



TUGAS AKHIR – TM141585

**PEMODELAN DAN ANALISIS ENERGI LISTRIK
YANG DIHASILKAN MEKANISME *OCEAN WAVE
ENERGY HARVESTER* TIPE PELAMPUNG BOLA
MENGUNAKAN METODE *CANTILEVER
PIEZOELECTRIC***

ZULFAN WILDAN FIRDAUS
NRP. 2112100086

Dosen Pembimbing:
Dr. Wiwiek Hendrowati, ST., MT.

PROGRAM SARJANA
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2016



FINAL PROJECT – TM141585

***MODELING AND ANALYSIS OF GENERATED
ELECTRICITY ENERGY OF BUOY BALL TYPE
OCEAN WAVE ENERGY HARVESTER USING
A CANTILEVER PIEZOELECTRIC METHOD***

ZULFAN WILDAN FIRDAUS
NRP. 2112100086

Advisory Lecturer
Dr. Wiwiek Hendrowati, ST, MT.

BACHELOR PROGRAM
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA 2016

**PEMODELAN DAN ANALISIS ENERGI LISTRIK YANG
DIHASILKAN MEKANISME *OCEAN WAVE ENERGY HARVESTER*
TIPE PELAMPUNG BOLA MENGGUNAKAN METODE *CANTILEVER*
*PIEZOELECTRIC***

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Vibrasi Dan Sistem Dinamis
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

ZULFAN WILDAN FIRDAUS
NRP. 2112 100 086

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr. Wiwiek Hendrowati, ST, MT (Pembimbing)
NIP. 197004121997032003
2. Prof. Ir. I Nyoman Sutantra, MSc, PhD (Penguji I)
NIP. 195106051978031002
3. Dr. Harus Laksana Guntur, ST, M. Eng (Penguji II)
NIP. 197505111999031001
4. Moch. Solichin, ST, MT (Penguji III)
NIP. 198908172015041003

SURABAYA
JUNI, 2016

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

**PEMODELAN DAN ANALISIS ENERGI LISTRIK YANG
DIHASILKAN MEKANISME *OCEAN WAVE ENERGY*
HARVESTER TIPE PELAMPUNG BOLA
MENGUNAKAN METODE *CANTILEVER*
*PIEZOELECTRIC***

Nama : Zulfan Wildan Firdaus
NRP : 2112100086
Jurusan : Teknik Mesin FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Wiwiek Hendrowati, ST., MT.

ABSTRAK

Indonesia merupakan Negara dengan potensi energi laut yang besar. Negara ini mempunyai luas lautan sebesar 5.8 juta km². Sedangkan energi gelombang laut yang dihasilkan mencapai lima kali suplai listrik Negara yang ada pada tahun 2014 yang mencapai 141,472 MWh/tahun. Potensi ini juga dimiliki oleh kawasan pantai sekitar Pulau Poteran. Potensi energi laut yang ada pada kawasan ini berkisar antara 0-1300 W/m². Untuk itulah diperlukan suatu pemodelan mekanisme *energy harvesting* gelombang laut tersebut agar dapat dimanfaatkan oleh rakyat sekitar khususnya nelayan. Mekanisme *energy harvesting* kali ini dilakukan pada skala laboratorium menggunakan tipe pelampung dengan metode *cantilever piezoelectric*.

Pembuatan tugas akhir kali ini difokuskan pada pemodelan dan analisa energi bangkitan yang dihasilkan oleh mekanisme *energy harvesting* tipe pelampung dengan metode *cantilever piezoelectric*. Kerja dari mekanisme ini yaitu gerakan naik turun dari gelombang laut ditangkap oleh pelampung yang kemudian dikonversikan ke gerak rotasi oleh pasangan *rack-pinion gear*. Gerak rotasi tersebut akan dinaikkan kecepatan putarannya oleh dua pasang *spur gear*. Putaran tersebut akan diteruskan ke bagian *blade* yang berputar. *Blade* ini nantinya akan memukul material *piezoelectric* dan akan terjadi defleksi pada

material *piezoelectric* yang mengakibatkan timbulnya tegangan listrik. Variasi yang digunakan pada pemodelan kali ini adalah frekuensi gelombang laut (1,1.2, dan 1.4 Hz), amplitudo gelombang (3.5, 3.9, dan 4.7 cm), dan jumlah material *piezoelectric* (1, 2, dan 3).

Hasil dari tugas akhir ini adalah terciptanya simulasi mekanisme *ocean wave energy harvester* tipe pelampung bola menggunakan metode *cantilever piezoelectric*. Simulasi ini dapat menghasilkan grafik voltase bangkitan terhadap waktu, arus listrik bangkitan terhadap waktu, dan daya listrik bangkitan terhadap waktu dengan variasi frekuensi dan tinggi gelombang, dan jumlah material *piezoelectric*. Daya listrik bangkitan material *piezoelectric* terbesar yang dihasilkan oleh mekanisme adalah 2.11×10^{-6} watt pada frekuensi gelombang 1.4 Hz dengan amplitudo 4.7 cm dan jumlah material *piezoelectric* sebanyak 3. Semakin besar frekuensi dan tinggi gelombang daya listrik bangkitannya akan semakin besar. Begitu juga ketika jumlah material *piezoelectric* ditambah daya listrik yang dihasilkan juga akan semakin besar.

Kata kunci: mekanisme *energy harvesting*, *cantilever piezoelectric*, simulasi, frekuensi gelombang laut, amplitudo gelombang, jumlah *piezoelectric*.

**MODELING AND ANALYSIS OF GENERATED
ELECTRICITY ENERGY OF BUOY BALL TYPE
OCEAN WAVE ENERGY HARVESTER USING
A CANTILEVER PIEZOELECTRIC METHOD**

Name : Zulfan Wildan Firdaus
NRP : 2112100086
Department : Mechanical Engineering FTI-ITS
Adviser Lecturer : Dr. Wiwiek Hendrowati, ST, MT.

ABSTRACT

Indonesia is the country with the great potential of marine energy. The country has ocean area of 5.8 million km². While the resulting sea wave energy reach five times state electrical supply that exist in 2014 which has reached 141.427 MWh/year. This potential is also owned by the coastal area around Poteran Island. Ocean energy potential that exists in this area ranges between 0-1300 W/m². Because of that needed an ocean wave energy harvesting mechanism modeling in order to be utilized by the people around a particular fisherman. This time the energy harvesting mechanism was done on a laboratory scale using a bouy type of cantilever piezoelectric method.

This time the final assignment is focused on modeling an analysis of energy generation that produced by the buoy ball type ocean wave energy harvester using a cantilever piezoelectric. The action of mechanism is the movement up and down of ocean waves are captured by the bouy which is then converted to rotational motion by a pair of rack-pinion gear. The speed of rotational motion is raised by two pairs of spur gear. The rotational motion will be forwarded to the rotating blade. This blade will be hit the piezoelectric material and piezoelectric material deflection will occur on the piezoelectric material resulted in the emergence of the electrical voltage. The variation used in the modeling of this time is the frequency of sea waves (1,

1.2, and 1.4 Hz), the amplitude of wave (3.5, 3.9, and 4.7 cm), and the amount of piezoelectric material (1, 2, and 3).

The result of this final task is the buoy ball type ocean wave energy harvester using a cantilever piezoelectric simulation was created. This simulation can produce voltage against time graphs, the current generation of electricity against time graphs, and electrical power over time graphs with variation of frequency and wave height, and the amount piezoelectric material. The largest electrical power generation of the material that generated by piezoelectric material is 2.11×10^{-6} watt on 1.4 Hz of wave frequency with 4.7 cm of amplitude and amount of piezoelectric material as much as 3. The greater frequency and wave height the generated electrical power will be even greater. So also when the amount of piezoelectric material is raised the generated electrical power will also be getting bigger.

Key words: *energy harvesting mechanism, cantilever piezoelectric, simulation, ocean wave frequency, wave amplitude, the amount of piezoelectric*

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

Puji syukur kehadirat Allah SWT atas rahmat, hidayah dan inayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir strata (S1). Tugas akhir ini disusun untuk memenuhi salah satu persyaratan kelulusan pendidikan sarjana S-1 di Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penulis juga ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sangat dalam kepada semua pihak yang telah banyak membantu dan berperan penting pada penyelesaian tugas akhir ini, yaitu:

1. **Allah SWT** yang telah memberikan rahmat dan ridhonya sehingga tugas akhir ini dapat diselesaikan oleh penulis dengan sebaik-baiknya.
2. **Dr. Wiwiek Hendrowati, ST., MT.** selaku dosen pembimbing yang sudi meluangkan waktu, tenaga dan pikiran ditengah kesibukannya untuk tidak henti-hentinya membimbing dan mendidik penulis hingga terselesaikannya tugas akhir ini.
3. **Khusnul dan Lailul Rohmah**, selaku kedua orang tua dari penulis yang selalu memberikan dukungan baik moral maupun material.
4. **Prof. Ir I Nyoman Sutantra, M.Sc, PhD, Dr. Eng. Harus Laksana Guntur, ST., M.Eng,** dan **Moch. Solichin, ST, MT**, selaku dosen penguji dalam sidang tugas akhir ini.
5. **Teman-teman Laboratorium Desain, Al-Azhar Community, OBH Combie+, dan angkatan M55**, dan seluruh teman-teman di sekitar penulis yang selalu memberikan motivasi dan dorongan kepada penulis agar cepat menyelesaikan tugas akhir ini.
6. Seluruh pihak yang tidak bias penulis sebutkan satu persatu.

Harapan yang besar penulis sampaikan agar nantinya tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi lingkungan sekitar. Penulis

menyadari bahwa dalam penulisan tugas akhir kali ini masih terjadi banya kesalahan yang dilakukan oleh penulis. Oleh sebab itu penulis memohon maaf yang sebesar-besarnya apabila ada kesalahan baik yang disengaja ataupun tidak. Penulis menerima dengan lapang dada apabila ada koreksi dikemudian hari. Hal ini bertujuan agar penulis bias menjadi pribadi yang lebih baik lagi. Wassalamualaikum Wr. Wb.

Surabaya, Juli 2015

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xvi

BAB I

PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan.....	3
1.5 Manfaat.....	3

BAB II

KAJIAN PUSTAKA	5
2.1 Kajian Terdahulu	5
2.2 Dasar Teori Gelombang Laut	11
2.2.1 Pengertian gelombang laut	11
2.2.2 Analisa gaya pada gelombang laut	14
2.2.3 Gaya apung (<i>Bouyancy force</i>)	16
2.2.4 Gaya <i>generated</i>	18
2.3 Dasar Teori Mekanika Getaran.....	18
2.3.1 Pengertian getaran	18
2.3.2 Getaran sistem 1 d.o.f dengan eksitasi gaya harmonik	19
2.3.3 Getaran multi d.o.f.....	22
2.3.4 Hubungan gerak rotasi dan translasi.....	23

2.4	Gearbox	24
2.5	Dasar Teori Material <i>Piezoelectric</i>	26
2.5.1	Pengertian dan efek <i>piezoelectric</i>	26
2.5.2	Konstanta <i>Piezoelectric</i>	30
2.5.3	Analisa <i>Piezoelectric</i>	34
2.5.4	Susunan <i>Piezoelectric</i>	36

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN..... 39

3.1	Diagram Alir	39
3.2	Penjelasan <i>Flowchart</i> Penelitian.....	40
3.2.1	Studi literatur	40
3.2.2	Identifikasi permasalahan	40
3.2.3	Pemodelan mekanisme	40
3.2.4	Simulasi mekanisme	43
3.2.4.1	Analisa Gerak Gelombang Naik	44
3.2.4.2	Analisa Gerak Gelombang Turun	56
3.2.4.3	Analisa Gerak Kelistrikan <i>Piezoelectric</i>	67
3.2.5	Variasi.....	69
3.2.6	Analisa dan pembahasan.....	69
3.2.7	Kesimpulan	69

BAB IV

ANALISA DAN PEMBAHASAN 71

4.1	Data dan Spesifikasi Mekanisme <i>Ocean Wave</i> Energy Harvester Tipe Pelampung Bola Cantilever <i>Piezoelectric</i>	71
4.1.1	Simulator Gelombang laut	71
4.1.2	Mekanisme <i>ocean wave energy harvester</i>	73
4.1.3	Contoh perhitungan.....	75
4.2.	Analisa Pemodelan	80
4.2.1	Defleksi material <i>piezoelectric</i> dengan variasi frekuensi, amplitudo gelombang, dan jumlah material <i>piezoelectric</i>	80
4.2.2	Energi bangkitan material <i>piezoelectric</i> dengan	

variasi jumlah material <i>piezoelectric</i> , frekuensi, dan amplitudo gelombang.....	83
4.3 Pembahasan	92
4.3.1 Pengaruh frekuensi dan tinggi gelombang laut terhadap energi listrik yang dihasilkan mekanisme <i>ocean wave energy harvester</i>	93
4.3.2 Pengaruh jumlah material <i>piezoelectric</i> terhadap energi listrik yang dihasilkan mekanisme <i>ocean wave energy harvester</i>	98
 BAB V	
KESIMPULAN DAN SARAN	107
5.1 Kesimpulan.....	107
5.2 Saran.....	108
 DAFTAR PUSTAKA	109
LAMPIRAN.....	111

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Mekanisme <i>vibration energy harvesting</i> : (a) tampak depan (b) skema Pengujian.....	5
Gambar 2.2	Grafik pengaruh frekuensi terhadap voltase bangkitan	6
Gambar 2.3	Mekanisme sederhana penelitian <i>cantilever piezoelectric energy harvesting</i>	7
Gambar 2.4	Skema percobaan <i>cantilever piezoelectric energy harvesting</i>	7
Gambar 2.5	Grafik voltase bangkitan terhadap waktu : (a) frekuensi 58 Hz (b) frekuensi 437 Hz	8
Gambar 2.6	(a) Skema mekanisme, (b) Skema dari aplikasi penelitian.....	9
Gambar 2.7	Hasil dari pemodelan mekanisme penelitian	9
Gambar 2.8	Permodelan mekanisme (a). pada kolam, dan (b) tampak 3D	10
Gambar 2.9	Grafik voltase bangkitan terhadap: (a) variasi tinggi gelombang dan jumlah PZT (b) variasi frekuensi gelombang dan jumlah PZT.....	11
Gambar 2.10	Pergerakan air laut.....	12
Gambar 2.11	Proses pembentukan gelombang akibat angin...	12
Gambar 2.12	Sketsa gelombang laut.....	14
Gambar 2.13	Karakteristik gelombang	14
Gambar 2.14	(a) Benda terapung (b) Benda melayang (c) Benda tenggelam	17
Gambar 2.15	Analisa gaya yang dihasilkan pelampung	17
Gambar 2.16	Gaya-gaya yang bekerja pada pelampung	18
Gambar 2.17	(a) Model sederhana gerak harmonik yang dipengaruhi oleh eksitasi gaya harmonik (b) <i>free body diagram</i>	19

Gambar 2.18	Respons sistem akibat eksitasi harmonis	21
Gambar 2.19	(a) Sistem berderajat dua, (b) <i>free body diagram</i>	22
Gambar 2.20	Gerak translasi dan rotasi pada <i>rack dan pinion</i>	23
Gambar 2.21	Roda gigi lurus (<i>spur gear</i>)	25
Gambar 2.22	Beberapa contoh bentuk <i>piezoelectric</i>	28
Gambar 2.23	Definisi arah pada elemen <i>piezoelectric</i>	31
Gambar 2.24	<i>Cantilever piezoelectric</i>	35
Gambar 3.25	Model pemanen energi kinetik	35
Gambar 2.26	Rangkaian listrik ekuivalen pemanen energi kinetik	36
Gambar 2.27	Susunan paralel material <i>piezoelectric</i>	37
Gambar 2.28	Konstanta pegas disusun paralel.....	37
Gambar 2.29	Elektrik <i>piezoelectric</i> disusun secara seri.....	38
Gambar 3.1	<i>Flowchart</i> penelitian	39
Gambar 3.2	Pemasangan mekanisme pada perahu cadik nelayan.....	41
Gambar 3.3	Pemodelan mekanisme	42
Gambar 3.4	Gerakan mekanisme (a) gerakan naik, (b) gerakan turun.....	44
Gambar 3.5	FBD kesetimbangan statis pelampung	44
Gambar 3.6	FBD kesetimbangan dinamis pelampung.....	45
Gambar 3.7	FBD <i>gear 1</i>	46
Gambar 3.8	FBD <i>gear 2</i>	47
Gambar 3.9	FBD <i>gear 3</i>	47
Gambar 3.10	FBD <i>gear 6</i>	48
Gambar 3.11	FBD <i>gear 5</i>	49
Gambar 3.12	FBD <i>gear 4</i>	49
Gambar 3.13	FBD <i>gear 7</i>	50
Gambar 3.14	FBD <i>gear 8</i>	51
Gambar 3.15	FBD <i>gear 9</i>	51
Gambar 3.16	FBD Pada <i>Blade dan Piezoelectric</i> (tampak belakang)	53
Gambar 3.17	FBD <i>piezoelectric</i>	54

Gambar 3.18	FBD kesetimbangan statis pelampung	57
Gambar 3.19	FBD dinamis pelampung	57
Gambar 3.20	FBD gear 1.....	58
Gambar 3.21	FBD gear 4	59
Gambar 3.22	FBD gear 5.....	59
Gambar 3.23	FBD gear 6	60
Gambar 3.24	FBD gear 3.....	60
Gambar 3.25	FBD gear 2	61
Gambar 3.26	FBD gear 7	61
Gambar 3.27	FBD gear 8	62
Gambar 3.28	FBD gear 9	63
Gambar 3.29	FBD Pada <i>Blade</i> dan <i>Piezoelectric</i> (tampak belakang)	64
Gambar 3.30	FBD <i>piezoelectric</i>	65
Gambar 4.1	Grafik pergerakan gelombang laut dengan variasi frekuensi dan tinggi gelombang	72
Gambar 4.2	Grafik gaya angkat gelombang.....	72
Gambar 4.3	Mekanisme gerak gelombang naik	73
Gambar 4.4	Mekanisme gerak gelombang turun	74
Gambar 4.5	Grafik defleksi 1 material <i>piezoelectric</i> dengan variasi frekuensi.....	80
Gambar 4.6	Grafik defleksi 1 material <i>piezoelectric</i> dengan variasi frekuensi diperbesar 3 sampai 3.5 detik.....	81
Gambar 4.7	Grafik defleksi material <i>piezoelectric</i> pada frekuensi gelombang 1 Hz dengan variasi jumlah material <i>piezoelectric</i>	82
Gambar 4.8	Grafik defleksi material <i>piezoelectric</i> pada frekuensi gelombang 1 Hz dengan variasi jumlah material <i>piezoelectric</i> diperbesar 3 sampai 3.5 detik	82
Gambar 4.9	Grafik voltase bangkitan 1 material <i>piezoelectric</i> dengan variasi frekuensi	84
Gambar 4.10	Grafik voltase bangkitan 1 material <i>piezoelectric</i> dengan variasi frekuensi	

	diperbesar 3 sampai 3.5 detik	84
Gambar 4.11	Grafik voltase bangkitan material <i>piezoelectric</i> pada frekuensi 1 Hz dengan variasi jumlah material <i>piezoelectric</i>	85
Gambar 4.12	Grafik voltase bangkitan material <i>piezoelectric</i> pada frekuensi 1 Hz dengan variasi jumlah material <i>piezoelectric</i> diperbesar 3 sampai 3.5 detik	86
Gambar 4.13	Grafik arus bangkitan 1 material <i>piezoelectric</i> dengan variasi frekuensi.....	87
Gambar 4.14	Grafik arus bangkitan 1 material <i>piezoelectric</i> dengan variasi frekuensi diperbesar 3-3.5 detik	87
Gambar 4.15	Grafik arus bangkitan material <i>piezoelectric</i> pada frekuensi gelombang 1 Hz dengan variasi jumlah material <i>piezoelectric</i>	88
Gambar 4.16	Grafik arus bangkitan material <i>piezoelectric</i> pada frekuensi gelombang 1 Hz dengan variasi jumlah material <i>piezoelectric</i> diperbesar 3 sampai 3.5 detik	89
Gambar 4.17	Grafik daya bangkitan 1 material <i>piezoelectric</i> dengan variasi frekuensi	90
Gambar 4.18	Grafik daya bangkitan 1 material <i>piezoelectric</i> dengan variasi frekuensi diperbesar 3 sampai 3.5 detik	90
Gambar 4.19	Grafik arus bangkitan material <i>piezoelectric</i> pada frekuensi gelombang 1 Hz dengan variasi jumlah material <i>piezoelectric</i>	91
Gambar 4.20	Grafik arus bangkitan material <i>piezoelectric</i> pada frekuensi gelombang 1 Hz dengan variasi jumlah material <i>piezoelectric</i> diperbesar 3 sampai 3.5 detik	92
Gambar 4.21	Grafik pengaruh frekuensi gelombang laut terhadap voltase bangkitan dari masing-masing jumlah material <i>piezoelectric</i> ..	94

Gambar 4.22	Grafik pengaruh frekuensi gelombang laut terhadap arus listrik bangkitan dari masing-masing jumlah material <i>piezoelectric</i> .. 95
Gambar 4.23	Grafik pengaruh frekuensi gelombang laut terhadap daya listrik bangkitan dari masing-masing jumlah material <i>piezoelectric</i> .. 97
Gambar 4.24	Grafik pengaruh jumlah material <i>piezoelectric</i> terhadap voltase bangkitan dari masing-masing frekuensi gelombang laut . 98
Gambar 4.25	Grafik pengaruh jumlah material <i>piezoelectric</i> terhadap arus listrik bangkitan dari masing-masing frekuensi gelombang laut 100
Gambar 4.26	Grafik pengaruh jumlah material <i>piezoelectric</i> terhadap daya listrik bangkitan dari masing-masing frekuensi gelombang laut 101
Gambar 4.27	<i>Bode diagram</i> voltase bangkitan dengan variasi jumlah material <i>piezoelectric</i> 102
Gambar 4.28	<i>Bode diagram</i> arus listrik bangkitan dengan variasi jumlah material <i>piezoelectric</i> . 104
Gambar 4.29	<i>Bode diagram</i> daya listrik bangkitan dengan variasi jumlah material <i>piezoelectric</i> . 105

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Energi bangkitan, <i>displacement</i> dan kapasitansi pada material <i>piezoelectric</i>	29
Tabel 2.2	Data teknis beberapa jenis material <i>Piezoelectric</i>	34
Tabel 4.1	Spesifikasi bagian-bagian mekanisme <i>ocean wave energy harvester</i> gerak naik-turun.	74
Tabel 4.2	Spesifikasi dimensi material <i>piezoelectric</i>	75
Tabel 4.4	Rekapitulasi nilai RMS voltase, arus, dan daya bangkitan material <i>piezoelectric</i>	93

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan Negara dengan potensi energi laut yang besar. Bentuk geografis dari Negara ini menyebabkan Indonesia mempunyai luas lautan sebesar 5,8 juta km². Sedangkan energi gelombang laut yang dihasilkan mencapai 5 kali suplai listrik Negara yang ada pada tahun 2014. Yaitu mencapai 141,472 MWh/tahun. Energi terbesar dari gelombang laut terdapat pada kawasan laut yang diapit oleh dua pulau atau yang sering disebut dengan selat. Selat yang mempunyai energi gelombang paling tinggi adalah Selat Lombok. Selain Selat Lombok yang mempunyai potensi energi laut yang cukup besar adalah laut di sekitar Pulau Poteran yang berlokasi di bagian tenggara Pulau Madura, Jawa Timur. Potensi energi laut di sekitar Pulau Poteran adalah 0-1300 W/m².

Potensi energi gelombang laut yang sangat besar tersebut perlu dimanfaatkan dengan maksimal, salah satunya adalah dengan menggunakan metode *energy harvesting*. *Energy harvesting* merupakan pemanfaatan energi dari luar yang terbentuk secara alami yang kemudian disimpan dalam skala kecil. Metode-metode yang digunakan untuk *energy harvesting* tersebut ada berbagai macam, salah satunya adalah dengan menggunakan material *piezoelectric*. Material *piezoelectric* adalah pengubah *strain* mekanik menjadi arus listrik dan voltase. Sebagian besar sumber listrik *piezoelectric* menghasilkan daya yang kecil yaitu dalam ukuran miliwatt. Material *piezoelectric* yang paling besar menghasilkan daya adalah *cantilever piezoelectric*. Karena sangat kecilnya daya yang dihasilkan oleh material *piezoelectric* ini, maka dibutuhkan sebuah sistem transmisi untuk menaikkan frekuensi dari gelombang laut agar mendekati frekuensi resonansi dari material *piezoelectric* tersebut.

Maka dari itu perlu dilakukan pemodelan untuk membuat alat *energy harvesting* tersebut agar energi laut yang sangat besar

di sekitar Pulau Poteran tersebut dapat dimanfaatkan dengan baik. pemodelan kali ini dilakukan dalam skala laboratorium untuk selanjutnya dijadikan sebagai referensi pembuatan alat tersebut. Pemodelan kali ini akan memanfaatkan energi kinetik yang dihasilkan oleh simulator gelombang laut, yang kemudian akan ditangkap oleh sebuah pelampung sebagai sebuah massa yang dilengkapi pegas untuk membantu massa tersebut ketika bergerak ke bawah. Gerakan massa tersebut akan dikonversi menjadi gerak putar oleh sebuah pasangan *rack-pinion gear*, dan kemudian putaran tersebut ditingkatkan dengan rasio perbandingan *spur gear*. Dari susunan *gear box* tersebut akan diteruskan ke *blade* yang berputar dan nantinya akan memukul material *piezoelectric*. Pemodelan kali ini dilakukan dengan variasi perbedaan jumlah material *piezoelectric*, frekuensi dan tinggi gelombang.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah disebutkan maka rumusan masalah yang digunakan pada tugas akhir kali ini adalah:

1. Bagaimana memodelkan suatu mekanisme *ocean wave energy harvester* tipe pelampung bola menggunakan metode *cantilever piezoelectric* dengan metode *cantilever piezoelectric*?
2. Bagaimana pengaruh variasi jumlah material *cantilever piezoelectric* terhadap karakteristik energi bangkitan yang dihasilkan oleh mekanisme *vibration energy harvesting* dengan metode *cantilever piezoelectric*?
3. Bagaimana pengaruh variasi frekuensi dan amplitudo gelombang terhadap karakteristik energi bangkitan yang dihasilkan oleh mekanisme *vibration energy harvesting* dengan metode *cantilever piezoelectric*?

