombang dan periode terhadap RMS (Viet et al., 2016).....	5
Gambar 2.4 Grafik massa dan tinggi lever terhadap RMS.....	6
Gambar 2.5 Struktur sistem <i>Piezoelectric Spring Pendulum Oscillator Used for Multi-directional and Ultra-low frequency Vibration Energy Harvesting</i> (Y. Wu et al., 2018)	7
Gambar 2.6 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	7
Gambar 2.7 Hasil percobaan sistem Penelitian Piezoelectric Spring Pendulum Oscillator Used for Multi-directional and Ultra-low frequency Vibration Energy Harvesting (Y. Wu et al., 2018) di bawah percepatan eksitasi yang tinggi	8
Gambar 2.8 sistem <i>double pendulum</i>	9
Gambar 2.9 Hasil percobaan Shaker Test (a) percepatan eksitasi, (b) Output Voltage PEHCB, (c) Output Voltage PEHSP, (d) Output voltage PEHDP penelitian <i>Improving efficiency of piezoelectric based energy harvesting from human motions using double pendulum system</i> (Izadgoshasb et al., 2019)	11
Gambar 2. 10 Skema sistem pada penelitian.....	12
Gambar 2.11 Nilai Parameter pada struktur sistem penelitian penelitian Nonlinear dynamics of a pendulum-beam coupling piezoelectric energy harvesting system	12
Gambar 2.12 Respon 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.....	13
Gambar 2.13 Skema Sistem Penelitian Ocean wave energy harvesting with a piezoelectric coupled buoy structure (N. Wu et al., 2015)	14
Gambar 2.14 Hasil Penelitian Ocean Wave Energy harvesting with a piezoelectric coupled buoy dengan parameter $Y_0 = 10$ m, $Y_0 = 2$ m dan $D_1 = 9$ m ²	15
Gambar 2.15 Hasil Penelitian Ocean Wave Energy harvesting with a piezoelectric coupled buoy	15
Gambar 2. 16 Contoh derajat kebebasan, sistem yang memiliki dua derajat kebebasan yang bergerak ke arah yang sama dan gerak pada massa 1 (m ₁) dan massa 2 (m ₂) saling berpengaruh ke arah x.....	17
Gambar 2.17 Respon piezoelektrik terhadap gaya yang diberikan	17
Gambar 2.18 Piezoelektrik kantilever	18
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian.....	20
Gambar 3.2 (a) Ilustrasi Sistem Massa <i>Cantilever-Beam</i> Piezoelektrik berbaris tampak depan (b) Ilustrasi Sistem Massa <i>Cantilever-Beam</i> Piezoelektrik berbaris tampak samping.....	22
Gambar 3.3 (a) Ilustrasi Sistem Massa <i>Cantilever-Beam</i> Piezoelektrik kolom tampak depan (b) Ilustrasi Sistem Massa <i>Cantilever-Beam</i> Piezoelektrik kolom tampak samping	22
Gambar 3.4 Komponen Piezoelektrik Pada Sistem <i>cantilever-beam</i> Piezoelektrik.....	23
Gambar 3. 5 Ilustrasi pergerakan kemiringan buoy terhadap gelombang.....	25
Gambar 3.6 Skema Gaya sistem.....	25
Gambar 3.7 <i>free-body diagram</i> dengan arah gerak sumbu x pada variasi satu DOF dan satu piezoelektrik	25
Gambar 3. 8 Massa (m ₁) pada <i>free-body diagram</i> pada satu DOF dan satu piezoelektrik ...	26

Gambar 3. 9 hasil meshing <i>cantilever beam</i> piezoelektrik berbaris.....	27
Gambar 3.10 hasil meshing <i>cantilever beam</i> piezoelektrik kolom	28
Gambar 3.11 Diagram alir simulasi static	29
Gambar 4. 1 <i>orthogonal quality</i> dan <i>skewness</i> pada <i>mesh metric spectrum</i>	31
Gambar 4. 2 Grafik meshing terhadap equivalent Stress pada Cantilever-Beam Piezoelektrik tiga batang kolom	32
Gambar 4. 3 Grafik hasil uji konvergensi (a) <i>orthogonal quality</i> (b) <i>skewness</i>	32
Gambar 4. 4 set up boundary condition.....	33
Gambar 4. 5 Hasil Uji <i>Static Structural</i> cantilever-beam piezoelektrik(a) <i>Equivalent Stress</i> (b) Total Deformasi.....	35
Gambar 4. 6 Hasil Uji <i>Static Structural</i> cantilever-beam piezoelektrik(a) <i>Equivalent Stress</i> (b) Total Deformasi.....	36
Gambar 4. 7 grafik hasil simulasi variasi gelombang 1 m (a) tegangan maximum (b) deformasi maksimum	38
Gambar 4. 9 Hasil respon frekuensi terhadap deformasi (a) amplitude 0,5 (b) amplitude 1 (c) amplitude 1,5	39
Gambar 4. 10 Hasil respon tegangan <i>equivalet</i> terhadap (a) amplitude 0,5 (b) amplitude 1 (c) amplitude 1,5	41
Gambar 4. 11 Hasil respon frekuensi terhadap frekuensi deformasi (a) tiga cantilever-beam piezoelektrik (b) empat cantilever-beam piezoelektrik	43
Gambar 4. 12 Hasil respon tegangan <i>equivalet</i> terhadap (a) tiga cantilver-beam piezoelektrik (b) empat cantilever-piezoelektrik.....	44
Gambar 4. 13 Hasil respon frekuensi terhadap frekuensi deformasi (a) empat cantilever-beam piezoelektrik baris (b) empat cantilever-beam piezoelektrik kolom	46
Gambar 4. 14 Hasil respon tegangan <i>equivalet</i> terhadap (a) empat cantilever-beam piezoelektrik baris (b) empat cantilever-beam piezoelektrik kolom	47
Gambar 4. 15 Hasil respon frekuensi terhadap deformasi maksimum (a) empat cantilever-beam piezoelektrik baris (b) empat cantilever-beam piezoelektrik kolom.....	48
Gambar 4. 16 Hasil voltase setiap variasi (a) amplitude 0,5 (b) aplitudo 1 (c) amplitude 1,5	50

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Nilai Parameter pada Penelitian Energy harvesting from ocean waves by a floating energy harvester (Viet et al., 2016)	4
Tabel 2. 2 Parameter Pada Sistem Penelitian Piezoelectric Spring Pendulum Oscillator Used for Multi-directional and Ultra-low frequency Vibration Energy Harvesting (Y. Wu et al., 2018).....	8
Tabel 2. 3 Hasil Analisa variable double pendulum pada penelitian <i>improving of piezoelectric based energy harvesting from human motions using double pendulum system</i>	10
Tabel 2. 4 Hasil Analisa variable single pendulum pada penelitian <i>improving of piezoelectric based energy harvesting from human motions using double pendulum system</i>	10
Tabel 2. 5 Parameter material piezoelektrik cantilever	14
Tabel 3. 1 Parameter <i>piezoelectric</i> (Beijing Quanxin Ultrasonic, 2022).....	23
Tabel 3. 2 Data Material Structural steel	24
Tabel 3. 3 Data Material Aluminium Alloy	24
Tabel 3. 4 Berat massa pada sistem	30
Tabel 3. 5 Tabel variabel variasi penelitian.....	30
tabel 4. 1 Nilai Stress Error dan Deformation Error.....	31
tabel 4. 2 Hasil perhitungan nilai gaya eksitasi	34
tabel 4. 3 Tabel hasil simulasi <i>maximum stress</i> dan <i>maximum deformation</i>	37

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan negara dengan penduduk sebesar 273,5 juta jiwa yang memnuat masyarakat membutuhkan sumber energi yang besar. Dengan banyaknya jumlah penduduk di Indonesia maka semakin banyak sumber energi yang dibutuhkan terutama bahan bakar fosil. Berdasarkan Augiyono et.al. (2013) seiring meningkatnya PDB selama kurun waktu 2012-2025 yang diperkirakan akan tumbuh sebesar 7,1% per tahun, mengakibatkan pertumbuhan kebutuhan energi meningkat sebesar 4,7% pertahun. (Ulfa, 2018). Namun, menurut kementerian ESDM, produksi minyak nasional hanya berkisar 700 ribu barel per hari iimana kebutuhan domestik yang dibutuhkan mencapai 1,5 juta barel per hari sehingga menyebabkan cadangan minyak terus menurun (ESDM, 2020).

Namun di Indonesia masih banyak penggunaan energi takterbarukan yang membahayakan lingkungan sekitar (Adzikri et al., 2017). Di Indonesia sendiri terdapat beberapa potensi energi terbarukan yang dapat dikembangkan seperti pada potensi panas bumi terbesar dan energi gelombang laut. Untuk energi gelombang laut sendiri berpotensi besar dapat dikembangkan menjadi pembangkit listrik tenaga air (PLTA), sedangkan skala kecil hingga menengah dapat dikembangkan menjadi pembangkit listrik tenaga minihidro (PLTM) dan mikrohidro (PLTMH). Penguji cobaan dan penelitian pun telah dilakukan secara simulasi dan analisis pun untuk memaksimalkan *clean energy* terutama dengan mengoptimalkan gelombang laut.

Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral (KESDM) menjelaskan bahwa salah satu kendala EBT di Indonesia yaitu penguasaan IPTEK yang masih terbatas dalam pembangunan di Indonesia dan permasalahan dari segi lahan dan tata ruang. Dalam meningkatkan pemanfaatan EBT di Indonesia, Telah dilakukan berbagai Penelitian mengenai gelombang laut sebagai sumber energi. Banyaknya penelitian yang telah diuji mengenai energi terbarukan ini terutama mengenai energi gelombang laut, namun masih terjadi losses dan menggunakan alat alat yang memakan banyak ruang. Oleh karena itu penelitian-penelitian baru harus terus dikembangkan untuk mendorong EBT dengan lebih efisien. Energi gelombang laut di Indonesia sangat berpotensi dikembangkan dan penggunaan teknologi *piezoelectric* dapat dibilang cukup efisien karena ukuran yang kecil namun dapat menghasilkan energi yang cukup besar dari gelombang laut.

1.2 Rumusan Masalah

Mengacu pada latar belakang mengenai pemanfaatan energi gelombang air laut, maka diperlukan penelitian lebih lanjut yaitu dengan menggunakan mekanisme osilator pendulum pegas piezoelektrik. Maka dari itu perumusan masalah dalam penelitian adalah:

1. Bagaimana merancang dan mensimulasikan mekanisme osilator *cantilever-beam* piezoelektrik?
2. Bagaimana pengaruh tinggi gelombang laut terhadap distribusi tegangan struktur?
3. Bagaimana pengaruh posisi piezoelektrik pada sistem terhadap distribusi tegangan dan defleksi yang dihasilkan?
4. Bagaimana pengaruh voltase maksimum yang dapat dihasilkan?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Eksitasi pada sistem dianggap sebagai base motion.
2. Eksitasi yang terbentuk berupa gelombang laut yang disimulasikan dianggap konstan.
3. Pengaruh gaya vertikal pada sistem diabaikan.
4. Redaman dan gesekan pada sistem sangat kecil sehingga dapat diabaikan.

1.4 Tujuan Penelitian

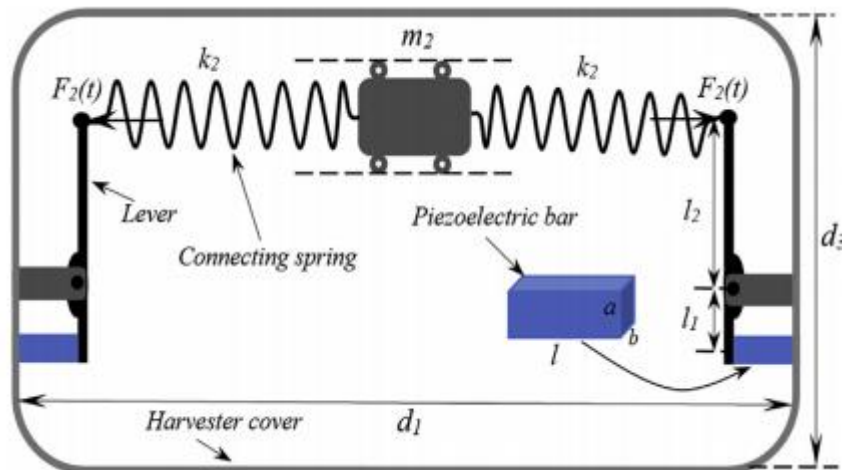
Tujuan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Merancang dan mensimulasikan osilator *cantilever beam* piezoelektrik yang sesuai dengan gelombang laut di Indonesia.
2. Mengetahui pengaruh distribusi tegangan yang dihasilkan
3. Mengetahui pengaruh posisi piezoelektrik pada sistem terhadap distribusi tegangan dan defleksi yang dihasilkan
4. Bagaimana pengaruh voltase maksimum yang dapat dihasilkan

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat pada penelitian ini adalah:

1. Meningkatkan pemanfaatan dari potensi-potensi EBT yang ada di Indonesia terutama gelombang laut.
2. Mengoptimalkan sumber daya gelombang laut di Indonesia dengan memanfaatkan piezoelektrik.
3. Solusi untuk krisis energi di Indonesia yang masih di dominasi menggunakan energi tak terbarukan.



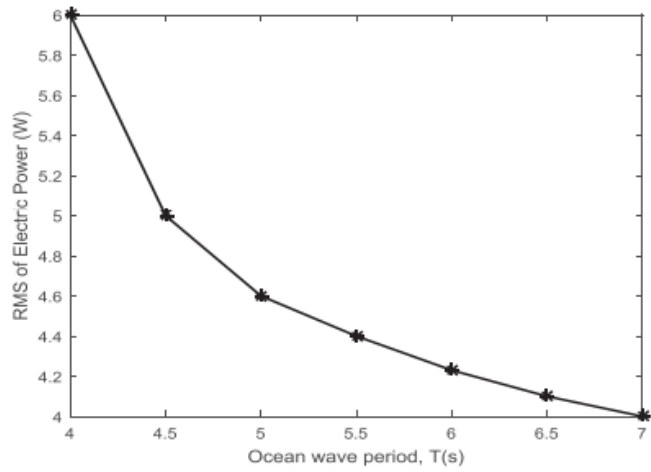
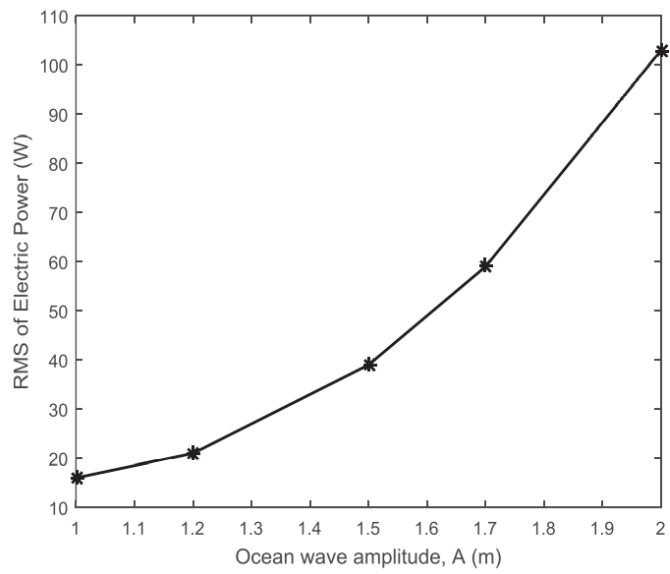
Gambar 2.2 Skema dalam Sistem Penelitian Energy harvesting from ocean waves by a floating energy harvester (Viet et al., 2016)

Pada gambar diatas menunjukan *floating energy harvester* (FEH) berbentuk kubus terhubung ke jangkar, mengambang di permukaan laut dan melempar dengan sudut miring, Q. penelitian ini menggunakan Sistem massa dan pegas digunakan untuk mentransfer gelombang gerak menjadi getaran mekanis. Dua perangkat tuas piezoelektrik digunakan untuk mentransfer dan memperkuat getaran mekanis yang dikumpulkan menjadi tenaga listrik.

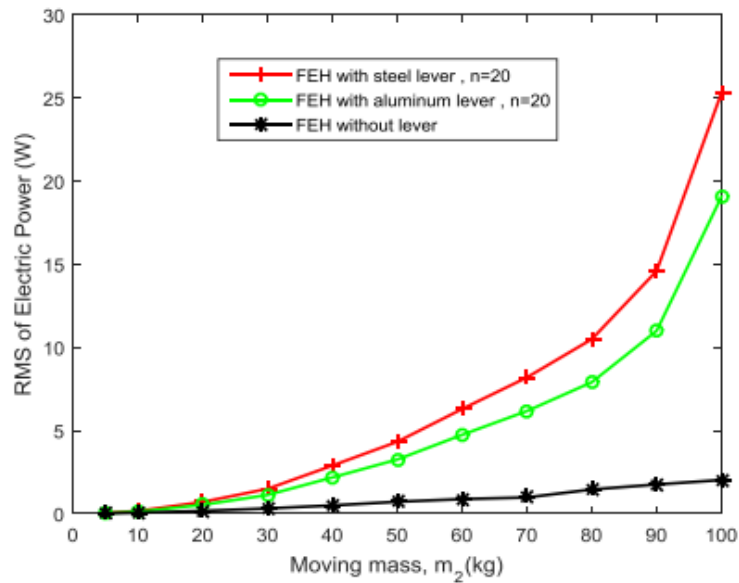
Tabel 2.1 Nilai Parameter pada Penelitian Energy harvesting from ocean waves by a floating energy harvester (Viet et al., 2016)

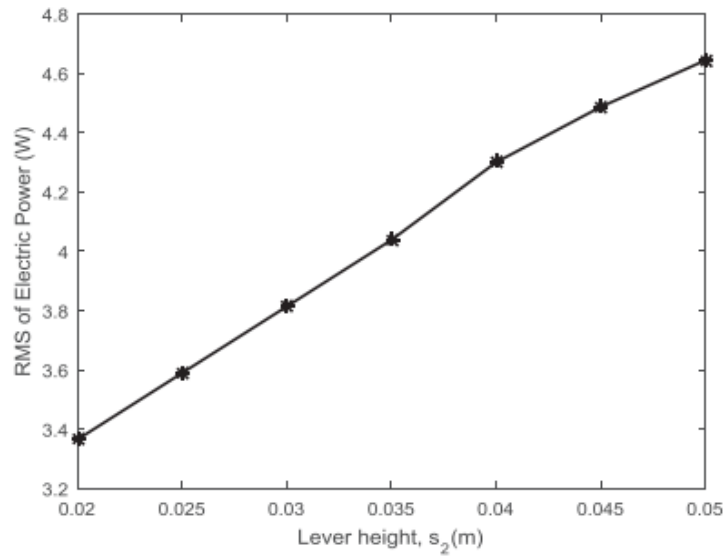
Ocean wave properties			FEH dimensions		
A(m)	T(s)	L(m)	d ₁ (m)	d ₂ (m)	d ₃ (m)
1.3	6	3	1	0.5	1

Pada penelitian ini dilakukan pula simulasi dengan parameter *ocean waves properties* dan dimensi FEH yang digunakan seperti pada tabel 2.1 dimana terdiri dari beberapa parameter seperti amplitude gelombang (A), periode gelombang (T), material lever, tinggi lever (s) dan perbandingan massa sistem. yang dimulai dengan model matematika dibuat berdasarkan metode Lagrangian-Euler dan diselesaikan dengan metode iterasi untuk menghitung nilai akar rata-rata kuadrat dari daya listrik yang dihasilkan.



Gambar 2.3 Grafik amplitudo gelombang dan periode terhadap RMS (Viet et al., 2016)



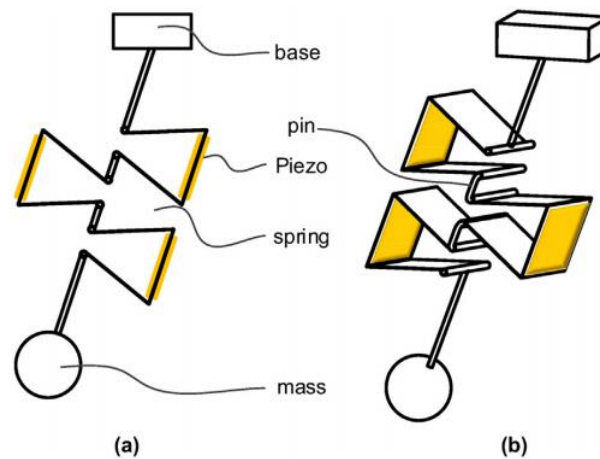


Gambar 2.4 Grafik massa dan tinggi lever terhadap RMS

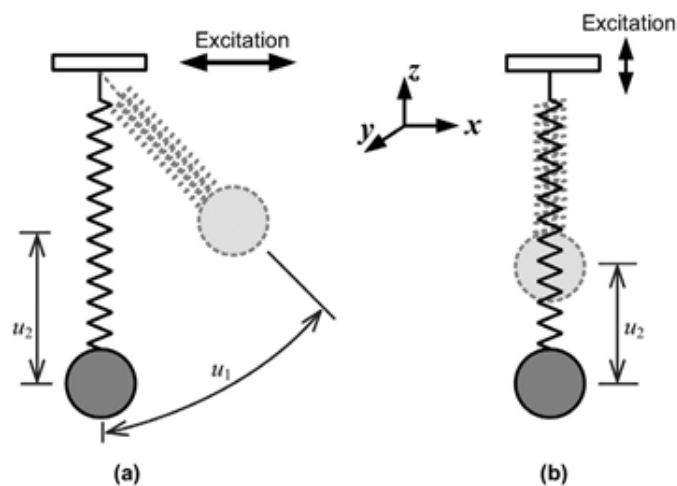
Pada penelitian ini menggunakan Massa 2 sebesar 100kg. dan dapat dilihat pada gambar 2. Bahwa terjadi kenaikan amplitude yang berbanding lurus dengan RMS. Dimulai dari amplitude sebesar 1 dihasilkan RMS sebesar 17W dan ketika amplitude sebesar 2m dihasilkan RMS sebesar 103W.

Penelitian selanjutnya membahas tentang *energy harvesting* dengan sistem pendulum piezoelektrik. Penelitian ini berfokus pada pemanenan energi getaran ultra-rendah (Y. Wu et al., 2018). Penangkapan energi struktur pegas piezoelectric menggunakan klip. Pemanenan dengan menggunakan pegas pendulum memungkinkan energi massa dinamis diubah menjadi energi listrik. Penelitian ini bertujuan untuk merancang, mengkarakterisasi, dan menguji sistem pendulum pegas piezoelektrik yang dapat mendapatkan energi getaran frekuensi ultra-rendah di berbagai arah.

Penelitian pengukuran ekstensif telah dilakukan dan hasilnya membuktikan bahwa perangkat prototipe dapat memanen energi dengan sangat baik di bawah getaran frekuensi ultra-rendah dan generator piezoelectric yang diusulkan adalah tipe inersia. Struktur seperti bandul juga merupakan osilator mekanis umum yang dapat dieksitasi ke segala arah pada bidang horizontal dan frekuensi resonansinya hanya bergantung pada panjang bandul dan percepatan gravitasi. Pada penelitian ini menggunakan struktur PSPH yang terdiri dari massa, pegas pendulum dengan elemen piezoelectric. Sistem pegas pendulum didasarkan pada beberapa klip pengikat logam dan dirakit oleh struktur seri.



Gambar 2.5 Struktur sistem *Piezoelectric Spring Pendulum Oscillator Used for Multi-directional and Ultra-low frequency Vibration Energy Harvesting* (Y. Wu et al., 2018)



Gambar 2.6 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 memfokuskan pada eksitasi horizontal yang ditambahkan dengan PSPH. Setelah mengelola data, maka didapat hasil berupa uji pemanenan energi dan validasi dari gerak manusia pun dilakukan dengan durasi gerakan manusia adalah sekitar 80 detik dan sinyal gerakan juga dipilih sebagai eksitasi input untuk model simulasi. Pada akhirnya akan membentuk gelombang tegangan keluaran piezoelectric simulasi, eksperimen, dan perbandingan kekuatan yang dipanen.

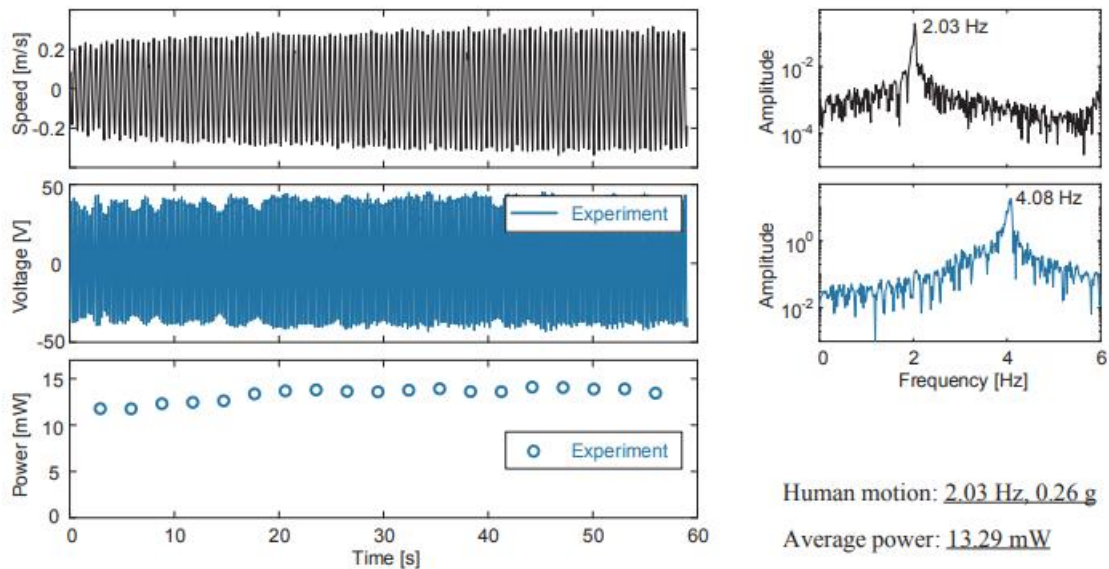
Penelitian ini diawali dengan membuat perhitungan agar mendapatkan parameter-parameter yang dibutuhkan pada sistem agar dapat menghasilkan nilai output yang diharapkan. Nilai output tersebut telah ditentukan dan dapat dilihat pada tabel berikut:

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

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
ξ_1	0.005	ξ_2	0.01
		k_m^2	0.015
		C_p	840 nF

Dari percobaan dengan menggunakan USB 6343 untuk mendapatkan tegangan keluaran piezoelectric, sinyal manusia, dan sinyal keluaran lainnya. Menggunakan vibrometer dippler laser dan resistor dengan nilai 54,16 k Ω dipilih untuk mengevaluasi kinerja pemanenan, maka didapatkan hasil sebagai berikut:



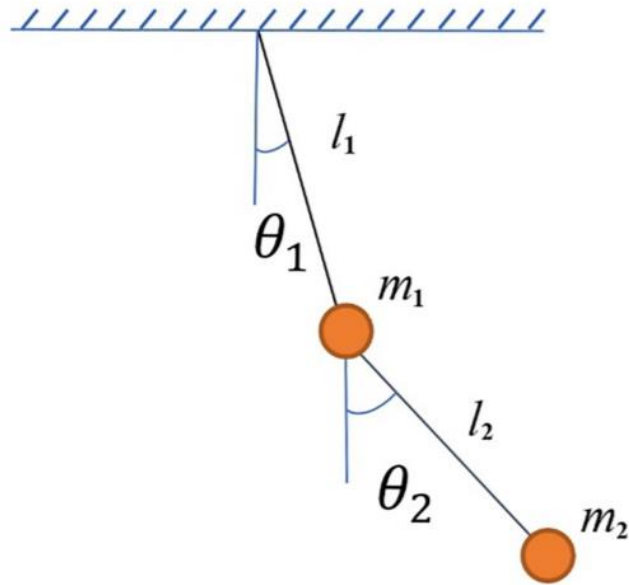
Gambar 2.7 Hasil percobaan sistem Penelitian Piezoelectric Spring Pendulum Oscillator Used for Multi-directional and Ultra-low frequency Vibration Energy Harvesting (Y. Wu et al., 2018) di bawah percepatan eksitasi yang tinggi

Berdasarkan penelitian ini, eksitasi yang diberikan terhadap sistem dari Gerakan tangan manusia yang menggerakkan sistem pendulum dan menggunakan *self-powered demonstration platform* dengan RMS dan frekuensi yang berbeda-beda. dihasilkan daya sebesar 13,29 mW yang didapat dari metode percobaan *self-powered demonstration platform* dengan frekuensi sebesar 2,03Hz dan eksitasi Gerakan (RMS) sebesar 0,26 g.

Penelitian selanjutnya mengenai *Improving efficiency of piezoelectric based energy harvesting from human motions using double pendulum system* (Izadgoshasb, 2019). Pemanen energi piezoelektrik (PEH) adalah salah satu pilihan yang paling banyak dicari, karena kemampuannya mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Oleh karena itu penelitian ini dibuat untuk meningkatkan efisiensi PEH untuk memanen energi dari gerakan manusia.

Penelitian ini dimulai dengan pendulum (PEHSP) dan (PEHDP) terhadap output berupa percepatan sudut dan energi kinetic.

Pada penelitian ini pemanen energi piezoelektrik (PEH) dengan balok kantilever yang dapat dipasang ke sumber getaran dan mampu meningkatkan frekuensi resonansi sumber input, melalui metode konversi frekuensi. Ini sangat berguna ketika frekuensi input rendah, seperti dalam kasus gerakan manusia. Penggunaan bandul sederhana dengan osilasi teratur yang dapat dijelaskan dengan fungsi sinus atau kosinus. Jika sistem tidak linier, periodenya tergantung pada amplitudo, tetapi gerakannya tetap teratur.



Gambar 2.8 sistem *double pendulum*

Sistem bandul yang ditinjau terdiri dari dua bandul dengan massa M_1 dan M_2 , dan menghubungkan lengan panjang masing-masing l_1 dan l_2 . Dapat dilakukan perumusan menggunakan persamaan Lagrange.

Dalam penelitian ini panjang kedua lengan sistem pendulum rangkap dianggap sama. Panjang lengan sistem bandul tunggal (l) dan berat massa (M) ditampilkan dalam tabel berikut:

Tabel 2.3 Hasil Analisa variable double pendulum pada penelitian *improving of piezoelectric based energy harvesting from human motions using double pendulum system*

Parameter yang diadopsi untuk pendulum ganda dalam analisis numerik.

Desain No.	1(mm)	2(mm)	M1(G)	M2(G)	(rad/s ²) Maks	Ek (mJ) Maks
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

Tabel 2.4 Hasil Analisa variable single pendulum pada penelitian *improving of piezoelectric based energy harvesting from human motions using double pendulum system*

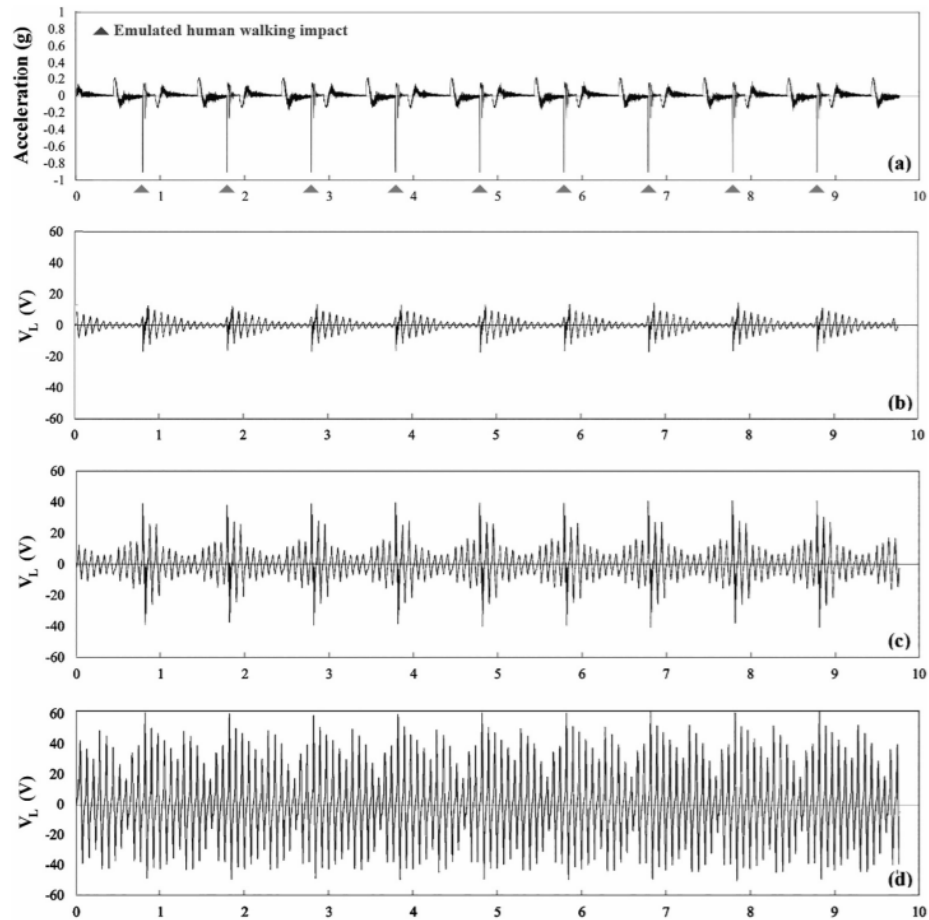
Parameter yang diadopsi untuk bandul tunggal dalam analisis numerik.

Desain No.	aku (mm)	M (G)	(rad/s ²) Maks	Ek (mJ) Maks
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 dari kedua tabel tersebut didapatkan parameter untuk panjang lengan dan massa yang terbaik dari kedua sistem. Didapat desain no 7 untuk *single pendulum* dan desain no 12 untuk *double pendulum*. Berdasarkan hasil perhitungan, sistem pendulum ganda ditemukan mampu menghasilkan percepatan sudut dan energi kinetik yang lebih tinggi. Berdasarkan studi numerik ini,

Desain yang digunakan pada penelitian ini yaitu dengan memasukkan sistem pendulum ganda ke dalam Piezoelectric energy harvester with *cantilever beam* (PEHCB). Digabungkan dengan interaksi gaya magnet yang dapat diputar, kinerja sistem dalam mengumpulkan energi dari gerakan manusia frekuensi rendah diselidiki. Dalam sistem pendulum ganda yang diusulkan, dianggap bahwa pendulum kedua, dengan kecepatan yang jauh lebih tinggi daripada yang pertama, dapat membuat perpindahan besar dan berulang saat eksitasi. Tiga konfigurasi pemanen, PEHCB dan PEHDP diuji pada shaker dengan eksitasi percepatan 1g dan frekuensi 1Hz. Dari pengujian tersebut didapat PEHDP dapat menghasilkan voltage sebesar 60 Hz yang 1.5 kali lebih besar dari PEHCB. Sedangkan dalam pengujian idle, PEHDP dapat menghasilkan voltage sebesar 20 volt sedangkan PEHCB menghasilkan voltage sebesar 10 volt. Dari hasil

tersebut dapat disimpulkan bahwa PEHDP menghasilkan *output voltage* lebih besar dibandingkan PEHCB.

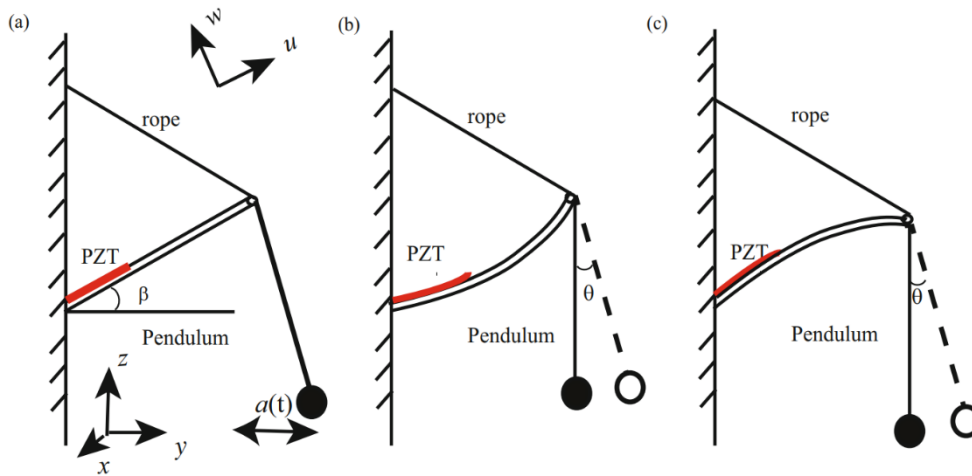


Gambar 2.9 Hasil percobaan Shaker Test (a) percepatan eksitasi, (b) Output Voltage PEHCB, (c) Output Voltage PEHSP, (d) Output voltage PEHDP penelitian *Improving efficiency of piezoelectric based energy harvesting from human motions using double pendulum system* (Izadgoshasb et al., 2019)

Penelitian ini membuktikan bahwa sistem piezoelektir dengan menggunakan massa 2 pendulum lebih baik karena menghasilkan daya yang lebih maksimal dan dapat menggali energi dengan menggunakan gerakan dari manusia.

Penelitian selanjutan yang berjudul *Nonlinear dynamics of pendulum-beam coupling piezoelectric energy harvesting* (Haitao Li, 2019). Pada perkembangan teknologi yang membuat kebutuhan daya yang tinggi. Dengan memanfaatkan energi dari getaran yang ada di sekitar kita, energi yang dibutuhkan dapat terpenuhi salah satunya dengan menggunakan matrial piezoelektrik yang sudah banyak dibuktikan oleh penelitian dengan sistem kantilever beam.

Tujuan dari penelitian ini dengan tujuan meningkatkan efisiensi sistem piezoelektrik kantilever beam dengan menambahkan pendulum ke dalam sistem sehingga dapat menerima eksitasi dari arah horizontal sehingga terjadi tegangan pada tali pendulum yang dapat menyebabkan terjadi tekan pada beam. Gaya tekan tersebut akan memberi gaya tekuk pada beam dan menyebabkan getaran dengan amplitude tinggi dan menghasilkan voltase yang tinggi.



Gambar 2. 10 Skema sistem pada penelitian

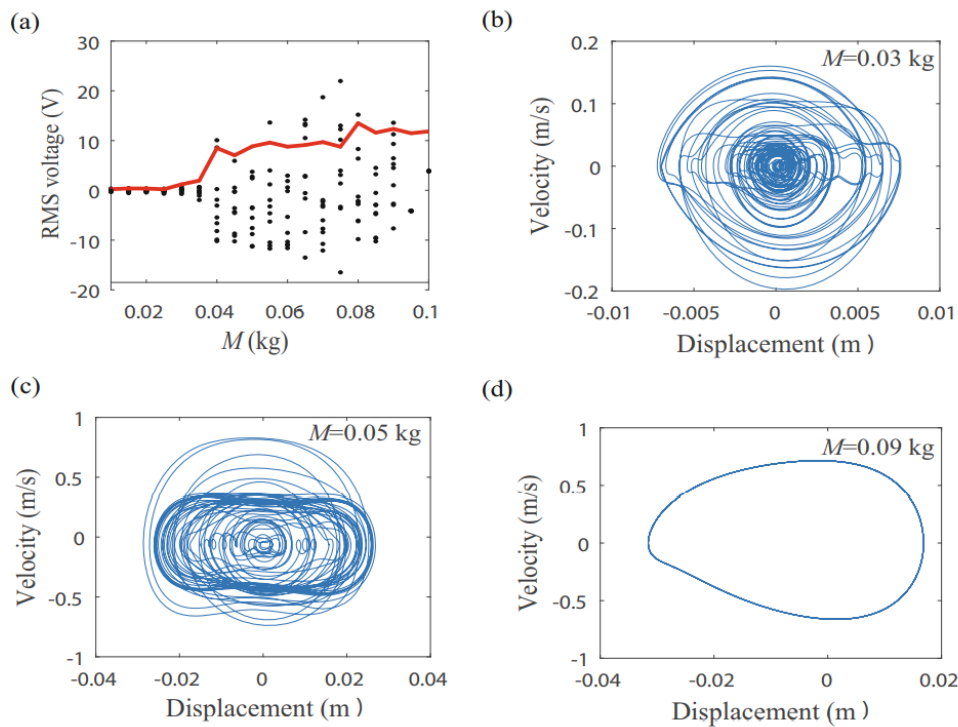
Dengan mendapatkan perumusan dari energi potensial dan kinetic pada sistem. Kemudian persamaan *electromechanical coupling* diturunkan berdasarkan *Hamilton's Principle*. Setelah itu ditentukan dan didapatkan parameter-parameter pada sistem untuk dilakukan percobaan secara matematis dengan eksitasi harmonis 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 berikut.

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	δ_1	0.0002 m
Thickness of steel substrate	δ_2	0.00075 m
Density of piezoelectric layer	ρ_1	$2270 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Density of steel substrate	ρ_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	ϵ_{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	$9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

Gambar 2.11 Nilai Parameter pada struktur sistem penelitian **penelitian** Nonlinear dynamics of a pendulum-beam coupling piezoelectric energy harvesting system

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 $l = 0.05\text{m}$.

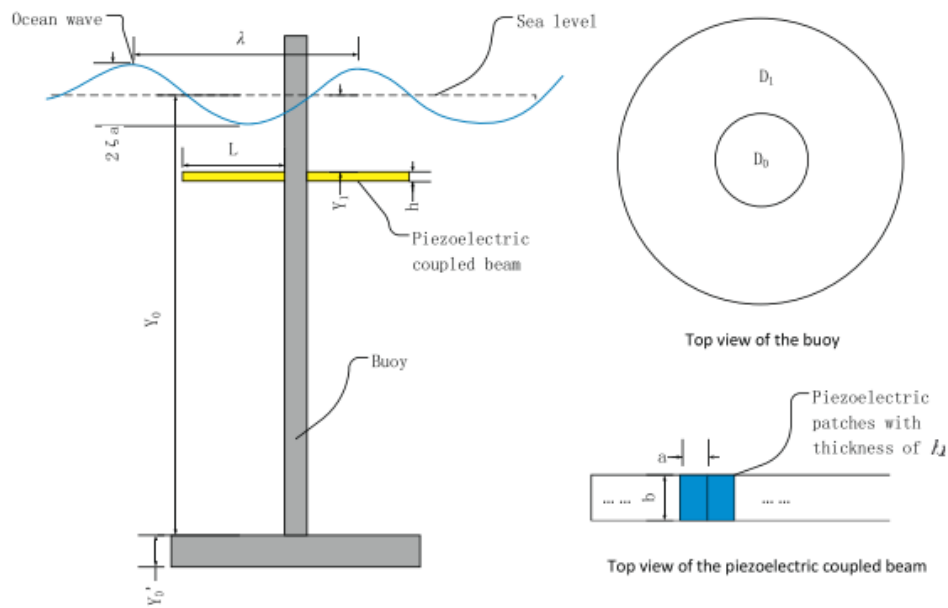
Setelah dilakukan percobaan eksitasi harmonis, didapatkan dalam Gambar 2.11 bahwa struktur sistem tidak dapat menghasilkan voltase secara teratur saat massa di bawah 0.09kg. Sementara itu saat struktur pendulum berada pada 0.05kg, voltase yang dihasilkan dapat menunjukkan sebesar 9 V karena amplitudo yang tinggi pada beam. Saat massa dinaikkan hingga mencapai 0.09kg, respon struktur sistem dapat menunjukkan gerakan yang periodik. Dapat disimpulkan bahwa dalam simulasi harmonik, sistem ini menunjukkan respons nonlinier yang kompleks, termasuk kekacauan yang dapat menyebabkan defleksi besar dan tegangan keluaran.



Gambar 2.12 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

Penelitian selanjutnya berjudul *ocean wave energy harvesting with a piezoelectric coupled buoy structure* (N. Wu et al., 2015). Penelitian ini dilakukan dikarenakan teknologi transduksi piezoelektrik dapat menghasilkan energi listrik yang lebih besar dan optimal dibandingkan dengan energy harvesting lainnya.

Pada penelitian ini mengembangkan desain optimal dari piezoelektrik yang dipasang pada struktur balok untuk mencari nilai RMS dan voltase yang didapat melalui sistem dengan parameter tinggi gelombang laut setinggi 3m. Dengan menggunakan desain struktur kantilever gabungan piezoelektrik yang dilekatkan oleh massa yang dikenai gerakan dasar untuk mencapai pemanenan energi yang efektif dan terdapat pula *material properties of the piezoelectric coupled cantilever* untuk mengkonversi energi gelombang laut menjadi energi listrik.



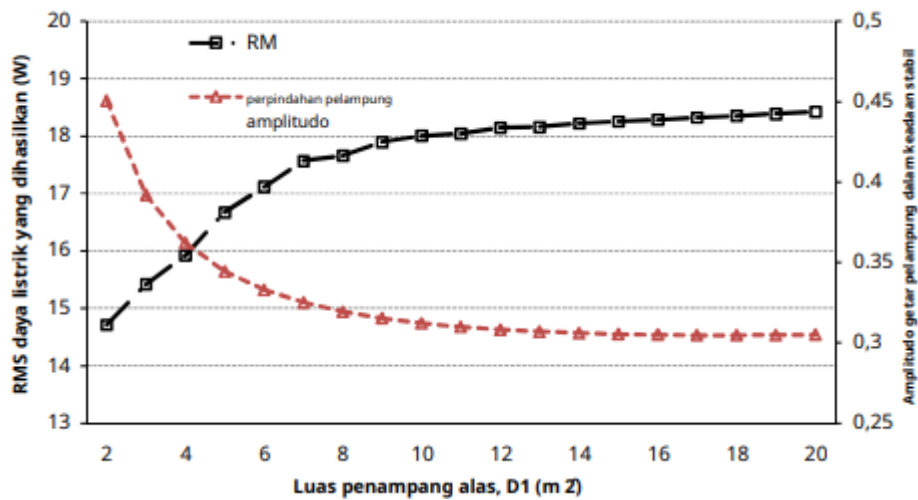
Gambar 2.13 Skema Sistem Penelitian Ocean wave energy harvesting with a piezoelectric coupled buoy structure (N. Wu et al., 2015)

Tabel 2.5 Parameter material piezoelektrik cantilever

Material properties of the piezoelectric coupled cantilever.