1.3 Batasan Masalah

Pada penelitian ini, batasan masalah yang digunakan oleh penulis adalah:

1. Gesekan-gesekan yang terjadi pada mekanisme diabaikan
2. Pegas dianggap memiliki kekakuan yang tetap
3. Gaya gelombang yang terjadi hanya pada arah vertikal
4. Seluruh massa yang bergerak dianggap kaku sehingga tidak ada defleksi masa yang diakibatkan oleh elastisitas
5. Getaran dari luar mekanisme diabaikan
6. Massa poros diabaikan
7. Poros dianggap kaku
8. Pengaruh slip pada gear, poros maupun *blade* diabaikan
9. Perambatan gelombang dianggap seragam
10. Mekanisme diletakkan di tempat *fix*

1.4 Tujuan

Adapun tujuan yang digunakan pada tugas akhir kali ini adalah:

1. Memodelkan suatu mekanisme *vibration energy harvesting* dengan metode *cantilever piezoelectric* dalam skala laboratorium
2. Mengetahui pengaruh variasi jumlah material *cantilever piezoelectric* terhadap karakteristik energi bangkitan yang dihasilkan oleh mekanisme *vibration energy harvesting* dengan metode *cantilever piezoelectric*.
3. Mengetahui pengaruh variasi frekuensi dan amplitudo gelombang terhadap karakteristik energi bangkitan yang dihasilkan oleh mekanisme *vibration energy harvesting* dengan metode *cantilever piezoelectric*.

1.5 Manfaat

Manfaat yang diperoleh dari kegiatan penelitian kali ini antara lain sebagai berikut:

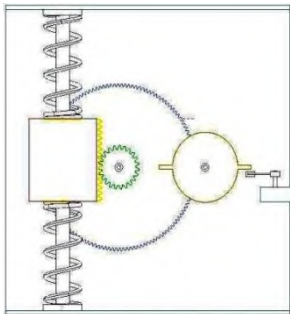
1. Menyediakan sumber energi alternatif untuk masyarakat khususnya di daerah sekitar pantai Pulau Poteran
2. Sebagai referensi untuk penelitian *vibration energy harvesting* gelombang laut selanjutnya

3. Dapat dijadikan sebagai acuan untuk pengembangan *vibration energy harvesting* dalam skala yang lebih besar.

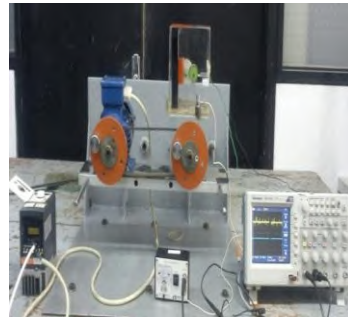
BAB II KAJIAN PUSTAKA

2.1 Kajian Terdahulu

Pada tahun 2015, Gusti Fajar Romano melakukan sebuah penelitian tentang karakteristik voltase bangkitan yang dihasilkan oleh mekanisme *vibration energy harvesting* menggunakan metode *cantilever piezoelectric*. Dalam penelitian kali ini material *piezoelectric* mendapatkan gaya akibat pukulan dari *blade* yang ada pada mekanisme *vibration energy harvesting* tersebut. Mekanisme ini dapat dilihat pada gambar 2.1. Bukan hanya itu, percobaan ini juga dilakukan dengan variasi frekuensi dari sumber getar, sehingga didapatkan grafik hubungan perbandingan pengaruh frekuensi sumber getar terhadap voltase bangkitan yang dapat dilihat pada gambar 2.2. Dari grafik tersebut dapat disimpulkan bahwa semakin semakin besar frekuensi sumber getar, maka semakin besar pula voltase bangkitan yang didapatkan.

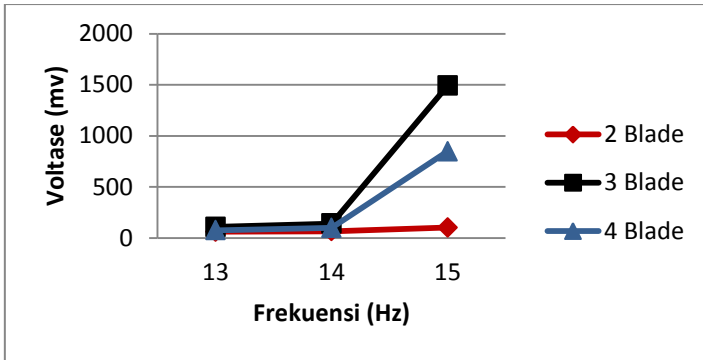


(a)



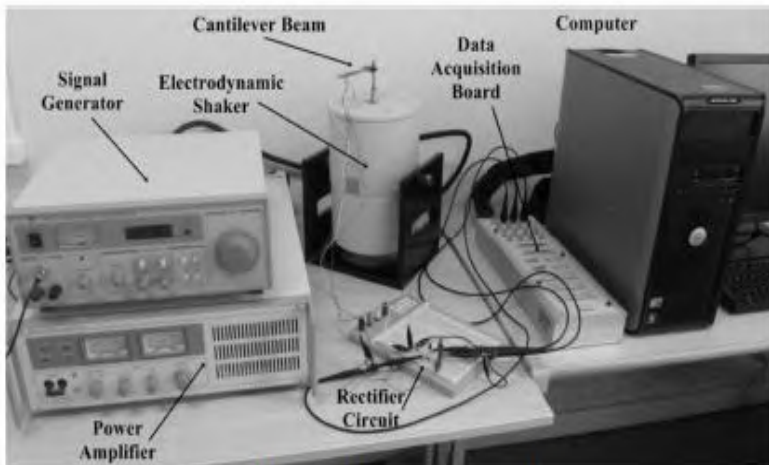
(b)

Gambar 2.1 Mekanisme *vibration energy harvesting*: (a) tampak depan (b) skema pengujian^[11]

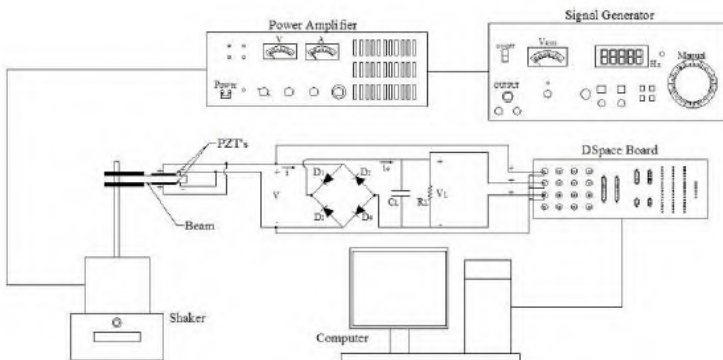


Gambar 2.2 Grafik pengaruh frekuensi terhadap voltase bangkitan^[11]

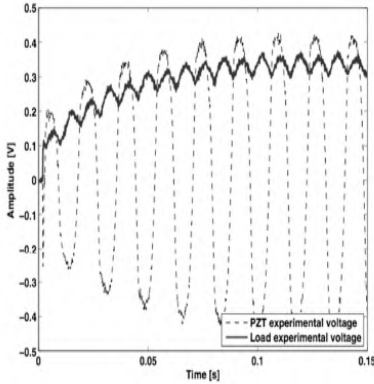
Tahun 2012, Samuel da Silva mengadakan suatu penelitian tentang karakteristik voltase bangkitan dari mekanisme *vibration energy harvesting* menggunakan material *cantilever piezoelectric* dengan variasi besarnya frekuensi eksitasi dari sumber getar. Material *piezoelectric* diletakkan pada sebuah *cantilever beam* dengan posisi frontal yang kemudian diberikan eksitasi getaran yang berasal dari sebuah *electrodynamic shaker*, seperti yang terlihat pada gambar 2.3 dan 2.4. Getaran *shaker* tersebut divariasikan frekuensinya dan kemudian akan diteruskan ke *cantilever beam* yang akan mengakibatkan material *piezoelectric* terdefleksi, dan kemudian menghasilkan voltase bangkitan yang dapat dilihat pada gambar 2.5. Dari gambar tersebut terlihat bahwa dengan semakin besarnya frekuensi sumber getar, maka voltase yang dihasilkan oleh material *piezoelectric* akan semakin besar.



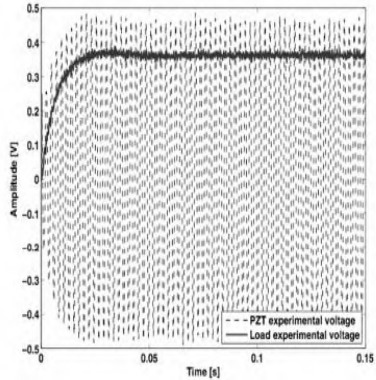
Gambar 2.3 Mekanisme sederhana penelitian *cantilever piezoelectric energy harvesting*^[6]



Gambar 2.4 Skema percobaan *cantilever piezoelectric energy harvesting*^[6]



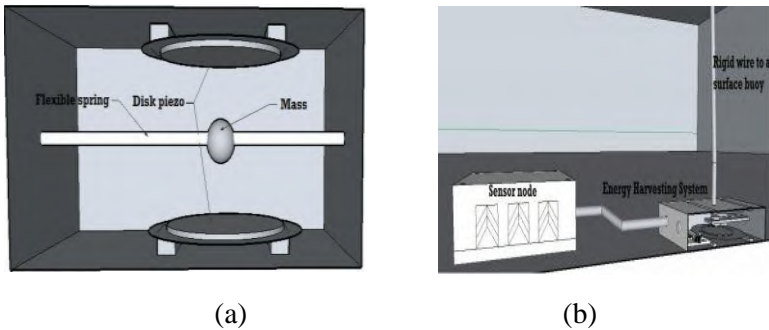
(a)



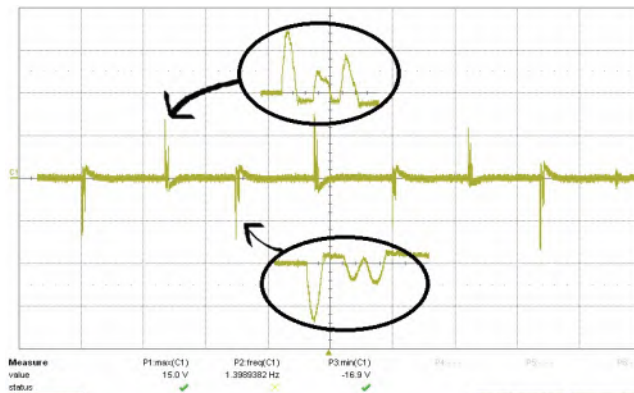
(b)

Gambar 2.5 Grafik voltase bangkitan terhadap waktu : (a) frekuensi 58 Hz (b) frekuensi 437 Hz^[6]

Pada tahun 2008, Carlos Vinolo melakukan pemodelan untuk memanen energi gelombang laut dengan menggunakan metode *piezoelectric* dengan jenis disk. Model pemanen energi gelombang laut ini dilengkapi dengan sebuah massa yang diletakkan pada *flexible spring* yang nantinya akan memberikan gaya pukul terhadap material *piezoelectric*. Sedangkan pemanenan energi gelombang laut dilakukan dengan cara mengaitkan kawat yang kaku ke *flexible spring* dan dihubungkan dengan pelampung yang ada di permukaan laut yang nantinya akan mengikuti profil gelombang laut. Sehingga menyebabkan *flexible spring* menjadi bergetar dan mengakibatkan material *piezoelectric* terpukul oleh massa yang terikat pada *flexible spring*. Hasil dari pemodelan mekanisme ini didapatkan output sebesar 16 V setiap pukulan massa terhadap *piezoelectric* pada frekuensi gelombang laut 1.4 Hz. Mekanisme pemodelan dapat dilihat pada gambar 2.6. Dan hasil dari pemodelan dapat dilihat pada gambar 2.7.



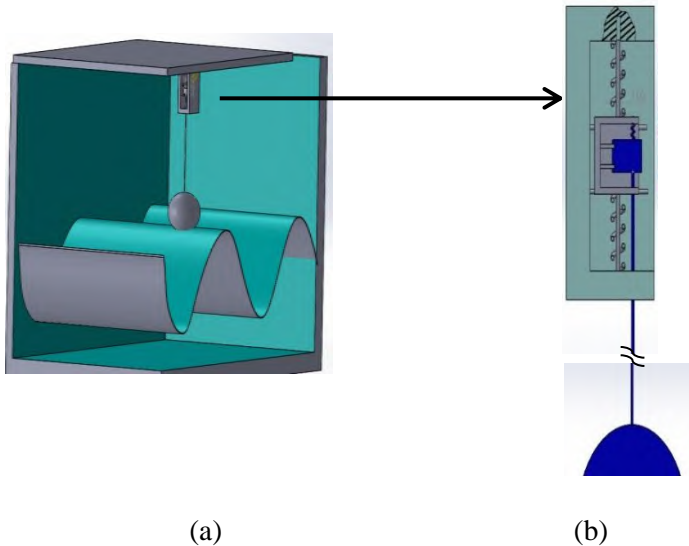
Gambar 2.6 (a) Skema mekanisme, (b) Skema dari aplikasi penelitian^[14]



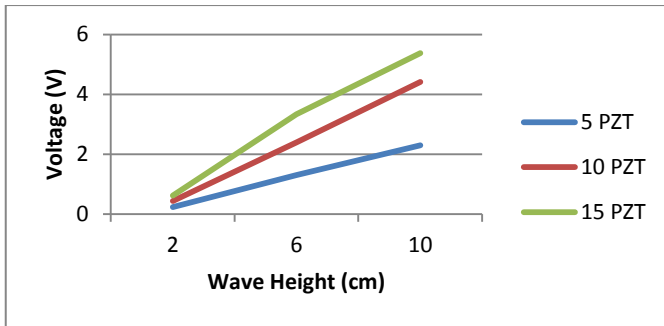
Gambar 2.7 Hasil dari pemodelan mekanisme penelitian^[14]

Pada tahun 2015, Yabes David Losong mengadakan suatu pemodelan untuk menganalisa voltase bangkitan yang akan dihasilkan oleh Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut (PLTGL) dengan tipe pelampung-*piezoelectric*. Pemodelan ini dilakukan dengan memvariasikan jumlah material *piezoelectric*, frekuensi gelombang laut, dan amplitudo gelombang laut.

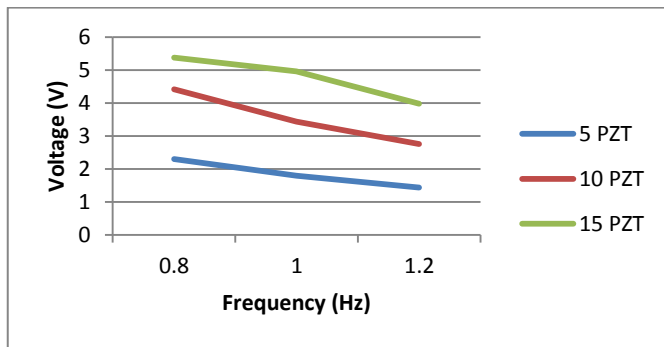
Gelombang laut pada pemodelan ini akan ditangkap oleh pelampung yang nantinya akan diteruskan ke massa pada mekanisme PLTGL dan akan mengakibatkan material *piezoelectric* terdefleksi dan menghasilkan voltase bangkitan. Pemodelan mekanisme ini dapat dilihat pada gambar 2.8. Hasil dari pemodelan ini adalah dengan semakin besarnya amplitudo, dan semakin banyaknya jumlah material *piezoelectric*, maka voltase bangkitan yang dihasilkan akan semakin besar. Akan tetapi dengan semakin besar frekuensi maka voltase yang dihasilkan akan semakin menurun, karena nilai frekuensi berbanding terbalik dengan gaya gelombang. Hasil pemodelan ini dapat dilihat pada gambar 2.9.



Gambar 2.8 Permodelan Mekanisme (a). pada kolam, dan (b) tampak 3D^[5]



(a)



(b)

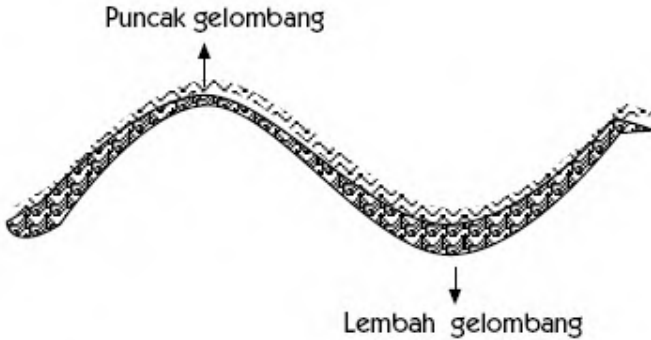
Gambar 2.9 Grafik voltase bangkitan terhadap: (a) variasi tinggi gelombang dan jumlah PZT (b) variasi frekuensi gelombang dan jumlah PZT^[5]

2.2 Dasar Teori Gelombang Laut

2.2.1 Pengertian gelombang laut

Gelombang laut merupakan energi dalam transisi yang terbawa oleh sifat aslinya. Gelombang laut terjadi apabila ada dua massa benda yang berbeda kerapatannya (densitasnya) bergesekan satu sama lain, maka pada bidang gerakannya akan terbentuk gelombang. Gelombang laut merupakan naik turunnya

air laut. Hal ini seperti ditunjukkan pada gambar 2.10 di bawah ini.



Gambar 2.10 Pergerakan air laut^[13]

Proses terbentuknya pembangkitan gelombang laut oleh gerakan angin belum sepenuhnya dapat dimengerti, atau dapat dijelaskan secara terperinci. Tetapi menurut perkiraan, gelombang terjadi karena hembusan angin secara teratur, terus-menerus di atas permukaan air laut. Hembusan angin yang akan membentuk riak permukaan, yang bergerak searah dengan hembusan angin seperti pada gambar 2.11.



Gambar 2.11 Proses pembentukan gelombang akibat angin^[13]

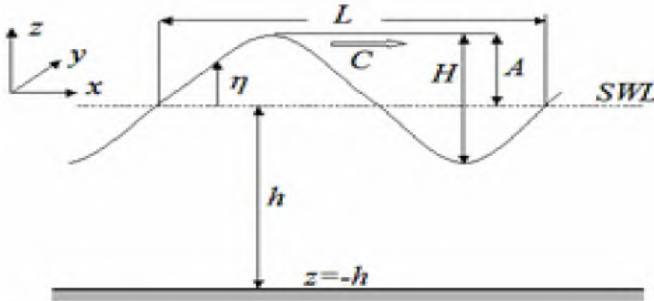
Sebuah gelombang terdiri dari beberapa bagian antara lain:

- a. Puncak gelombang (*Crest*) adalah titik tertinggi dari sebuah gelombang.
- b. Lembah gelombang (*Trough*) adalah titik terendah gelombang, diantara dua puncak gelombang.
- c. Panjang gelombang (*Wave Length*) adalah jarak mendatar antara dua puncak gelombang atau antara dua lembah gelombang.
- d. Tinggi gelombang (*Wave Height*) adalah jarak tegak antara puncak dan lembah gelombang.
- e. Periode gelombang (*Wave Period*) adalah waktu yang diperlukan oleh dua puncak gelombang yang berurutan untuk melalui satu titik.

Bhat(1978), Garison(1993), dan Gross(1993) mengemukakan bahwa ada 4 bentuk besaran yang berkaitan dengan gelombang, yakni:

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

Sebagai dasar penentuan spektrum (kandungan energi gelombang), diperlukan beberapa istilah/ukuran gelombang ditunjukkan pada gambar 2.12.

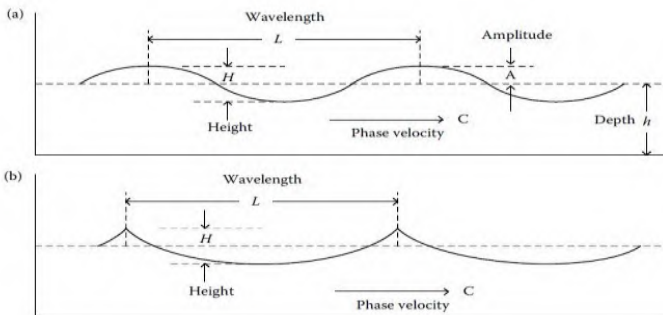
Gambar 2.12 Sketsa gelombang laut^[13]

2.2.2 Analisa gaya pada gelombang laut

Energi gelombang laut memberikan 15-20 kali lebih banyak tersedia per meter persegi dari angin ataupun matahari. Energi gelombang total adalah jumlah dari energi kinetik dan energi potensial. Total energi potensial dan energi kinetik dapat dirumuskan:

$$E_{density} = \rho_{water} \cdot g \cdot \frac{H^2}{8} = \rho_{water} \cdot g \cdot \frac{A^2}{2}$$

$$P_{density} = \frac{E_{density}}{T} = \rho_{water} \cdot g \cdot \frac{H^2}{8T} = \rho_{water} \cdot g \cdot \frac{A^2}{2T}$$

Gambar 2.13 Karakteristik gelombang^[13]

$$E = \frac{1}{2} \rho g A^2$$

dengan:

- E = Energi potensial (joule)
- g = Percepatan gravitasi (9,8 m/s²)
- ρ = Densitas air (1000 kg/m³)
- A = Amplitudo gelombang (m)

Untuk mendapatkan rata-rata energi atau daya dari periode gelombang, energi E dikalikan dengan kecepatan rambat gelombang (v_g).

$$v_g = \frac{L}{2T}$$

Dengan keterangan T adalah periode gelombang dalam detik dan L adalah panjang gelombang dalam satuan meter.

$$v_g = \frac{1}{2} \rho g A^2 \frac{L}{2T}$$

Jika panjang gelombang dan periode gelombang dihubungkan, sehingga didapatkan:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi}$$

Sehingga didapatkan:

$$P_w = \frac{\rho g A^2 T}{8\pi}$$

$$P_w = \frac{\rho g^2 (\eta_{(x,t)})^2 T}{8\pi}$$

$$P_w = \frac{\rho g^2}{8\pi} \left(\frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t) \right)^2 T$$

$$P_w = \frac{\rho g^2 H^2 T}{32\pi} (\cos(kx - \sigma t))^2$$

dengan:

$$k = \frac{2\pi}{L}$$

$$\sigma = \frac{2\pi}{T}$$

Dengan trigonometri maka persamaan 2.7 dapat diuraikan sebagai berikut:

$$P_w = \frac{\rho g^2 \cdot H^2 \cdot T}{32\pi} \left(\cos \frac{2\pi t}{T} \right)^2$$

Dari persamaan 2.10 di atas, dapat diketahui gaya gelombang yang dikonversikan oleh mekanisme pelampung dengan rumusan sebagai berikut:

$$F_{wave} = \frac{P_{wave}}{C_g}$$

Dengan $C_g = 2\frac{\lambda}{T}$, maka persamaan 2.11 akan menjadi:

$$F_w = \frac{\rho g^2 \cdot H^2 \cdot T^2}{64\pi\lambda} \left(\cos \frac{2\pi t}{T} \right)^2$$

dengan:

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi}$$

Maka persamaan 2.12 akan menjadi:

$$F_w = \frac{\rho g \cdot H^2}{32} \left(\cos \frac{2\pi t}{T} \right)^2$$

Keterangan:

g = Percepatan gravitasi (9,8 m/s²)

ρ = Densitas air (1000 kg/m³)

A = Amplitudo gelombang (m)

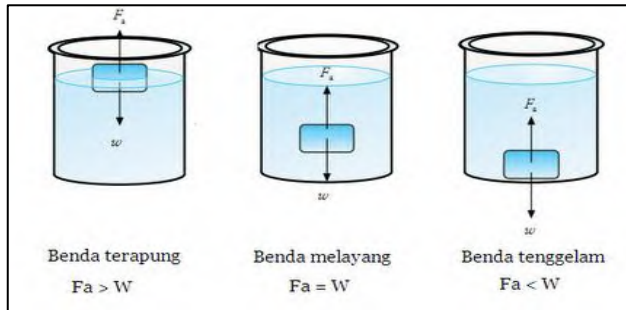
λ = Panjang gelombang (m)

T = Periode gelombang (m)

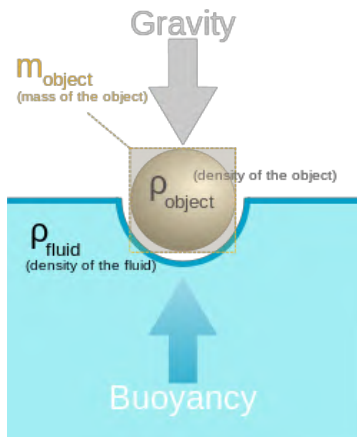
2.2.3 Gaya apung (Buoyancy force)

Gaya apung atau *buoyancy force* (F_b), yaitu gaya tekan keatas pada suatu benda yang mengapung sama dengan berat air yang dipindahkan atau yang sering disebut dengan hukum

archimedes. Gaya *buoyancy* selalu sama dengan berat fluida yang dipindahkan. Ilustrasi ini dapat dilihat pada gambar 2.14.



Gambar 2.14 (a) Benda terapung (b) Benda melayang (c) Benda tenggelam^[13]



Gambar 2.15 Analisa gaya yang dihasilkan pelampung^[13]

$$F_b = \rho_{fluida} \cdot V_{benda} \cdot g$$

dengan:

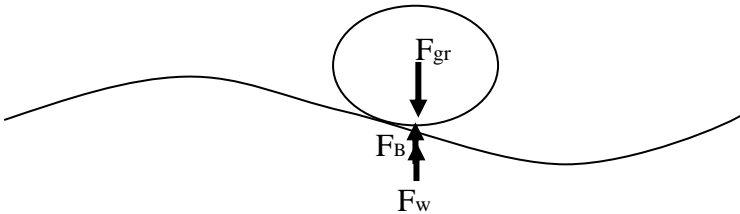
ρ = Berat jenis air (kg/m^3)

V = Volume benda tenggelam (m^3)

g = Gaya gravitasi (m/s^2)

2.2.4 Gaya generated

Gaya yang dihasilkan ($F_{generated}$) merupakan resultan gaya yang dihasilkan oleh gelombang laut untuk dapat menggerakkan pelampung dan diteruskan ke roda gigi untuk selanjutnya diteruskan ke *blade* pemukul. FBD pelampung dapat terlihat pada gambar 2.16.



Gambar 2.16 Gaya-gaya yang bekerja pada pelampung^[13]

$$F_g = (F_w + F_b) - F_{gravitasi} [F_w + (\rho_{fluida} \cdot V_{benda} \cdot g)] - m \cdot g$$

dengan:

- F_g : gaya yang ditransfer oleh gelombang
- F_w : gaya yang dihasilkan oleh gelombang
- F_b : gaya apung pelampung
- $F_{gravitasi}$: gaya berat yang diterima sistem penangkap gelombang

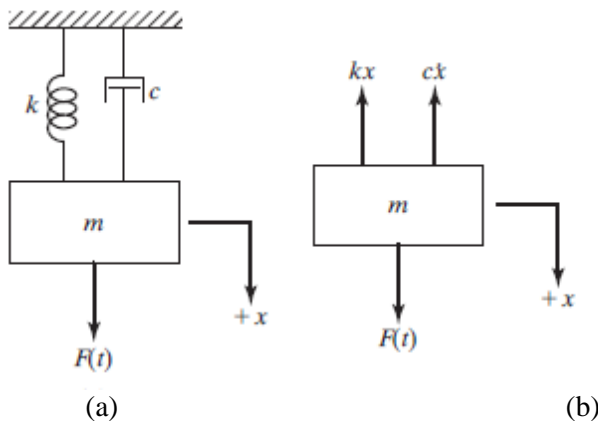
2.3 Dasar Teori Mekanika Getaran

2.3.1 Pengertian getaran

Secara umum getaran dapat didefinisikan dengan suatu gerak bolak-balik di sekitar kesetimbangan. Kesetimbangan itu sendiri maksudnya adalah keadaan di mana suatu benda berada pada posisi diam jika tidak ada gaya yang bekerja pada benda tersebut. Getaran mempunyai amplitudo (jarak simpangan terjauh dengan titik tengah) yang sama.