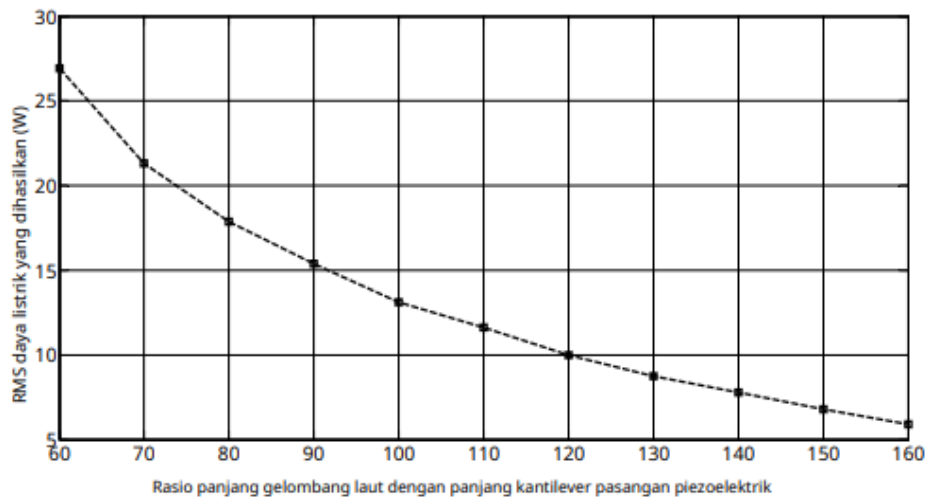
Parameters	Host beam (aluminum)	Piezoelectric patches (PZT4)
Length, l/a (m)	1	0.05
Width, b (m)	0.2	0.2
Thickness, h/h_1 (m)	0.006	0.0006
Young's modulus (N/m^2)	78e9	7.5e10
Mass density (kg/m^3)	2800	7500
e_{31} (C/m^2)		-2.8
C_p (nF)		0.375 for the piezoelectric patch with the geometry of 0.01 m, 0.01 m, 0.0001 m

Model numerik dikembangkan untuk menghitung getaran pelampung dan cantilever yang digabungkan dengan piezoelektrik yang dikenai gelombang laut serta energi listrik yang dihasilkan untuk pertama kalinya. Dilakukan pula 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.



Gambar 2.14 Hasil Penelitian Ocean Wave Energy harvesting with a piezoelectric coupled buoy dengan parameter $Y_0 = 10$ m, $Y_0 = 2$ m dan $D_1 = 9$ m²

Variasi amplitudo getaran pelampung dan RMS dan luas penampang yang berbeda dari pemberat pelampung ditunjukkan pada Gambar 2.13 . Dimensi pelampung dan patch piezoelektrik diberikan sebagai yaitu s $Y_0 = 10$ m, $Y_0 = 2$ m dan $D_0 = 0.04$ m². Dari data tersebut, sistem dapat menghasilkan energi listrik sebesar 17,6W ketika luas penampang pelampung 7m². peningkatan yang signifikan dari efisiensi pemanenan energi, tetapi efeknya tidak terlalu jelas ketika luas penampang struktur pemberat berada di luar jangkauan.



Gambar 2.15 Hasil Penelitian Ocean Wave Energy harvesting with a piezoelectric coupled buoy

Penelitian ini membuktikan bahwa penggunaan sistem piezoelectric buoy harvester, dari gelombang laut dapat diubah menjadi energi listrik dan penelitian ini masih dikembangkan dengan penelitian lebih lanjut seperti ketahanan sistem.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Gelombang Laut

Gelombang laut merupakan sebuah fenomena alam yang sering terjadi di laut. Gelombang laut merupakan peristiwa naik turunnya permukaan laut secara vertikal yang membentuk kurva atau grafik sinusoidal tanpa disertai oleh perpindahan massa airnya. Terdapat 4 bentuk besaran yang berkaitan terhadap gelombang, yaitu:

- Amplitude (T) yang merupakan jarak antara puncak dari gelombang dengan permukaan rata-rata air.
- Frekuensi (f) yang merupakan besaran gelombang yang melewati suatu titik dalam waktu tertentu.
- Kemiringan gelombang (λ) merupakan perbandingan antara tinggi gelombang dengan panjang gelombang.
- Kecepatan (C) merupakan jarak yang ditempuh oleh gelombang dalam satu satuan waktu tertentu,

2.2.2 Gelombang Laut

Penelitian ini menggunakan gelombang laut di Indonesia sebagai sumber eksitasi dari sistem pendulum. Maka, digunakanlah data tinggi gelombang laut yang diterbitkan oleh Pusat Meteorologi Maritim BMKG. Setelah didapatkan data tinggi gelombang (H), digunakan beberapa perumusan berikut untuk mencari periode (T), panjang gelombang (λ), kecepatan gelombang (v) dan energi kinetik (EK) yang dihasilkan oleh gelombang.

- Amplitudo 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;

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

(Pers. 1)

- Panjang Gelombang (λ) dan Kecepatan Gelombang (v)

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

$$\lambda = 5.12 T$$

(Pers. 2)

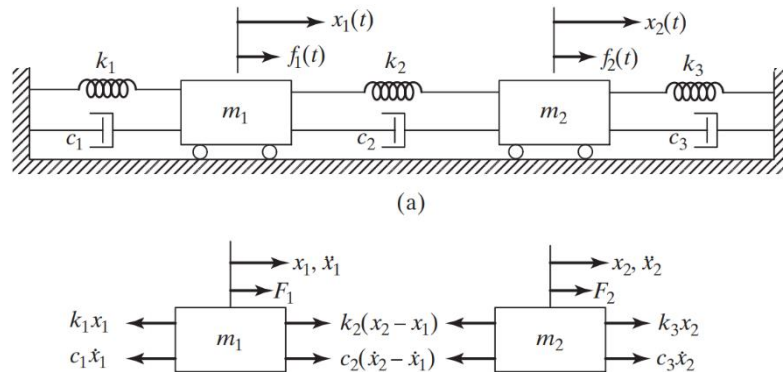
Jika panjang gelombang dan periode diketahui, maka kecepatan gelombang dapat diperoleh dengan menggunakan rumus;

$$v = \frac{\lambda}{T}$$

(Pers. 3)

2.2.3 Derajat Kebebasan

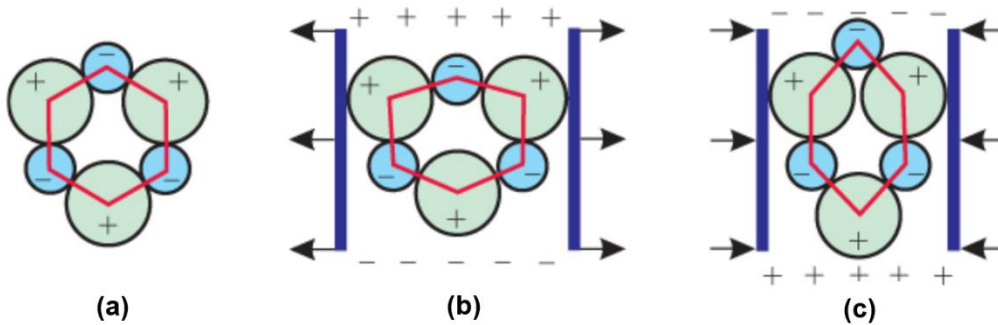
Derajat kebebasan adalah jumlah minimum sebuah variable yang diperlukan untuk menggambarkan gerak suatu sistem. Dalam model sistem derajat kebebasan tunggal hanya membutuhkan satu variabel untuk menggambarkan suatu sistem dan semakin banyak derajat kebebasan yang dimiliki oleh suatu sistem maka pergerakan mekanismenya akan semakin bebas.



Gambar 2. 16 Contoh derajat kebebasan, sistem yang memiliki dua derajat kebebasan yang bergerak ke arah yang sama dan gerak pada massa 1 (m_1) dan massa 2 (m_2) saling berpengaruh ke arah x .

2.2.4 Piezoelektrik

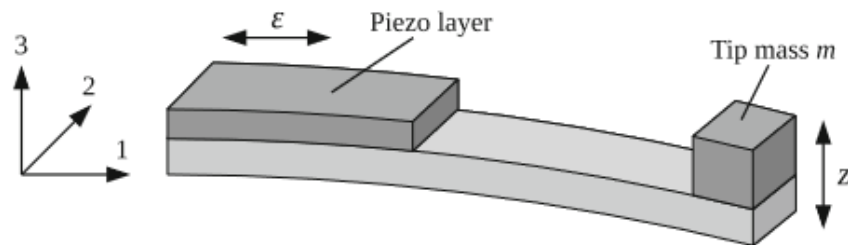
Piezoelektrik merupakan suatu bahan yang dapat menghasilkan tegangan listrik saat terkena defleksi akibat sebuah getaran, tekanan, atau tarikan. Akibat dari hal tersebut akan menyebabkan polarisasi muatan akibat gaya yang diberikan pada piezoelektrik menyebabkan kristal untuk menghasilkan listrik.



Gambar 2.17 Respon piezoelektrik terhadap gaya yang diberikan

Terdapat muatan positif dan negatif yang tersebar pada material piezoelektrik. Seperti yang terlihat pada gambar 2.13 bagian a, susunan muatan material saat tidak terjadi gaya apapun terhadap piezoelektrik dan ketika piezoelektrik terkena gaya seperti geraran, tarik, dan tekanan mengakibatkan muatan bergerak sehingga terjadi polarisasi yang menghasilkan tegangan listrik seperti pada gambar 2.13 pada bagian b dan gambar 2.13 bagian c.

Percobaan pembangkit listrik tenaga gelombang laut menggunakan piezoelektrik cantilever yang merupakan sebuah piezoelektrik yang berbentuk cantilever dengan material *piezoelectric transducer* dibagian bawah atau atas.



Gambar 2.18 Piezoelektrik cantilever

Agar dapat mengetahui berapa besar tegangan listrik yang dihasilkan piezoelektrik cantilever dapat digunakan persamaan berikut:

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

Dimana:

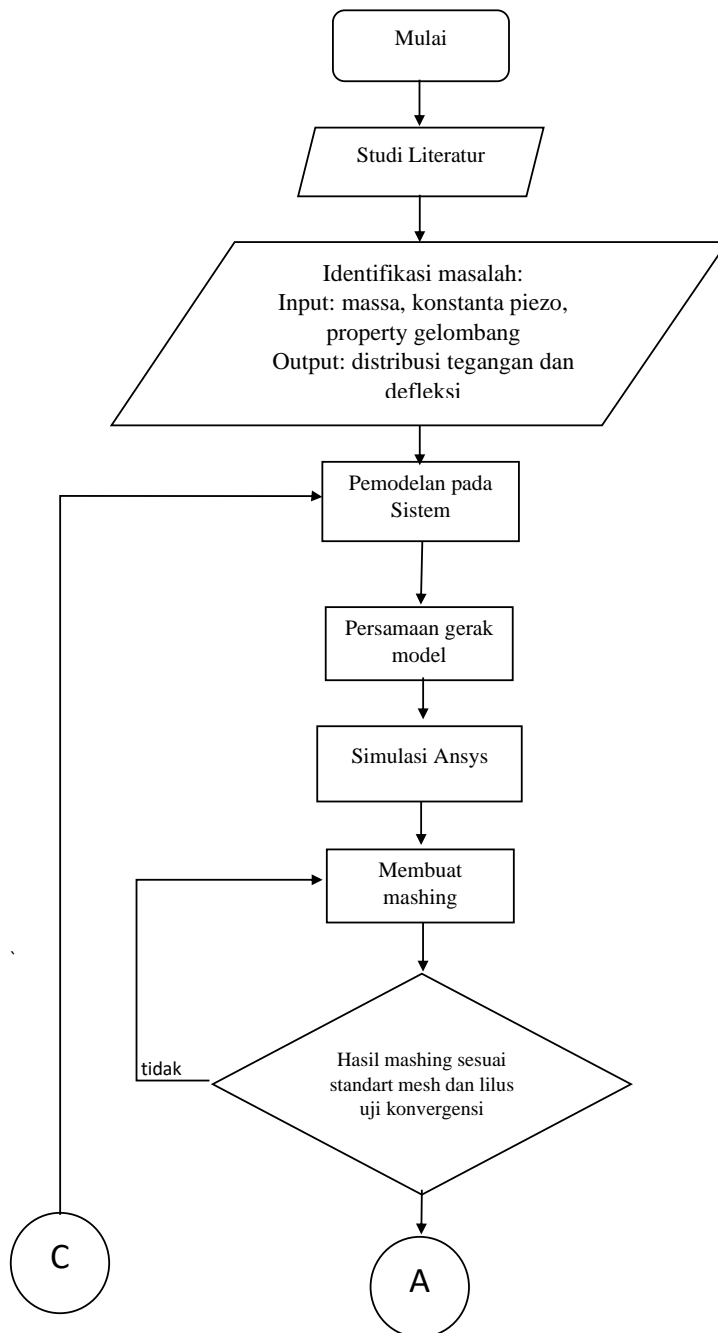
- V_p = Voltase *piezoelectric*
- d_{31} = Konstanta voltase
- E_p = Modulus elastisitas
- w_p = Lebar *piezoelectric*
- t = Tebal *piezoelectric*
- C = *Piezoelectric capacitance*
- X_p = Defleksi *piezoelectric*

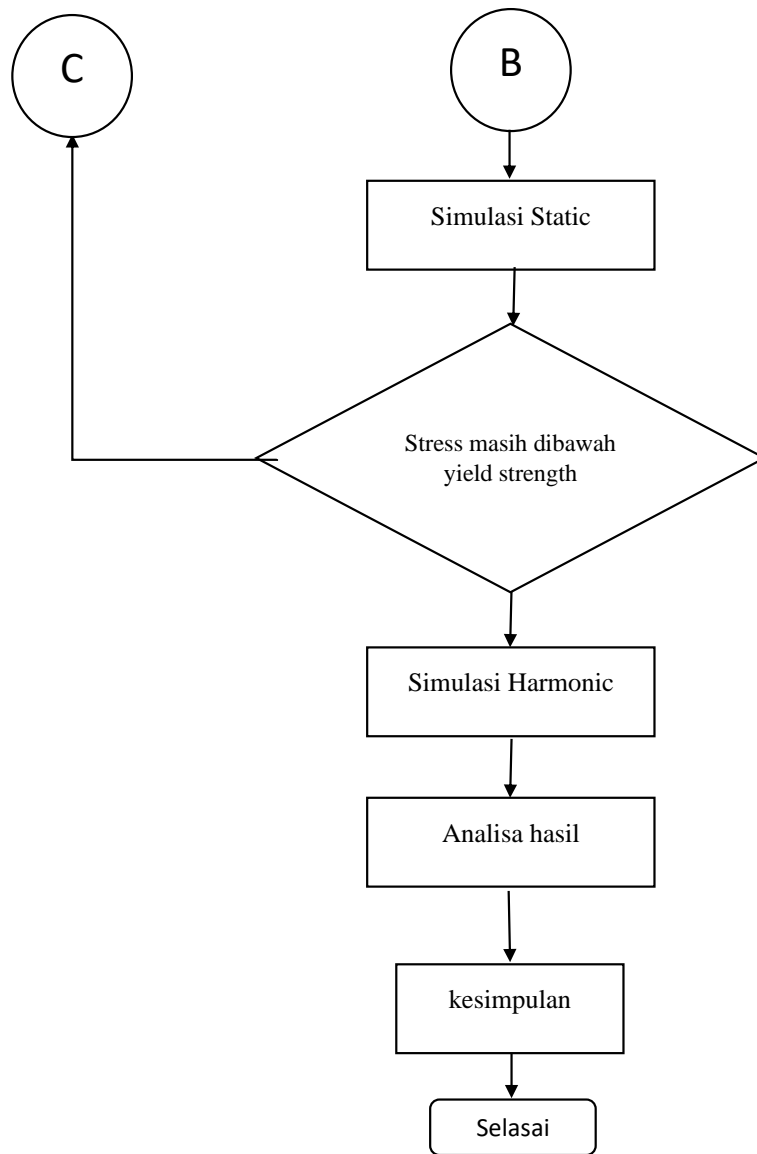
BAB III METODOLOGI

3.1 Tahap Penelitian

3.1.1 Diagram Alir

Dalam mencapai hasil yang sistematis dan mencapai tujuan dalam penulisan tugas akhir, dapat dilakukan, diperlukan Langkah-langkah sesuai prosedur analisa. Langkah-langkah tersebut dapat dilihat pada gambar berikut:





Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.1.2 Penjelasan Diagram Alir

Berikut adalah penjelasan terkait diagram alir pada Gambar 3.1:

1. Studi literatur

Diperlukan tinjauan pustaka mengenai penelitian-penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya sebelum penelitian dilakukan. Topik studi yang berkaitan dengan gelombang sebagai input dari sistem yang akan dipakai, piezoelektrik sebagai teknologi yang dipakai

sistem, derajat kebebasan pada getaran sistem, getaran pada sistem *cantilever-beam*, dan contoh pembangkit listrik tenaga gelombang laut.

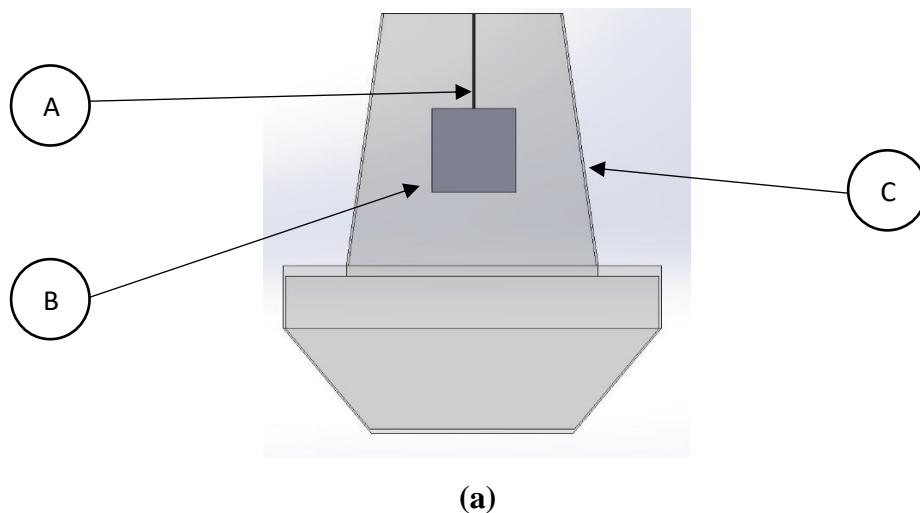
2. Identifikasi Masalah

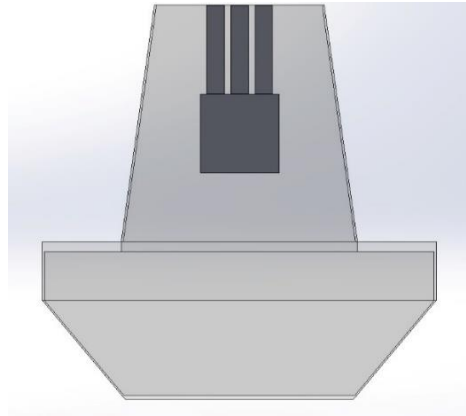
Pada penelitian tugas akhir ini, masalah yang diidentifikasi dibagi menjadi dua bagian, yaitu input dan output. Input merupakan suatu masukan yang diberikan pada simulasi, yaitu berupa massa, konstanta piezoelektrik, dan property gelombang laut. Sedangkan output merupakan hasil yang didapatkan dalam simulasi, yaitu berupa distribusi tegangan dan defleksi.

3. Pemodelan dan material pada sistem

Pada penelitian ini, pemodelan yang dilakukan menggunakan system *cantilever-beam* piezoelektrik. Pada penelitian ini, pembangkit listrik sistem massa *cantilever-beam* memanfaatkan input darigaya horizontal dari hasil gerakan gelombang laut. Ketika sistem mendapatkan gaya dari gelombang, masa sistem dapat bergerak dan menyebabkan adanya defleksi pada plat piezoelektrik yang dapat membangkitkan tegangan listrik.

Perancangan pada sistem ini merupakan rancangan pembangkit listrik tenaga gelombang laut (PLTG) dengan sistem *cantilever-beam* ber-massa pada mekanisme apung. Perancangan pada model sistem dibuat menggunakan *software Solidworks 2020*. Rancangan sistem berikut berukuran kecil dan tidak membutuhkan energi yang tidak besar sehingga dapat diaplikasikan pada *buoy*. Pada sistem memiliki tinggi buoy sepanjang 205 mm dan lebar 200 mm. untuk massa memiliki tinggi x lebar x Panjang sebesar 40 mm x 40 mm x 40 mm.