2.3.2 Getaran sistem 1 d.o.f dengan eksitasi gaya harmonik

Getaran dengan eksitasi gaya harmonik juga bisa disebut dengan getaran paksa. Getaran paksa bias terjadi apabila gaya eksternal diberikan ke sistem sehingga sistem juga menghasilkan respons yang disebut dengan respons harmonik. Getaran paksa dapat dimodelkan secara sederhana pada gambar 2.16.



Gambar 2.17 (a) Model sederhana gerak harmonik yang dipengaruhi oleh eksitasi gaya harmonik (b) *free body diagram*^[12]

Gaya harmonik yang diberikan ke sistem dapat berbentuk:

$$F(t) = F_o e^{i(\omega t + \Phi)}$$

atau,

$$F(t) = F_o \cos(\omega t + \Phi)$$

atau,

$$F(t) = F_o \sin(\omega t + \Phi)$$

Dari gambar 2.17(b) tersebut dapat diperoleh persamaan gerak harmonik suatu benda akibat pengaruh eksitasi harmonik sebagai berikut:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t)$$

Jika $F(t) = F_o \cos(\omega t + \Phi)$, maka persamaan 2.19 akan menjadi:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_o \cos(\omega t + \Phi)$$

Penyelesaian homogen dari persamaan gerak (2.20) adalah:

$$x_h(t) = C_1 \cos \omega_n t + C_2 \sin \omega_n t$$

dengan $\omega_n = (k/m)^{0.5}$ adalah frekuensi natural sistem.

Karena gaya eksitasi $F(t)$ adalah harmonik, maka penyelesaian partikular dari persamaan (2.20) juga harmonik, dengan frekuensi yang sama dengan eksitasi yaitu ω . Sehingga dapat diasumsikan:

$$x_p(t) = X \cos \omega t$$

dengan X adalah konstanta yang menyatakan amplitudo maksimum dari $x_p(t)$. Substitusi persamaan (2.22) tersebut ke persamaan (2.20) memberikan:

$$X = \frac{F_o}{k - m\omega^2}$$

dengan demikian penyelesaian lengkap dari persamaan gerak (2.20) adalah:

$$x(t) = C_1 \cos \omega_n t + C_2 \sin \omega_n t + \frac{F_o}{k - m\omega^2} \cos \omega t$$

dengan kondisi awal adalah:

$$x(t=0) = x_o, \text{ dan } \dot{x}(t=0) = \dot{x}_o$$

Maka,

$$C_1 = x_o - \frac{F_o}{k - m\omega^2}$$

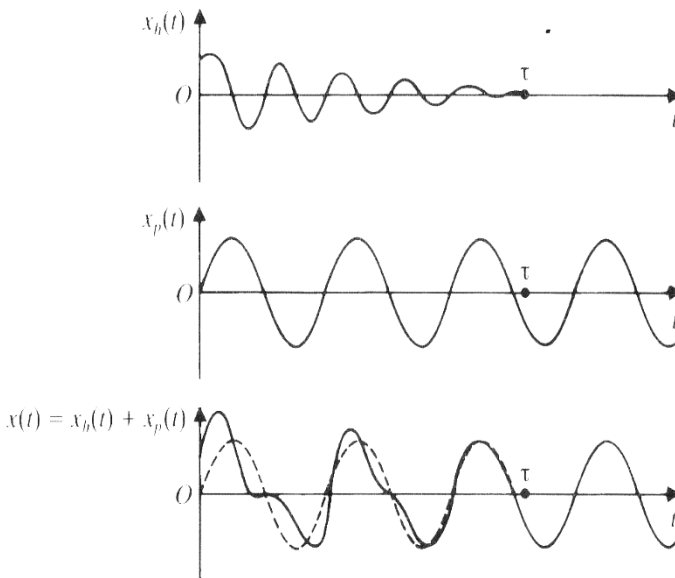
dan

$$C_2 = \frac{\dot{x}_o}{\omega_n}$$

maka substitusi persamaan 2.25 dan 2.26 ke persamaan 2.24 sehingga menjadi:

$$x(t) = \left(x_o - \frac{F_o}{k - m\omega^2} \right) \cos \omega_n t + \frac{\dot{x}_o}{\omega_n} \sin \omega_n t + \left(\frac{F_o}{k - m\omega^2} \right) \cos \omega t$$

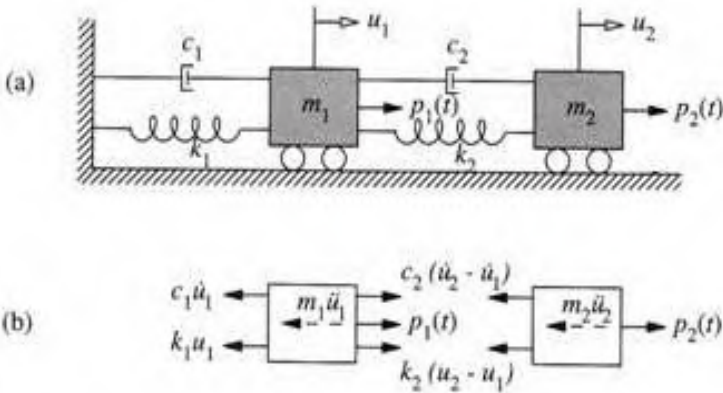
Dari persamaan 2.27 dapat dibuat grafik respons sistem terhadap waktu seperti pada gambar 2.17 di bawah ini:



Gambar 2.18 Respons sistem akibat eksitasi harmonik^[12]

2.3.3 Getaran multi d.o.f

Persamaan gerak untuk *Multi Degree of Freedom* (M.D.O.F) sederhana, dapat diidealisasikan pada sistem massa-pegas-redaman yang ditarik oleh gaya $P_1(t)$ dan $P_2(t)$ pada gambar 2.18 berikut.



Gambar 2.19 (a) Sistem berderajat dua, (b) *free body diagram*^[1]

Dari gambar 2.19(b) di atas, maka akan didapatkan persamaan gerak dengan menggunakan Hukum Newton kedua yang diberikan untuk setiap massa.

$$m_j \ddot{u}_j + f_{Dj} + f_{Sj} = p_j(t)$$

Persamaan 2.28 di atas terdiri dari $j=1$ dan $j=2$ sehingga dapat ditulis dalam bentuk matriks:

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} f_{D1} \\ f_{D2} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} f_{S1} \\ f_{S2} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} p_1(t) \\ p_2(t) \end{Bmatrix}$$

dengan:

$$f_{S1} = k_1 u_1 + k_2 (u_1 - u_2)$$

$$f_{d1} = c_1 \dot{u}_1 + c_2 (\dot{u}_1 - \dot{u}_2)$$

dan,

$$f_{s2} = k_2(u_2 - u_1)$$

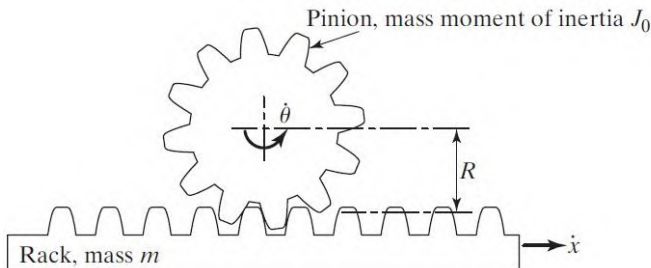
$$f_{d2} = c_2(\dot{u}_2 - \dot{u}_1)$$

Dengan menyubstitusikan persamaan 3.30 dan 3.31 ke persamaan 3.29, maka akan didapatkan:

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} p_1(t) \\ p_2(t) \end{Bmatrix}$$

2.3.4 Hubungan gerak rotasi dan translasi

Gerak translasi dapat diartikan sebagai gerak pergeseran suatu benda dengan bentuk dan lintasan yang sama, sedangkan gerak rotasi adalah gerak perputaran benda terhadap sumbu atau porosnya. Dalam suatu mekanisme biasanya memiliki salah satu atau kedua gerak ini. *Rack-pinion* (gambar 2.19) merupakan contoh suatu bagian dari mekanisme yang mengonversikan dari gerak translasi menjadi gerak rotasi, atau sebaliknya.



Gambar 2.20 Gerak translasi dan rotasi pada *rack* dan *pinion*^[12]

Dari gambar di atas dapat dijabarkan rumusan massa ekuivalen antara gerak translasi dan rotasi dari *rack* dan *pinion* melalui persamaan energi kinetik, rumusannya sebagai berikut:

$$E_k = \frac{1}{2}m\dot{x}^2 + \frac{1}{2}J_0\dot{\theta}^2$$

dan energi kinetik ekuivalen dapat dirumuskan seperti :

$$E_{k_{eq}} = \frac{1}{2}m_{eq}\dot{x}_{eq}^2$$

sedangkan, $\dot{x}_{eq} = \dot{x}$ dan $\dot{\theta} = \frac{\dot{x}}{R}$

maka,

$$\frac{1}{2}m_{eq}\dot{x}^2 = \frac{1}{2}m\dot{x}^2 + \frac{1}{2}J_0\left(\frac{\dot{x}}{R}\right)^2$$

sehingga, massa ekuivalen pada gerak translasi adalah sebagai berikut:

$$m_{eq} = m + \frac{J_0}{R^2}$$

dan massa ekuivalen pada gerak rotasi adalah sebagai berikut:

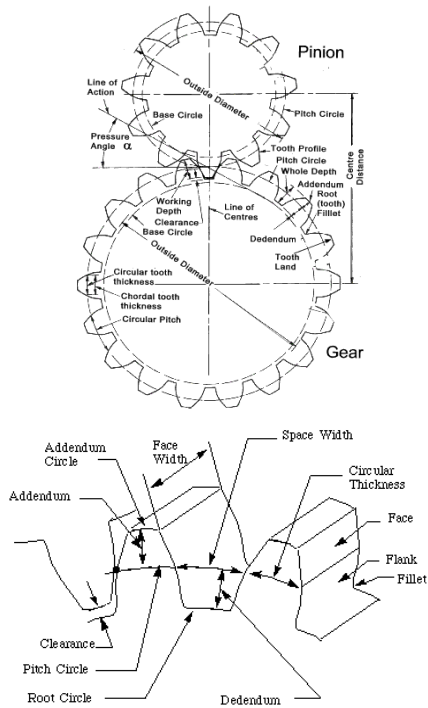
$$J_{eq} = J_0 + mR^2$$

2.4 Gearbox

Gearbox adalah satu komponen utama motor yang disebut sebagai pemindah tenaga yang mempunyai beberapa fungsi antara lain:

- 1 Mengubah momen yang akan diteruskan ke mesin
- 2 Menyediakan rasio gigi yang sesuai dengan beban mesin
- 3 Menghasilkan putaran mesin tanpa slip.

Dalam fungsinya untuk menyediakan rasio gigi yang sesuai dengan beban mesin, ada berbagai macam jenis *gear*, salah satunya adalah roda gigi lurus (*spur gear*). *Spur gear* adalah salah satu jenis *gear* yang digunakan untuk mentransmisikan daya dan gerak pada dua poros yang paralel. Setiap pasang *spur gear*, *gear* yang kecil disebut *pinion* (berfungsi sebagai penggerak), sedangkan yang besar disebut *gear* (yang digerakkan). Ilustrasi roda gigi lurus dapat dilihat pada gambar 2.21 berikut:



Gambar 2.21 Roda gigi lurus (*spur gear*) [12]

Persamaan *spur gear* yang sering digunakan adalah:

$$P = \frac{Nt}{d} = \frac{\pi d}{Nt}$$

Sehingga:

$$Pxp = \pi$$

dengan:

p : circular pitch

P : diametral pitch

N_t : jumlah gigi pada roda gigi

Center of Distance

Center of distance adalah jarak titik pusat sepasang roda gigi yang nilainya sama dengan setengah dari jumlah diameter-diameter *pitch*-nya.

$$c = \frac{dp + dg}{2}$$

dengan:

c : jarak pusat 2 poros sepasang roda gigi

dp : diameter *pinion*

dg : diameter *gear*

Velocity Ratio

Persamaan dari *velocity ratio* adalah:

$$i = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{Nt_2}{Nt_1} = \frac{d_2}{d_1}$$

dengan:

i : *velocity ratio*

Nt : jumlah gigi

ω : kecepatan sudut

d : diameter *pitch circle*

n : kecepatan keliling

2.5 Dasar Teori Material *Piezoelectric*

2.5.1 Pengertian dan efek *piezoelectric*

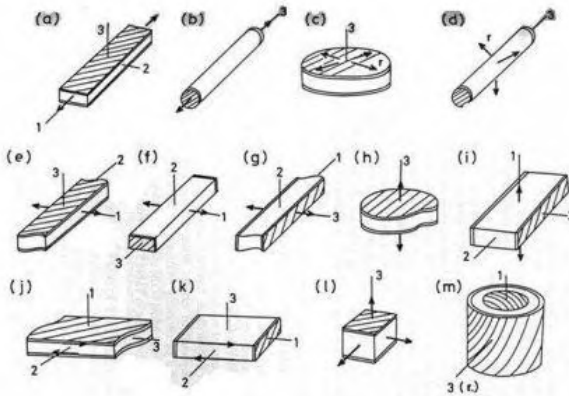
Piezoelectric adalah suatu material yang biasanya terbuat dari Kristal batuan, keramik, termasuk tulang dan polimer yang memiliki kemampuan untuk membangkitkan potensial listrik. Potensial listrik ini merupakan respons dari tegangan yang diberikan pada material *piezoelectric* tersebut. Kata *piezo* berasal

dari bahasa Yunani *piezo* atau *piezein* yang berarti memeras atau menekan. Piezoelektrisitas adalah sebuah fenomena saat sebuah gaya yang diterapkan pada suatu segmen bahan menimbulkan muatan listrik pada permukaan segmen bahan tersebut yang disebabkan oleh adanya distribusi muatan listrik pada sel-sel kristal. Nilai koefisien muatan piezoelektrik berada pada rentang 1–100 pico coulomb/Newton. Material *piezoelectric* dibagi menjadi 3 jenis yaitu:

- Kristal, seperti Quartz (SiO_2), Gallium Orthophosphate (GaPO_4)
- Keramik, seperti Barium Titanate (BaTiO_3), Lead Zirconate Titanate (PZT)
- Polimer, seperti Polyvinylidene Difluoride (PVDF)

Efek piezoelektrik terjadi jika medan listrik terbentuk ketika material dikenai tekanan mekanik. Pada saat medan listrik melewati material, molekul yang terpolarisasi akan menyesuaikan dengan medan listrik, dihasilkan dipole yang terinduksi dengan molekul atau struktur kristal materi. Penyesuaian molekul akan mengakibatkan material berubah dimensi. Fenomena tersebut dikenal dengan *electrostriction*.

Setiap material *piezoelectric* memiliki karakteristik yang berbeda-beda tergantung dari bentuk, pemanfaatan, sifat mekanik, energi yang dihasilkan, komposisi material, dan faktor lain yang mempengaruhi kinerjanya. Beberapa bentuk dan macam-macam dari *piezoelectric* dapat dilihat pada gambar 2.22.



Gambar 2.22 Beberapa contoh bentuk *piezoelectric*^[4]

Sedangkan voltase bangkitan yang dihasilkan oleh material *piezoelectric* disebabkan oleh adanya muatan yang berbeda-beda antar partikel dalam *piezoelectric* itu sendiri. Dan ketika material *piezoelectric* tersebut dikenai gaya eksternal atau mengalami defleksi, hal ini menyebabkan jarak antar partikel tersebut berubah. Karena perubahan jarak antar partikel tersebut menyebabkan munculnya beda tegangan yang disebut dengan *Pull-in Voltage*. Besar dari *Pull-in Voltage* dipengaruhi oleh besarnya energi mekanik yang diterima material *piezoelectric*, jenis material, dan kapasitansi material. Beberapa karakteristik energi bangkitan dari material *piezoelectric* dapat dirumuskan dengan:

Tabel 2.1 Energi bangkitan, *displacement* dan kapasitansi pada material *piezoelectric*^[4]

Action Mode (L , length; W , width; T , thickness; D , diameter)	Generated Voltage, V	Displacement, ΔL (ΔT)	Capacitance, C
Transverse length mode: $L > 3W > 3T$	$V = \frac{g_{31}}{W} F$	$\Delta l = \frac{d_{31}}{T} L V$	$C = \frac{\epsilon_1^T L W}{T}$
Thickness extension mode: $D > 5T$	$V = \frac{4Tg_{33}}{\pi D^2} F$	$\Delta T = d_{33} V$	$C = \frac{\pi \epsilon_3^T D^2}{4l}$
Radial mode: $D > 5T$	Not applied	$\Delta D = \frac{d_{31} D}{T} V$	$C = \frac{\pi}{4} K_1^T \epsilon_0 \frac{D^2}{T}$
Longitudinal mode: $L > 3D$	$V = \frac{4L}{\pi D^2} g_{33} F$	$\Delta L = d_{33} V$	$C = \frac{\pi D^2}{4L} K_1^T \epsilon_0$
Thickness shear mode: $W > 5T, L > 5T$	$V = \frac{g_{15}}{W} F$	$\Delta x = d_{15} V$	$C = \frac{LW}{T} K_1^T \epsilon_0$

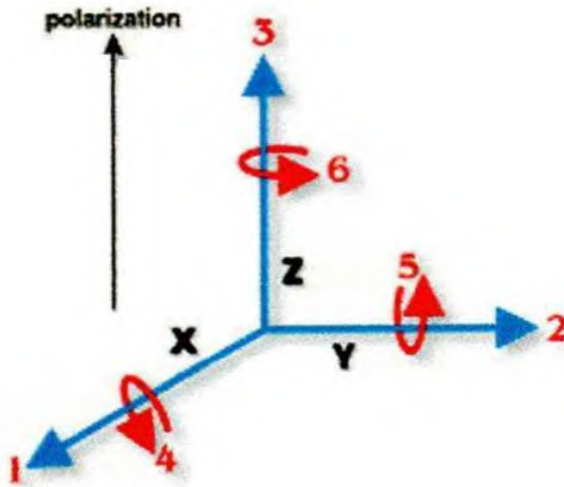
Note: F is the force and ϵ_3^T is dielectric permittivity of the material at constant stress in direction 3, K_1^T is relative dielectric constant ($K_1^T = \epsilon_1^T / \epsilon_0$), and ϵ_0 is dielectric permittivity in vacuum.

2.5.2 Konstanta *Piezoelectric*

Keramik *piezoelectric* merupakan material yang *anisotropic*. Untuk itu diperlukan konstanta fisik yang dapat menyatakan hubungan antara arah gaya mekanik dan gaya listrik yang diberikan atau dihasilkan. Hubungan tersebut tergantung dari sifat keramik *piezoelectric*, ukuran dan bentuk elemen, serta arah dari eksitasi mekanik atau elektrik.

Identifikasi arah pada elemen *piezoceramic* mengacu pada 3 sumbu yang analog dengan sumbu X, Y dan Z pada sistem sumbu ortogonal. Untuk gaya/tegangan normal ketiga sumbu yang bersesuaian dengan sumbu X, Y, Z dinotasikan sebagai 1, 2, dan 3. Sedangkan untuk gaya / tegangan geser, ketiga sumbu koordinat tersebut direpresentasikan oleh *subscript* 4, 5, dan 6. Pada umumnya polarisasi keramik ditentukan sejajar dengan sumbu 3, yang mana arah polarisasi tersebut ditetapkan selama proses produksi untuk mengaktifkan material.

Pendefinisian konstanta *piezoelectric* biasanya ditandai dengan dua buah *subscript*. *Subscript* pertama menyatakan arah medan listrik yang berhubungan dengan voltase atau arus listrik yang diberikan atau yang dihasilkan, yaitu sumbu 3. Sedangkan *subscript* kedua menyatakan arah tegangan atau regangan mekanik, yang dalam hal ini merupakan arah yang searah dengan serat material atau arah yang tegak lurus terhadap bidang yang dibentuk oleh sumbu 3 dan sumbu yang searah dengan serat material.



Gambar 2.23 Definisi arah pada elemen *piezoelectric*^[4]

Beberapa definisi tentang konstanta beserta persamaan yang sering digunakan dipaparkan pada uraian berikut.

a) *Piezoelectric Charge Constant*

Piezoelectric charge constant, d, adalah polarisasi yang dibangkitkan per-unit tegangan mekanik yang diaplikasikan pada material *piezoelectric*, atau regangan mekanik yang terjadi pada material *piezoelectric* per-unit medan listrik yang diberikan. Sebagai contohnya,

d_{31} : polarisasi yang terinduksi pada arah 3 (paralel terhadap arah polarisasi elemen) per-unit tegangan normal yang diberikan pada arah 1 per-unit medan listrik yang diberikan pada arah 3

d_{33} : polarisasi yang terinduksi pada arah 3 (paralel terhadap arah polarisasi elemen) per-unit tegangan normal yang diberikan pada arah 3, atau regangan normal yang diberikan pada arah 3 per-unit medan listrik yang diberikan pada arah 3

d_{15} ; polarisasi yang terinduksi pada arah 1 (tegak lurus terhadap arah polarisasi elemen) per-unit tegangan geser yang diberikan pada arah 2 (tegak lurus terhadap arah polarisasi elemen) atau regangan geser yang terjadi dalam arah 2 per-unit medan listrik yang diberikan pada arah 1

b) Piezoelectric Voltage Constant

Piezoelectric voltage constant, g, adalah medan listrik yang dibangkitkan oleh material *piezoelectric* per-unit tegangan mekanik yang diberikan, atau regangan mekanik yang ditunjukkan oleh material *piezoelectric* per-unit perpindahan listrik yang diberikan. Sebagai contohnya,

g_{31} : medan listrik yang terinduksi pada arah 3 (paralel terhadap arah polarisasi elemen) per unit tegangan normal yang diberikan pada arah 1, atau regangan yang terjadi dalam arah 1 per-unit perpindahan listrik yang diberikan pada arah 3

g_{33} : medan listrik yang terinduksi pada arah 3 (paralel terhadap arah polarisasi elemen) per-unit tegangan normal yang diberikan pada arah 3, atau regangan yang terjadi dalam arah 3 per-unit perpindahan listrik yang diberikan pada arah 3

g_{15} : medan listrik yang terinduksi pada arah 1 (tegak lurus terhadap arah polarisasi elemen) per-unit tegangan geser yang diberikan pada arah 2 (tegak lurus terhadap arah polarisasi elemen) atau regangan geser yang terjadi dalam arah 2 per-unit perpindahan listrik yang diberikan pada arah 1

c) Electro Mechanical Factor

Electromechanical coupling factor, k, merupakan indikator efektivitas material *piezoelectric* dalam mengubah energi listrik ke energi mekanik atau mengubah energi mekanik ke energi listrik. k disertai dua buah *subscript*, dimana dalam hal *direct effect subscript* pertama menunjukkan arah energi listrik

yang dihasilkan dan *subscript* kedua menunjukkan arah dari energi mekanik yang diberikan.

Nilai k tergantung pada spesifikasi yang diberikan oleh *supplier* keramik, yang merupakan nilai maksimum secara teoritis. Pada frekuensi rendah, elemen *piezoelectric* keramik tertentu dapat mengubah 30%-75% dari energi yang diberikan padanya ke bentuk lain; tergantung pada komposisi material *piezoelectric* dan arah pembebanan yang diberikan. Nilai k tinggi, yang mencerminkan efisiensi konversi energi, pada umumnya tidak memperhitungkan *dielectric losses* atau *mechanical losses*. Ketelitian pengukuran efisiensi ditentukan berdasar pada rasio konversi energi, yaitu energi yang dapat dihasilkan oleh elemen *piezoelectric* terhadap total energi yang diberikan pada elemen. Berdasar pada pengukuran tersebut, elemen *piezoelectric* dengan desain sistem yang baik dapat menghasilkan efisiensi mencapai 90%.

Perlu diperhatikan bahwa dimensi dari elemen keramik mempengaruhi persamaan k yang digunakan. Misalnya, untuk keramik *piezoelectric* berbentuk piringan tipis (*thin disc*) dikenal adanya *planar coupling factor*, k_p , yang menyatakan hubungan antara medan listrik yang paralel terhadap arah polarisasi elemen keramik (arah 3) dengan efek mekanik yang menghasilkan getaran radial relatif terhadap arah polarisasi (arah 1 dan arah 2). Selain itu ada *thickness coupling factor*, k_t , yang merupakan persamaan khusus untuk k_{33} , yang menyatakan hubungan antara medan listrik arah 3 dengan getaran mekanik pada arah yang sama. Faktor k_t tersebut dikenal pula pada pelat *piezoelectric* yang memiliki dimensi permukaan yang relatif lebih besar dibandingkan dengan dimensi tebal. Elemen *piezoelectric* dengan bentuk ini memiliki frekuensi resonansi pada arah ketebalan yang lebih tinggi nilainya dibandingkan dengan frekuensi resonansi pada arah transversal (permukaan). Faktor k_t lebih rendah daripada k_{33} , karena adanya kontraksi atau ekspansi pada tebal elemen sebagai akibat terjadinya getaran transversal dengan amplitudo besar pada frekuensi resonansi.

Pada batang keramik langsing (*thin rod*, panjang $> 10 \times$ diameter) digunakan k_{31} untuk menyatakan faktor hubungan antara medan listrik pada arah 3 dengan getaran longitudinal pada arah 1, atau digunakan k_{33} untuk menyatakan faktor hubungan antara medan listrik pada arah 3 dengan getaran longitudinal pada arah 3.