(b)

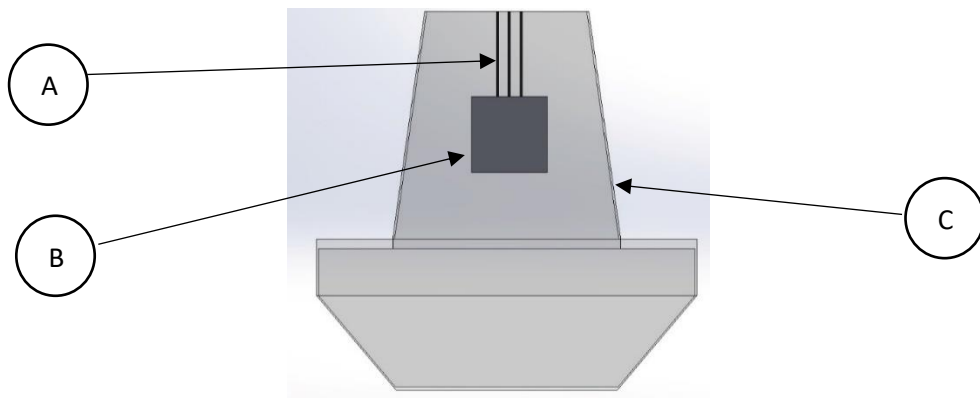
Gambar 3.2 (a) Ilustrasi Sistem Massa *Cantilever-Beam* Piezoelektrik berbaris tampak depan
 (b) Ilustrasi Sistem Massa *Cantilever-Beam* Piezoelektrik berbaris tampak samping

Keterangan:

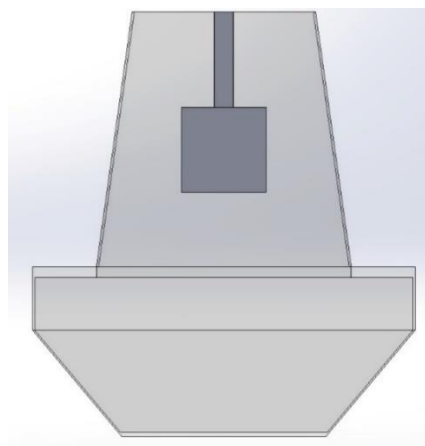
A= *Cantilever beam* piezoelektrik

B= Massa

C= *buoy*



(a)



(b)

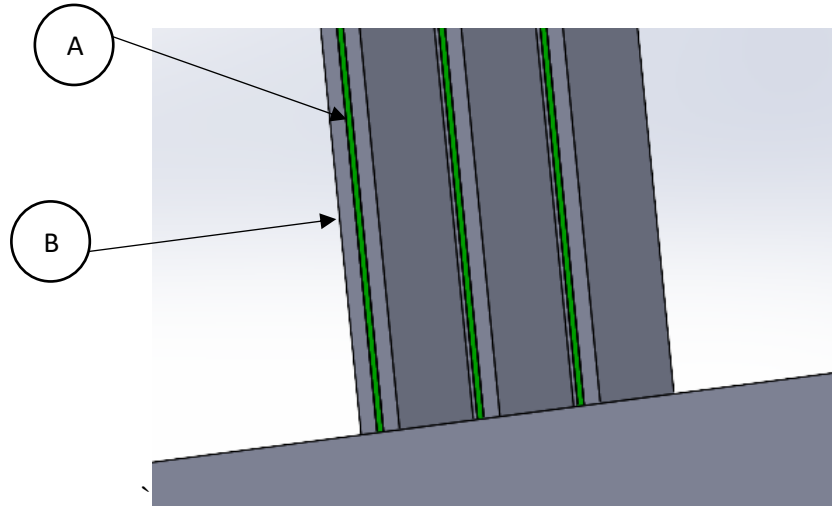
Gambar 3.3 (a) Ilustrasi Sistem Massa *Cantilever-Beam* Piezoelektrik kolom tampak depan
 (b) Ilustrasi Sistem Massa *Cantilever-Beam* Piezoelektrik kolom tampak samping

Keterangan:

A= *Cantilever-beam* piezoelektrik

B= Massa

C= *buoy*



Gambar 3.4 Komponen Piezoelektrik Pada Sistem *cantilever-beam* Piezoelektrik

Keterangan:

A= Piezoelektrik

B= Penyangga piezoelektrik

Simulasi pada pemodelan dilakukan dengan menggunakan *software* ANSYS. Material yang digunakan adalah pada piezoelektrik yang sudah banyak terjual dipasaran. Pada struktur menggunakan structural steel karena ketersediaan material structural steel di Indonesia tergolong mudah didapatkan dan memiliki harga yang terjangkau. Parameter yang diperlukan selanjutnya adalah parameter piezoelektrik. Dalam penelitian ini menggunakan piezoelektrik yang sudah ada dipasaran, sehingga didapatkan parameter piezoelektrik.

Tabel 3.1 Parameter *piezoelectric* (Beijing Quanxin Ultrasonic, 2022)

Keterangan	Parameter	Nilai
Panjang	l_{pzt}	$45 \times 10^{-3} \text{ m}$
Lebar	w_{pzt}	$9 \times 10^{-3} \text{ m}$
Tebal	t_{pzt}	$0,2 \times 10^{-3} \text{ m}$
Kapasitansi	c	$63 \times 10^{-9} \text{ F}$
Konstanta regangan	d_{31}	$6,2 \times 10^{-10} \text{ C/N}$
Konstanta kekakuan	K_{pzt}	$230,77 \text{ N/m}$
Konstanta peredam	C_{pzt}	$0,8653 \text{ Ns/m}$
<i>Electromechanical coupling factor</i>	k_{31}	30,2%

Modulus Young	E	$58,9 \times 10^9 \text{ N/m}^2$
Frekuensi resonansi	fr	31,1 kHz

Tabel 3.2 Data Material Structural steel

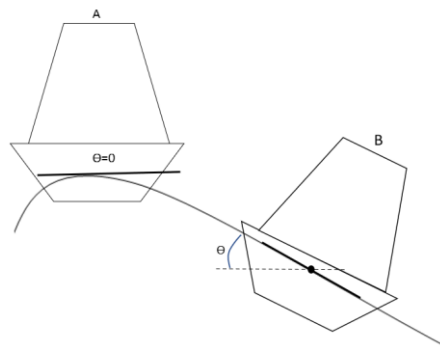
Mechanical Properties	Metric
Tensile Strenght, Ultimate	400 – 550 Mpa
Tensile Strenght, Yield	250 Mpa
Density	$7,85 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$
Young Modulus	$2 \times 10^5 \text{ MPa}$
Bulk Modulus	$1,6667 \times 10^5 \text{ MPa}$
Poissons Ratio	0.30
Shear Modulus	79.3 GPa

Tabel 3.3 Data Material Aluminium Alloy

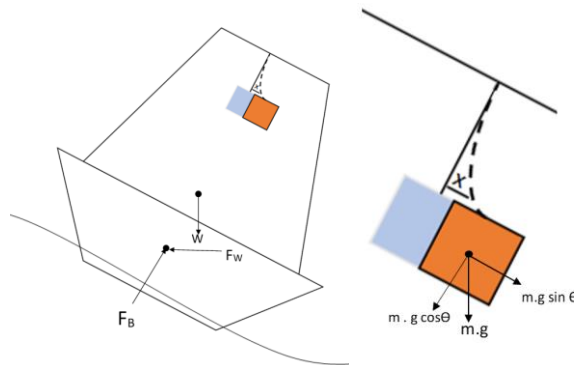
Mechanical Properties	Metric
Tensile Strenght, Ultimate	310 Mpa
Tensile Strenght, Yield	280 Mpa
Density	$2,77 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$
Young Modulus	7100 MPa
Bulk Modulus	69608 MPa
Poissons Ratio	0.330
Shear Modulus	79.3 GPa

4. Persamaan gerak model

Pada sistem ini dilakukan percobaan terhadap sistem didalam benda terapung seperti ponton yang akan diuji gerakannya yang menyebabkan kemiringan diakibatkan oleh gelombang laut yang memiliki variabel-variabel tinggi gelombang, dan gaya gelombang (F_w), gaya apung (F_b) dan gaya berat (w). Dari variabel-variabel dapat ditemukan variabel derajat kemiringan. Setelah mendapatkan derajat kemiringan. Gerak yang dihasilkan pada sistem tersebut akan berpengaruh pada defleksi pada piezoelektrik pada dalam sistem yang terjadi akibat pergerakan dari massa dan buoy pada sistem tersebut.



Gambar 3.5 Ilustrasi pergerakan kemiringan buoy terhadap gelombang

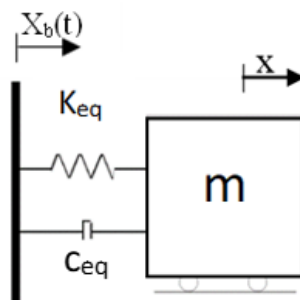


Gambar 3.6 Skema Gaya sistem

Setelah mendapatkan pemodelan system, dapat dilakukan analisa persamaan gerak yang didapat melalui *free-body diagram* sampai ketahap *state variable*. Penelitian ini dilakukan dengan Gerakan massa secara vertical dan massa piezoelektrik dapat diabaikan.

Sistem memiliki derajat kebebasan karena variasi yang digunakan menggunakan satu massa. Pada perumusan yang digunakan, variasi jumlah piezoelektrik tidak dicantumkan, variasi piezoelektrik dianggap tidak mempengaruhi *free-body diagram* karena variasi tersebut hanya berpengaruh pada jumlah konstanta gaya piezoelektrik yang ada. Dan nilai kekakuan dan redaman dapat dijadikan sebagai *equivalent* dari penyangga berbahan aluminium alloy dan piezoelektrik.

Seluruh persamaan mempunyai kesamaan hipotesa yaitu piezoelektrik tidak bermassa. Untuk memperjelas variable-variabel yang digunakan pada perumusan, akan ditunjukkan pada tiap variable yang ada pada gambar berikut:

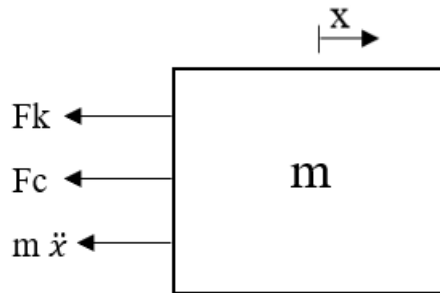


Gambar 3.7 *free-body diagram* dengan arah gerak sumbu x pada variasi satu DOF dan satu piezoelektrik

Keterangan:

- m = massa
- k_{eq} = konstanta kekakuan *equivalent*
- c_{eq} = konstanta redaman *equivalent*
- $x_b(t)$ = gaya *base motion*

Dalam sistem dengan variasi satu DOF, dan gaya dari gelombang hanya akan berpengaruh ke massa (m), dimana untuk susunan baris dan kolom menggunakan FBD yang sama dikarenakan susunan baris dan kolom berada pada posisi paralel.



Gambar 3. 8 Massa (m_1) pada *free-body diagram* pada satu DOF dan satu piezoelektrik

Dari gambar 3.8 dapat dilihat sehingga pada massa tersebut dapat dijabarkan model persamaan gerak sebagai berikut:

• **Equation of motion**

$$\Sigma F = m\ddot{x}$$

$$-ck - Fc = m\ddot{x}$$

Dimana:

- $z = (x-x_b)$
- $\dot{z} = (\dot{x} - \dot{x}_b)$
- $\ddot{z} = (\ddot{x} - \ddot{x}_b)$
- $X_b = A \sin \omega t$
- $\dot{x}_b = A \omega \cos \omega t$
- $\ddot{x}_b = -A \omega^2 \sin \omega t$
- $Fk = k (x-x_b) = k \cdot z$
- $Fc = c (\dot{x} - \dot{x}_b) = c \cdot \dot{z}$

sehingga:

$$-m\ddot{x} - k(x-x_b) - c(\dot{x} - \dot{x}_b) = 0$$

$$-m\ddot{x} - kz - c\dot{z} = 0$$

$$-m\ddot{x} - kz - c\dot{z} = 0$$

$$m\ddot{z} + kz + c\dot{z} = -m\ddot{x}_b$$

(Pers. 5)

Diperlukan pula perumusan untuk mendapatkan nilai eksitasi gaya yang bekerja pada sistem. Gaya tersebut muncul akibat sistem yang miring akibat gelombang laut, gaya berat tersebut dapat dijabarkan sebagai berikut:

$$F_{ep(t)} = M_b g \sin (\theta(t))$$

(Pers. 6)

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

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

(Pers. 7)

Dimana:

A= Amplitudo gelombang

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

u= Jarak sistem pada sumbu u

$\omega = 2\pi f = \text{Kecepatan sudut}$

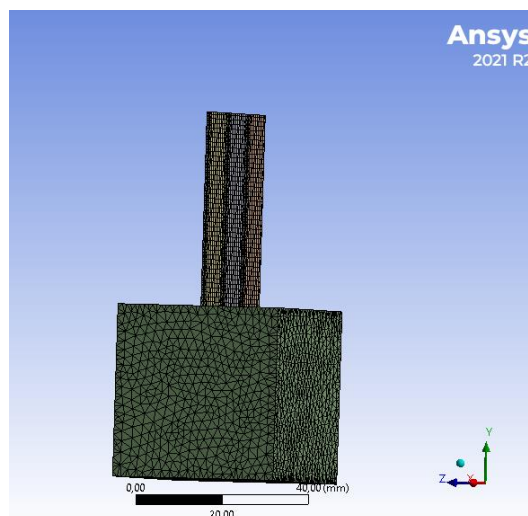
t= waktu

5. Simulasi pada ANSYS

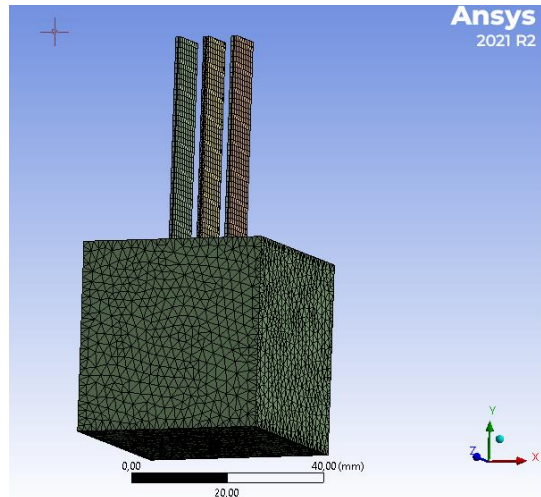
Pemodelan dan persamaan yang telah dibuat dapat diproses melalui ANSYS agar agar mendapatkan hasil yang diinginkan.

6. Membuat meshing

Pembuatan meshing merupakan bagian dari simulasi yang dimana geometri dibagi menjadi elemen sederhana. Sebelum melakukan meshing, dilakukan face cleaning agar hasil dari mesh geometri menjadi bagus. Proses meshing sangat mempengaruhi hasil simulasi yang dilakukan.



Gambar 3. 9 hasil meshing *cantilever beam* piezoelektrik berbaris



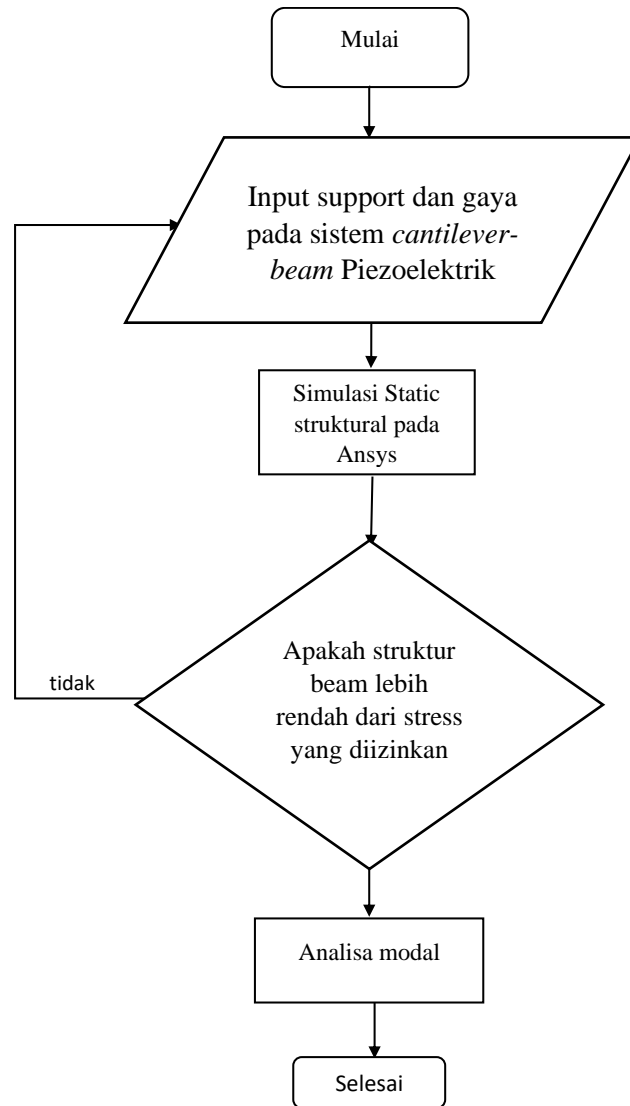
Gambar 3.10 hasil meshing *cantilever beam* piezoelektrik kolom

7. Hasil simulasi sesuai dan uji konvergensi

Sesudah melakukan meshing, dilanjutkan dengan uji konvergensi meshing pada desain *cantilever-beam* piezoelektrik. Tujuan dari uji konvergensi yaitu mendapatkan *orthogonal quality* dan *skewness* yang sesuai dengan *mesh metric spectrum*.

8. Simulasi Static

Pengujian static atau struktural analisis adalah Analisa yang digunakan untuk menganalisa tegangan von-misses dan menentukan displacement benda pada beban statik.



Gambar 3.11 Diagram alir simulasi static

9. Simulasi Harmonic

Simulasi harmonic digunakan untuk menentukan respons dari struktur terhadap beban yang bervariasi secara sinusoidal dengan waktu. Yang bertujuan untuk memverifikasi apakah desain yang dibuat telah berhasil mengatasi resonansi atau efek yang membahayakan dari getaran yang berlebihan yang menghasilkan frekuensi natural dan modulus getar.

Dalam simulasi ini dibutuhkan inputan eksitasi dari gerak relatif dari displacement buoy dan sistem, dimana eksitasi tersebut dapat dilihat pada perumusan berikut:

$$f(t) = m\ddot{y}$$

(Pers. 8)

10. Kesimpulan

Setelah melakukan simulasi static dan harmonic, maka dapat diperoleh kesimpulan dari penelitian tugas akhir. Yang berisi dari pokok bahasan dan menjawab rumusan masalah sehingga tujuan penelitian dapat tercapat.

3.2 Parameter dan variabel sistem

Terdapat beberapa parameter percobaan yang perlu dilakukan sebelum melaksanakan perhitungan matematis dan beberapa parameter yang diperlukan seperti parameter pada sistem utama, parameter piezoelektrik dan parameter gelombang laut. Parameter pada sistem utama pada sistem ini yang akan dibutuhkan adalah berat massa pada *cantilever-beam* piezoelektrik. Untuk parameter berat massa *cantilever-beam* piezoelektrik, rancangan diambil dari penelitian yang sudah ada untuk smassa-nya, seperti pada tabel berikut.

Tabel 3.4 Berat massa pada sistem

Berat Massa pada Sistem
0,6 Kg

Pada penelitian ini, parameter terakhir yang dibutuhkan yaitu parameter gelombang laut sebagai sumber gaya pada sistem. Parameter gelombang laut digunakan untuk penentuan variasi pada percobaan sistem. Untuk parameter dapat dilihat melalui data BMKG yang menunjukkan beberapa titik di Indonesia dengan data gelombang laut indonesia. Mulai dari 0.1 m, 1 m, dan 1.5 m.

Dari parameter yang telah didapatkan, dapat dirumuskan variasi-variasi yang dapat digunakan dalam melakukan percobaan sebagai berikut:

Tabel 3.5 Tabel variabel variasi penelitian

Massa		Amplitudo		Jumlah piezoelektrik	
Variabel	Jumlah Massa	Variabel	Nilai	Variabel	Nilai
A_{i1}	1	B_1	0.5 m	n_1	2
A_{i2}	1	B_2	1 m	n_2	3
A_{i3}	1	B_3	1.5 m	n_3	4

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Pembahasan pada bab 4 pada penelitian ini akan menjelaskan hasil dari Analisa simulasi statis menggunakan static structural dan Analisa dinamis menggunakan harmonic analysis pada sistem *cantilever-beam* piezoelektrik dengan eksitasi amplitude gelombang laut yang mengenai sistem. Pada analisa simulasi statis dan dinamis akan dijelaskan data dan outputan yang didapat dari hasil simulasi serta pembahasan dari data dan outputan yang telah didapat.

4.1 Analisa kekuatan statis struktur

4.1.1 Uji Konvergensi

Setelah melaku meshing, dapat dilakukan uji konvergensi pada struktur meshing *cantilever beam* piezoelektrik. Untuk error yang diterima adalah dibawah 5% dan dapat dilanjutkan dalam mencari nilai rata-rata dari orthogonal quality dan skewness yang sesuai dengan mesh metric spectrum. Untuk mengetahui element size yang akan dipakai, maka dapat diuji satu per satu sampai mendapatkan hasil error dan titik stabil di bawah 5%.

Skewness mesh metrics spectrum:



Orthogonal Quality mesh metrics spectrum:



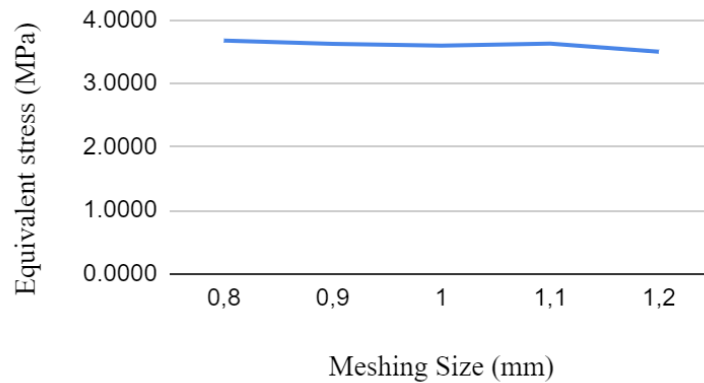
Gambar 4.1 *orthogonal quality* dan *skewness* pada *mesh metric spectrum*

Dan dari hasil meshing yang telah dilakukan, didapat nilai dari stress error dan deformation error dan stress error yang terdapat dalam tabel yang dapat dilihat pada tabel 4.1.

tabel 4.1 Nilai Stress Error dan Deformation Error

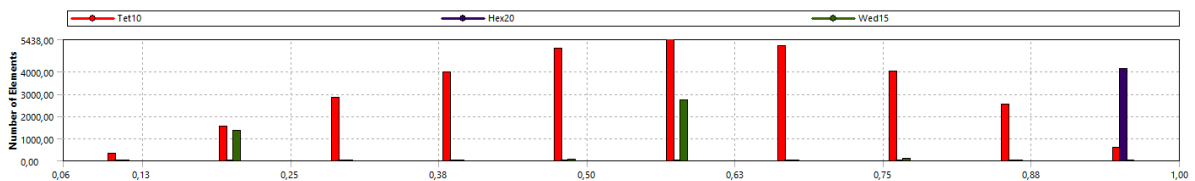
Meshing Size (mm)	Element	Equivalent stress (MPa)	Orthogonal Quality	Deformation (mm)	Stress Error	Deformation Error
0,8	39453	3.6719	0.75676	0.02733		
0,9	30978	3.622	0.75296	0.02731	1.38%	-0.07%
1	23739	3.5929	0.75296	0.02730	-0.81%	-0.05%
1,1	21854	3.6240	0.75296	0.02729	0.86%	-0.02%
1,2	18118	3.4966	0.75296	0.02728	-3.64%	-0.04%

Setelah melakukan uji konvergensi mesing didapatkan bahwa meshing yang stabil dan error yang kecil yaitu pada element size 1,1 mm untuk *cantilever beam* tiga batang kolom yang menghasilkan stress error sebesar 0,86%. Untuk grafik hasil uji konvergensi dapat dilihat pada gambar grafik 4.2.