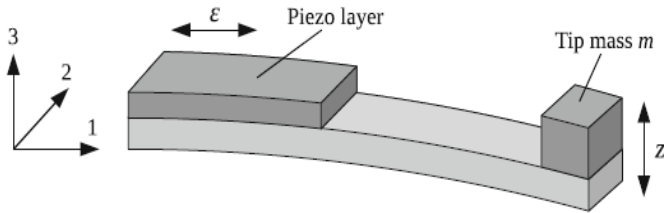
Di bawah ini terdapat tabel dari koefisien-koefisien *piezoelectric*

Tabel 2.2 Data teknis beberapa jenis material *piezoelectric*^[4]

Property	Units	PVDF Film	PZT	BaTiO3
<i>Density</i>	10^3 kg/m^3	1.78	7.5	5.7
<i>Relative Permittivity</i>	ϵ/ϵ_0	12	1200	1700
d_{31} Constant	$(10^{-12}) \text{ C/N}$	23	110	78
g_{31} Constant	$(10^{-3}) \text{ Vm/N}$	216	10	5
k_{31} Constant	1 Khz	12	30	21
<i>Acoustic Impedance</i>	$(10^6) \text{ kg/m}^2\text{-sec}$	27	30	30

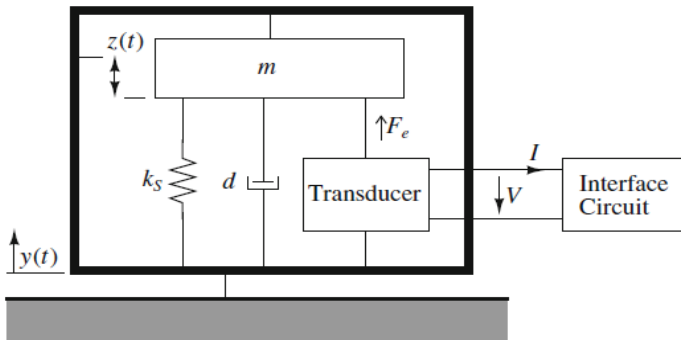
2.5.3 Analisa *Piezoelectric*

Material *cantilever piezoelectric* dapat dimodelkan sebagai sebagai pegas dengan bentuk *cantilever beam* yang dilengkapi dengan massa pada ujungnya. Defleksi yang terjadi adalah dari arah 3 atau searah dengan sumbu z, dan regangan yang terjadi adalah pada arah satu atau pada arah sumbu x, sedangkan gaya yang diterima oleh *piezoelectric* adalah pada arah tiga atau pada arah sumbu z. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 2.23 berikut.



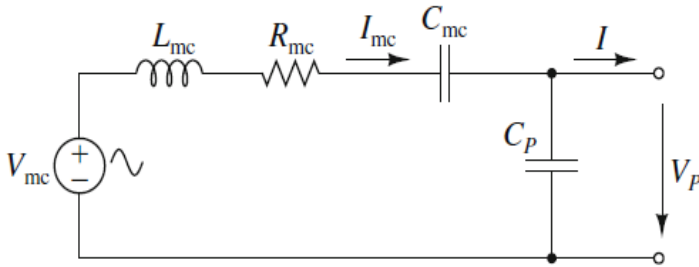
Gambar 2.24 *Cantilever piezoelectric*^[2]

Untuk model dinamis pemanen energi kinetik dari *cantilever piezoelectric* dapat dimodelkan sebagai susunan massa pegas yang diberikan gaya harmonis. Susunan massa pegas tersebut dilengkapi dengan rangkaian elektrik pemanen energi. Model tersebut dapat dilihat pada gambar 2.25.



Gambar 3.25 Model pemanen energi kinetik^[2]

Dari gambar 2.24 di atas maka didapatkan rangkaian listrik ekuivalen yang sesuai. Rangkaian listrik tersebut dapat dilihat pada gambar 2.25.



Gambar 2.26 Rangkaian listrik ekuivalen pemanen energi kinetik^[2]

Persamaan rangkai listrik ekuivalen pada gambar 2.25 di atas dapat dirumuskan sebagai:

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

dengan:

$$V_{mc} = \frac{F_i}{\Gamma} \quad L_{mc} = \frac{M}{\Gamma^2} \quad R_{mc} = \frac{d_p}{\Gamma^2} \quad C_{mc} = \frac{\Gamma^2}{k_p}$$

$$\Gamma = \sqrt{k_{31} k_p C_p}$$

dengan:

F_i = Gaya eksitasi (N)

M = Massa (Kg)

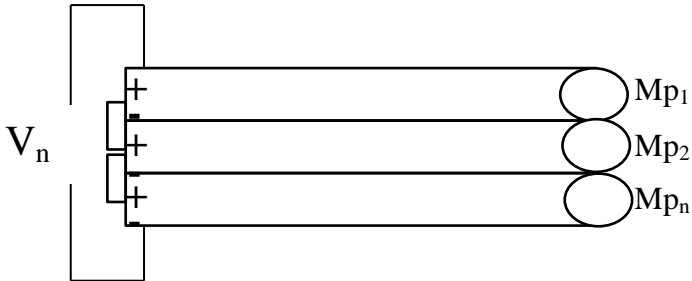
d_p = Konstanta damping ekuivalen *piezoelectric* (Ns/m)

k_p = Konstanta pegas ekuivalen *piezoelectric* (N/m)

C_p = Kapasitansi *piezoelectric* (Farad)

2.5.4 Susunan *Piezoelectric*

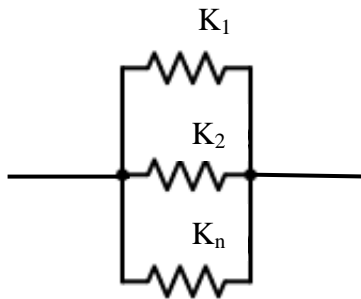
Piezoelectric dapat disusun secara seri dan paralel. Susunan dari *piezoelectric* ini dapat merubah sifat mekanik dan elektrik dari *piezoelectric* yang bergantung dari bentuk susunan dari *piezoelectric* tersebut. Susunan material *piezoelectric* secara paralel dapat dilihat pada gambar 2.26. Pengaruh susunan tersebut akan dijelaskan sebagai berikut:



Gambar 2.27 Susunan paralel material *piezoelectric*

a. Sifat Mekanik

Material *piezoelectric* dalam hal ini disusun secara paralel, maka sifat mekaniknya adalah



Gambar 2.28 Konstanta pegas disusun paralel

Untuk satu material *piezoelectric*

$$F_k = K \cdot x$$

Untuk *piezoelectric* yang disusun secara paralel dengan jumlah n

$$F_k = K_{eq} \cdot x$$

dengan: $K_{eq} = n \cdot K$

Untuk keseluruhan jumlah massa M_p dapat dirumuskan dengan:

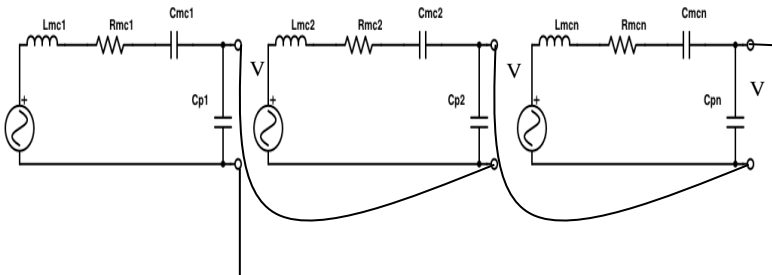
$$M_{eq} = M_1 + M_2 + \dots + M_n$$

Atau,

$$M_{eq} = n \cdot M$$

b. Sifat Elektrik

Penyusunan elektrik dari material *piezoelectric* secara seri dapat ditunjukkan pada gambar 2.28.



Gambar 2.29 Elektrik *piezoelectric* disusun secara seri

Voltase yang dihasilkan oleh *piezoelectric* jika disusun secara seri adalah

$$V_n = V_{p1} + V_{p2} + \dots + V_{pn}$$

Jika $V_{p1} = V_{p2} = V_{pn}$, maka:

$$V_n = n \cdot V_1$$

Dan arus yang dihasilkan oleh *piezoelectric* jika disusun secara seri adalah

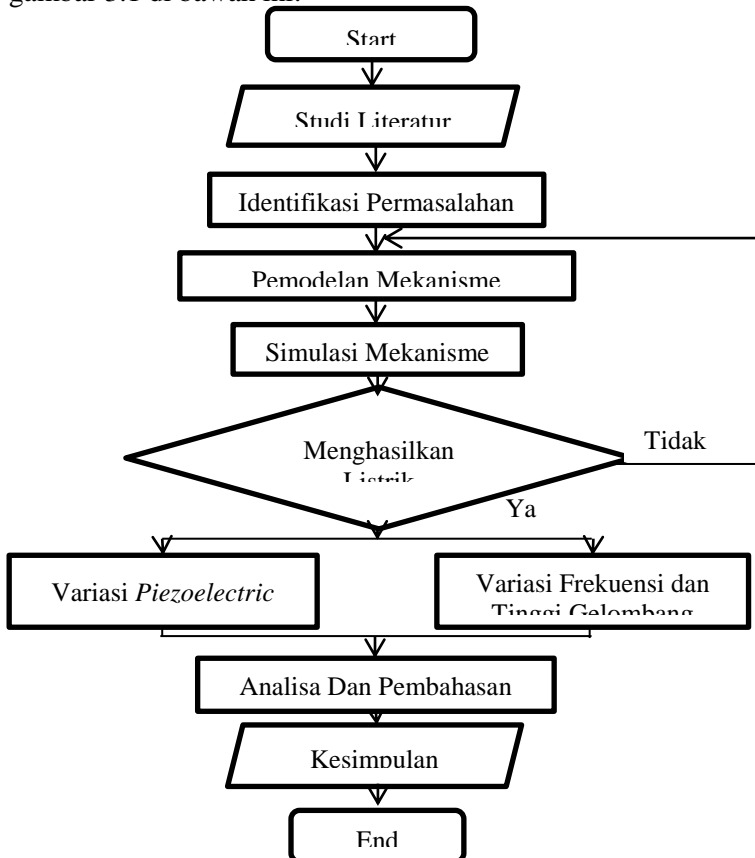
$$I_n = I_1 = I_2 = \dots = I_n$$

Dari persamaan pada rangkaian seri dapat disimpulkan bahwa dengan menyusun elektriknya secara seri, maka voltase yang dihasilkan akan semakin meningkat. Akan tetapi berbanding terbalik dengan arus yang dihasilkan, yaitu tetap seiring dengan bertambahnya jumlah material *piezoelectric*.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir

Adapun prosedur penyusunan Tugas Akhir kali ini diilustrasikan dalam sebuah *flowchart* yang dapat dilihat pada gambar 3.1 di bawah ini:



Gambar 3.1 *Flowchart* penelitian

3.2 Penjelasan *Flowchart* Penelitian

3.2.1 Studi literatur

Penelitian kali ini diawali dengan melakukan studi literatur. Pada bagian ini dilakukan pengumpulan literatur-literatur dan referensi-referensi yang dapat mendukung dalam pengerjaan Tugas Akhir kali ini. Literatur-literatur tersebut dapat tugas akhir yang pernah ada, katalog, jurnal, dan buku teks. Referensi tersebut erat kaitannya dengan penelitian terdahulu mengenai *energy harvesting* menggunakan material *piezoelectric*, gelombang laut, mekanika getaran, dan material *piezoelectric* itu sendiri.

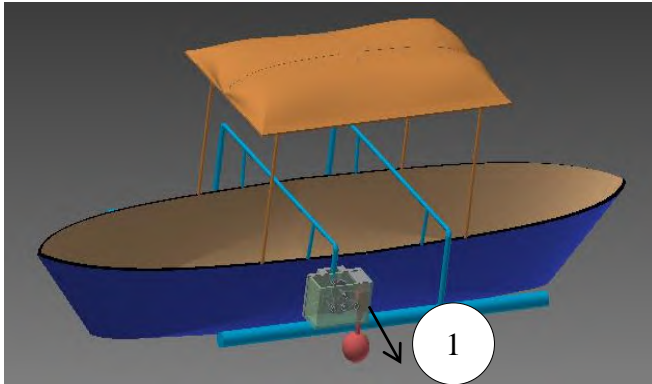
3.2.2 Identifikasi permasalahan

Pada tugas akhir ini digunakan *cantilever piezoelectric* untuk mengubah energi kinetik menjadi energi listrik. Terdapat dua parameter yang menjadi identifikasi permasalahan yaitu variabel *input* dan variabel *output*. Parameter yang dijadikan variabel *input* dari permasalahan kali ini berupa gelombang air laut yang diteruskan ke struktur sedangkan variabel *output* berupa *displacement*, voltase, kuat arus, dan daya yang dihasilkan oleh *cantilever piezoelectric*.

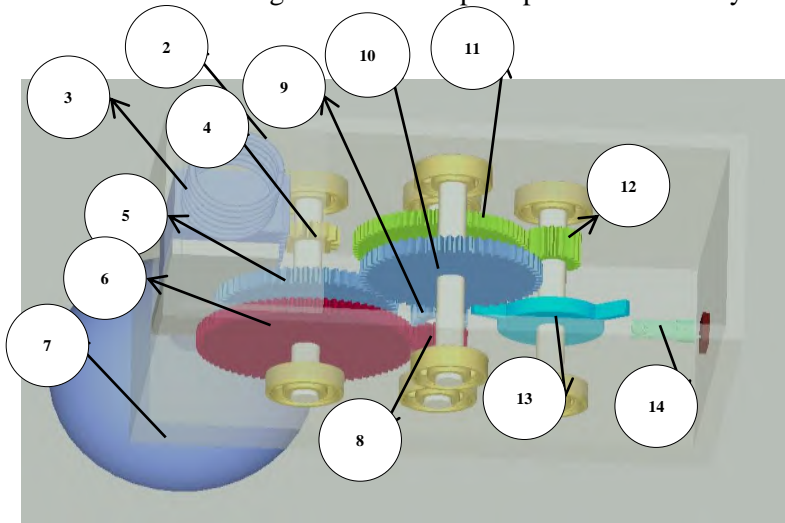
3.2.3 Pemodelan mekanisme

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk memodelkan suatu mekanisme *vibration energy harvesting* dengan metode *cantilever piezoelectric* skala laboratorium. Mekanisme ini merupakan *prototype* dari alat *vibration energy harvesting* yang nantinya akan dipasang pada sebuah perahu cadik nelayan yang ada di sekitar Pantai Pulau Poteran. Alat ini akan dipasang di bagian cadik dari perahu yang dapat dilihat pada gambar 3.2. Pengoperasian alat ini dilakukan ketika perahu nelayan sudah berada pada tempat pencarian ikan, yang berarti kondisi kapal sudah tidak berlayar lagi (saat perahu diam). Energi listrik yang dihasilkan mekanisme ini nantinya akan langsung digunakan untuk menyalakan lampu yang ada pada perahu nelayan.

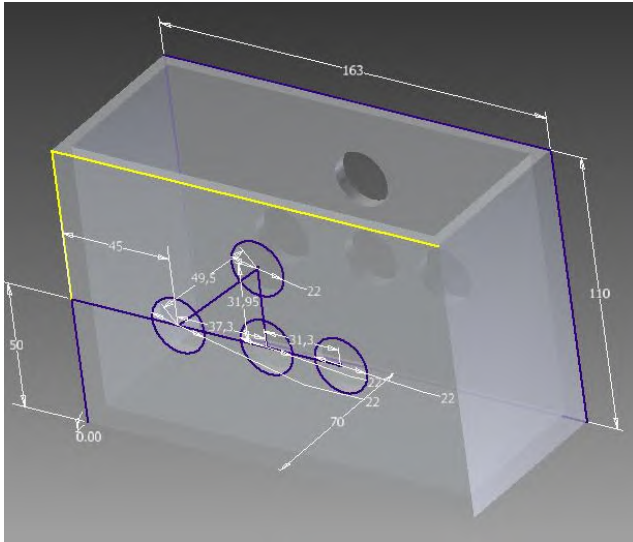
Sehingga nelayan bisa menghemat biaya dari pembelian bahan bakar minyak untuk menggerakkan motor *diesel* yang biasanya digunakan untuk menyalakan listrik. Mekanisme dari alat ini dapat dilihat pada gambar 3.3



Gambar 3.2 Pemasangan mekanisme pada perahu cadik nelayan



(a)



(b)

Gambar 3.3 Pemodelan mekanisme (a) Mekanisme lengkap (b) *Housing*

Keterangan gambar:

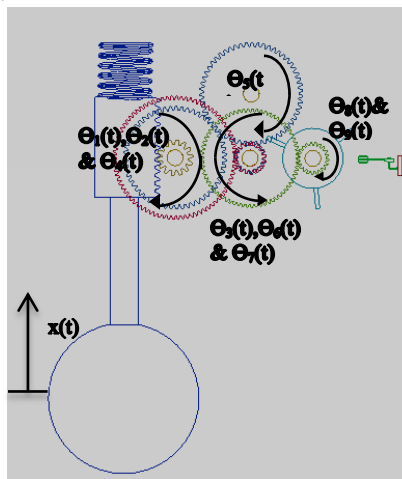
- | | | |
|--------------------|--------------|-------------------|
| 1. Mekanisme VHE | 6. Gear 2 | 11. Gear 7 |
| 2. Pegas | 7. Pelampung | 12. Gear 8 |
| 3. Rack | 8. Gear 3 | 13. Blade |
| 4. Pinion (Gear 1) | 9. Gear 6 | 14. Piezoelectric |
| 5. Gear 4 | 10. Gear 5 | |

Cara kerja dari alat ini adalah pelampung akan menangkap gaya dari gelombang yang nantinya akan membuat pelampung bergerak naik-turun. Gerak translasi dari pelampung tersebut akan dikonversikan ke gerak rotasi oleh sebuah pasangan *rack-pinion gear*. Ketika *rack* bergerak naik maka *pinion* (Gear1) akan bergerak berputar mengikuti arah jarum jam. Putaran tersebut akan diteruskan oleh pasangan roda gigi lurus (Gear 2 dan 3 CW) yang dilengkapi oleh sebuah *one way bearing* yang

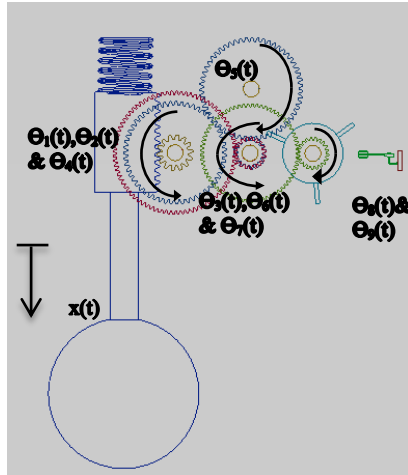
hanya bergerak searah putaran jarum jam. Sebaliknya ketika *rack* turun maka *pinion* akan berputar berlawanan dengan arah jarum jam dan akan memutar pasangan roda gigi lurus (*Gear 4, 5, dan 6 CCW*) yang dilengkapi dengan sebuah *one way bearing* yang hanya berputar melawan arah putaran jarum jam. Putaran tersebut akan terus dinaikkan kecepatan putarannya hingga pada *gear* ke-8. Putaran tersebut akan diteruskan oleh poros yang kaku ke sebuah *blade* pemukul yang nantinya akan memukul material *piezoelectric*. Pukulan tersebut nantinya akan membuat *piezoelectric* terdefleksi dan akan menghasilkan voltase.

3.2.4 Simulasi mekanisme

Langkah selanjutnya setelah melakukan simulasi mekanisme, hal yang dilakukan adalah menyimulasikan mekanisme tersebut agar sesuai dengan kenyataan yang ada dan dapat direalisasikan. Hal pertama yang dilakukan dalam simulasi mekanisme ini adalah menentukan persamaan gerak dari masing-masing massa yang bergerak, gerakan masing-masing massa dapat dilihat pada gambar 3.4. Persamaan gerak tersebut adalah sebagai berikut.



(a)



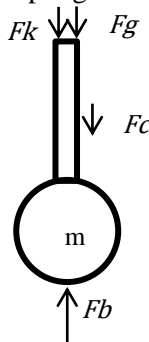
(b)

Gambar 3.4 Gerakan mekanisme (a) gerakan naik, (b) gerakan turun

3.2.4.1 Analisa gerak gelombang naik

1. Pelampung

Pada saat tidak ada gelombang pelampung mengalami kesetimbangan statis yang gaya-gayanya hanya dipengaruhi oleh gaya *buoyancy* dan gaya gravitasi sehingga *free body diagram* (FBD) dari pelampung adalah sebagai berikut:



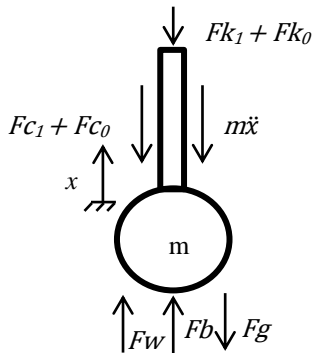
Gambar 3.5 FBD kesetimbangan statis pelampung

Dari FBD di atas maka akan didapat persamaan

$$Fb - Fg - Fk_0 - Fc_0 = 0$$

$$Fb = Fg + Fk_0 + Fc_0$$

Setelah diketahui kesetimbangan statis pada pelampung kemudian dicari persamaan gerak dari pelampung dengan FBD sebagai berikut:



Gambar 3.6 FBD kesetimbangan dinamis pelampung

Dari *Free Body Diagram* (FBD) tersebut didapat persamaan dinamis sebagai berikut:

$$\Sigma F = 0$$

$$m\ddot{x} + Kx + Fc_1 - Fg + Fw + Fb = 0$$

dengan memasukkan persamaan 3.2 ke persamaan 3.4, maka akan didapatkan

$$m\ddot{x} + Kx + Fc_1 = Fw$$

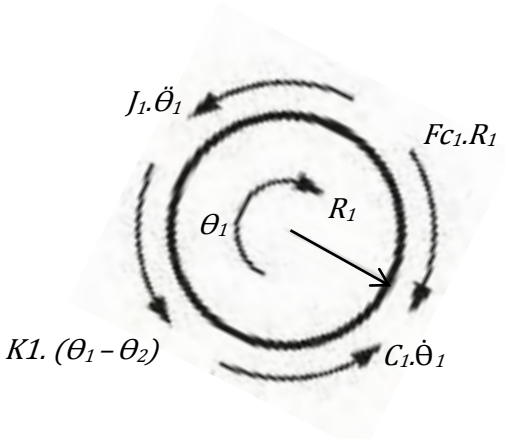
dengan Fc_1 adalah gaya kontak antara *rack* dan *pinion* dan Fg adalah gaya resultan antara gaya yang timbul dari gelombang laut

(F_{wave}), gaya apung/buoyancy (F_b), dan gaya berat dari pelampung (F_g).

2. *Spur gear*

Spur gear adalah komponen dari *gear box* yang berfungsi untuk meningkatkan kecepatan putaran dan frekuensi dari *blade* pemukul agar mendekati frekuensi resonansi dari material *piezoelectric*.

Pinion (Gear1)



Gambar 3.7 FBD gear 1

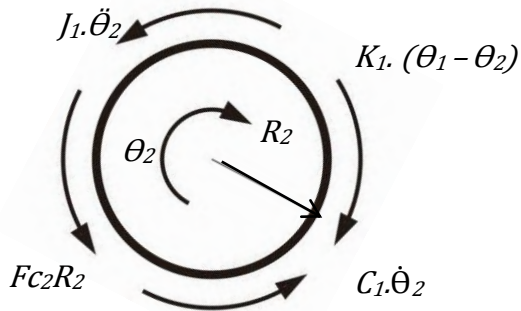
Dari FBD tersebut didapatkan persamaan gerak:

$$\Sigma M = 0$$

$$J_1 \cdot \ddot{\theta}_1 + C_1 \cdot \dot{\theta}_1 + k_1 \cdot (\theta_1 - \theta_2) - F_{c1} \cdot R_1 = 0$$

$$F_{c1} = \frac{1}{R_1} (J_1 \cdot \ddot{\theta}_1 + C_1 \cdot \dot{\theta}_1 + k_1 \cdot \theta_1 - k_l \cdot \theta_2)$$

$$\ddot{\theta}_1 = \frac{1}{J_1} \cdot (F_{c1} \cdot R_1 + k_1 \cdot \theta_2 - C_1 \cdot \dot{\theta}_1 - k_l \cdot \theta_1)$$

Gear 2

Gambar 3.8 FBD gear 2

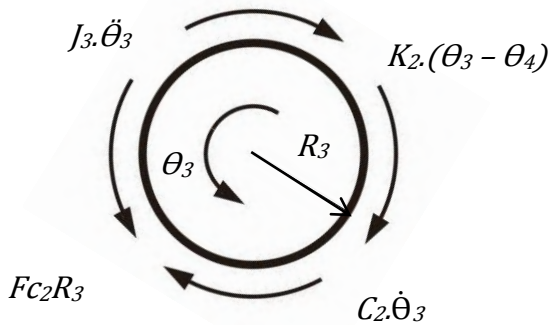
Dari FBD tersebut didapatkan persamaan gerak:

$$\Sigma M = 0$$

$$J_2 \cdot \ddot{\theta}_2 + C_1 \cdot \dot{\theta}_2 - k_3 \cdot (\theta_1 - \theta_2) + F_{c2} \cdot R_2 = 0$$

$$J_2 \cdot \ddot{\theta}_2 + C_1 \cdot \dot{\theta}_2 + F_{c2} \cdot R_2 = k_1 \cdot (\theta_1 - \theta_2)$$

$$\ddot{\theta}_2 = \frac{1}{J_2} \cdot (k_1 \cdot \theta_1 - F_{c2} \cdot R_2 - C_1 \cdot \dot{\theta}_2 - k_1 \cdot \theta_2)$$

Gear 3

Gambar 3.9 FBD gear 3

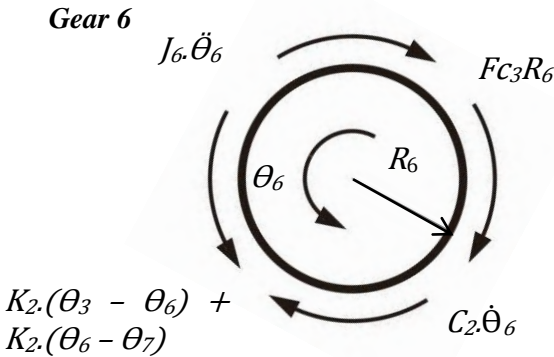
Dari FBD tersebut didapatkan persamaan gerak:

$$\Sigma M = 0$$

$$J_3 \ddot{\Theta}_3 + C_2 \dot{\Theta}_3 + k_2 (\Theta_3 - \Theta_4) - F_{C_2} R_3 = 0$$

$$F_{C_2} = \frac{1}{R_3} (J_3 \ddot{\Theta}_3 + C_2 \dot{\Theta}_3 + k_2 \Theta_3 - k_2 \Theta_4)$$

$$\ddot{\Theta}_3 = \frac{1}{J_3} \cdot (F_{C_2} R_3 + k_2 \Theta_4 - C_2 \dot{\Theta}_3 - k_2 \Theta_3)$$



Gambar 3.10 FBD gear 6

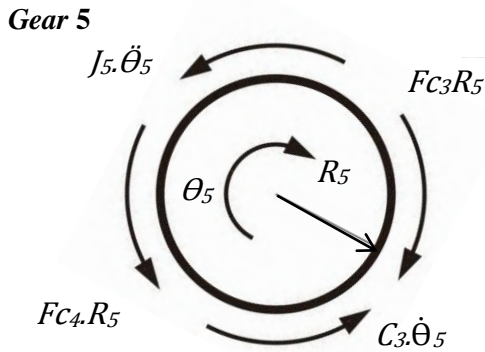
Dari FBD tersebut didapatkan persamaan gerak:

$$\Sigma M = 0$$

$$J_6 \ddot{\Theta}_6 + C_2 \dot{\Theta}_6 - k_2 (\Theta_3 - \Theta_6) - K_2 (\Theta_6 - \Theta_7) + F_{C_3} R_6 = 0$$

$$k_2 (\Theta_3 - \Theta_6) = J_6 \ddot{\Theta}_6 + C_2 \dot{\Theta}_6 - K_2 (\Theta_6 - \Theta_7) + F_{C_3} R_6$$

$$\ddot{\Theta}_6 = \frac{1}{J_6} \cdot (-F_{C_3} R_6 + k_2 \Theta_3 - C_2 \dot{\Theta}_6 - k_2 \Theta_7)$$



Gambar 3.11 FBD gear 5

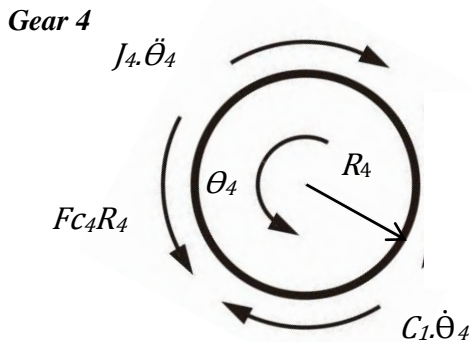
Dari FBD tersebut didapatkan persamaan gerak:

$$\Sigma M = 0$$

$$J_5 \cdot \ddot{\theta}_5 + C_3 \cdot \dot{\theta}_5 + F_{C_4} \cdot R_5 - F_{C_3} \cdot R_5 = 0$$

$$F_{C_3} = \frac{1}{R_5} (J_5 \cdot \ddot{\theta}_5 + C_3 \cdot \dot{\theta}_5 + F_{C_4} \cdot R_5)$$

$$\ddot{\theta}_5 = \frac{1}{J_5} \cdot (F_{C_3} \cdot R_5 - C_3 \cdot \dot{\theta}_5 - F_{C_4} \cdot R_5)$$



Gambar 3.12 FBD gear 4

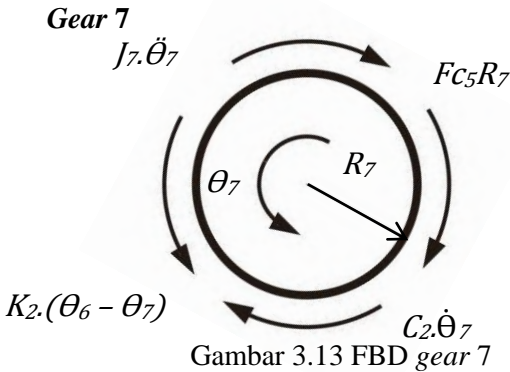
Dari FBD tersebut didapatkan persamaan gerak:

$$\Sigma M = 0$$

$$J_4 \ddot{\Theta}_4 + C_1 \dot{\Theta}_4 - F_{c4} R_4 = 0$$

$$F_{c4} R_4 = J_4 \ddot{\Theta}_4 + C_1 \dot{\Theta}_4$$

$$\ddot{\Theta}_4 = \frac{1}{J_4} \cdot (F_{c4} R_4 + C_2 \dot{\Theta}_4)$$



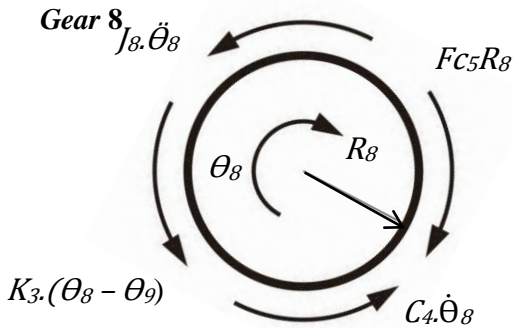
Dari FBD tersebut didapatkan persamaan gerak:

$$\Sigma M = 0$$

$$J_7 \ddot{\Theta}_7 + C_2 \dot{\Theta}_7 - k_2 \cdot (\Theta_6 - \Theta_7) + F_{c5} R_7 = 0$$

$$k_2 \cdot (\Theta_6 - \Theta_7) = J_7 \ddot{\Theta}_7 + C_2 \dot{\Theta}_7 + F_{c5} R_7$$

$$\ddot{\Theta}_7 = \frac{1}{J_7} \cdot (-F_{c5} R_7 + k_2 \cdot \Theta_6 - C_2 \dot{\Theta}_7 - k_2 \cdot \Theta_7)$$



Gambar 3.14 FBD gear 8

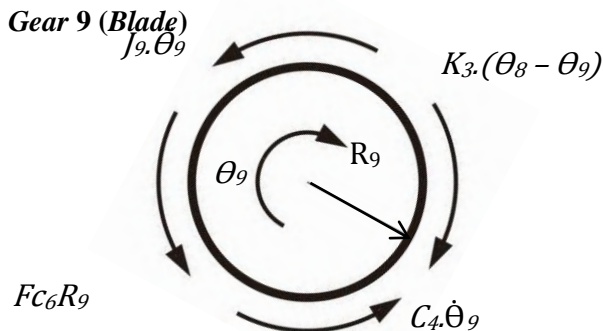
Dari FBD tersebut didapatkan persamaan gerak:

$$\Sigma M = 0$$

$$J_8 \cdot \ddot{\theta}_8 + C_4 \cdot \dot{\theta}_8 + k_3 \cdot (\theta_8 - \theta_9) - F_{c5} \cdot R_8 = 0$$

$$F_{c3} = \frac{1}{R_8} (J_8 \cdot \ddot{\theta}_8 + C_4 \cdot \dot{\theta}_8 + k_3 \cdot \theta_8 - k_3 \cdot \theta_9)$$

$$\ddot{\theta}_8 = \frac{1}{J_8} \cdot (F_{c5} \cdot R_8 + k_3 \cdot \theta_9 - C_4 \cdot \dot{\theta}_8 - k_3 \cdot \theta_8)$$



Gambar 3.15 FBD gear 9

Dari FBD tersebut didapatkan persamaan gerak:

$$\Sigma M = 0$$

$$J_9 \ddot{\Theta}_9 + C_4 \dot{\Theta}_9 - k_3 (\Theta_8 - \Theta_9) + F_{c4} R_9 = 0$$

$$J_9 \ddot{\Theta}_9 + C_4 \dot{\Theta}_9 + F_{c4} R_9 = k_3 (\Theta_8 - \Theta_9)$$

$$\ddot{\Theta}_9 = \frac{1}{J_9} \cdot (-F_{c6} R_9 + k_3 \Theta_8 - C_4 \dot{\Theta}_9 - k_3 \Theta_9)$$

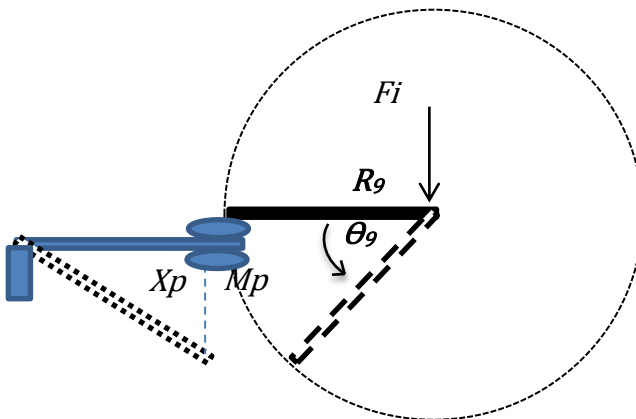
dengan:

- M = Massa Pelampung
- F_{c1} = Gaya kontak antara *rack* dengan *gear* 1
- F_{c2} = Gaya kontak antara *gear* 2 dengan *gear* 3
- F_{c3} = Gaya kontak antara *gear* 5 dengan *gear* 6
- F_{c4} = Gaya kontak antara *gear* 4 dengan *gear* 5
- F_{c5} = Gaya kontak antara *gear* 7 dengan *gear* 8
- F_{c6} = Gaya kontak antara *blade* dengan *piezoelectric*
- K = Konstanta pegas
- K_1 = Konstanta elastisitas poros *gear* 1, 2, dan 4
- K_2 = Konstanta elastisitas poros *gear* 3, 6, dan 7
- K_3 = Konstanta elastisitas poros *gear* 8 dan *blade*
- Θ_1 = Perpindahan sudut *gear* 1
- Θ_2 = Perpindahan sudut *gear* 2
- Θ_3 = Perpindahan sudut *gear* 3
- Θ_4 = Perpindahan sudut *gear* 4
- Θ_5 = Perpindahan sudut *gear* 5
- Θ_6 = Perpindahan sudut *gear* 6
- Θ_7 = Perpindahan sudut *gear* 7
- Θ_8 = Perpindahan sudut *gear* 8
- Θ_9 = Perpindahan sudut *blade*
- J_1 = Inersia *gear* 1
- J_2 = Inersia *gear* 2
- J_3 = Inersia *gear* 3
- J_4 = Inersia *gear* 4
- J_5 = Inersia *gear* 5
- J_6 = Inersia *gear* 6
- J_7 = Inersia *gear* 7
- J_8 = Inersia *gear* 8
- J_9 = Inersia *blade*

- C_1 = Koefisien damping gear 1, 2, dan 4
 C_2 = Koefisien damping gear 3, 6, dan 7
 C_3 = Koefisien damping gear 5
 C_4 = Koefisien damping gear 8 dan blade

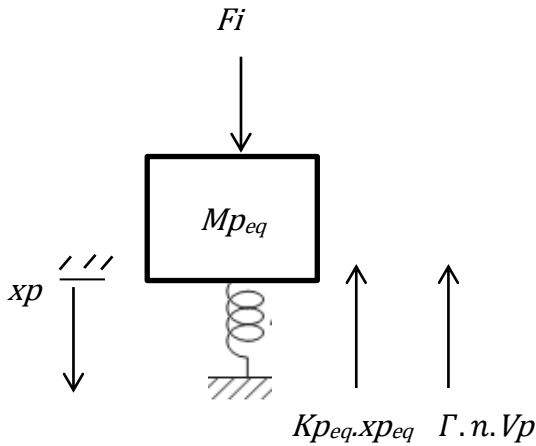
3. Blade dan piezoelectric

Blade adalah komponen yang mampu memberikan gaya impact ke *piezoelectric* sehingga menimbulkan tegangan listrik. Akibat impact dari blade, maka *piezoelectric* mengalami defleksi. Defleksi inilah yang nantinya menghasilkan beda potensial pada komponen *piezoelectric*. Adapun hubungan antara defleksi yang terjadi pada *piezoelectric* dengan respon gerak dari blade adalah sebagai berikut.



Gambar 3.16 FBD Pada Blade dan Piezoelectric (tampak belakang)

Gambar 3.16 adalah gambar FBD kontak antara blade dengan *piezoelectric*. Persamaan gerak dari *piezoelectric* akibat gaya kejut (*impact*) yang ditimbulkan oleh gerak rotasi dari blade dapat dimodelkan secara sederhana menurut gambar 3.17 berikut:

Gambar 3.17 FBD *piezoelectric*

Dari FBD di atas dapat diturunkan persamaan gerak *piezoelectric* sebagai berikut:

$$m_{p_{eq}} \ddot{x}_p + K_{p_{eq}} x_p + \Gamma \cdot n \cdot V_p = F_i$$

4. Massa (Beban)

Pada persamaan gerak pelampung didapat persamaan 3.5:

$$m \ddot{x} + Kx + F_{c1} = F_w$$

untuk mendapatkan nilai dari massa ekuivalen dari sistem *gearbox harvesting energy*, maka dilakukan pemindahan ruas variabel-variabel sehingga hanya tertinggal variabel massa dan percepatan pada ruas kiri. Sehingga persamaan 3.5 tersebut menjadi:

$$\ddot{x} = \frac{1}{m} [-Kx + F_w - F_{c1}]$$

Setelah mendapatkan persamaan 3.43 substitusi persamaan 3.8 ke persamaan 3.43 sehingga didapatkan:

$$\ddot{x} = \frac{1}{m}[-Kx + Fw - \frac{1}{R1} [J_1.\ddot{\theta}_1 + C_1.\dot{\theta}_1 + k_1.\theta_1 - k_1.\theta_2]]$$

kemudian substitusi persamaan 3.12 ke persamaan 3.44 sehingga didapatkan:

$$\ddot{x} = \frac{1}{m}[-Kx + Fw - \frac{1}{R1} [J_1.\ddot{\theta}_1 + C_1.\dot{\theta}_1 + J_2.\ddot{\theta}_2 + C_1.\dot{\theta}_2 + F_{C2}.R_2]]$$

lalu persamaan 3.16 disubstitusikan ke persamaan 3.45 dan didapatkan

$$\ddot{x} = \frac{1}{m}[-Kx + Fw - \frac{1}{R1} [J_1.\ddot{\theta}_1 + C_1.\dot{\theta}_1 + J_2.\ddot{\theta}_2 + C_1.\dot{\theta}_2 + \frac{R2}{R3} [J_3.\ddot{\theta}_3 + C_2.\dot{\theta}_3 + k_2.\theta_3 - k_2.\theta_4]]]$$

setelah didapatkan persamaan 3.46 lalu disubstitusikan persamaan 3.20 ke persamaan tersebut dan didapatkan:

$$\ddot{x} = \frac{1}{m}[-Kx + Fw - \frac{1}{R1} [J_1.\ddot{\theta}_1 + C_1.\dot{\theta}_1 + J_2.\ddot{\theta}_2 + C_2.\dot{\theta}_2 + \frac{R2}{R3} [J_3.\ddot{\theta}_3 + C_3.\dot{\theta}_3 + J_6.\ddot{\theta}_6 + C_2.\dot{\theta}_6 - K_2.(\theta_6 - \theta_7) + F_{C3}.R_6]]]$$

Kemudian substitusi persamaan 3.24 ke persamaan 3.47 dan akan didapatkan:

$$\ddot{x} = \frac{1}{m}[-Kx + Fw - \frac{1}{R1} [J_1.\ddot{\theta}_1 + C_1.\dot{\theta}_1 + J_2.\ddot{\theta}_2 + C_2.\dot{\theta}_2 + \frac{R2}{R3} [J_3.\ddot{\theta}_3 + C_3.\dot{\theta}_3 + J_6.\ddot{\theta}_6 + C_2.\dot{\theta}_6 + \frac{R6}{R5} (J_5.\ddot{\theta}_5 + C_3.\dot{\theta}_5 + F_{C4}.R_5) - K_2.(\theta_6 - \theta_7)]]]]]$$

lalu substitusi persamaan 3.28 ke persamaan 3.48 dan didapatkan:

$$\ddot{x} = \frac{1}{m}[-Kx + Fw - \frac{1}{R1} [J_1.\ddot{\theta}_1 + C_1.\dot{\theta}_1 + J_2.\ddot{\theta}_2 + C_2.\dot{\theta}_2 + \frac{R2}{R3} [J_3.\ddot{\theta}_3 + C_3.\dot{\theta}_3 + J_6.\ddot{\theta}_6 + C_2.\dot{\theta}_6 + \frac{R6}{R5} (J_5.\ddot{\theta}_5 + C_3.\dot{\theta}_5 + \frac{R5}{R4}(J_4.\ddot{\theta}_4 + C_1.\dot{\theta}_4) - K_2.(\theta_6 - \theta_7)]]]]]$$

Kemudian substitusikan persamaan 3.32 ke persamaan 3.49 sehingga didapatkan:

$$\ddot{x} = \frac{1}{m}[-Kx + Fw - \frac{1}{R1} [J_1.\ddot{\theta}_1 + C_1.\dot{\theta}_1 + J_2.\ddot{\theta}_2 + C_2.\dot{\theta}_2 + \frac{R2}{R3} [J_3.\ddot{\theta}_3 + C_3.\dot{\theta}_3 + J_6.\ddot{\theta}_6 + C_2.\dot{\theta}_6 + \frac{R6}{R5} (J_5.\ddot{\theta}_5 + C_3.\dot{\theta}_5 + \frac{R5}{R4} (J_4.\ddot{\theta}_4 + C_1.\dot{\theta}_4) + J_7.\ddot{\theta}_7 + C_2.\dot{\theta}_7 + F_{C5.R7}]]]]]$$

Lalu substitusikan persamaan 3.36 ke persamaan 3.50 sehingga didapatkan:

$$\ddot{x} = \frac{1}{m}[-Kx + Fw - \frac{1}{R1} [J_1.\ddot{\theta}_1 + C_1.\dot{\theta}_1 + J_2.\ddot{\theta}_2 + C_2.\dot{\theta}_2 + \frac{R2}{R3} [J_3.\ddot{\theta}_3 + C_3.\dot{\theta}_3 + J_6.\ddot{\theta}_6 + C_2.\dot{\theta}_6 + \frac{R6}{R5} (J_5.\ddot{\theta}_5 + C_3.\dot{\theta}_5 + \frac{R5}{R4}(J_4.\ddot{\theta}_4 + C_1.\dot{\theta}_4) + J_7.\ddot{\theta}_7 + C_2.\dot{\theta}_7 + \frac{R7}{R8} [J_8.\ddot{\theta}_8 + C_4.\dot{\theta}_8 + k_3.\theta_8 - k_3.\theta_9]]]]]]]$$

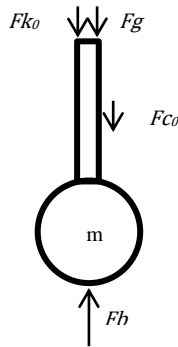
Terakhir setelah didapatkan persamaan 3.51, maka disubstitusikan persamaan 3.40 ke persamaan 3.51 sehingga didapatkan:

$$\ddot{x} = \frac{1}{m}[-Kx + Fw - \frac{1}{R1} [J_1.\ddot{\theta}_1 + C_1.\dot{\theta}_1 + J_2.\ddot{\theta}_2 + C_2.\dot{\theta}_2 + \frac{R2}{R3} [J_3.\ddot{\theta}_3 + C_3.\dot{\theta}_3 + J_6.\ddot{\theta}_6 + C_2.\dot{\theta}_6 + \frac{R6}{R5} (J_5.\ddot{\theta}_5 + C_3.\dot{\theta}_5 + \frac{R5}{R4}(J_4.\ddot{\theta}_4 + C_1.\dot{\theta}_4) + J_7.\ddot{\theta}_7 + C_2.\dot{\theta}_7 + \frac{R7}{R8} [J_8.\ddot{\theta}_8 + C_4.\dot{\theta}_8 + J_9.\ddot{\theta}_9 + C_4.\dot{\theta}_9 + F_{C6.R9}]]]]]]]$$

3.2.4.2 Analisa gerak gelombang turun

1. Pelampung

Pada saat tidak ada gelombang pelampung mengalami kesetimbangan statis yang gaya-gayanya hanya dipengaruhi oleh gaya *buoyancy* dan gaya gravitasi sehingga *free body diagram* (FBD) dari pelampung adalah sebagai berikut:



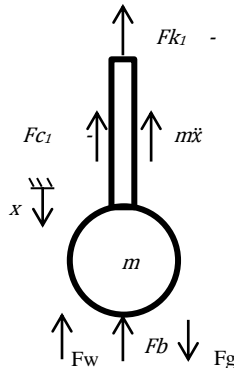
Gambar 3.18 FBD kesetimbangan statis pelampung

Dari FBD di atas maka akan didapat persamaan

$$Fb - Fg - Fk_0 - Fc_0 = 0$$

$$Fb = Fg + Fk_0 + Fc_0$$

Setelah diketahui kesetimbangan statis pada pelampung kemudian dicari persamaan gerak dari pelampung dengan FBD sebagai berikut:



Gambar 3.19 FBD dinamis pelampung

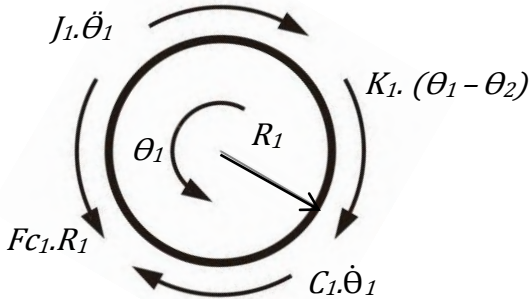
Dari *free body diagram* (FBD) tersebut didapat persamaan dinamis sebagai berikut:

$$\Sigma F = 0$$

$$-m\ddot{x}_1 - Fk_1 - F_{C_1} - F_w = 0$$

$$\ddot{x} = \frac{1}{m} (-F_{C_1} - kx - F_w)$$

2. Spur Gear Gear 1



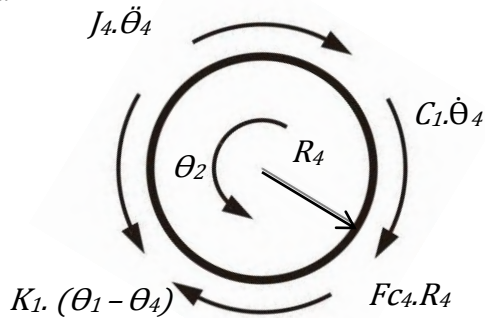
Gambar 3.20 FBD gear 1

Dari FBD tersebut diperoleh persamaan:

$$\Sigma M = 0$$

$$-J_1 \cdot \ddot{\theta}_1 - k_1 \cdot (\theta_1 - \theta_2) - C_1 \dot{\theta}_1 + F_{C_1} \cdot R_1 = 0$$

$$F_{C_1} = \frac{1}{R_1} (J_1 \cdot \ddot{\theta}_1 + C_1 \dot{\theta}_1 + k_1 (\theta_1 - \theta_2))$$

Gear 4

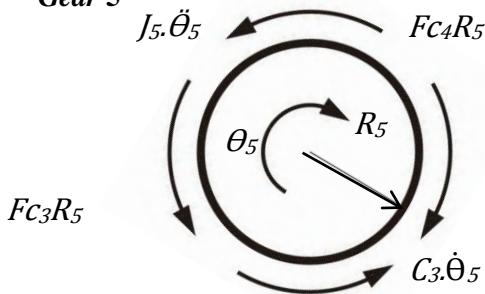
Gambar 3.21 FBD gear 4

Dari FBD tersebut diperoleh persamaan:

$$\Sigma M = 0$$

$$-J_4 \ddot{\theta}_4 + k_1 (\theta_1 - \theta_4) - C_1 \dot{\theta}_4 - F_{c4} R_4 = 0$$

$$k_1 (\theta_1 - \theta_4) = J_4 \ddot{\theta}_4 + C_1 \dot{\theta}_4 + F_{c4} R_4$$

Gear 5

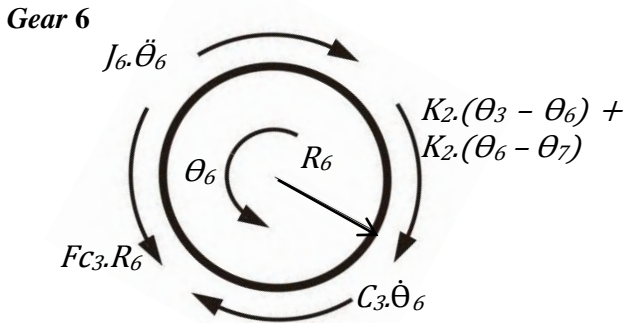
Gambar 3.22 FBD gear 5

Dari FBD tersebut diperoleh persamaan:

$$\Sigma M = 0$$

$$-J_5 \ddot{\theta}_5 - F_{c3} R_5 - C_3 \dot{\theta}_5 + F_{c4} R_5 = 0$$

$$Fc_4 = \frac{1}{R_5} (J_5 \ddot{\theta}_5 + Fc_3 R_5 + C_3 \dot{\theta}_3)$$



Gambar 3.23 FBD gear 6

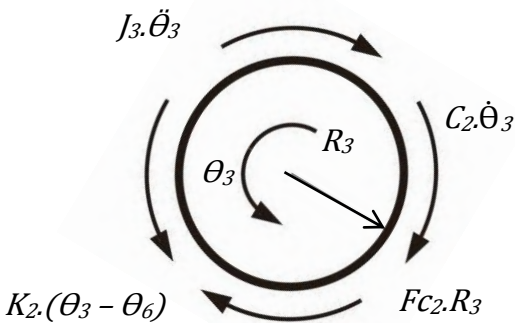
Dari FBD tersebut diperoleh persamaan:

$$\Sigma M = 0$$

$$-J_6 \ddot{\theta}_6 - C_3 \dot{\theta}_6 - K_2 (\theta_3 - \theta_6) - K_2 (\theta_6 - \theta_7) + Fc_3 R_6 = 0$$

$$Fc_3 = \frac{1}{R_6} (J_6 \ddot{\theta}_6 + C_3 \dot{\theta}_6 + K_2 (\theta_3 - \theta_6) + K_2 (\theta_6 - \theta_7))$$

Gear 3



Gambar 3.24 FBD gear 3

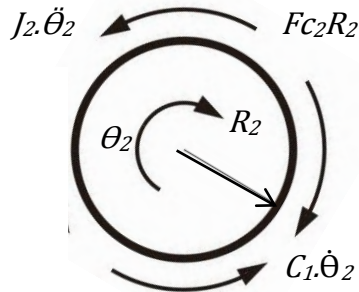
Dari FBD tersebut diperoleh persamaan :

$$\Sigma M = 0$$

$$-J_3.\ddot{\theta}_3 + K_2.(\theta_3 - \theta_6) - C_2\dot{\theta}_3 - Fc_2R_3 = 0$$

$$K_2.(\theta_3 - \theta_6) = J_3.\ddot{\theta}_3 + C_2\dot{\theta}_3 + Fc_2R_3$$

Gear 2



Gambar 3.25 FBD gear 5

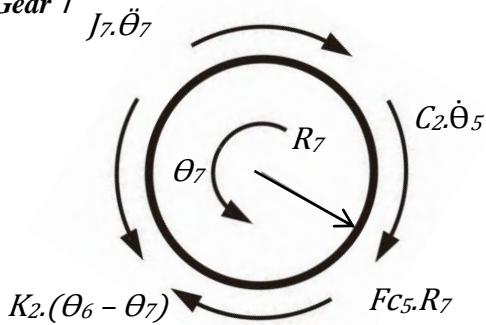
Dari FBD tersebut diperoleh persamaan:

$$\Sigma M = 0$$

$$-J_2.\ddot{\theta}_2 + Fc_2R_2 - C_1\dot{\theta}_2 = 0$$

$$Fc_2R_2 = J_2.\ddot{\theta}_2 + C_1\dot{\theta}_2$$

Gear 7



Gambar 3.26 FBD gear 7

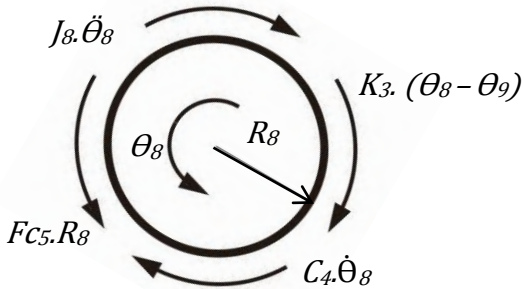
Dari FBD tersebut diperoleh persamaan :

$$\Sigma M = 0$$

$$- J_7.\ddot{\theta}_7 + K_2.(\theta_6 - \theta_7) - C_2.\dot{\theta}_7 - F_{C_5}R_7 = 0$$

$$K_2.(\theta_6 - \theta_7) = J_7.\ddot{\theta}_7 + C_2.\dot{\theta}_7 + F_{C_5}R_7$$