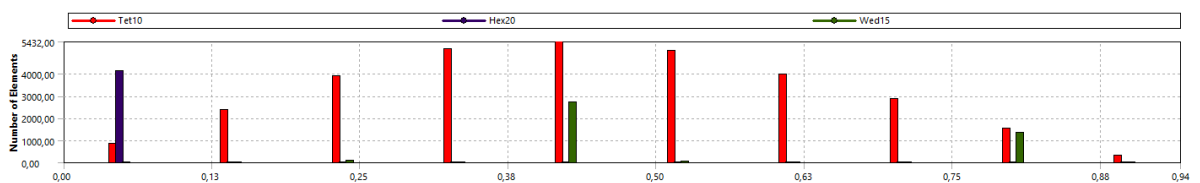


Gambar 4.2 Grafik meshing terhadap equivalent Stress pada *Cantilever-Beam* Piezoelektrik tiga batang kolom

Untuk *cantilever-beam* tiga batang kolom didapatkan nilai *average orthogonal quality* sebesar 0,75296 dan *skewness* sebesar 0,3286. Dari nilai ini didapatkan bahwa hasil tersebut berada pada level *very good* untuk *orthogonal quality* dan *skewness* dari diagram mesh metric yang dapat dilihat pada gambar 4.1



(a)



(b)

Gambar 4.3 Grafik hasil uji konvergensi (a) *orthogonal quality* (b) *skewness*

4.1.2 Pengujian Pembebanan Statis

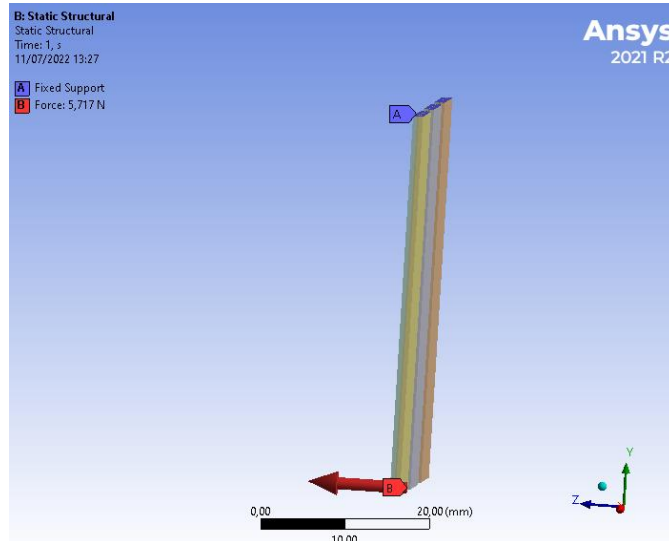
Sebelum pembebanan statis dilakukan, diperlukan menentukan displacement, stress, strain, dan gaya pada struktur atau komponen yang disebabkan oleh beban statis dengan mengesampingkan inerti dan damping.

4.1.2.1 Beban statis

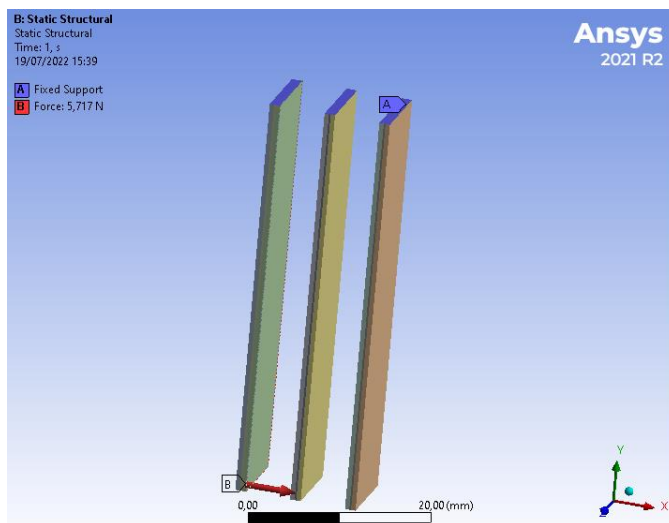
Gaya yang diinput pada Analisa ini didapatkan melalui perhitungan beban yang bekerja pada kendaraan seperti berat massa. Berat massa pada perhitungan ini sebesar 0,6 Kg dan berat piezoelektrik yang sangat ringan maka dapat diabaikan. Dan berikut free body diagram untuk gaya yang bekerja terhadap system *cantilever-beam* piezoelektrik.

4.1.2.2 Batas kondisi dan pebebanan pada system

Batas kondisi (boundary condition) adalah kondisi batas atau control perhitungan yang dimasukan sebelum dilakukan proses simulasi. Pada penelitian ini dilakukan pencarian mode shape dengan set up boundary condition seperti gambar 4.4 dimana untuk susunan baris, gaya diberikan ke arah sumbu Z dan untuk susunan kolom, gaya diberikan ke arah sumbu X.



(a)



(b)

Gambar 4. 4 set up boundary condition (a) susunan baris (b) susunan kolom

4.1.2.3 Hasil static structural

Pada simulasi statis, diuji dari beberapa susunan piezoelektrik yang disusun secara sejajar dan kolom. Jumlah piezoelektrik yang digunakan sebanyak 2, 3, dan 4. Dan ukuran meshing yang disimulasikan yaitu 1,1 mm dimana ukuran ini lulus tahap uji konvergensi yang memiliki error dibawah 5%. Pada simulasi ini, material piezoelektrik menggunakan parameter yang telah ditentukan yang dapat dilihat pada tabel 3.3. dan untuk material penyangga

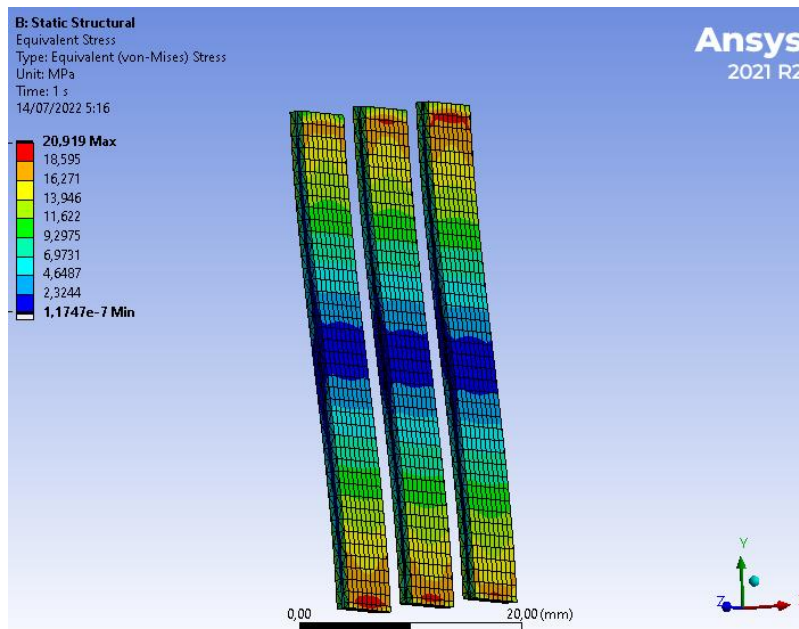
menggunakan material aluminium alloy dan massa yang digunakan menggunakan material structural steel yang memiliki massa sebesar 0,6 Kg. amplitudo yang digunakan pada simulasi ini yaitu sebesar 0,5 m, 1 m, dan 1,5 m. gaya yang diberikan ke arah sumbu X atau Z dari perhitungan, dan nilai negatif hanya menunjukkan arah gaya yang terjadi pada sistem, hasil perhitungan dapat dilihat seperti berikut:

tabel 4.2 Hasil perhitungan nilai gaya eksitasi

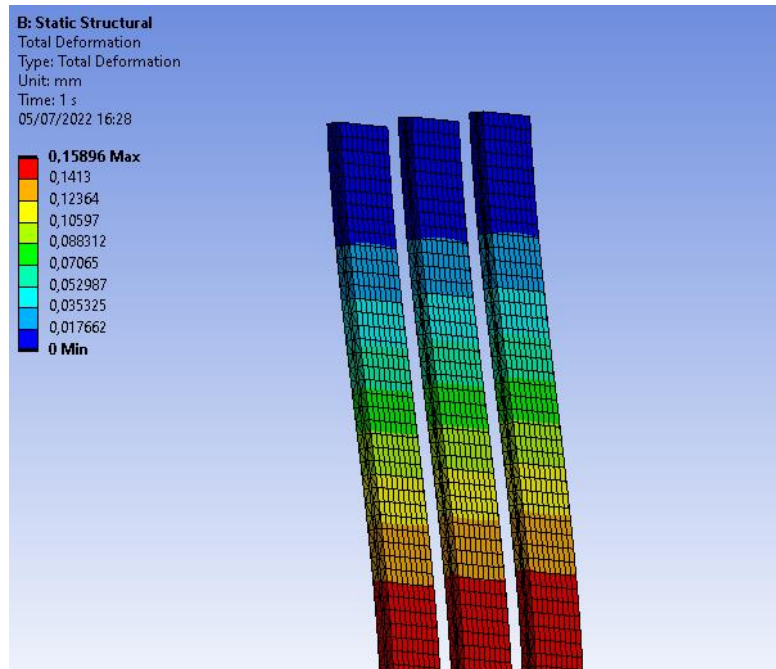
amplitudo	θ (rad)	$m \cdot g \sin \theta$ (N)
0,5	-0,84	-4,339
1	-1,125	-5,414
1,5	-1,263	-5,717

4.1.2.4 Hasil Equivalent Stress dan Total Deformation

Hasil dari uji statis pada struktur tiga batang kolom dengan variasi amplitude 1.5 m didapatkan *equivalent stress* maksimum sebesar 20,719 MPa sehingga terdapat deformasi maksimum sebesar 0,15896 mm. Titik tegangan maksimum yang terjadi terdapat pada bagian atas *cantilever-beam*, sedangkan untuk titik tegangan minimum terjadi pada bagian bawah *cantilever-beam*. Kemudian, untuk titik deformasi maksimum terdapat pada bagian bagian bawah *cantilever-beam*, sedangkan untuk titik deformasi minimum terdapat pada bagian bagian atas *cantilever-beam* yang berhubungan langsung terhadap buoy. Pemusatan tegangan terjadi karena struktur *cantilever-beam* mengalami bending akibat distribusi gaya kearah sumbu X- yang kemudian membuat *stress* maksimum terdapat pada bagian atas *cantilever-beam*. Hasil dari simulasi statis *cantilever-beam* piezoelektrik tiga batang kolom dapat dilihat pada gambar.



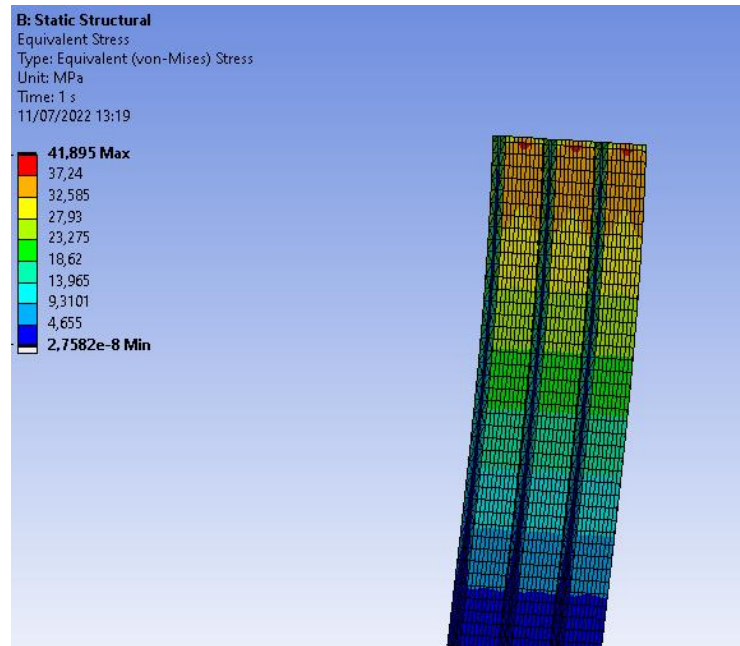
(a)



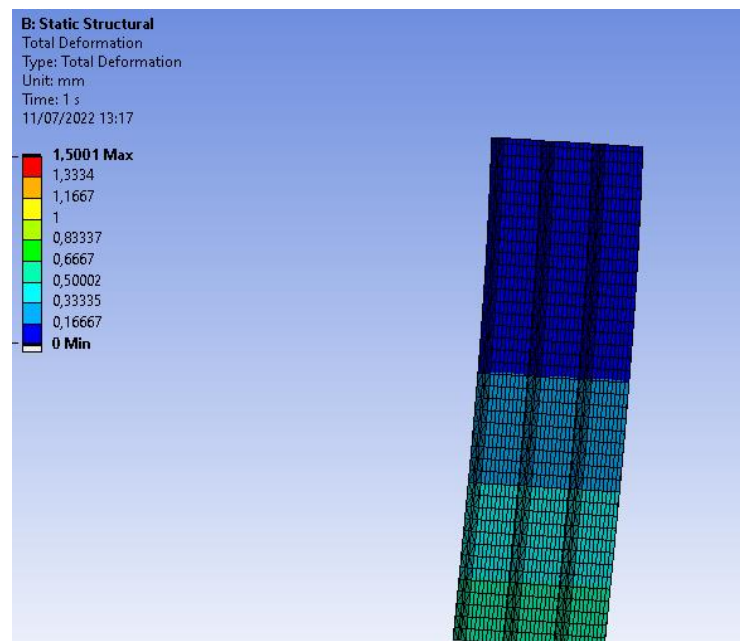
(b)

Gambar 4.5 Hasil Uji *Static Structural cantilever-beam* piezoelektrik(a) *Equivalent Stress* (b) *Total Deformasi*

Hasil dari uji statis pada struktur tiga batang berbaris didapatkan *equivalent stress* maksimum sebesar 42,329 MPa sehingga terdapat deformasi maksimum sebesar 1,514 mm. Titik tegangan maksimum yang terjadi terdapat pada bagian atas *cantilever-beam*, sedangkan untuk titik tegangan minimum terjadi pada bagian bawah *cantilever-beam*. Kemudian, untuk titik deformasi maksimum terdapat pada bagian bagian bawah *cantilever-beam*, sedangkan untuk titik deformasi minimum terdapat pada bagian bagian atas *cantilever-beam* yang berhubungan langsung terhadap buoy. Pemusatan tegangan terjadi karena struktur *cantilever-beam* mengalami bending akibat distribusi gaya kearah sumbu Z- yang kemudian membuat *stress* maksimum terdapat pada bagian atas *cantilever-beam*. Hasil dari simulasi statis *cantilever-beam* piezoelektrik 3 batang baris dapat dilihat pada gambar.



(a)



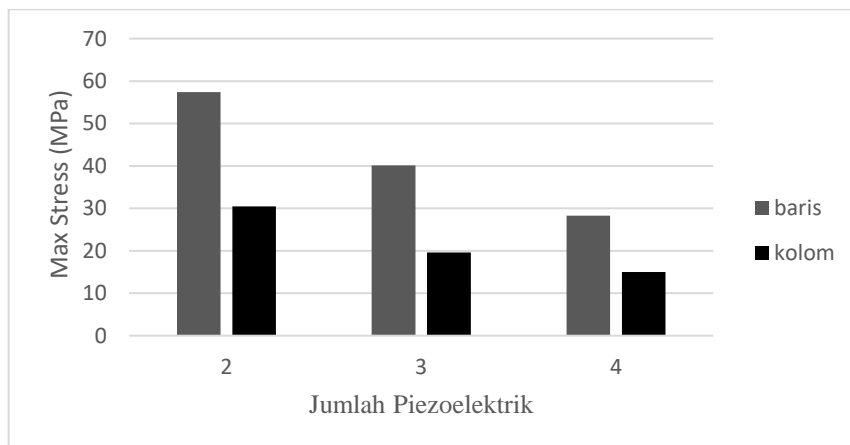
(b)

Gambar 4.6 Hasil Uji *Static Structural cantilever-beam* piezoelektrik(a) *Equivalent Stress*
 (b) *Total Deformasi*

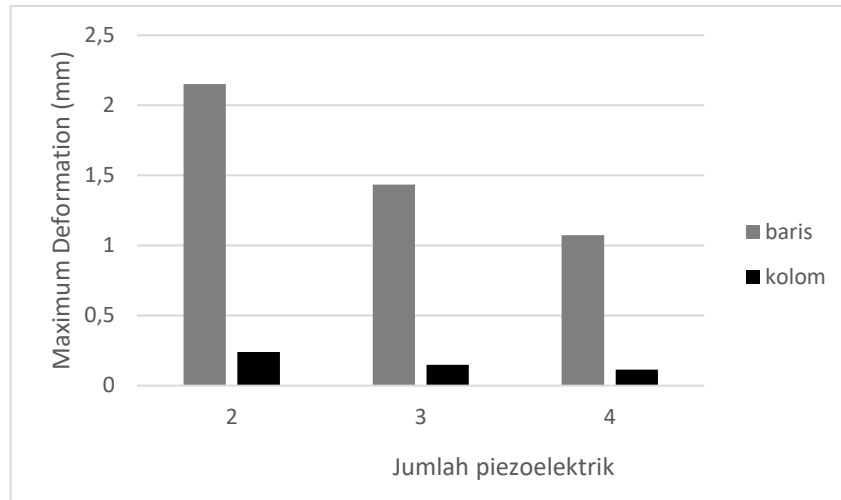
Untuk variasi dua batang, tiga batang dan empat batang *cantilever-beam* dengan variasi amplitude sebesar 0.5, 1, dan 1.5 dapat dilihat pada tabel berikut.

tabel 4.3 Tabel hasil simulasi *maximum stress* dan *maximum deformation*

Amplitudo	Jenis piezoelektrik	Jumlah piezoelektrik	Max stress (MPa)	Max deformation (mm)
0,5	Baris	2	45,433	1,7076
		3	32,126	1,1385
		4	22,685	0,8528
	Kolom	2	23,828	0,14256
		3	15,725	0,11842
		4	12,017	0,09134
1	Baris	2	57,374	2,1506
		3	40,086	1,4338
		4	28,305	1,0741
	Kolom	2	30,486	0,23907
		3	19,62	0,14775
		4	14,995	0,11397
1,5	Baris	2	60,585	2,2709
		3	42,329	1,514
		4	29,89	1,1342
	Kolom	2	32,193	0,25245
		3	20,719	0,15896
		4	15,834	0,12035



(a)



(b)

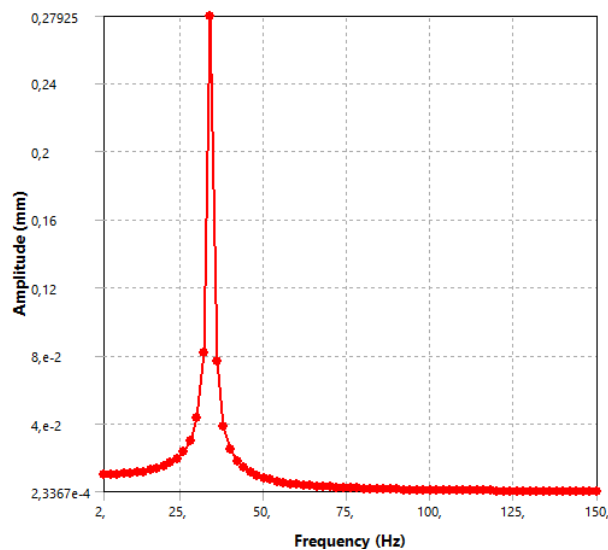
Gambar 4.7 grafik hasil simulasi variasi gelombang 1 m (a) tegangan maximum (b) deformasi maksimum

Dari gambar 4.7 dapat dilihat bahwa semakin banyak piezoelektrik dan penyangga dalam susunan kolom yang digunakan dalam sistem dapat membuat semakin kecilnya equivalent stress dan semakin kecil juga deformasi maximum-nya. Dan dapat dilihat juga bahwa semakin banyak piezoelektrik dan penyangga pada sistem *cantilever-beam* dengan susunan berbaris menyebabkan semakin kecilnya deformasi maximum yang dialami oleh piezoelektrik dan penyangga.

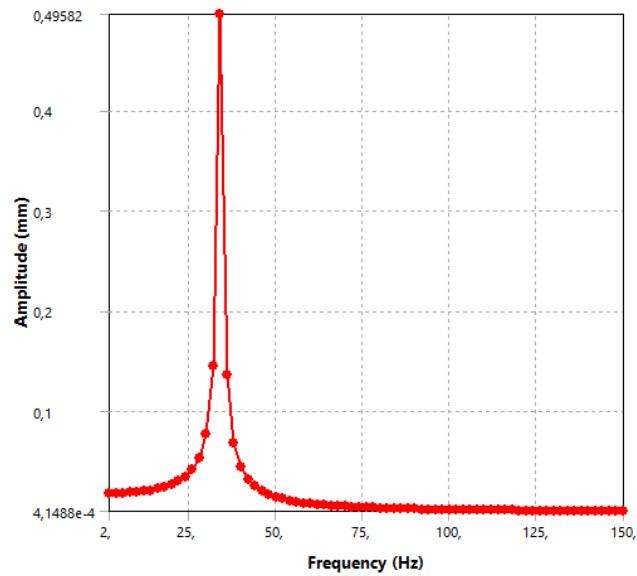
4.2 Hasil respon harmonic

4.2.1 Respon harmonic terhadap amplitude

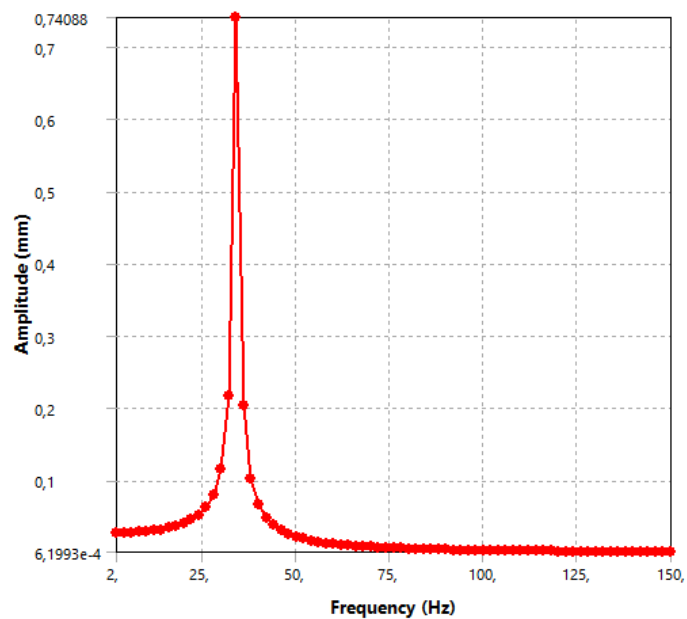
Pada hasil simulasi harmonic terhadap amplitude. Dilakukan percobaan pada variasi amplitude sebesar 0.5, 1, dan 1.5. pada amplitude 0.5, digunakan input gaya sebesar 0,49N, pada amplitude 1 digunakan input gaya sebesar 0.87 N dan pada amplitude 1.5 digunakan input gaya sebesar 1.3 N. Pada simulasi ini digunakan model sistem dengan dua *cantilever-beam* piezoelektrik susunan kolom.



(a)



(b)



(c)

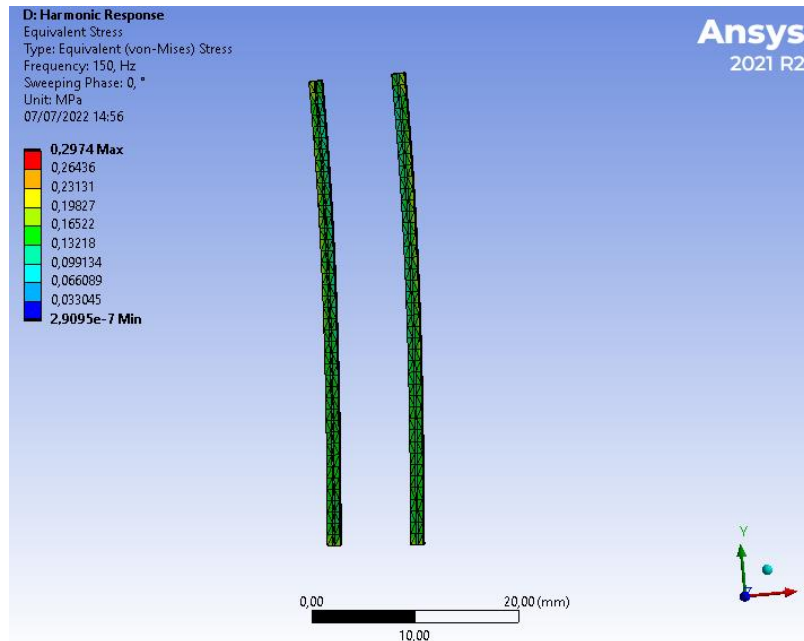
Gambar 4.8 Hasil respon frekuensi terhadap deformasi (a) amplitude 0,5 (b) amplitude 1 (c) amplitude 1,5

Pada gambar 4.8 menunjukkan respon dinamis dari struktur dua *cantilever-beam* piezoelektrik. Seperti yang dapat dilihat pada grafik bahwa resonansi terjadi pada amplitude 0,5 sebesar didapatkan 34 Hz dimana amplitude pada masing-masing getaran terjadi pada 0,27925 mm dan amplitude 1 didapatkan 34 Hz dimana amplitude pada masing-masing getaran terjadi pada 0,49582 mm dan dan pada amplitudo 1,5 m didapatkan resonansi pada 34 Hz dimana amplitude pada masing-masing getaran terjadi pada 0,74088 mm.

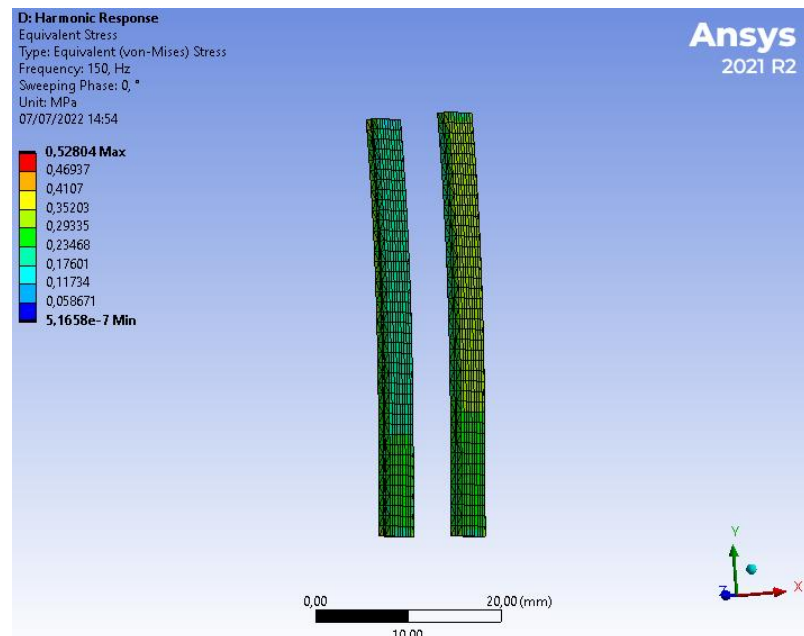
Dari simulasi harmonic response terhadap pengaruh amplitudo menggunakan hasil berupa frekuensi respon menghasilkan bahwa semakin tinggi gaya berupa amplitudo yang

terjadi, maka nilai amplitudo yang dihasilkan juga semakin tinggi. Pada simulasi ini, hasil tertinggi dihasilkan dari amplitudo sebesar 1,5 m dengan inputan gaya sebesar 1,3 N.

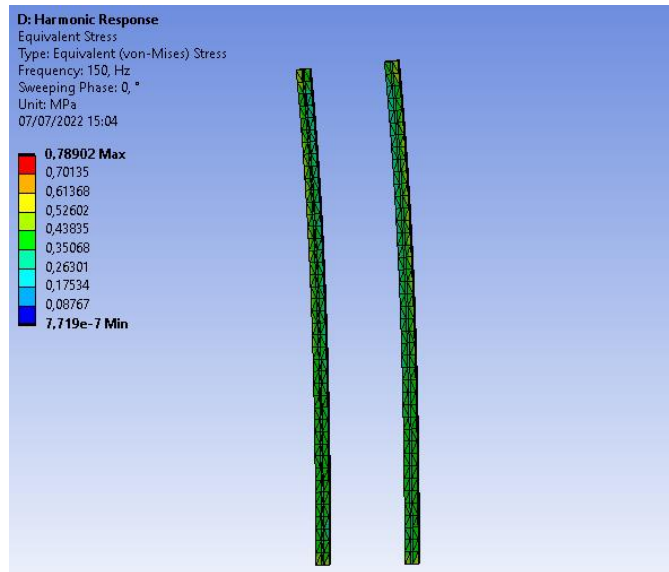
Dilakukan pula perbandingan pengaruh amplitudo dengan variasi dua *cantilever-beam* piezoelektrik susunan kolom terhadap tegangan yang terjadi. Inputan yang diberikanpun sebesar 0.5 N, 0.87 N, dan 1.3 N.



(a)



(b)

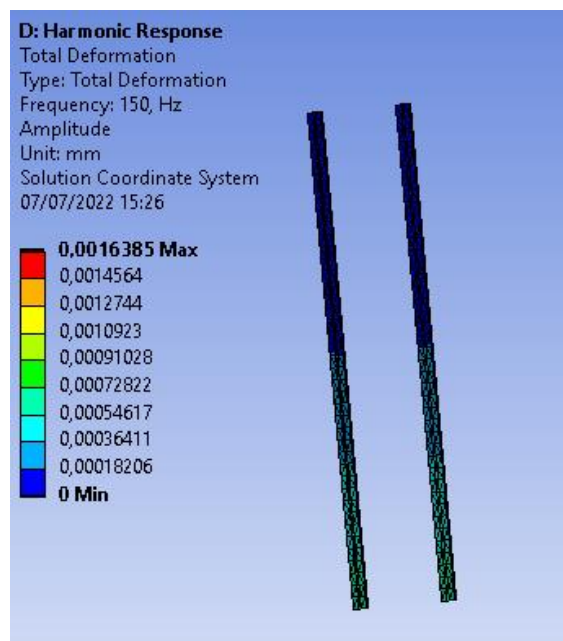


(c)

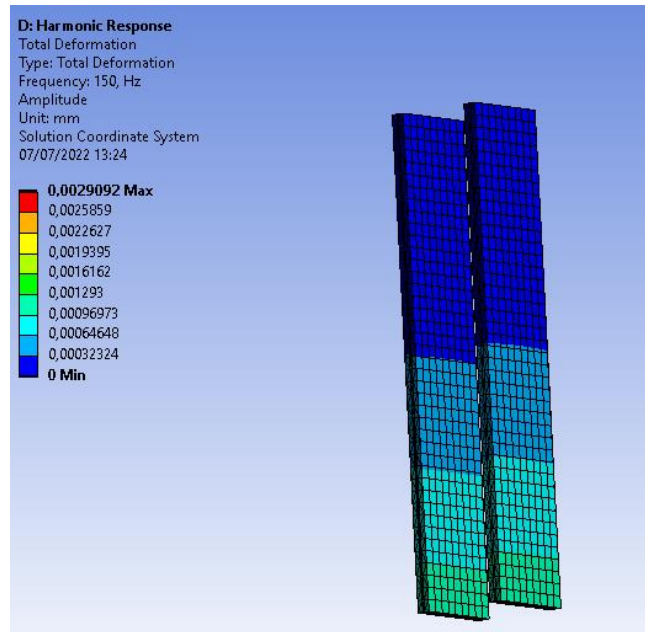
Gambar 4. 9 Hasil respon tegangan *equivalet* terhadap (a) amplitude 0,5 (b) amplitude 1 (c) amplitude 1,5

Pada gambar 4.9 dapat dilihat hasil dari pengujian tegangan pada simulasi harmonic dimana ketika amplitudo sebesar 0,5 m menghasilkan tegangan maksimum sebesar 0,2974 MPa, ketika amplitudo sebesar 1m menghasilkan deformasi maksimum sebesar 0,052804 MPa, dan ketika amplitudo sebesar 1,5 m menghasilkan tegangan maksimum sebesar 0,78902 MPa. Hal ini menandakan semakin tinggi amplitudo, maka semakin besar pula tegangan yang terjadi pada sistem.

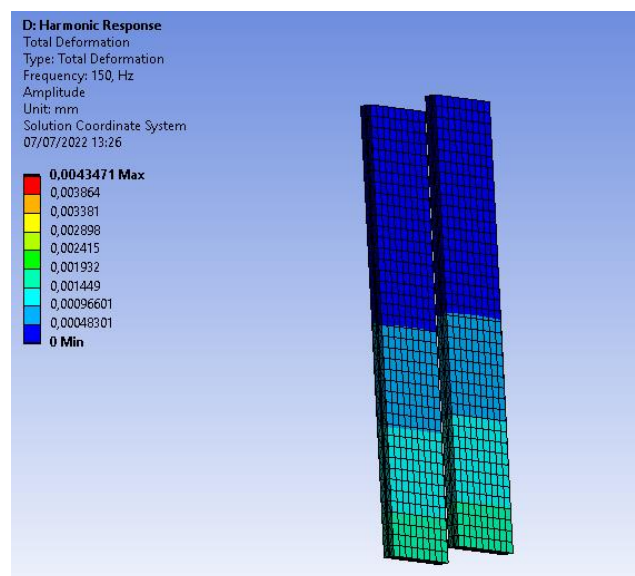
Dilakukan pula perbandingan pengaruh amplitudo dengan variasi dua *cantilever-beam* piezoelektrik susunan kolom terhadap deformasi yang terjadi. Inputan yang diberikanpun sebesar 0.5 N, 0.87 N, dan 1.3 N.



(a)



(b)



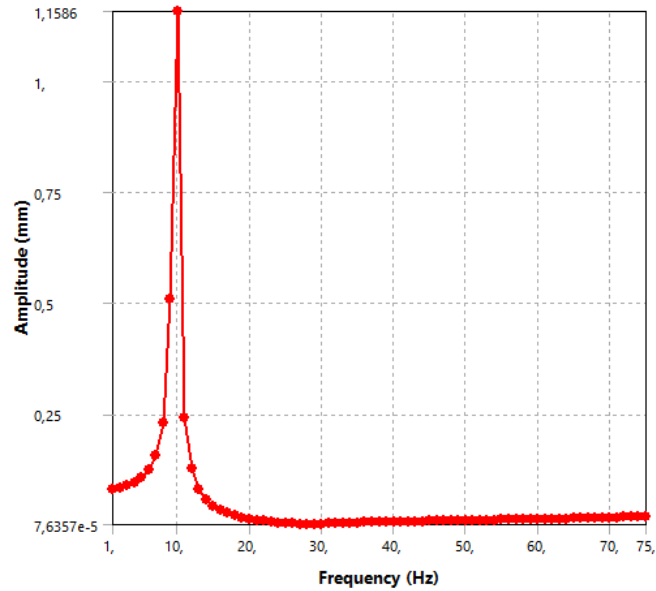
(c)

Gambar 4.10 Hasil *harmonic response* terhadap deformasi maksimum (a) amplitude 0,5 (b) amplitude 1 (c) amplitude 1,5

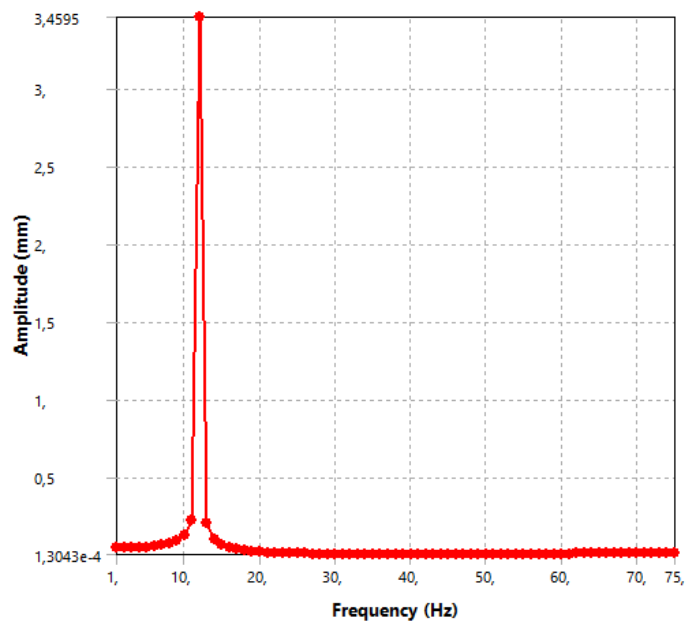
Pada gambar 4.10 dapat dilihat hasil dari pengujian deformasi pada simulasi harmonic dimana ketika amplitudo sebesar 0,5 m menghasilkan deformasi maksimum sebesar 0,0016385 mm, ketika amplitudo sebesar 1m menghasilkan deformasi maksimum sebesar 0,0029092 mm, dan ketika amplitudo sebesar 1,5 m menghasilkan deformasi maksimum sebesar 0,0043471 mm. Hal ini menandakan semakin tinggi amplitudo, maka semakin besar pula deformasi yang terjadi pada sistem.

4.2.2 Respon harmonic terhadap jumlah piezoelektrik

Pada hasil simulasi harmonic terhadap jumlah piezoelektrik. Dilakukan percobaan pada variasi pada jumlah batang dengan variasi dua *cantilever-beam* piezoelektrik dan empat *cantilever-beam* piezoelektrik. Pada simulasi ini digunakan inputan amplitude 1.5 m dengan gaya inputan sebesar 1,3 N.



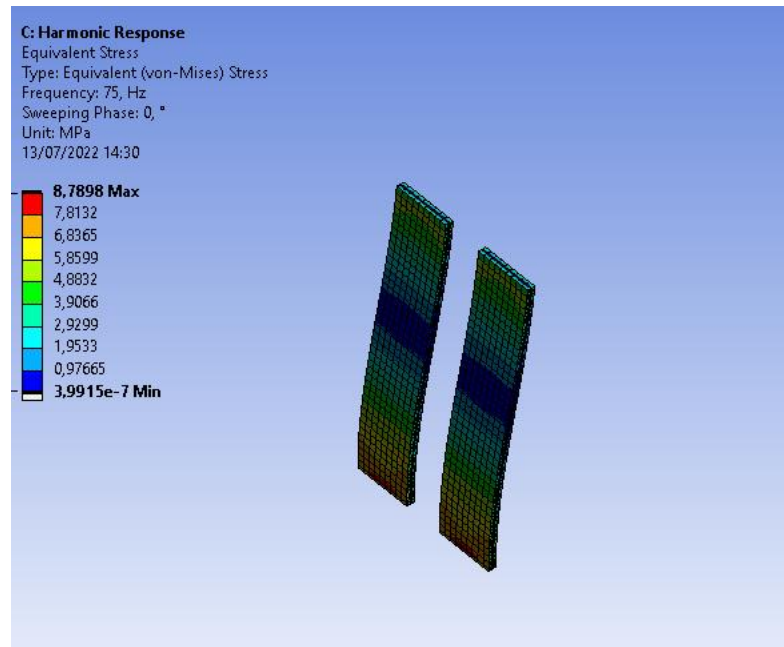
(a)



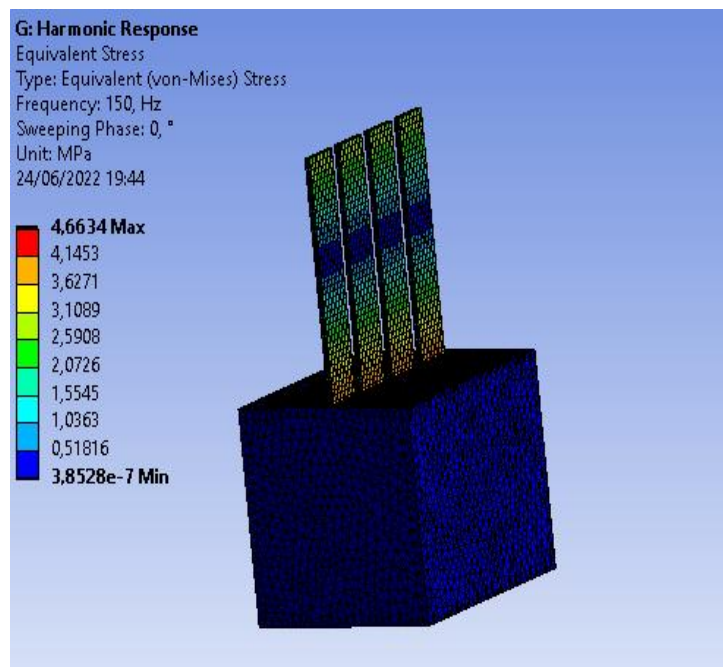
(b)

Gambar 4.11 Hasil respon frekuensi terhadap frekuensi deformasi (a) dua *cantilever-beam* piezoelektrik (b) empat *cantilever-beam* piezoelektrik

Pada gambar 4.11 dapat dilihat hasil dari frekuensi respon dari jumlah piezoelektrik yang berbeda pada variasi dua *cantilever-beam* piezoelektrik dan empat *cantilever-beam* piezoelektrik dimana pada variasi dua *cantilever-beam* piezoelektrik menghasilkan amplitudo sebesar 1,1586 mm pada frekuensi 10 Hz dan pada variasi empat *cantilever-beam* piezoelektrik menghasilkan amplitudo sebesar 3,4579 mm pada frekuensi 12.



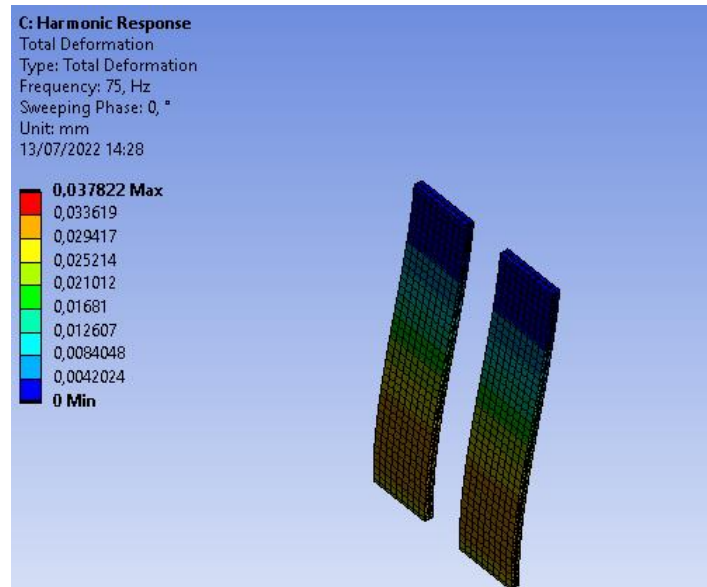
(a)



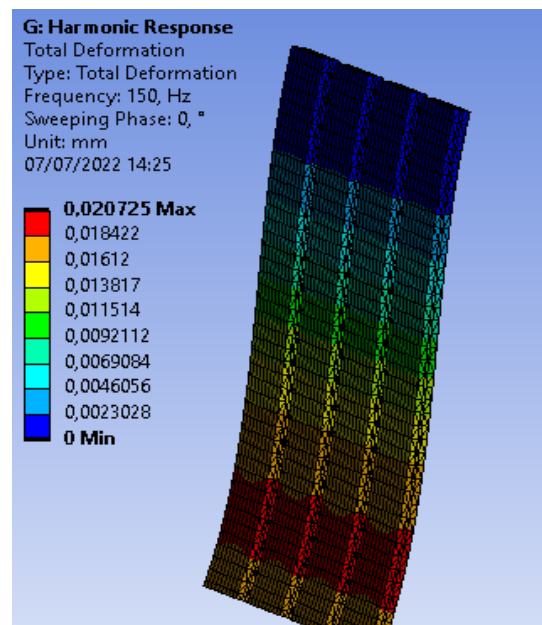
(b)

Gambar 4.12 Hasil respon tegangan *equivalent* terhadap (a) dua cantilver-beam piezoelektrik (b) empat cantilever-piezoelektrik

Pada gambar 4.12 dapat dilihat hasil dari pengujian tegangan pada simulasi harmonic dimana ketika amplitudo sebesar 1,5 m, dua *cantilever-beam* piezoelektrik menghasilkan tegangan maksimum sebesar 8,7898 MPa, dan empat *cantilever-beam* piezoelektrik menghasilkan tegangan maksimum sebesar 4,6634 MPa. Hal ini menandakan semakin banyak jumlah *cantilever-beam* yang digunakan, maka semakin kecil tegangan maksimum yang dihasilkan pada susunan baris.