Gear 8



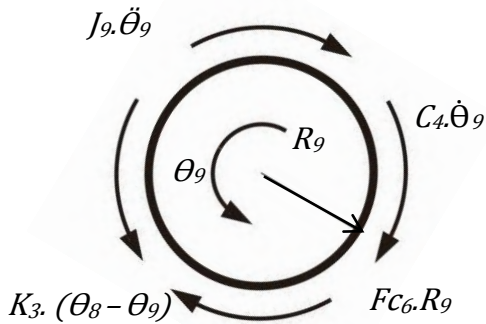
Gambar 3.27 FBD gear 8

Dari FBD tersebut diperoleh persamaan :

$$\Sigma M = 0$$

$$-J_8.\ddot{\theta}_8 - C_4.\dot{\theta}_8 - k_3.(\theta_8 - \theta_9) + F_{C_5}R_8 = 0$$

$$F_{C_5} = \frac{1}{R_8} (J_8.\ddot{\theta}_8 + C_4.\dot{\theta}_8 + k_3(\theta_8 - \theta_9))$$

Gear 9 (Blade)

Gambar 3.28 FBD gear 9

Dari FBD tersebut diperoleh persamaan :

$$\Sigma M = 0$$

$$-J_9 \cdot \ddot{\theta}_9 + k_3 \cdot (\theta_8 - \theta_9) - C_4 \dot{\theta}_9 - Fc_6 \cdot R_9 = 0$$

$$k_3 \cdot (\theta_8 - \theta_9) = J_9 \cdot \ddot{\theta}_9 + C_4 \dot{\theta}_9 + Fc_6 \cdot R_9$$

dengan:

M = Massa Pelampung

Fc_1 = Gaya kontak antara rack dengan gear 1

Fc_2 = Gaya kontak antara gear 2 dengan gear 3

Fc_3 = Gaya kontak antara gear 5 dengan gear 6

Fc_4 = Gaya kontak antara gear 4 dengan gear 5

Fc_5 = Gaya kontak antara gear 7 dengan gear 8

Fc_6 = Gaya kontak antara blade dengan piezoelectric

K = Konstanta pegas

K_1 = Konstanta elastisitas poros gear 1, 2, dan 4

K_2 = Konstanta elastisitas poros gear 3, 6, dan 7

K_3 = Konstanta elastisitas poros gear 8 dan blade

θ_1 = Perpindahan sudut gear 1

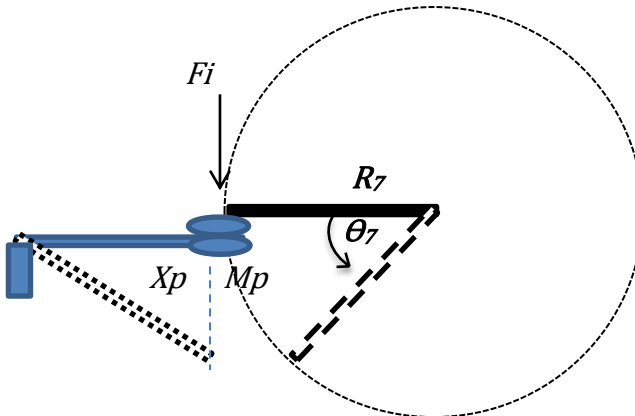
θ_2 = Perpindahan sudut gear 2

θ_3 = Perpindahan sudut gear 3

θ_4 = Perpindahan sudut gear 4

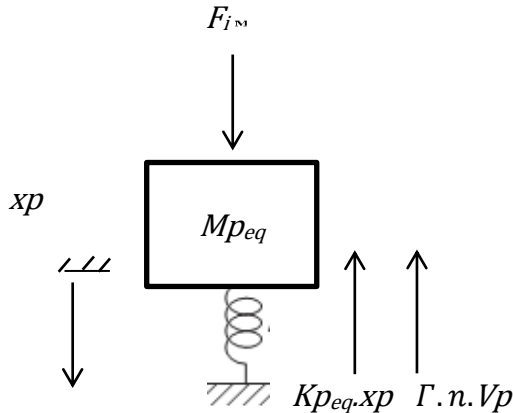
- θ_5 = Perpindahan sudut gear 5
 θ_6 = Perpindahan sudut gear 6
 θ_7 = Perpindahan sudut gear 7
 θ_8 = Perpindahan sudut gear 8
 θ_9 = Perpindahan sudut blade
 J_1 = Inersia gear 1
 J_2 = Inersia gear 2
 J_3 = Inersia gear 3
 J_4 = Inersia gear 4
 J_5 = Inersia gear 5
 J_6 = Inersia gear 6
 J_7 = Inersia gear 7
 J_8 = Inersia gear 8
 J_9 = Inersia blade
 C_1 = Koefisien damping gear 1, 2, dan 4
 C_2 = Koefisien damping gear 3, 6, dan 7
 C_3 = Koefisien damping gear 5
 C_4 = Koefisien damping gear 8 dan blade

3. Blade dan piezoelectric



Gambar 3.29 FBD Pada *Blade* dan *Piezoelectric* (tampak belakang)

Gambar 3.24 adalah gambar FBD kontak antara *blade* dengan *piezoelectric*. Persamaan gerak dari *piezoelectric* akibat gaya kejut (*impact*) yang ditimbulkan oleh gerak rotasi dari *blade* dapat dimodelkan secara sederhana menurut gambar 3.25 berikut



Gambar 3.30 FBD *piezoelectric*

Dari FBD diatas dapat diturunkan persamaan gerak *piezoelectric* sebagai berikut:

$$m_{peq} \ddot{x}_p + K_{peq} x_p + \Gamma \cdot n \cdot V_p = F_i$$

4. Massa (Beban)

Pada persamaan gerak pelampung didapat persamaan 3.56:

$$-m\ddot{x}_1 - Fk - Fc_1 - Fw = 0$$

untuk mendapatkan nilai dari massa ekuivalen dari sistem *gearbox harvesting energy*, maka dilakukan pemindahan ruas variabel-variabel sehingga hanya tertinggal variabel massa dan percepatan pada ruas kiri. Sehingga persamaan di atas menjadi:

$$\ddot{x} = \frac{1}{m} [-Fc_1 - kx - Fw]$$

Setelah mendapatkan persamaan 3.86 substitusi persamaan 3.60 ke persamaan 3.86 sehingga didapatkan:

$$\ddot{x} = \frac{1}{m} [-kx - Fw - \frac{1}{R1} [J_1 \cdot \ddot{\theta}_1 + C_1 \dot{\theta}_1 + k_1(\theta_1 - \theta_2)]]$$

Kemudian substitusi persamaan 3.63 ke persamaan 3.87 sehingga didapatkan:

$$\ddot{x} = \frac{1}{m} [-kx - Fw - \frac{1}{R1} [J_1 \cdot \ddot{\theta}_1 + C_1 \dot{\theta}_1 + J_2 \cdot \ddot{\theta}_2 + C_1 \dot{\theta}_2 + Fc_3 \cdot R_4]]$$

lalu persamaan 3.66 disubstitusikan ke persamaan 3.88 dan didapatkan:

$$\ddot{x} = \frac{1}{m} [-kx - Fw - \frac{1}{R1} [J_1 \cdot \ddot{\theta}_1 + C_1 \dot{\theta}_1 + J_2 \cdot \ddot{\theta}_2 + C_1 \dot{\theta}_2 + \frac{R4}{R5} (J_5 \cdot \ddot{\theta}_5 + Fc_4 R_5 + C_3 \cdot \dot{\theta}_3)]]$$

Setelah didapatkan persamaan 3.89 lalu substitusikan persamaan 3.69 ke persamaan tersebut dan didapatkan:

$$\ddot{x} = \frac{1}{m} [-kx - Fw - \frac{1}{R1} [J_1 \cdot \ddot{\theta}_1 + C_1 \dot{\theta}_1 + J_2 \cdot \ddot{\theta}_2 + C_1 \dot{\theta}_2 + \frac{R4}{R5} [J_5 \cdot \ddot{\theta}_5 + C_3 \cdot \dot{\theta}_3 + \frac{R5}{R6} [J_6 \cdot \ddot{\theta}_6 + C_3 \dot{\theta}_6 + K_2 \cdot (\theta_3 - \theta_6) + K_2 \cdot (\theta_6 - \theta_7)]]]]$$

Kemudian substitusi persamaan 3.72 ke persamaan 3.90 dan akan didapatkan:

$$\ddot{x} = \frac{1}{m} [-kx - Fw - \frac{1}{R1} [J_1 \cdot \ddot{\theta}_1 + C_1 \dot{\theta}_1 + J_2 \cdot \ddot{\theta}_2 + C_1 \dot{\theta}_2 + \frac{R4}{R5} [J_5 \cdot \ddot{\theta}_5 + C_3 \cdot \dot{\theta}_3 + \frac{R5}{R6} [J_6 \cdot \ddot{\theta}_6 + C_3 \dot{\theta}_6 + J_3 \cdot \ddot{\theta}_3 + C_2 \dot{\theta}_3 + Fc_2 R_3 + K_2 \cdot (\theta_6 - \theta_7)]]]]$$

Kemudian substitusi persamaan 3.75 ke persamaan 3.91 dan akan didapatkan:

$$\ddot{x} = \frac{1}{m} [-kx - Fw - \frac{1}{R1} [J_1 \cdot \ddot{\theta}_1 + C_1 \dot{\theta}_1 + J_2 \cdot \ddot{\theta}_2 + C_1 \dot{\theta}_2 + \frac{R4}{R5} [J_5 \cdot \ddot{\theta}_5 + C_3 \cdot \dot{\theta}_3 + \frac{R5}{R6} [J_6 \cdot \ddot{\theta}_6 + C_3 \dot{\theta}_6 + J_3 \cdot \ddot{\theta}_3 + C_2 \dot{\theta}_3 + \frac{R3}{R2} (J_2 \cdot \ddot{\theta}_2 + C_1 \cdot \dot{\theta}_2) + K_2 \cdot (\theta_6 - \theta_7)]]]]$$

lalu persamaan 3.78 disubstitusikan ke persamaan 3.92 dan didapatkan:

$$\ddot{x} = \frac{1}{m} \left[-kx - Fw - \frac{1}{R1} [J1.\ddot{\Theta}_1 + C1\dot{\Theta}_1 + J2.\ddot{\Theta}_2 + C1\dot{\Theta}_2 + \frac{R4}{R5} [J5.\ddot{\Theta}_5 + C3.\dot{\Theta}_3 + \frac{R5}{R6} [J6.\ddot{\Theta}_6 + C3\dot{\Theta}_6 + J3.\ddot{\Theta}_3 + C2\dot{\Theta}_3 + \frac{R3}{R2} (J2.\ddot{\Theta}_2 + C1.\dot{\Theta}_2) + J7.\ddot{\Theta}_7 + C2.\dot{\Theta}_7 + Fc5R7]]]] \right]$$

Kemudian substitusi persamaan 3.81 ke persamaan 3.93 dan akan didapatkan:

$$\ddot{x} = \frac{1}{m} \left[-kx - Fw - \frac{1}{R1} [J1.\ddot{\Theta}_1 + C1\dot{\Theta}_1 + J2.\ddot{\Theta}_2 + C1\dot{\Theta}_2 + \frac{R4}{R5} [J5.\ddot{\Theta}_5 + C3.\dot{\Theta}_3 + \frac{R5}{R6} [J6.\ddot{\Theta}_6 + C3\dot{\Theta}_6 + J3.\ddot{\Theta}_3 + C2\dot{\Theta}_3 + \frac{R3}{R2} (J2.\ddot{\Theta}_2 + C1.\dot{\Theta}_2) + J7.\ddot{\Theta}_7 + C2.\dot{\Theta}_7 + \frac{R7}{R8} [J8.\ddot{\Theta}_8 + C4\dot{\Theta}_8 + k3(\Theta_8 - \Theta_9)]]]] \right]$$

dan yang terakhir substitusi persamaan 3.84 ke persamaan 3.94 dan didapatkan:

$$\ddot{x} = \frac{1}{m} \left[-kx - Fw - \frac{1}{R1} [J1.\ddot{\Theta}_1 + C1\dot{\Theta}_1 + J2.\ddot{\Theta}_2 + C1\dot{\Theta}_2 + \frac{R4}{R5} [J5.\ddot{\Theta}_5 + C3.\dot{\Theta}_3 + \frac{R5}{R6} [J6.\ddot{\Theta}_6 + C3\dot{\Theta}_6 + J3.\ddot{\Theta}_3 + C2\dot{\Theta}_3 + \frac{R3}{R2} (J2.\ddot{\Theta}_2 + C1.\dot{\Theta}_2) + J7.\ddot{\Theta}_7 + C2.\dot{\Theta}_7 + \frac{R7}{R8} [J8.\ddot{\Theta}_8 + C4\dot{\Theta}_8 + J9.\ddot{\Theta}_9 + C4\dot{\Theta}_9 + Fc6.R9]]]] \right]$$

Setelah didapatkan persamaan respons dari getaran ini, maka ditentukan frekuensi gelombang yang akan dipanen energi listriknya. Kemudian dilakukan simulasi menggunakan *Matlab Simulink* dengan mengasumsikan semua nilai dari variabel yang belum diketahui. Setelah itu dilakukan pembuatan mekanisme dengan spesifikasi bahan-bahan yang ada di pasaran.

3.2.4.3 Analisa kelistrikan *piezoelectric*

Material *piezoelectric* menghasilkan energi listrik apabila terjadi defleksi pada material tersebut. Energi listrik tersebut terdiri dari voltase, arus listrik, dan daya bangkitan. Voltase bangkitan dari energi listrik pada mekanisme ini dapat dirumuskan dengan:

$$V_p = \frac{3d_{31}E_p w_p t}{4c} x_p$$

dengan:

V_p = Voltase bangkitan *piezoelectric* (Volt)

d_{31} = Voltage constant (C/N)

E_p = Modulus Elastisitas (N/m²)

w_p = Lebar *piezoelectric* (m)

t = Tebal *piezoelectric* (m)

c = Capacitance *piezoelectric* (Farad)

x_p = Defleksi *piezoelectric* (m)

Sedangkan arus bangkitan dari *piezoelectric* pada mekanisme kali ini dapat dirumuskan dengan:

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

$$i_{mc} = \frac{1}{L_{mc}} (V_{mc} - R_{mc} I_{mc} - \frac{1}{C_{mc}} \int I_{mc} dt - V_p)$$

dimana:

$$V_{mc} = \frac{F_i}{\Gamma} \quad L_{mc} = \frac{M}{\Gamma^2} \quad R_{mc} = \frac{d_p}{\Gamma^2} \quad C_{mc} = \frac{\Gamma^2}{k_p}$$

$$\Gamma = \sqrt{k_{31} k_p C_p}$$

dengan:

M = Massa (Kg)

d_p = Konstanta damping ekuivalen *piezoelectric* (Ns/m)

k_p = Konstanta pegas ekuivalen *piezoelectric* (N/m)

C_p = Kapasitansi *piezoelectric* (Farad)

Untuk daya bangkitan dari *piezoelectric* dapat dirumuskan dengan:

$$P = V_p I_{mc}$$

dengan:

I_{mc} = Arus bangkitan *piezoelectric* (Amper)

3.2.5 Variasi

Tujuan dari pemodelan kali ini adalah untuk mengetahui bagaimana pengaruh dari frekuensi dan amplitudo gelombang serta jumlah dari material *piezoelectric* terhadap energi bangkitan dari material *cantilever piezoelectric*. Dikarenakan tujuan itulah pemodelan kali ini diberikan variasi frekuensi gelombang mulai dari 1,1.2, dan 1.4 Hz, variasi tinggi gelombang 7, 7.84, dan 9.4 cm, dan variasi jumlah material *piezoelectric* mulai dari 1, 2, dan 3 yang dipasang berjajar secara paralel.

3.2.6 Analisa dan pembahasan

Nantinya setelah dilakukan pengambilan data hal yang dilakukan selanjutnya adalah menganalisa data yang didapat. Data-data ini didapat hasil dari pengambilan data dari pemodelan pada *Matlab Simulink*. Data ini merupakan data hasil percobaan secara teoritis yang nantinya akan dijadikan sebagai perbandingan dengan data yang didapatkan secara eksperimen.

3.2.7 Kesimpulan

Pada tahap penarikan kesimpulan, hal yang dilakukan adalah dengan mengamati fenomena-fenomena yang terjadi dan bagaimana tren dari sejumlah data yang diperoleh dari pemodelan. Dari data yang didapat secara teoritis nantinya dibandingkan setiap variasi yang telah dilakukan dan dilihat variasi mana yang lebih efektif.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB IV

ANALISA DAN PEMBAHASAN

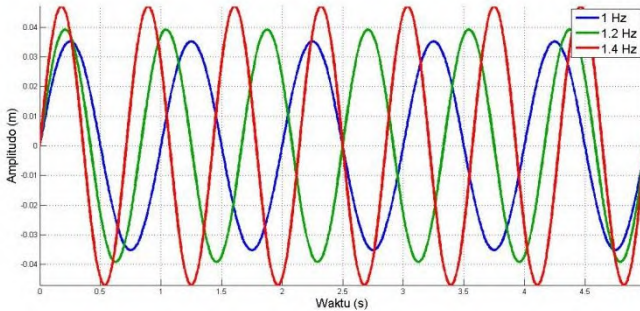
Pada bab ini akan dianalisis dan dibahas energi listrik yang dihasilkan mekanisme *ocean wave energy harvester* tipe pelampung bola dengan menggunakan metode *cantilever piezoelectric* secara teoritis. Analisa dan pembahasan ini dimulai dengan analisis gaya yang dihasilkan oleh gelombang laut terhadap energi listrik bangkitan, kemudian dilanjutkan dengan analisis pengaruh variasi frekuensi dan tinggi gelombang, lalu dilanjutkan dengan analisis pengaruh variasi jumlah material *piezoelectric* terhadap energi listrik bangkitan.

4.1 Data dan Spesifikasi Mekanisme *Ocean Wave Energy Harvester* Tipe Pelampung Bola-Cantilever Piezoelectric

Pada subbab ini akan dijelaskan mengenai data dan spesifikasi dari bagian-bagian mekanisme *ocean wave energy harvester* yang akan digunakan dalam pemodelan. Selain data dari *ocean wave energy harvester*, pada subbab ini juga akan dijelaskan mengenai data-data gelombang laut yang akan digunakan dalam pemodelan.

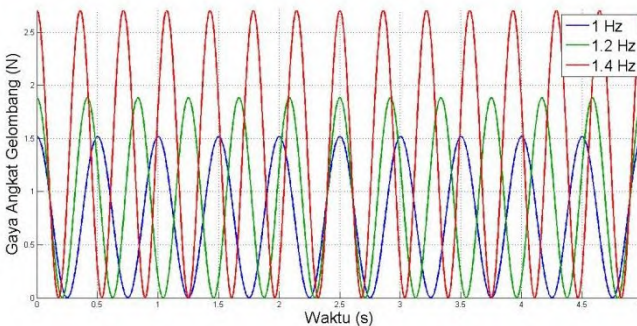
4.1.1 Simulator Gelombang laut

Pemodelan kali ini akan digunakan spesifikasi gelombang yang dihasilkan oleh alat simulator gelombang laut. Pada simulator gelombang laut ini, besar dari frekuensi gelombang yang dihasilkan selalu berbanding lurus dengan nilai amplitudo gelombangnya. Data gelombang yang digunakan dalam pemodelan kali ini adalah gelombang pada frekuensi 1 Hz dengan amplitudo 3.52 cm, frekuensi 1.2 Hz dengan amplitudo 3.92 cm, dan frekuensi 1.4 Hz dengan amplitudo 4.7 cm. Profil gelombang yang dihasilkan oleh simulator gelombang laut dapat dilihat pada gambar 4.1.



Gambar 4.1 Grafik pergerakan gelombang laut dengan variasi frekuensi dan tinggi gelombang

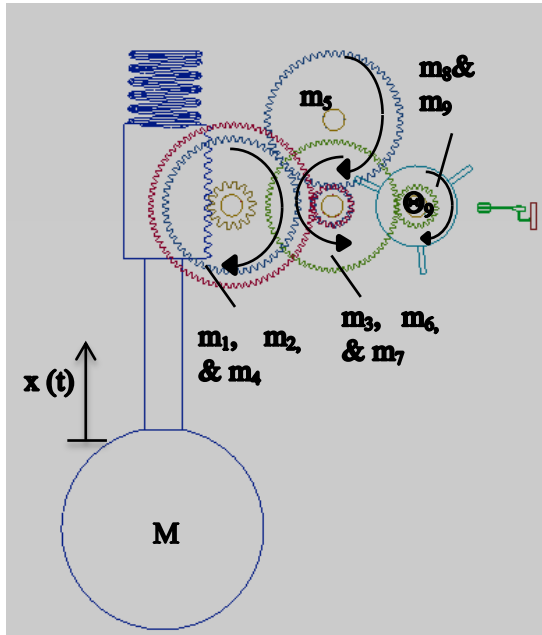
Berdasarkan pergerakan gelombang yang dihasilkan oleh simulator gelombang laut, dengan menggunakan persamaan 2.13 dapat ditentukan besarnya gaya angkat gelombangnya seperti gambar 4.2. Pada grafik tersebut diambil RMS setiap variasi frekuensi gelombangnya. Pada frekuensi gelombang 1 Hz dengan amplitudo 3.52 cm, 1.2 Hz dengan amplitudo 3.92 cm, dan 1.4 Hz dengan amplitudo 4.7 cm gaya angkat gelombangnya berurut-urut adalah 0.93 N, 1.16 N, dan 1.66 N. Berdasarkan nilai-nilai tersebut dapat disimpulkan bahwa dengan semakin bertambahnya frekuensi, amplitudo gelombang akan semakin besar, dengan demikian gaya angkat gelombang yang dihasilkan juga akan semakin besar.



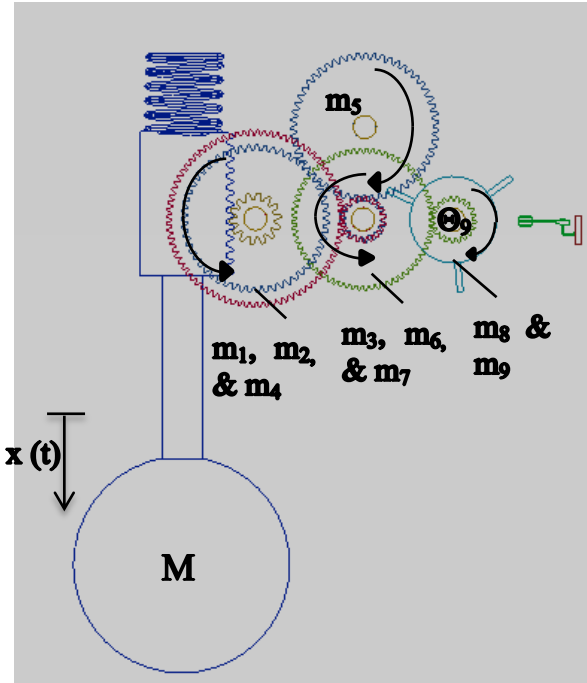
Gambar 4.2 Grafik gaya angkat gelombang

4.1.2 Mekanisme *ocean wave energy harvester*

Berdasarkan mekanisme yang dimodelkan pada gambar 4.3 untuk gelombang naik dan gambar 4.4 untuk gelombang turun, spesifikasi dari bagian-bagian mekanisme tersebut dapat dilihat pada tabel 4.1 untuk mekanisme gerak naik, tabel 4.2 untuk mekanisme gerak turun, dan tabel 4.3 untuk material *piezoelectric*.