(a)



(b)

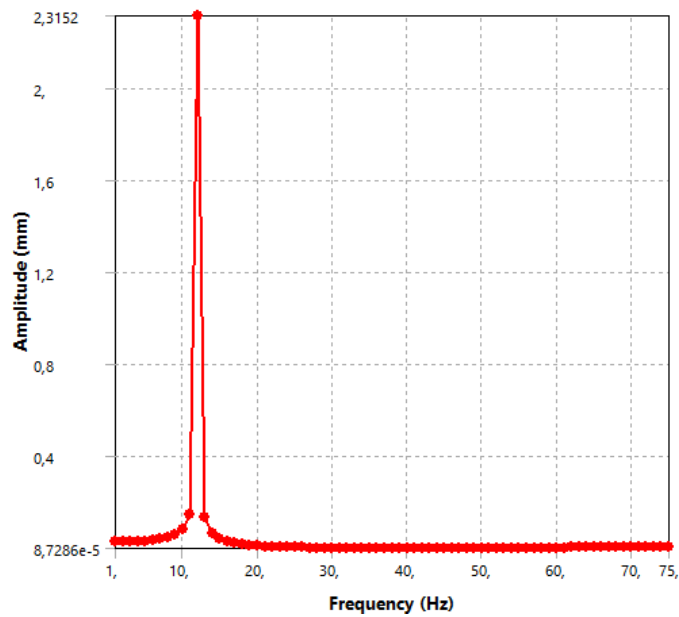
Gambar 4.13 Hasil *harmonic response* terhadap deformasi maksimum (a) dua cantilver-beam piezoelektrik (b) empat cantilever-piezoelektrik

Pada gambar 4.13 dapat dilihat hasil dari pengujian deformasi pada simulasi harmonic dimana ketika amplitudo sebesar 1,5 m atau inputan sebesar 1,3 N menghasilkan tegangan maksimum sebesar 0,037822 mm pada dua *cantilever-beam* piezoelektrik berbaris, dan

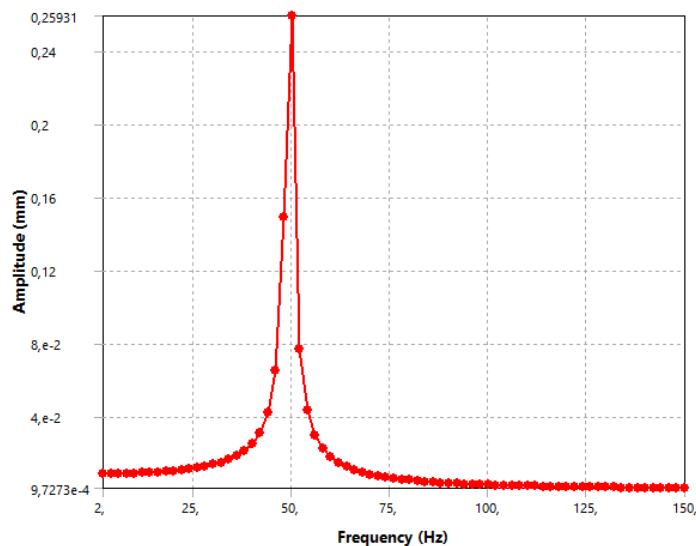
tegangan maksimum sebesar 0,020725 mm pada empat *cantilever-beam* piezoelektrik kolom. Dapat dilihat bahwa semakin banyak *cantilever-beam* piezoelektrik, maka deformasi yang terjadi akan semakin kecil walaupun tidak signifikan.

4.2.3 Respon harmonic terhadap susunan piezoelektrik

Pada hasil simulasi harmonic terhadap susunan piezoelektrik. Dilakukan percobaan pada variasi pada susunan empat *cantilever-beam* piezoelektrik berbaris dan susunan empat *cantilever-beam* kolom. Dengan inputan amplitudo sebesar 1 m dengan gaya inputan sebesar 0,87 N.



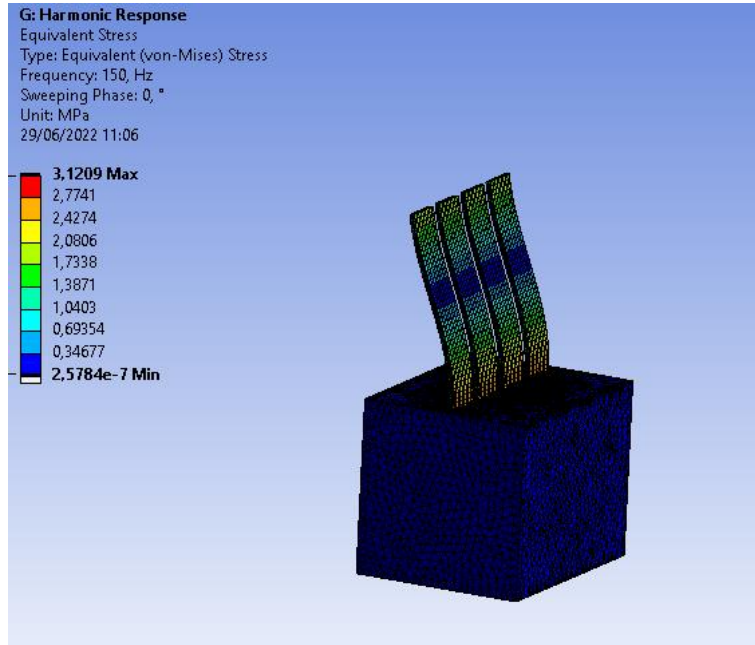
(a)



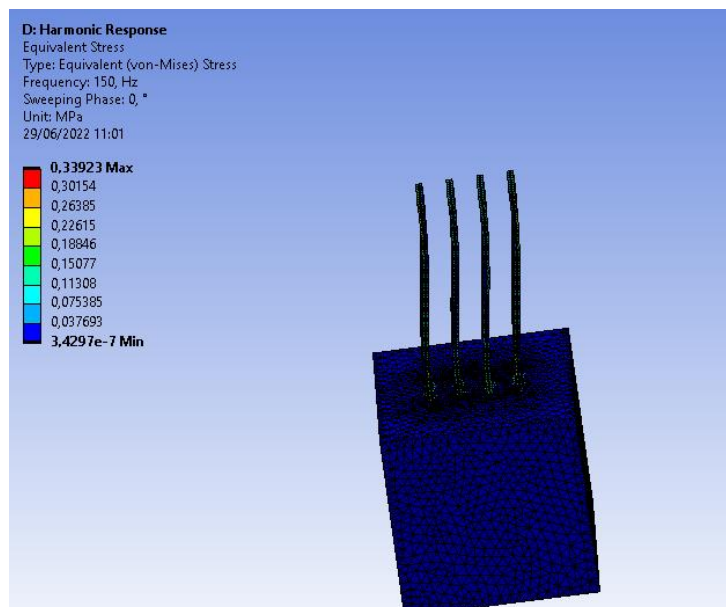
(b)

Gambar 4.14 Hasil respon frekuensi terhadap frekuensi deformasi (a) empat *cantilever-beam* piezoelektrik baris (b) empat *cantilever-beam* piezoelektrik kolom

Dapat dilihat hasil dari frekuensi respon dari jumlah piezoelektrik yang berbeda pada variasi tiga *cantilever-beam* piezoelektrik dan empat *cantilever-beam* piezoelektrik dimana pada variasi empat *cantilever-beam* piezoelektrik berbaris menghasilkan resonansi pada amplitudo sebesar 2,3152 mm pada frekuensi 12 Hz dan terjadi peak kedua sebesar 0,2 mm pada frekuensi 126 Hz dan pada variasi empat *cantilever-beam* piezoelektrik kolom menghasilkan resonansi pada amplitudo sebesar 0,25931 mm pada frekuensi 50 Hz.



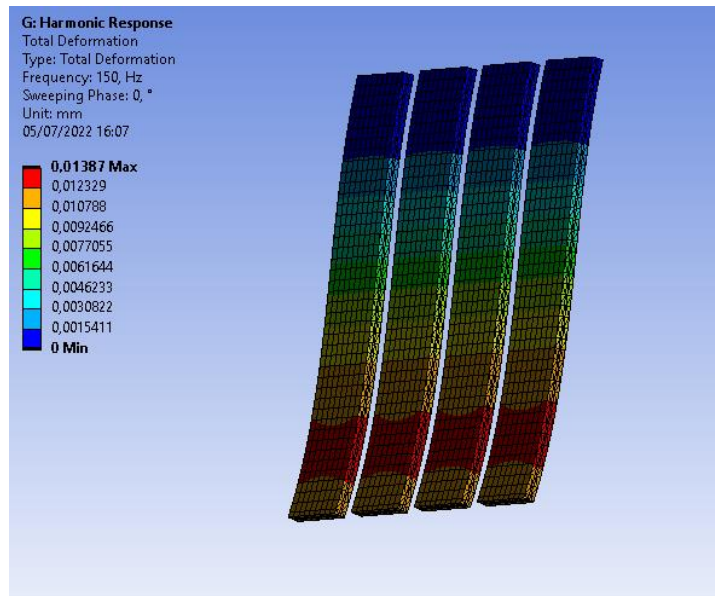
(a)



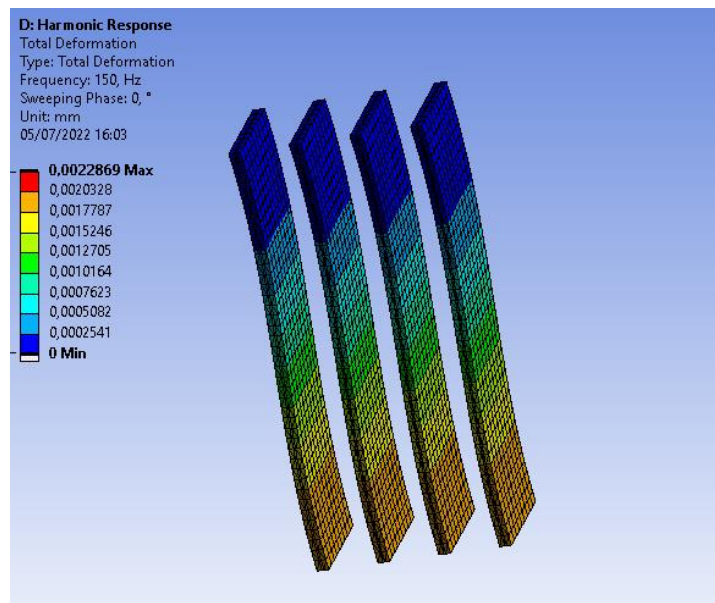
(b)

Gambar 4.15 Hasil respon tegangan *equivalent* terhadap (a) empat *cantilever-beam* piezoelektrik baris (b) empat *cantilever-beam* piezoelektrik kolom

Pada gambar 4.14 dapat dilihat hasil dari pengujian tegangan pada simulasi harmonic dimana ketika amplitudo sebesar 1 m menghasilkan tegangan maksimum sebesar 3,1209 MPa pada *cantilever-beam* piezoelektrik berbaris, dan tegangan maksimum sebesar 0,33923 MPa pada *cantilever-beam* piezoelektrik kolom. Dapat dilihat bahwa susunan berbaris menghasilkan tegangan yang lebih besar dibandingkan susunan kolom.



(a)



(b)

Gambar 4. 16 Hasil *harmonic response* terhadap deformasi maksimum (a) empat *cantilever-beam* piezoelektrik baris (b) empat *cantilever-beam* piezoelektrik kolom

Pada gambar 4.15 dapat dilihat hasil dari pengujian tegangan pada simulasi harmonic dimana ketika amplitudo sebesar 1 m atau inputan sebesar 0,87 N menghasilkan tegangan

maksimum sebesar 0,01387 mm pada *cantilever-beam* piezoelektrik berbaris, dan tegangan maksimum sebesar 0,002286 mm pada *cantilever-beam* piezoelektrik kolom. Dapat dilihat bahwa susunan berbaris menghasilkan deformasi yang jauh lebih besar dibandingkan susunan kolom.

4.3 Hasil tegangan bangkitan

Pada simulasi ini didapatkan hasil dari tegangan bangkitan dari inputan total deformasi yang telah didapat pada simulasi harmonik lalu dimasukkan kedalam rumus dalam mencari voltase maksimum yang dapat dihasilkan oleh sistem yang telah dibuat dan disimulasikan. Pada hasil ini akan ditinjau perbandingan voltase dari susunan berbaris dan kolom.

Pada susunan baris menggunakan empat *cantilever-beam* piezoelektrik dan pada susunan kolom menggunakan empat *cantilever-beam* piezoelektrik dengan inputan dari gaya relatif sebesar 1,3 N dari amplitudo sebesar 1,5 m. Diasumsikan bahwa voltase dari susunan baris yaitu (V_{pb}) dan susunan kolom yaitu (V_{pk}). Untuk perhitungan voltase pada susunan baris dapat dilihat seperti berikut:

$$Vp = \frac{3d_{31}E_p w_p t}{4C_p} X_p$$

(Pers. 9)

$$\begin{aligned} V_{pb} &= \frac{3 \cdot (6,2 \cdot 10^{-10} \cdot 5,89e^{10} \cdot 0,009 \cdot 0,0002)}{4 (63 \cdot 10^{-10})} 0,0002072 \cdot 4 \\ &= 0,6486 V \end{aligned}$$

(Pers. 10)

Untuk perhitungan voltase pada susunan kolom dapat dilihat seperti berikut:

$$Vp = \frac{3d_{31}E_p w_p t}{4C_p} X_p$$

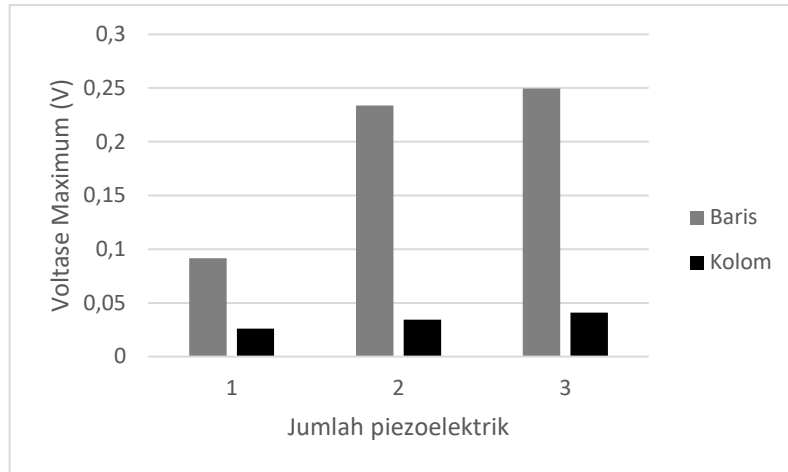
(Pers. 11)

$$\begin{aligned} V_{pk} &= \frac{3 \cdot (6,2 \cdot 10^{-10} \cdot 5,89e^{10} \cdot 0,009 \cdot 0,0002)}{4 (63 \cdot 10^{-10})} 0,0000341 \cdot 4 \\ &= 0,1067 V \end{aligned}$$

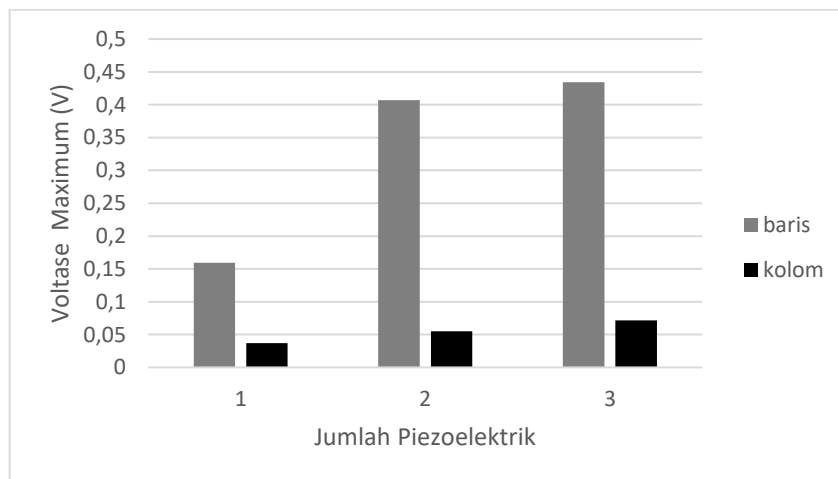
(Pers. 12)

Dapat dilihat hasil perhitungan dari perbandingan voltase antara empat *cantilever-beam* baris dan empat *cantilever-beam* kolom, bahwa voltase yang dihasilkan oleh susunan baris dapat menghasilkan nilai voltase yang lebih besar sebesar 0,6486 V sedangkan untuk susunan

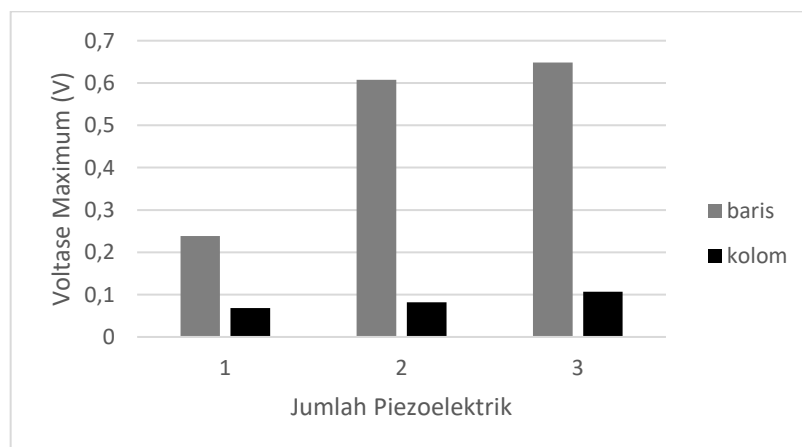
baris menghasilkan nilai sebesar 0,1067 V. dapat dilihat pula grafik dari pengujian setiap variasi seperti berikut.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4. 17 Hasil voltase setiap variasi (a) amplitude 0,5 (b) aplitud 1 (c) amplitude 1,5

Dapat dilihat pada grafik 4.16 menunjukkan voltase setiap variasi yang diuji. Pada grafik menunjukkan bahwa setiap penambahan *cantilever-beam* piezoelektrik dapat meningkatkan nilai voltase. Dan pada grafik pada susunan kolom bahwa empat *cantilever-beam* piezoelektrik menghasilkan voltase tertinggi sebesar 0,041 V sedangkan untuk susunan baris, empat *cantilever-beam* piezoelektrik menghasilkan voltase tertinggi sebesar 0,2495 V.

Dapat dilihat pada gambar 4.16 terlihat bahwa semakin besar amplitude maka semakin besar voltase yang dihasilkan. Dan dari ketiga grafik tersebut, tren pada susunan baris menghasil voltase yang lebih besar dari pada susunan kolom. Dengan penambahan piezoelektrik, voltase yang dihasilkan semakin besar dari susunan baris dan kolom walaupun pada susunan kolom, penambahan variasi piezoelektrik tidak menghasilkan kenaikan voltase yang signifikan seperti pada susunan baris.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan yang telah dilakukan, dapat diambil kesimpulan terkait tugas akhir ini yaitu sebagai berikut :

1. Telah dimodelkan rancangan sistem PLTGL dengan menggunakan *software Solidworks 2021*. Dimana rancangan dari *piezoelectric* diuji dengan menggunakan *software Ansys Workbench 2020 R1* untuk mengetahui kekuatan *piezoelectric* atas gaya yang mengenainya. Setelah itu dibuatlah persamaan gerak serta *state variable form*. Simulasi dilakukan menggunakan *software Ansys Workbench 2020 R1* dengan menguji Analisa statis dengan *menggunakan static structural*. Hasil yang diperoleh pada proses simulasi adalah nilai deformasi maksimum dan stress maksimum yang terjadi pada sistem PLTGL. Besarnya defleksi *piezoelectric*, stress, dan daya bangkitan dipengaruhi oleh parameter berupa jumlah piezoelektrik, susunan piezoelektrik, dan tinggi amplitude.
2. Tinggi amplitudo sangat berpengaruh terhadap nilai inputan eksitasi yang dapat mempengaruhi deformasi maksimum, tegangan maksimum, dan voltase yang dihasilkan. Dimana semakin tinggi amplitudo yang digunakan maka semakin tinggi deformasi maksimum, tegangan maksimum, dan voltase yang dihasilkan.
3. Susunan pada *cantilever-beam* piezoelektrik sangat berpengaruh terhadap deformasi maksimum yang dihasilkan pada sistem. Dimana susunan baris dapat menghasilkan deformasi lebih besar dibandingkan dengan susunan kolom. Hal itu disebabkan akibat susunan kolom lebih kuat dalam menahan deformasi pada sistem.
4. Susunan pada *cantilever-beam* piezoelektrik dan jumlah piezoelektrik yang digunakan sangat berpengaruh terhadap voltase maksimum yang dihasilkan. Dimana semakin banyak jumlah piezoelektrik pada susunan sistem maka semakin besar voltase yang dihasilkan. Dalam penelitian ini, empat *cantilever-beam* piezoelektrik menghasilkan voltase tertinggi dalam susunan baris dan empat *cantilever-beam* piezoelektrik menghasilkan voltase tertinggi pula dalam susunan kolom.

5.2 Saran

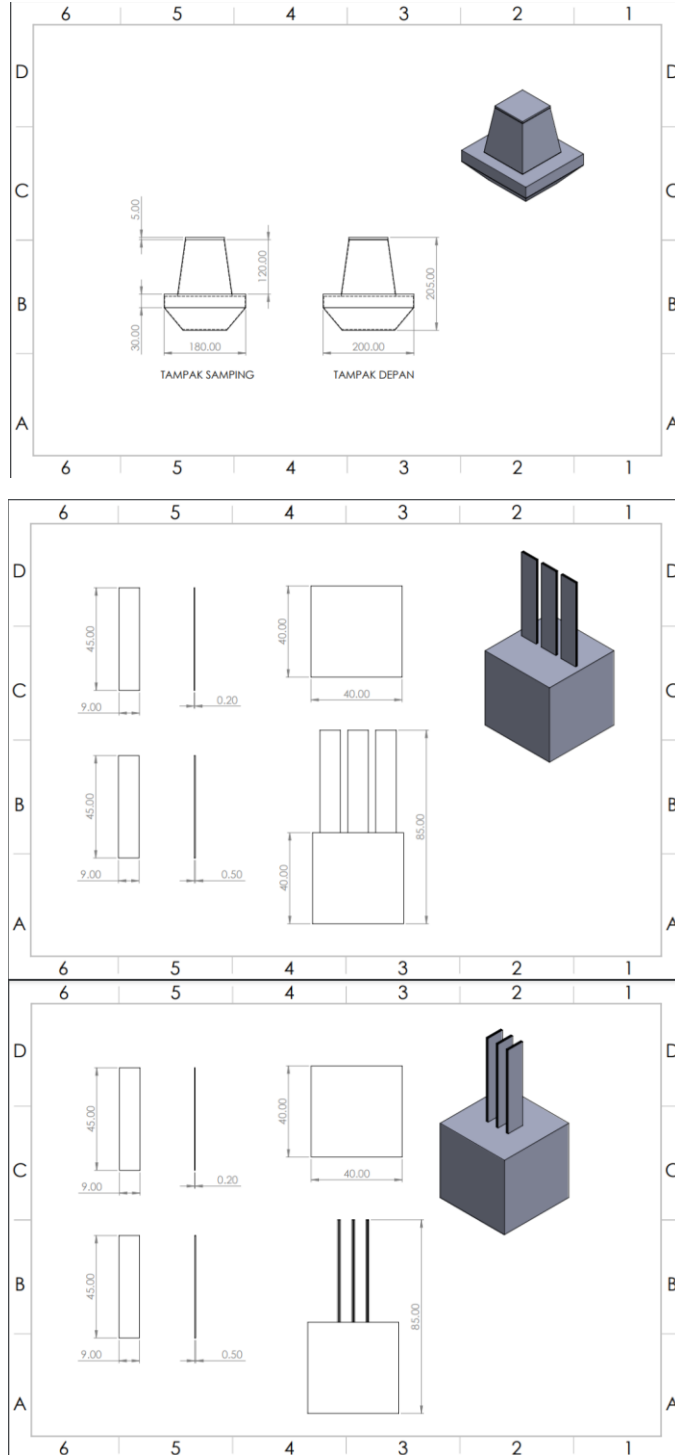
Adapun saran dari penelitian yang telah dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Perlu dilakukan eksperimen secara langsung sebagai perbandingan data antara proses simulasi dan eksperimen.
2. Menggunakan piezoelektrik jenis lainnya yang dapat menghasilkan voltase yang lebih besar.
3. Penambahan massa dan jumlah piezoelektrik dapat dilakukan lebih lanjut agar mendapat voltase yang lebih besar.