Gambar 4.3 Mekanisme gerak gelombang naik



Gambar 4.4 Mekanisme gerak gelombang turun

Tabel 4.1 Spesifikasi bagian-bagian mekanisme *ocean wave energy harvester* gerak naik

Dimensi	Besar	Satuan
Massa Pelampung (M)	0.2475	Kg
Konstanta Pegas (K)	400	N/m
Massa <i>pinion</i> (m_1)	0.005	Kg
Massa <i>gear</i> 2 (m_2)	0.0125	Kg
Massa <i>gear</i> 3 (m_3)	0.0067	Kg
Massa <i>gear</i> 4 (m_4)	0.0125	Kg
Massa <i>gear</i> 5 (m_5)	0.0125	Kg
Massa <i>gear</i> 6 (m_6)	0.0067	Kg

Tabel 4.1 Spesifikasi bagian-bagian mekanisme *ocean wave energy harvester* gerak naik (lanjutan)

Dimensi	Besar	Satuan
Massa <i>gear</i> 7 (m_7)	0.0125	Kg
Massa <i>gear</i> 8 (m_8)	0.0067	Kg
Massa <i>blade</i> (m_9)	0.012	Kg
Jari-jari <i>pinion</i> (R_1)	0.015	m
Jari-jari <i>gear</i> 2 (R_2)	0.03	m
Jari-jari <i>gear</i> 3 (R_3)	0.0073	m
Jari-jari <i>gear</i> 4 (R_4)	0.024	m
Jari-jari <i>gear</i> 5 (R_5)	0.073	m
Jari-jari <i>blade</i> (R_6)	0.035	m

Tabel 4.2 Spesifikasi dimensi material *piezoelectric*

Dimensi	Besar	Satuan
Massa inersia (m_p)	0.0003	Kg
Panjang (L_p)	0.012	m
Lebar (w_p)	0.006	m
Tinggi (h_p)	0.0001	m
<i>Mechanical coupling</i> (k_{31})	0.12	
Kapasitansi (c)	244	pF
<i>Piezoelectric constant</i> (d_{31})	23×10^{-12}	C/N
Modulus elastisitas (E)	3×10^9	N/m ²

4.1.3 Contoh perhitungan

Dari data dan spesifikasi yang telah dijelaskan di atas, maka dapat dilakukan perhitungan. Di bawah ini adalah hasil perhitungan yang berguna untuk pemodelan karakteristik energi listrik yang dihasilkan mekanisme *ocean wave energy harvester* tipe pelampung bola menggunakan metode *cantilever*

piezoelectric. Perhitungan ini didahului dengan menentukan parameter-parameter yang akan digunakan untuk perhitungan. Parameter-parameter tersebut adalah sebagai berikut:

➤ Momen inersia (J)

Nilai momen inersia dari *gear* dianggap sebagai silinder pejal, maka digunakan rumus $J = \frac{1}{2}mR^2$, sehingga nilai dari momen inersia untuk masing-masing *gear* untuk gerak naik maupun turun adalah:

- Momen inersia *pinion* (J_1) = 5.6250×10^{-7} Kg.m²
- Momen inersia *gear* 2 (J_2) = 5.6250×10^{-6} Kg.m²
- Momen inersia *gear* 3 (J_3) = 1.7852×10^{-7} Kg.m²
- Momen inersia *gear* 4 (J_4) = 3.6000×10^{-6} Kg.m²
- Momen inersia *gear* 5 (J_5) = 3.6000×10^{-6} Kg.m²
- Momen inersia *gear* 6 (J_6) = 1.7852×10^{-7} Kg.m²
- Momen inersia *gear* 7 (J_7) = 3.6000×10^{-6} Kg.m²
- Momen inersia *gear* 8 (J_8) = 1.7852×10^{-7} Kg.m²
- Momen inersia *blade* (J_9) = 7.3500×10^{-6} Kg.m²

➤ Konstanta damping (c)

Nilai konstanta damping dari mekanisme sangatlah kecil, oleh karena itu nilai dari konstanta damping ini dapat diabaikan sehingga tidak berpengaruh ($c_1 = c_2 = c_3 = c_4 = 0$)

➤ Konstanta pegas pada poros

Nilai konstanta pegas pada poros sangatlah besar, sehingga tidak terjadi defleksi sudut (Θ) sama sekali. Karena nilai dari defleksi sudut (Θ) tidak ada maka pengaruh konstanta pegas pada poros dapat diabaikan

Setelah diketahui parameter-parameter yang akan digunakan dalam analisis gerak mekanisme *ocean wave energy harvester*. Selanjutnya akan dilakukan perhitungan perpindahan sudut mekanisme, gaya kontak *blade* dengan material *piezoelectric*, dan energi bangkitan dari material *piezoelectric*. Perhitungan-perhitungan tersebut adalah sebagai berikut:

- Perpindahan sudut (Θ), kecepatan sudut ($\dot{\Theta}$), dan percepatan sudut ($\ddot{\Theta}$)
 Keseluruhan nilai dari perpindahan sudut (Θ), kecepatan sudut ($\dot{\Theta}$), dan percepatan sudut ($\ddot{\Theta}$) dihitung untuk setiap gerak naik maupun turun. Nilai dari setiap sudut perpindahan pada *gear* nilainya diekuivalenkan dengan perpindahan sudut pada *blade* sehingga:

Gerak Naik

$x = \theta_1 R_1$, sedangkan besar nilai $\theta_1 = \theta_2$ karena seporos, lalu

$\theta_2 R_2 = \theta_3 R_3$, dan nilai $\theta_3 = \theta_6$ dikarenakan seporos, lalu

$\theta_6 R_6 = \theta_5 R_5$, dan nilai $\theta_5 R_5 = \theta_4 R_4$, lalu $\theta_6 = \theta_7$ dikarenakan seporos, lalu

$\theta_7 R_7 = \theta_8 R_8$, dan nilai $\theta_8 = \theta_9$, maka persamaan 3.37 menjadi

$$\left[M \frac{R_8 R_3 R_1}{R_2 R_7} \ddot{\theta}_9 + K \frac{R_8 R_3 R_1}{R_2 R_7} \theta_9 - F_w + \frac{1}{R_1} \left[J_1 \frac{R_8 R_3}{R_2 R_7} \ddot{\theta}_9 + \right. \right. \\ \left. \left. J_2 \frac{R_8 R_3}{R_2 R_7} \ddot{\theta}_9 + \frac{R_2}{R_3} \left[J_3 \frac{R_8}{R_7} \ddot{\theta}_9 + J_6 \frac{R_8}{R_7} \ddot{\theta}_9 + \frac{R_6}{R_5} \left(J_5 \frac{R_6 R_8}{R_5 R_7} \ddot{\theta}_9 + \right. \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. J_4 \frac{R_6 R_8}{R_4 R_7} \right) + J_7 \frac{R_8}{R_7} \ddot{\theta}_9 + \frac{R_7}{R_8} [J_8 \ddot{\theta}_9 + J_9 \ddot{\theta}_9 + F_{cp} R_9] \right] \right] = 0.$$

$$0.0074 \ddot{\theta}_9 + 0.4441 \theta_9 + 31.5256 F_{cp} - F_w = 0$$

Gerak Turun

Dengan cara yang sama untuk mendapatkan persamaan gerak pada gerak naik, maka persamaan gerak turun didapatkan sebagai berikut:

$$\left[M \frac{R_8 R_6 R_1}{R_7 R_4} \ddot{\theta}_9 + K \frac{R_8 R_6 R_1}{R_7 R_4} \theta_9 + F_w + \frac{1}{R_1} \left[J_1 \frac{R_8 R_6}{R_4 R_7} \ddot{\theta}_9 + \right. \right. \\ \left. \left. J_4 \frac{R_8 R_6}{R_4 R_7} \ddot{\theta}_9 + J_5 \frac{R_8 R_6 R_4}{R_5 R_7} \ddot{\theta}_9 + \frac{R_5}{R_6} \left[J_6 \frac{R_8}{R_7} \ddot{\theta}_9 + J_3 \frac{R_8}{R_7} \ddot{\theta}_9 + \right. \right. \right. \\ \left. \left. \frac{R_3}{R_2} \left(J_2 \frac{R_3 R_8}{R_2 R_7} \ddot{\theta}_9 \right) + J_7 \frac{R_8}{R_7} \ddot{\theta}_9 + \frac{R_7}{R_8} \left[J_8 \ddot{\theta}_9 + J_9 \ddot{\theta}_9 + \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. F_{cp} R_9 \right] \right] \right] = 0.$$

$$0.0060 \ddot{\theta}_9 + 0.5551 \theta_9 + 15.7628 F_{cp} + F_w = 0$$

- Gaya kontak *blade* dengan material *piezoelectric*
Analisis gaya kontak antara *blade* dengan material *piezoelectric* digunakan pendekatan gaya kejut (*impact*) yang terjadi ketika *blade* memukul material *piezoelectric*. Gaya *impact* tersebut didapatkan dari persamaan:

$$F_{cp} = \frac{m_9 \dot{\theta}_9 R_9}{\Delta t}$$

$$F_{cp} = \frac{4.2 \times 10^{-4}}{\Delta t} \dot{\theta}_9, \text{ dengan } \frac{1}{\Delta t} = \frac{R_2}{R_3} \times \frac{R_7}{R_8} = 13.5110 \text{ maka}$$

$$F_{cp} = 0.0057 \dot{\theta}_6$$

- *Piezoelectric*

Dalam perhitungan energi listrik yang dihasilkan oleh material *piezoelectric*, ada beberapa hal yang menentukan besarnya energi bangkitan tersebut diantaranya:

- Voltase bangkitan (V_p)

$$V_p = \frac{3d_{31} E_p w_p t}{4c} x_p(t)$$

$$V_p = \frac{3 \times 23 \times 10^{-12} \times 3 \times 10^9 \times 0.006 \times 0.0001}{4 \times 244 \times 10^{-12}} x_p(t) = 127.25 X_p(t) \text{ volt}$$

- Konstanta pegas (k_p)

$$k_p = \frac{3EI}{l_p^3}, \text{ dengan } I = \frac{w_p h_p^3}{12} = 5 \times 10^{-16}$$

$$k_p = 2.6042 \text{ N/m}$$

- Arus bangkitan *piezoelectric*

Dengan menggunakan persamaan 3.74 maka akan didapatkan:

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

dengan:

$$V_{mc} = \frac{F_{cp}}{\Gamma}, \Gamma = \sqrt{k_{31}^2 k_p c} = 3.0249 \times 10^{-6}$$

$$V_{mc} = \frac{0.0057 \dot{\theta}_6}{3.0249 \times 10^{-6}} = 1884.359 \dot{\theta}_6$$

$$L_{mc} = \frac{m_p}{\Gamma^2} = \frac{0.0003}{(3.0249 \times 10^{-6})^2} = 3.2787 \times 10^7$$

$$C_{mc} = \frac{\Gamma^2}{k_p} = \frac{(3.0249 \times 10^{-6})^2}{2.6042} = 3.5136 \times 10^{-12}$$

Sehingga persamaan arus bangkitan *piezoelectric* menjadi

$$1884.359 \dot{\theta}_6 =$$

$$3.279 \times 10^7 \frac{dI_{mc}}{dt} + \frac{1}{3.5136 \times 10^{-12}} \int I_{mc} dt +$$

$$0.2052 \dot{\theta}_6$$

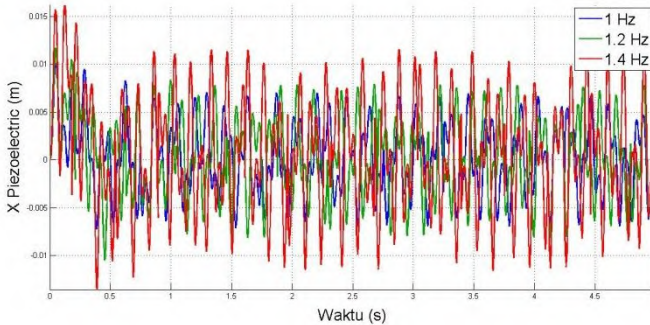
Setelah menentukan parameter-parameter yang dibutuhkan dan telah melakukan perhitungan maka dibuat *block diagram* pada MATLAB Simulink. Dari simulasi ini nantinya akan didapatkan besar voltase, arus, dan daya bangkitan dari material *piezoelectric* dengan melakukan variasi terhadap jumlah *piezoelectric*, tinggi dan frekuensi gelombang. Setelah mendapatkan grafik setiap variasi ditentukan *root mean square* (RMS) untuk dicari nilai rata-rata dari energi bangkitan pada

piezoelectric, dan kemudian dilakukan analisis dan pembahasan pada masing-masing grafik.

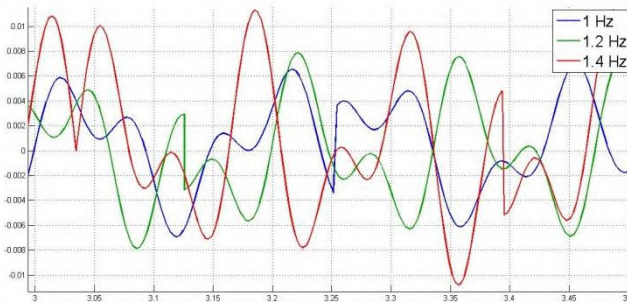
4.2 Analisa Pemodelan

4.2.1 Defleksi material *piezoelectric* dengan variasi frekuensi, amplitudo gelombang, dan jumlah material *piezoelectric*

Analisa pemodelan kali ini akan diawali dengan menampilkan defleksi yang terjadi pada material *piezoelectric*. Defleksi ini akan ditampilkan dalam bentuk grafik perubahan defleksi material *piezoelectric* terhadap waktu. Grafik-grafik tersebut nantinya akan divariasikan frekuensi dan amplitudo gelombangnya. Variasi dari frekuensi selalu berbanding lurus dengan amplitudonya yaitu ketika frekuensi gelombang 1 Hz amplitudonya 3.52 cm, 1.2 Hz amplitudonya 3.92 cm, dan ketika 1.4 Hz amplitudonya 4.7 cm. Hasil dari simulasi ini dapat dilihat pada gambar 4.5 dan 4.6.



Gambar 4.5 Grafik defleksi 1 material *piezoelectric* dengan variasi frekuensi



Gambar 4.6 Grafik defleksi 1 material *piezoelectric* dengan variasi frekuensi diperbesar 3 sampai 3.5 detik

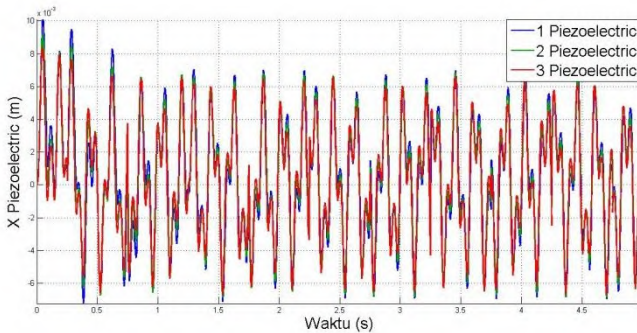
Pada gambar di atas ditunjukkan perubahan defleksi 1 buah material *piezoelectric* terhadap waktu. Dari grafik tersebut terlihat bahwa sistem stabil pada detik ke 1.5. Nilai defleksi material *piezoelectric* pada frekuensi 1 Hz dari grafik tersebut mempunyai nilai tertinggi sebesar 0.0056 m, pada frekuensi 1.2 Hz mempunyai nilai defleksi terbesar 0.0071 m, dan pada frekuensi 1.4 Hz mempunyai defleksi terbesar 0.009 m. Berdasarkan nilai-nilai tersebut dapat disimpulkan bahwa dengan semakin bertambahnya frekuensi, maka nilai defleksi material *piezoelectric* juga akan semakin besar.

Hal yang serupa juga terjadi pada grafik defleksi material *piezoelectric* yang berjumlah 2 dan 3 terhadap waktu. Pada grafik ini didapatkan nilai tertingginya yang hampir sama dengan ketika material *piezoelectric* berjumlah 1 pada frekuensi 1, 1.2, dan 1.4 berurut-urut yaitu 0.0054 m, 0.0069 m, dan 0.009 m pada material *piezoelectric* yang berjumlah 2. Pada material *piezoelectric* yang berjumlah 3 nilai defleksi tertingginya berurut-urut yaitu 0.0051 m, 0.0068 m, dan 0.0087 m.

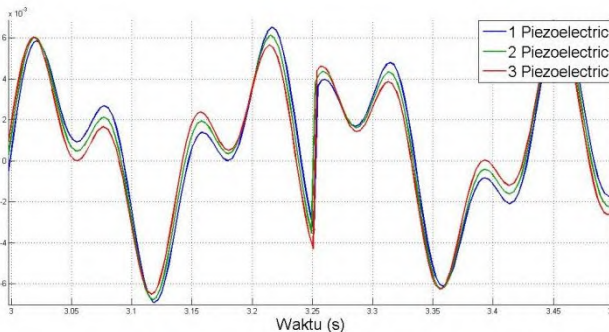
Dari nilai-nilai yang sudah disebutkan di atas, maka dapat ditarik kesimpulan bahwa dengan semakin bertambahnya frekuensi gelombang menyebabkan defleksi *piezoelectric* juga akan semakin besar. Hal ini disebabkan karena dengan

bertambahnya frekuensi, maka tinggi gelombang juga akan semakin besar, sehingga akan mengakibatkan gaya angkat gelombang juga akan semakin besar.

Selain menampilkan grafik defleksi material *piezoelectric* terhadap waktu yang dipengaruhi oleh frekuensi dan amplitudo gelombang, pada subbab ini juga akan ditampilkan grafik defleksi material *piezoelectric* terhadap waktu yang dipengaruhi oleh jumlah material *piezoelectric*. Grafik ini dapat dilihat pada gambar 4.7 dan 4.8.



Gambar 4.7 Grafik defleksi material *piezoelectric* pada frekuensi gelombang 1 Hz dengan variasi jumlah material *piezoelectric*



Gambar 4.8 Grafik defleksi material *piezoelectric* pada frekuensi gelombang 1 Hz dengan variasi jumlah material *piezoelectric* diperbesar 3 sampai 3.5 detik

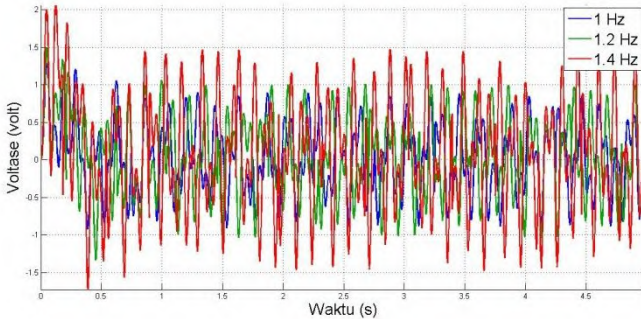
Grafik di atas adalah grafik defleksi dari 1 material *piezoelectric* terhadap waktu dengan variasi frekuensi gelombang. Grafik tersebut mulai stabil pada detik ke 1.5. Nilai dari defleksi pada grafik tersebut hampir sama dengan semakin bertambahnya jumlah material *piezoelectric*. Pada grafik dengan jumlah material *piezoelectric* yang berjumlah 1, 2, dan 3 nilai tertingginya berurut-urut adalah 0.0056 m, 0.0054 m, 0.0051 m.

Grafik serupa juga didapatkan ketika memvariasikan pada frekuensi gelombang sebesar 1.2 Hz dan 1.4 Hz. Nilai tertingginya ketika divariasikan jumlah material *piezoelectric*-nya sebesar 1, 2, dan 3 berurut-urut adalah 0.0071 m, 0.0069 m, dan 0.0068 m untuk frekuensi gelombang sebesar 1.2 Hz. Kemudian ketika frekuensi gelombangnya dinaikkan lagi sebesar 1.4 Hz, defleksi terbesarnya adalah 0.009 m, 0.009 m, dan 0.0087 m.

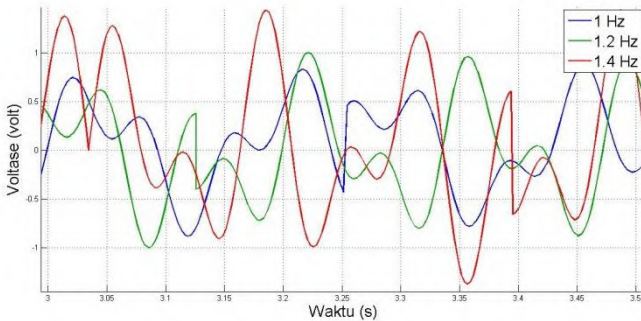
Setelah mendapatkan nilai-nilai tertinggi dari defleksi *piezoelectric* dengan variasi jumlah *piezoelectric*, maka dapat ditarik kesimpulan bahwa dengan semakin banyaknya jumlah material *piezoelectric*, maka defleksi yang dihasilkan akan cenderung sama. Karena gaya pukul yang diterima oleh setiap material *piezoelectric* sama.

4.2.2 Energi bangkitan material *piezoelectric* dengan variasi jumlah material *piezoelectric*, frekuensi, dan amplitudo gelombang

Pada subbab ini nantinya akan diberikan grafik hasil simulasi pada MATLAB Simulink. Grafik-grafik tersebut divariasikan frekuensi dan amplitudo gelombangnya. Variasi tersebut mulai dari frekuensi gelombang sebesar 1 Hz dengan amplitudo sebesar 3.52 cm, frekuensi gelombang sebesar 1.2 Hz dengan amplitudo sebesar 3.92 cm, dan frekuensi gelombang sebesar 1.4 Hz dengan amplitudo sebesar 4.7 cm. Seperti pada gambar 4.2 di bawah ini yang merupakan grafik voltase bangkitan dari 1 *piezoelectric* dengan variasi frekuensi gelombang.



Gambar 4.9 Grafik voltase bangkitan 1 material *piezoelectric* dengan variasi frekuensi



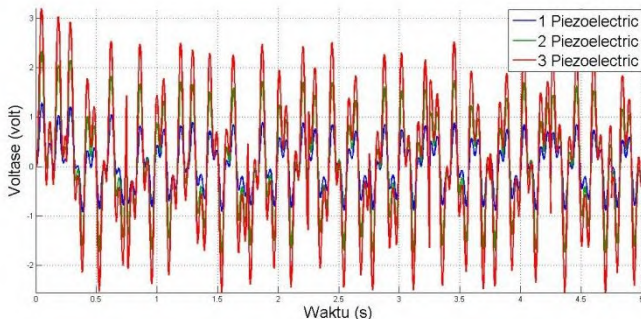
Gambar 4.10 Grafik voltase bangkitan 1 material *piezoelectric* dengan variasi frekuensi diperbesar 3 sampai 3.5 detik

Gambar 4.9 di atas adalah grafik voltase bangkitan dari 1 material *piezoelectric*. Grafik tersebut mulai stabil pada detik ke 1.5. Pada gambar 4.10 terlihat bahwa pada detik ke 3 grafik yang terjadi tidak kontinu, hal ini karena pada detik tersebut terjadi perpindahan sistem dari naik ke turun. Dari grafik tersebut kemudian diambil nilai tertinggi dari setiap variasi. Nilai tertinggi dari voltase bangkitan pada frekuensi 1 Hz dengan amplitudo gelombang 3.52 cm besarnya adalah 0.868 volt, frekuensi 1.2 Hz dengan amplitudo 3.92 cm besarnya adalah 1 volt, dan frekuensi 1.4 Hz dengan amplitudo 4.7 cm besarnya adalah 1.442 volt.

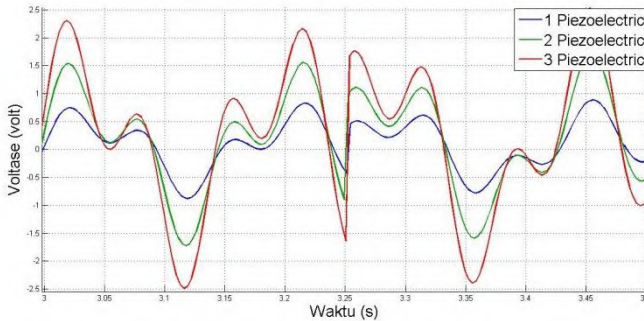
Berdasarkan nilai-nilai tersebut nilai voltase bangkitan tertinggi pada frekuensi gelombang 1.4 Hz dengan amplitudo 4.7 cm dengan nilai voltase 1.442 volt

Profil grafik yang sama juga ditunjukkan oleh grafik voltase bangkitan material piezoelectric berjumlah 2 dan 3 terhadap waktu dengan variasi frekuensi gelombang. Nilai tertinggi dari masing-masing jumlah material *piezoelectric* tersebut berurut-urut adalah 2.916 volt dan 4.308 volt yang sama-sama terdapat pada frekuensi 1.4 Hz dengan amplitudo 4.7 cm.

Selain grafik voltase bangkitan material *piezoelectric* yang divariasikan frekuensi gelombang dan amplitudonya. Grafik voltase bangkitan juga disajikan dengan variasi jumlah material *piezoelectric*-nya. Grafik tersebut dapat dilihat pada gambar 4.11 dan 4.12.



Gambar 4.11 Grafik voltase bangkitan material *piezoelectric* pada frekuensi 1 Hz dengan variasi jumlah material *piezoelectric*

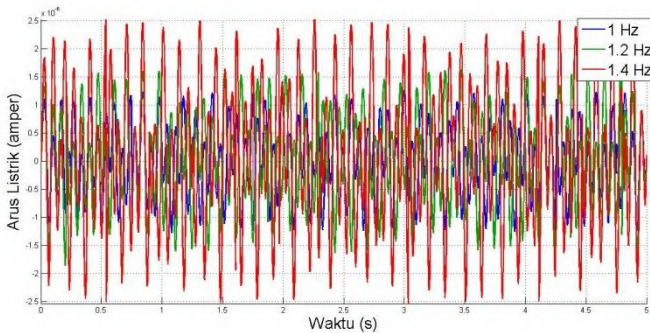


Gambar 4.12 Grafik voltase bangkitan material *piezoelectric* pada frekuensi 1 Hz dengan variasi jumlah material *piezoelectric* diperbesar 3 sampai 3.5 detik

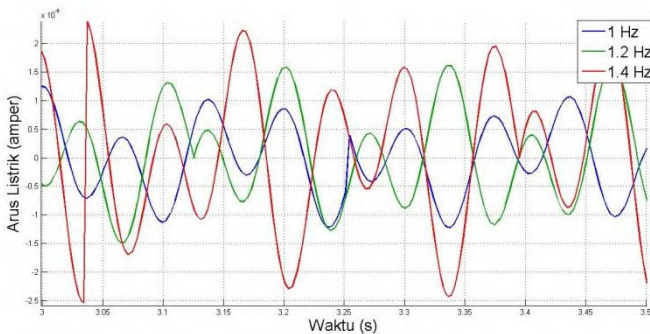
Gambar 4.11 di atas merupakan grafik voltase bangkitan yang dihasilkan oleh material *piezoelectric* pada frekuensi 1 Hz dengan variasi jumlahnya. Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa nilai tertinggi dicapai pada jumlah material *piezoelectric* 3 dengan nilai terbesarnya 2.521 volt. Kemudian pada jumlah material *piezoelectric* 2 nilai voltase bangkitan terbesarnya 1.522 volt, dan pada jumlah material *piezoelectric* 1 nilai voltase bangkitan tertingginya sebesar 0.8624 volt.

Grafik serupa juga ditunjukkan ketika frekuensi gelombangnya ditambah menjadi 1.2 Hz dan 1.4 Hz. Ketika frekuensi gelombangnya 1.2 Hz voltase bangkitan tertinggi juga ada pada jumlah material *piezoelectric* sebanyak 3 dengan nilai terbesar 2.955 volt. Terakhir ketika frekuensi gelombang ditingkatkan sebesar 1.4 Hz voltase bangkitan tertinggi juga dihasilkan oleh 3 material *piezoelectric* dengan nilai terbesarnya 4.316 volt.

Setelah menampilkan grafik voltase yang dihasilkan oleh simulasi, kemudian akan ditampilkan grafik arus bangkitan dari material *piezoelectric* yang divariasikan jumlah material *piezoelectric*, frekuensi dan tinggi gelombangnya. Grafik tersebut ditunjukkan oleh gambar 4.13 hingga 4.16.



Gambar 4.13 Grafik arus bangkitan 1 material *piezoelectric* dengan variasi frekuensi



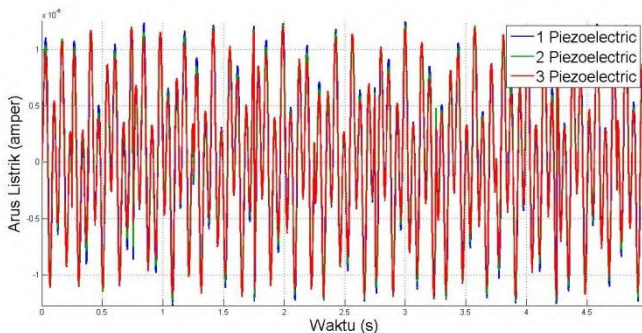
Gambar 4.14 Grafik arus bangkitan 1 material *piezoelectric* dengan variasi frekuensi diperbesar 3 sampai 3.5 detik

Pada gambar 4.13 di atas ditunjukkan grafik arus bangkitan dari 1 material *piezoelectric*. Grafik tersebut mulai stabil pada detik ke 1.5. Pada gambar 4.13 terlihat bahwa pada detik ke 3 grafik yang terjadi tidak kontinu, hal ini karena pada detik tersebut terjadi perpindahan sistem dari naik ke turun. Dari grafik tersebut kemudian diambil nilai terbesarnya dari setiap variasi. Nilai terbesar dari arus bangkitan pada frekuensi 1 Hz dengan amplitudo gelombang 3.52 cm, frekuensi 1.2 Hz dengan amplitudo 3.92 cm, dan frekuensi 1.4 Hz dengan amplitudo 4.7

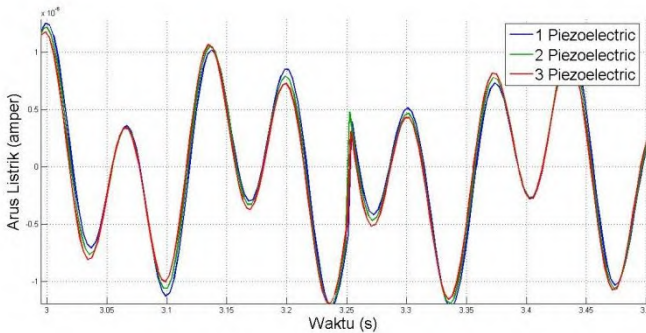
cm yang besarnya berurut-urut adalah 1.215×10^{-6} A, 1.605×10^{-6} A, dan 2.505×10^{-6} A. Dari nilai tertinggi yang telah didapatkan dapat diketahui bahwa dengan semakin besar frekuensi dan tinggi gelombang, maka nilai arus bangkitan yang dihasilkan material *piezoelectric* akan semakin besar dengan nilai terbesar pada frekuensi 1.4 Hz dan tinggi gelombang 4.7 cm dengan besar arus terbesarnya adalah 2.505×10^{-6} A.