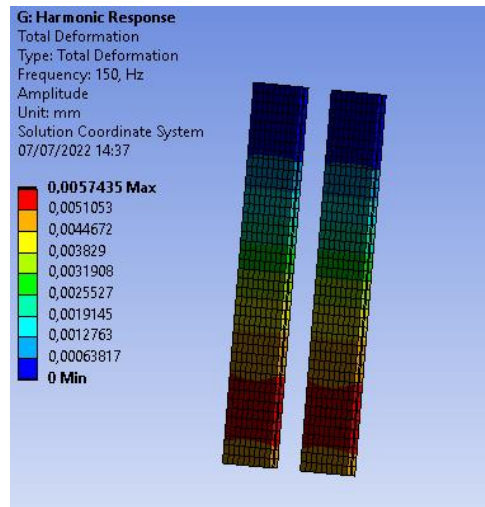
DAFTAR PUSTAKA

- Adzikri, F., Notosudjono, D., & Suhendi, D. (2017). Strategi Pengembangan Energi Terbarukan di Indonesia. *Jurnal Online Mahasiswa (Jom) Bidang Teknik Elektro*, 1(1), 1–13. <http://jom.unpak.ac.id/index.php/teknikelektro/article/view/667>
- ESDM. (2020). *Rencana Dstrategis Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral* (pp. 1–492). [https://jdih.esdm.go.id/storage/document/Permen ESDM Nomor 16 Tahun 2020.pdf](https://jdih.esdm.go.id/storage/document/Permen%20ESDM%20Nomor%2016%20Tahun%202020.pdf)
- Haitao Li. (2019). *Nonlinear dynamics of a pendulum-beam coupling piezoelectric energy harvesting system*. *The European Physical Journal Plus*, 134(12) | 10.1140/epjp/i2019-13085-1. 1–13. <https://sci-hub.st/10.1140/epjp/i2019-13085-1>
- Izadgoshasb, I. (2019). *Improving efficiency of piezoelectric based energy harvesting from human motions using double pendulum system*. *Energy Conversion and Management*, 184, 559–570 | 10.1016/j.enconman.2019.02.001. <https://sci-hub.st/10.1016/j.enconman.2019.02.001>
- Ulfa, R. (2018, August 1). *10 Daftar Permasalahan Serius Energi Nasional, Apa Saja? : Okezone Economy*. Okezone. <https://economy.okezone.com/read/2018/07/31/320/1930032/10-daftar-permasalahan-serius-energi-nasional-apa-saja?page=2>
- Viet, N. V, Xie, X. D., Liew, K. M., Banthia, N., & Wang, Q. (2016). Energy harvesting from ocean waves by a floating energy harvester. *Energy*, 112, 1219–1226. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.019>
- Wu, N., Wang, Q., & Xie, X. (2015). Ocean wave energy harvesting with a piezoelectric coupled buoy structure. *Applied Ocean Research*, 50, 110–118. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2015.01.004>
- Wu, Y., Qiu, J., Zhou, S., Ji, H., Chen, Y., & Li, S. (2018). A piezoelectric spring pendulum oscillator used for multi-directional and ultra-low frequency vibration energy harvesting. *Applied Energy*, 231(September), 600–614. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.082>

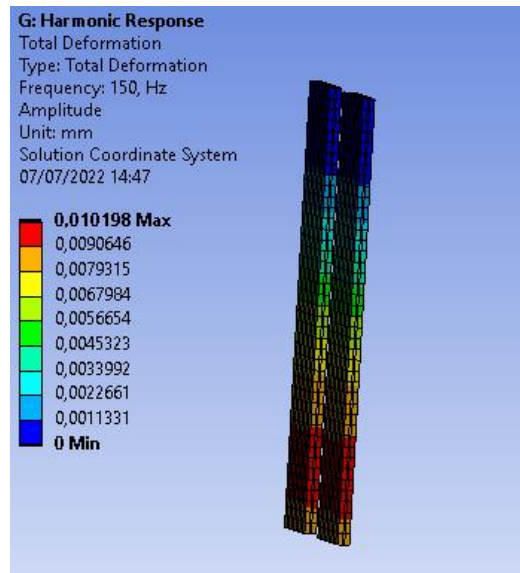
LAMPIRAN



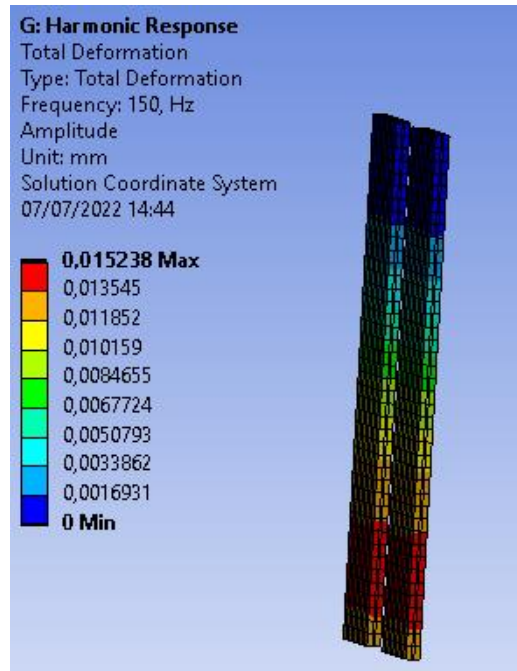
Lampiran 1 Design Rancangan PLTGL



(a)

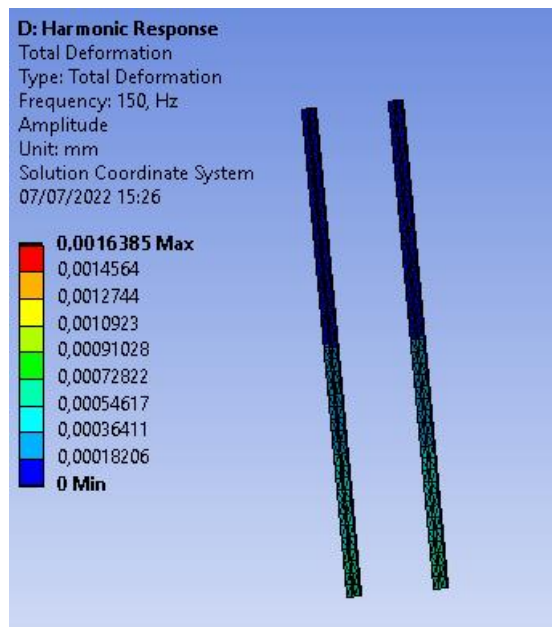


(b)

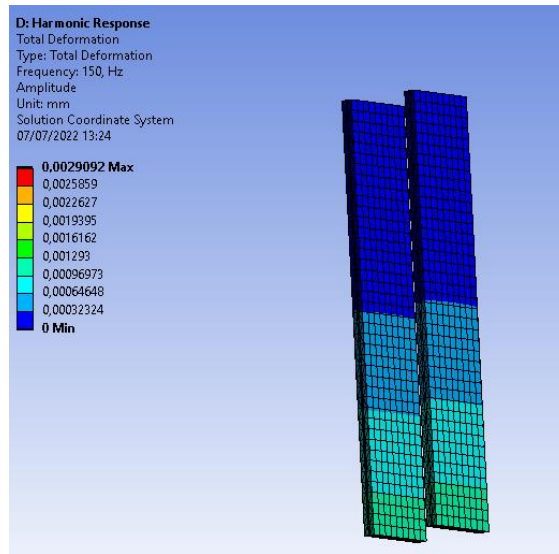


(c)

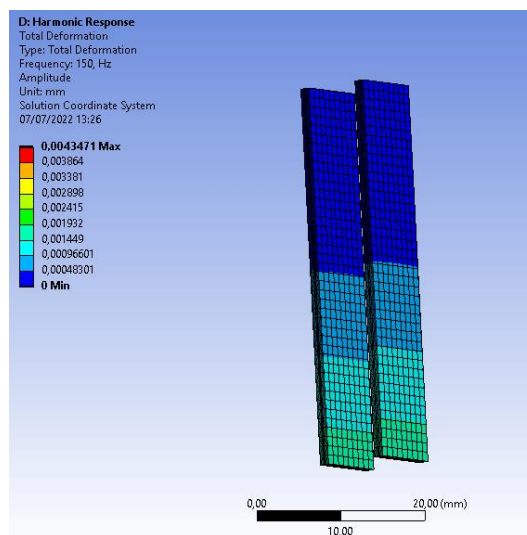
Lampiran 2 Deformasi hasil *harmonic response* dua *cantilever-beam* Piezoelektrik baris (a) amplitudo 0,5 m (b) amplitudo 1 m (c) amplitudo 1,5 m



(a)

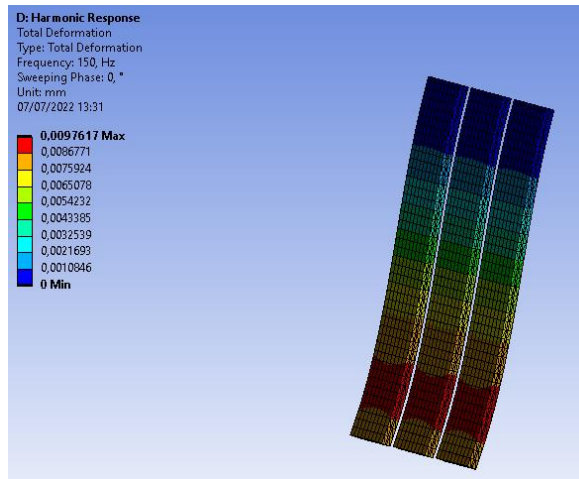


(b)

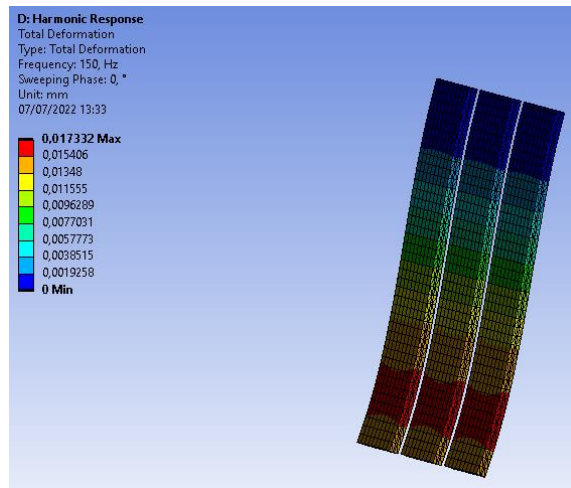


(c)

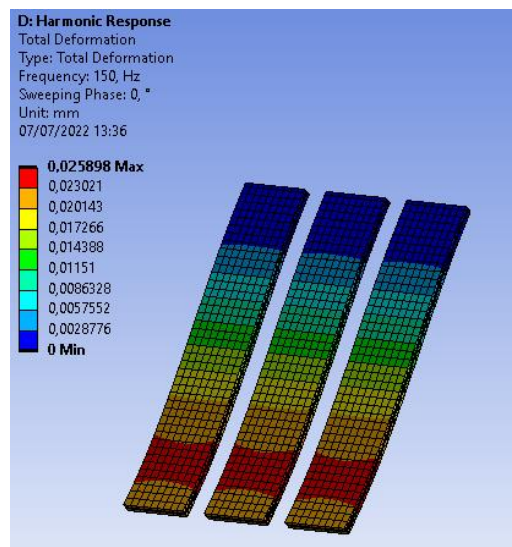
Lampiran 3 Deformasi hasil *harmonic response* dua *cantilever-beam* Piezoelektrik kolom
 (a) amplitudo 0,5 m (b) amplitudo 1 m (c) amplitudo 1,5 m



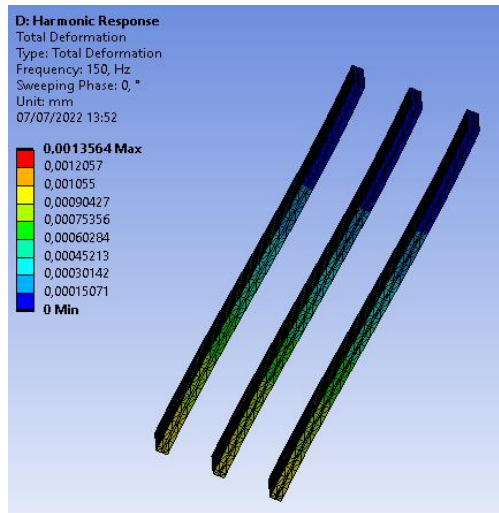
(a)



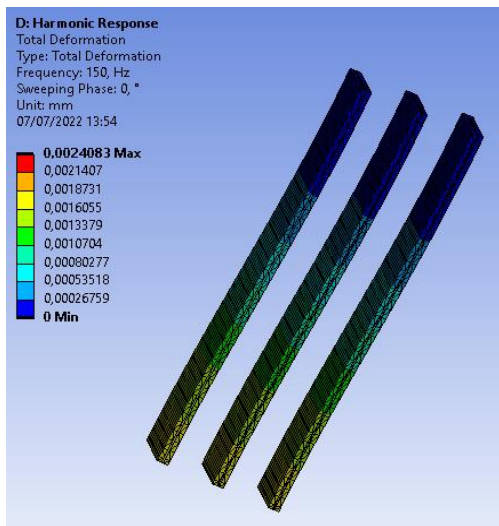
(b)



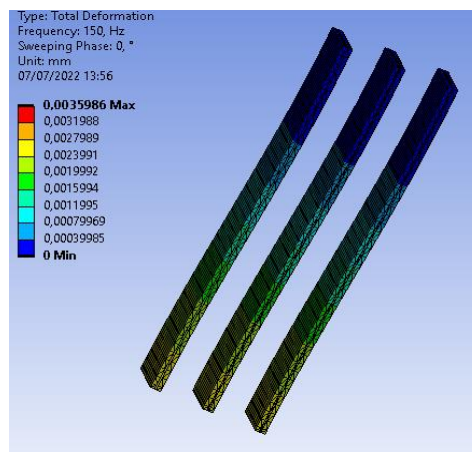
Lampiran 4 Deformasi hasil *harmonic response* tiga *cantilever-beam* Piezoelektrik baris (a) amplitudo 0,5 m (b) amplitudo 1 m (c) amplitudo 1,5 m



(a)

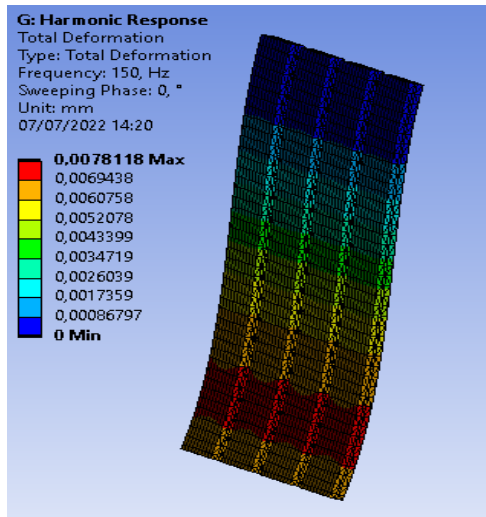


(b)

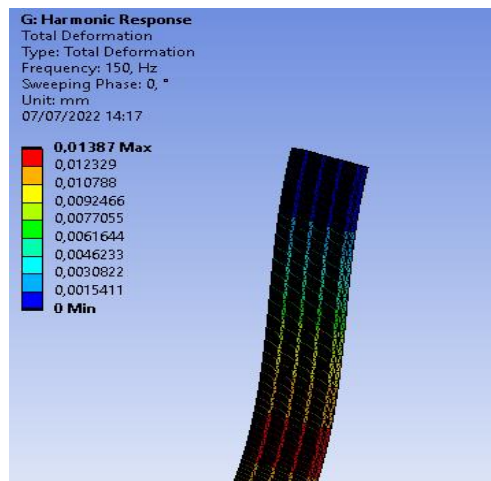


(c)

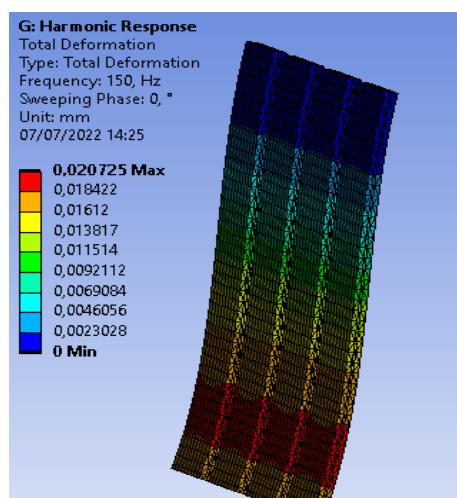
Lampiran 5 Deformasi hasil *harmonic response* tiga *cantilever-beam* Piezoelektrik kolom
 (a) amplitudo 0,5 m (b) amplitudo 1 m (c) amplitudo 1,5 m



(a)

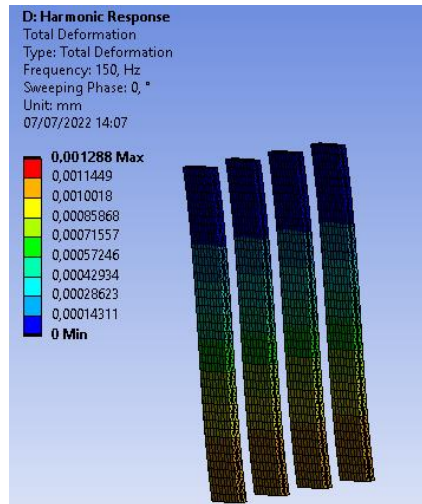


(b)

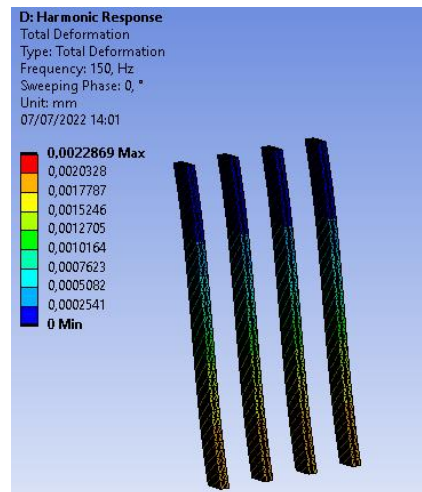


(c)

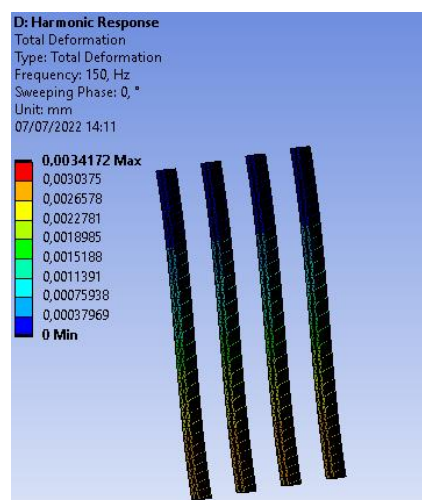
Lampiran 6 Deformasi hasil *harmonic response* empat *cantilever-beam* Piezoelektrik baris
 (a) amplitudo 0,5 m (b) amplitudo 1 m (c) amplitudo 1,5 m



(a)



(b)



(b)

Lampiran 7 Deformasi hasil *harmonic response* empat *cantilever-beam* Piezoelektrik kolom
 (a) amplitudo 0,5 m (b) amplitudo 1 m (c) amplitudo 1,5 m

	Amplitudo	Jenis piezoelektrik	Jumlah piezoelektrik	Deformation (mm)	Voltase (V)
2 beam baris	0,5	baris	2	0,00586	0,09171
2 beam kolom			3	0,00996	0,2338
3 beam baris			4	0,00797	0,2495
3 beam kolom		kolom	2	0,00167	0,02614
4 beam baris			3	0,00147	0,03451
4 beam kolom			4	0,00131	0,041
2 beam baris	1	baris	2	0,01019	0,1595
2 beam kolom			3	0,01733	0,4068
3 beam baris			4	0,01387	0,4341
3 beam kolom		kolom	2	0,0029	0,03678
4 beam baris			3	0,00235	0,05517
4 beam kolom			4	0,002286	0,07155
2 beam baris	1,5	baris	2	0,01523	0,2384
2 beam kolom			3	0,02589	0,6078
3 beam baris			4	0,02072	0,6486
3 beam kolom		kolom	2	0,00434	0,06792
4 beam baris			3	0,00348	0,0817
4 beam kolom			4	0,00341	0,1067

Lampiran 8 Tabel hasil variasi deformasi dan voltase

BIODATA PENULIS



Bagas Dian Anggoro dilahirkan di Padang, 4 April 2000 merupakan anak yang terlahir dari orang tua Bernama Bapak Widodo dan Ibu Yossi. Penulis memulai pendidikan di sekolah dasar Al-Azhar 17 Bintaro, SMP Al-Azhar 3 Bintaro, dan melanjutkan pendidikannya di SMAN 4 Tangerang Selatan. Kemudian penulis menjalani jenjang pendidikan tinggi di S1 Teknik Mesin FTIRS Institut Teknologi Sepuluh Nopember pada bidang studi desain terdaftar dengan NRP.02111740000173.

Pada masa perkuliahannya penulis aktif dalam kegiatan akademik maupun non-akademik. Penulis tergabung ke dalam salah satu organisasi mahasiswa mesin bernama Mesin ITS Autosport yang bergerak di bidang olahraga otomotif. Selain itu, penulis juga aktif dalam berbagai kepanitian seperti acara Wisuda Teknik mesin dan Mechtech. Penulis juga pernah. Meskipun penulis mengikuti berbagai kegiatan non-akademik, penulis tidak meninggalkan kewajibannya sebagai mahasiswa yaitu untuk menimba ilmu sebanyak-banyaknya. Untuk informasi lebih lanjut mengenai penelitian ini beserta kritik dapat menghubungi penulis melalui email: bagasdiananggoro@gmail.c