Grafik yang serupa juga ditunjukkan oleh grafik arus bangkitan material *piezoelectric* dengan jumlah 2 dan 3 yang juga divariasikan frekuensi dan tinggi gelombangnya. Pada 2 material *piezoelectric* arus bangkitan terbesarnya bernilai 2.497×10^{-6} A pada frekuensi gelombang 1.4 Hz dan tinggi gelombang 4.7 cm. Terakhir ketika jumlah material *piezoelectric* 3 arus bangkitan terbesarnya bernilai 2.468×10^{-6} A pada frekuensi gelombang 1.4 Hz dan tinggi gelombang 4.7 cm.

Selain menampilkan grafik arus bangkitan material *piezoelectric* terhadap waktu yang divariasikan frekuensi dan tinggi gelombangnya, selanjutnya akan ditampilkan grafik arus bangkitan material *piezoelectric* terhadap waktu yang divariasikan jumlah material *piezoelectric*-nya. Grafik tersebut dapat dilihat pada gambar 4.15 dan 4.16.



Gambar 4.15 Grafik arus bangkitan material *piezoelectric* pada frekuensi gelombang 1 Hz dengan variasi jumlah material *piezoelectric*

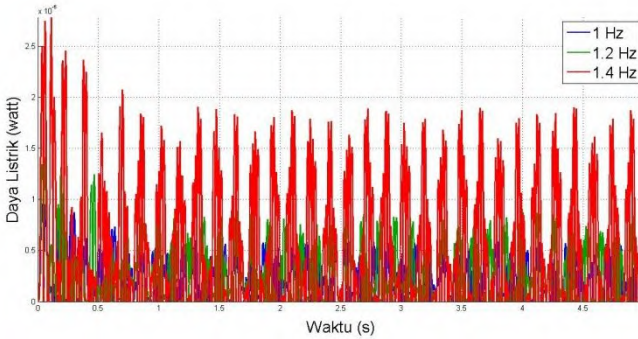


Gambar 4.16 Grafik arus bangkitan material *piezoelectric* pada frekuensi gelombang 1 Hz dengan variasi jumlah material *piezoelectric* diperbesar 3 sampai 3.5 detik

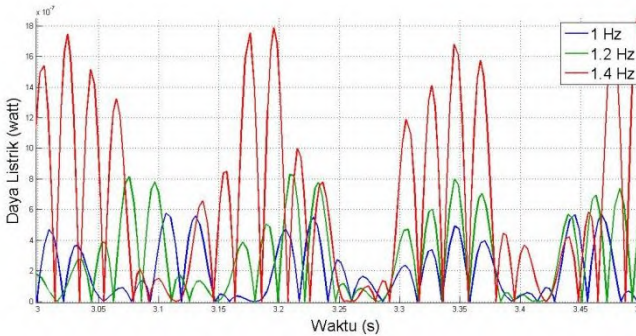
Gambar 4.15 di atas merupakan grafik arus bangkitan yang dihasilkan oleh material *piezoelectric* pada frekuensi 1 Hz dengan variasi jumlahnya. Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa nilai dari arus bangkitannya hampir sama. Pada jumlah material *piezoelectric* 1, 2, dan 3 nilai-nilai arus bangkitan terbesarnya berurut-urut adalah 1.215×10^{-6} A, 1.216×10^{-6} A, dan 1.176×10^{-6} A.

Bentuk grafik yang sama juga ditunjukkan ketika frekuensi gelombangnya ditambah menjadi 1.2 Hz dan 1.4 Hz. Ketika frekuensi gelombangnya 1.2 Hz arus bangkitan tertingginya sebesar 1.633×10^{-6} A. Terakhir ketika frekuensi gelombang ditingkatkan sebesar 1.4 Hz arus bangkitan tertinggi yang dihasilkan adalah sebesar 2.468×10^{-6} A.

Terakhir setelah grafik voltase dan arus bangkitan ditampilkan, selanjutnya ditampilkan grafik daya bangkitan pada masing-masing jumlah material *piezoelectric*. Grafik-grafik tersebut dapat dilihat pada gambar 4.17 sampai gambar 4.20.



Gambar 4.17 Grafik daya bangkitan 1 material *piezoelectric* dengan variasi frekuensi



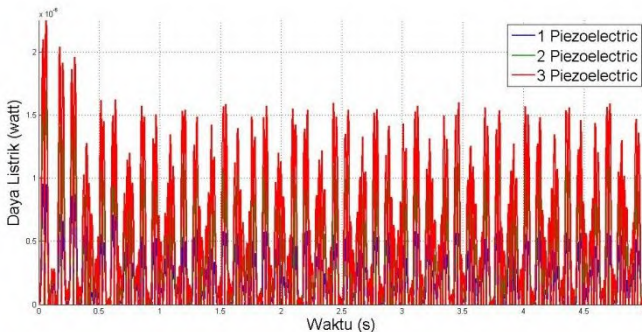
Gambar 4.18 Grafik daya bangkitan 1 material *piezoelectric* dengan variasi frekuensi diperbesar 3 sampai 3.5 detik

Gambar di atas adalah gambar 4.17 yang merupakan grafik daya bangkitan dari 1 material *piezoelectric*. Grafik tersebut mulai stabil pada detik ke 1.5 dengan nilai daya listrik tertinggi pada frekuensi gelombang 1.4 Hz. Dari grafik tersebut kemudian diambil nilai terbesarnya dari setiap variasi. Nilai terbesar dari daya bangkitan pada frekuensi 1 Hz dengan amplitudo gelombang 3.52 cm besarnya adalah 5.797×10^{-7} watt, frekuensi 1.2 Hz dengan amplitudo 3.92 cm besarnya adalah 8.265×10^{-7} watt, dan frekuensi 1.4 Hz dengan amplitudo 4.7 cm besarnya adalah 1.899×10^{-6} watt. Dari nilai tertinggi yang telah

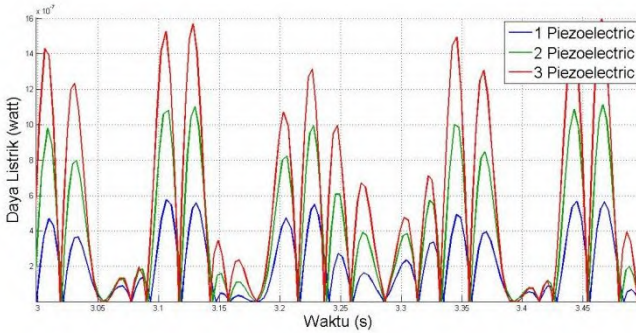
didapatkan dapat diketahui bahwa dengan semakin besar frekuensi dan tinggi gelombang, maka nilai daya bangkitan yang dihasilkan material *piezoelectric* akan semakin besar dengan nilai terbesar pada frekuensi 1.4 Hz dan tinggi gelombang 4.7 cm yaitu 1.899×10^{-6} watt.

Grafik serupa juga ditunjukkan oleh daya bangkitan yang dihasilkan material *piezoelectric* dengan jumlah 2 dan 3. Nilai tertinggi dari daya bangkitan 2 material *piezoelectric* adalah 3.723×10^{-6} watt pada frekuensi 1.4 Hz dengan tinggi gelombang 4.7 cm. Pada 3 material *piezoelectric* daya bangkitan tertingginya adalah 5.411×10^{-6} watt yang juga terjadi pada saat frekuensi gelombang 1.4 Hz dengan tinggi gelombang 4.7 cm.

Setelah itu akan ditampilkan grafik daya bangkitan yang dihasilkan oleh material *piezoelectric* dengan variasi jumlahnya. Grafik tersebut dapat dilihat pada gambar 4.19 dan 4.20.



Gambar 4.19 Grafik arus bangkitan material *piezoelectric* pada frekuensi gelombang 1 Hz dengan variasi jumlah material *piezoelectric*



Gambar 4.20 Grafik arus bangkitan material *piezoelectric* pada frekuensi gelombang 1 Hz dengan variasi jumlah material *piezoelectric* diperbesar 3 sampai 3.5 detik

Gambar 4.19 di atas adalah gambar grafik daya bangkitan material *piezoelectric* pada frekuensi 1 Hz dan amplitudo gelombang 3.52 cm yang divariasikan jumlahnya. Dari gambar di atas dapat dilihat bahwa pada material *piezoelectric* dengan jumlah 1, 2, dan 3 nilai daya bangkitan terbesarnya berurut-urut adalah 5.797×10^{-7} watt, 1.11×10^{-6} watt, 1.599×10^{-6} watt. Dari nilai-nilai tersebut dapat diketahui bahwa nilai daya bangkitan tertinggi ketika material *piezoelectric* berjumlah 3 dengan nilai daya bangkitan terbesarnya 1.599×10^{-6} watt.

Hal serupa juga terjadi ketika frekuensi gelombang ditingkatkan menjadi 1.2 Hz dan 1.4 Hz. Nilai daya bangkitan tertingginya berurut-urut adalah 2.428×10^{-6} watt dan 5.411×10^{-6} watt yang sama-sama ada pada jumlah material *piezoelectric* 3.

4.3 Pembahasan

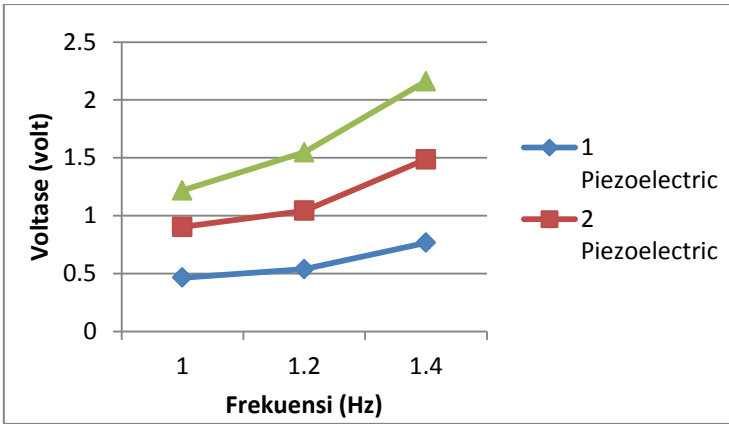
Setelah dicari nilai tertinggi dari masing-masing frekuensi, selanjutnya akan dicari nilai RMS untuk setiap jumlah material *piezoelectric* dengan masing-masing variasinya. Nilai-nilai RMS tersebut dapat dilihat pada tabel 4.4. Dari tabel tersebut nantinya akan dibuat grafik dengan menggunakan Microsoft Excel dan dibahas fenomena-fenomena yang terjadi

Tabel 4.4 Rekapitulasi nilai RMS voltase, arus, dan daya bangkitan material *piezoelectric*

Jumlah <i>Piezoelectric</i>	Frekuensi (Hz)	Amplitudo (cm)	Vrms (Volt)	Irms (Ampere)	Prms (Watt)
1	1	3.52	0.464	6.07×10^7	2.46×10^7
	1.2	3.92	0.5376	7.99×10^7	3.57×10^7
	1.4	4.7	0.7663	1.25×10^6	7.70×10^7
2	1	3.52	0.9029	6.04×10^7	4.67×10^7
	1.2	3.92	1.0425	7.92×10^7	6.80×10^7
	1.4	4.7	1.4859	1.24×10^6	1.48×10^6
3	1	3.52	1.2175	6.28×10^7	6.26×10^7
	1.2	3.92	1.5465	7.92×10^7	1.02×10^6
	1.4	4.7	2.1616	1.23×10^6	2.11×10^6

4.3.1 Pengaruh frekuensi dan tinggi gelombang laut terhadap energi listrik yang dihasilkan mekanisme *ocean wave energy harvester*

Setelah dilakukan analisis mengenai voltase, arus, dan daya bangkitan yang dihasilkan oleh material *piezoelectric* yang dikeluarkan oleh simulasi, selanjutnya dilakukan pembahasan mengenai nilai RMS dari voltase, arus, dan daya tersebut. Analisis tersebut dilakukan berdasarkan pada grafik yang dihasilkan oleh Microsoft Excel yang ditunjukkan oleh gambar 4.21, 4.22, dan 4.23.



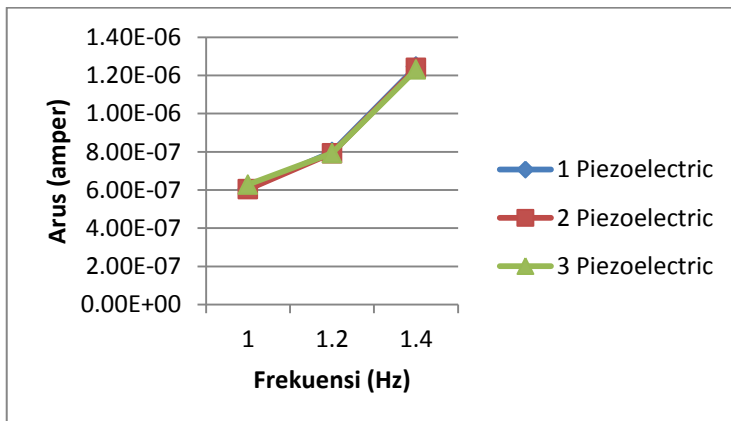
Gambar 4.21 Grafik pengaruh frekuensi gelombang laut terhadap voltase bangkitan dari masing-masing jumlah material *piezoelectric*

Gambar 4.21 di atas adalah grafik pengaruh frekuensi gelombang laut terhadap voltase bangkitan yang dihasilkan oleh mekanisme *ocean wave energy harvester*. Pada gambar tersebut terdapat tiga buah grafik yang masing-masing grafik menunjukkan banyaknya jumlah *piezoelectric* yang dipasang pada mekanisme ketika dilakukan simulasi. Dari ketiga grafik tersebut terlihat bahwa *trendline* dari setiap grafiknya selalu naik seiring dengan bertambahnya frekuensi gelombang laut.

Trendline dari ketiga grafik di atas selalu naik seiring dengan bertambahnya frekuensi dari gelombang laut. Hal ini disebabkan karena dengan bertambahnya frekuensi gelombang laut, maka amplitudo dari gelombang laut juga akan semakin besar. Dengan bertambahnya amplitudo dari gelombang laut tersebut mengakibatkan gaya gelombang laut (F_{wave}) juga akan semakin besar. Gelombang laut ini merupakan input dari mekanisme *ocean wave energy harvester*. Jika gaya gelombang laut ini semakin besar, maka respon dari mekanisme *ocean wave energy harvester* juga akan semakin besar dan mengakibatkan kecepatan sudut pada *blade* juga semakin besar. Kecepatan sudut

pada blade selalu berbanding lurus dengan gaya pukul yang diberikan oleh *blade* ke *piezoelectric*. Dengan semakin besarnya gaya pukul tersebut, maka defleksi yang terjadi pada *piezoelectric* juga akan semakin besar yang mengakibatkan voltase bangkitan dari *piezoelectric* juga semakin besar.

Berdasarkan pada pembahasan di atas dapat ditarik kesimpulan bahwa dengan semakin besarnya frekuensi gelombang laut, maka nilai dari voltase bangkitan yang dihasilkan mekanisme *ocean wave energy harvester* juga akan semakin besar. Dari grafik tersebut diketahui nilai voltase terbesar berada pada frekuensi gelombang 1.4 Hz dengan jumlah material *piezoelectric* sebanyak 3 yang besarnya adalah 2.16 volt.



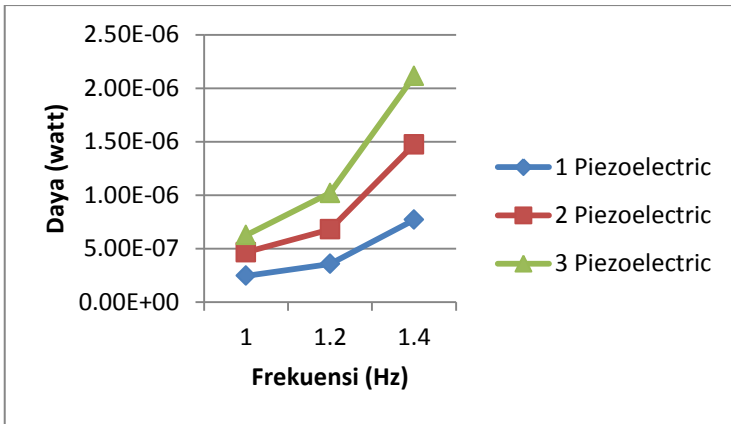
Gambar 4.22 Grafik pengaruh frekuensi gelombang laut terhadap arus listrik bangkitan dari masing-masing jumlah material *piezoelectric*

Gambar 4.22 di atas adalah grafik pengaruh frekuensi gelombang laut terhadap arus bangkitan yang dihasilkan oleh mekanisme *ocean wave energy harvester*. Pada gambar tersebut terdapat tiga buah grafik yang masing-masing grafik menunjukkan banyaknya jumlah *piezoelectric* yang dipasang pada mekanisme ketika dilakukan simulasi. Dari ketiga grafik tersebut

terlihat bahwa *trendline* dari setiap grafiknya selalu naik seiring dengan bertambahnya frekuensi gelombang laut.

Ketiga grafik di atas menunjukkan *trendline* grafik yang selalu selalu naik seiring dengan bertambahnya frekuensi dari gelombang laut. Hal ini disebabkan karena dengan bertambahnya frekuensi gelombang laut, maka amplitudo dari gelombang laut juga akan semakin besar. Dengan bertambahnya amplitudo dari gelombang laut tersebut mengakibatkan gaya gelombang laut (F_{wave}) juga akan semakin besar. Gelombang laut ini merupakan input dari mekanisme *ocean wave energy harvester*. Jika gaya gelombang laut ini semakin besar, maka gaya pukul dari *blade* juga akan semakin besar. Gaya pukul dari *blade* ini menentukan besarnya voltase bangkitan dari *piezoelectric*. Dengan semakin besarnya gaya pukul dan voltase *piezoelectric*, maka nilai dari arus listrik juga akan semakin besar.

Berdasarkan pada pembahasan di atas dapat ditarik kesimpulan bahwa dengan semakin besarnya frekuensi gelombang laut, maka nilai dari arus listrik bangkitan yang dihasilkan mekanisme *ocean wave energy harvester* juga akan semakin besar. Dari grafik tersebut diketahui nilai arus listrik terbesar berada pada frekuensi gelombang 1.4 Hz yang besarnya adalah 1.25×10^{-6} A.



Gambar 4.23 Grafik pengaruh frekuensi gelombang laut terhadap daya listrik bangkitan dari masing-masing jumlah material *piezoelectric*

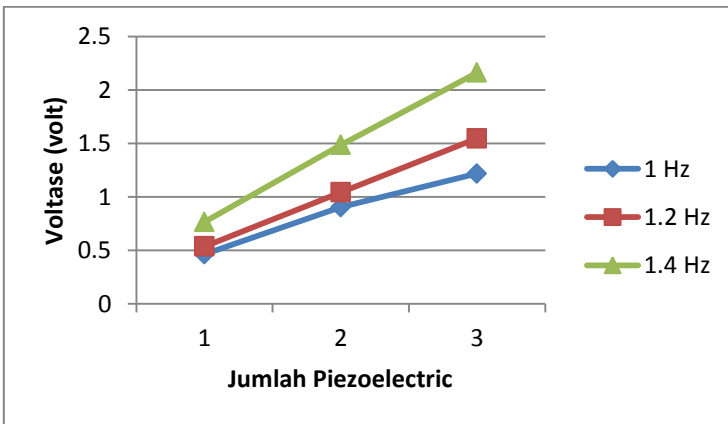
Gambar 4.23 di atas adalah grafik pengaruh frekuensi gelombang laut terhadap daya bangkitan yang dihasilkan oleh mekanisme *ocean wave energy harvester*. Pada gambar tersebut terdapat tiga buah grafik yang masing-masing grafik menunjukkan banyaknya jumlah *piezoelectric* yang dipasang pada mekanisme ketika dilakukan simulasi. Dari ketiga grafik tersebut terlihat bahwa *trendline* dari setiap grafiknya selalu naik seiring dengan bertambahnya frekuensi gelombang laut.

Ketiga grafik di atas menunjukkan *trendline* grafik yang selalu selalu naik seiring dengan bertambahnya frekuensi dari gelombang laut. Hal ini disebabkan karena dengan bertambahnya frekuensi gelombang laut, maka amplitudo dari gelombang laut juga akan semakin besar. Hal ini menyebabkan nilai dari voltase dan arus listrik bangkitan dari *piezoelectric* juga semakin besar. Nilai dari daya listrik selalu berbanding lurus dengan besarnya voltase dan arus listriknya, sehingga dengan bertambahnya nilai voltase dan arus listriknya, maka nilai dayanya juga akan semakin besar.

Berdasarkan pada pembahasan di atas dapat ditarik kesimpulan bahwa dengan semakin besarnya frekuensi gelombang laut, maka nilai dari daya listrik bangkitan yang dihasilkan mekanisme *ocean wave energy harvester* juga akan semakin besar. Dari grafik tersebut diketahui nilai daya listrik terbesar berada pada frekuensi gelombang 1.4 Hz dengan jumlah *piezoelectric* sebanyak 3 yang bernilai 2.11×10^{-6} watt.

4.3.2 Pengaruh jumlah material *piezoelectric* terhadap energi listrik yang dihasilkan mekanisme *ocean wave energy harvester*

Pada subbab ini akan dijelaskan mengenai pengaruh jumlah material *piezoelectric* terhadap energi bangkitan yang dihasilkan mekanisme *ocean wave energy harvester*. Pada mekanisme ini mekanis *piezoelectric* dipasang secara paralel dan elektriknya dipasang secara seri dan divariasikan jumlah material *piezoelectric*-nya. Grafik ini dapat dilihat pada gambar 4.24, 4.25, dan 4.26.

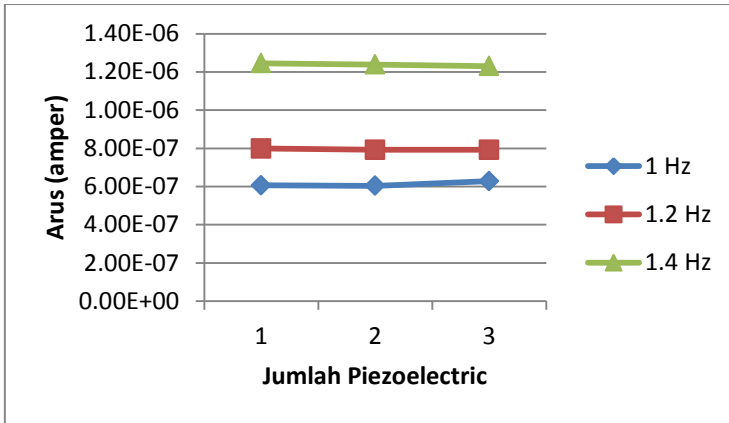


Gambar 4.24 Grafik pengaruh jumlah material *piezoelectric* terhadap voltase bangkitan dari masing-masing frekuensi gelombang laut

Gambar 4.24 di atas adalah grafik pengaruh jumlah material *piezoelectric* terhadap voltase bangkitan yang dihasilkan oleh mekanisme *ocean wave energy harvester*. Pada gambar tersebut terdapat tiga buah grafik yang masing-masing menunjukkan frekuensi dari gelombang laut dan divariasikan jumlah material *piezoelectric*-nya. Dari ketiga grafik tersebut terlihat bahwa *trendline* dari setiap grafiknya selalu naik seiring dengan bertambahnya jumlah material *piezoelectric*.

Kenaikan dari *trendline* grafik pada gambar 4.24 disebabkan karena bertambahnya jumlah material *piezoelectric* yang dipasang pada mekanisme *ocean wave energy harvester*. Dengan bertambahnya jumlah dari material *piezoelectric* yang dirangkai secara seri, maka nilai dari voltase bangkitannya juga akan semakin besar. Pada kasus ini material *piezoelectric* dianggap sebagai sebuah hambatan yang dilalui oleh arus listrik, sehingga ketika dirangkai secara seri nilai voltasenya akan terus bertambah seiring dengan bertambahnya jumlah material *piezoelectric* tersebut.

Berdasarkan pada pembahasan di atas dapat ditarik kesimpulan bahwa dengan semakin besarnya jumlah material *piezoelectric*, maka nilai dari voltase bangkitan yang dihasilkan mekanisme *ocean wave energy harvester* juga akan semakin besar. Dari grafik tersebut diketahui nilai voltase terbesar berada pada jumlah *piezoelectric* sebanyak 3 pada frekuensi 1.4 Hz yang bernilai 2.16 volt.



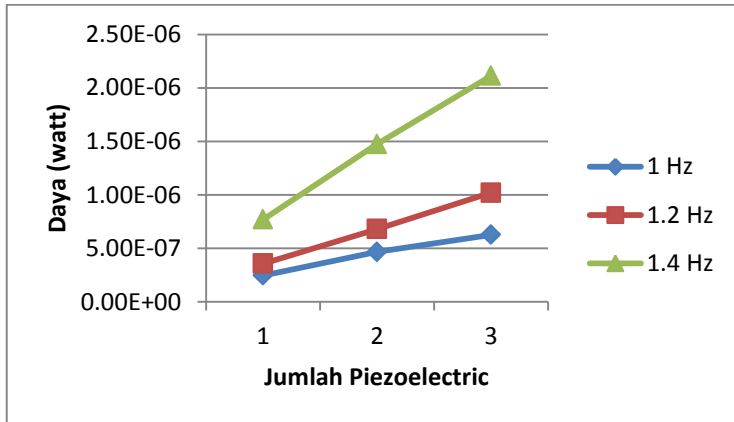
Gambar 4.25 Grafik pengaruh jumlah material *piezoelectric* terhadap arus listrik bangkitan dari masing-masing frekuensi gelombang laut

Gambar 4.25 di atas adalah grafik pengaruh jumlah material *piezoelectric* terhadap arus listrik bangkitan yang dihasilkan oleh mekanisme *ocean wave energy harvester*. Pada gambar tersebut terdapat tiga buah grafik yang masing-masing menunjukkan frekuensi dari gelombang laut dan divariasikan jumlah material *piezoelectric*-nya. Dari ketiga grafik tersebut terlihat bahwa *trendline* dari setiap grafiknya selalu konstan seiring dengan bertambahnya jumlah material *piezoelectric*.

Pada gambar 4.25 tersebut terlihat bahwa *trendline* grafiknya selalu konstan seiring dengan bertambahnya material *piezoelectric*. Hal ini disebabkan karena dengan bertambahnya jumlah dari material *piezoelectric* yang dirangkai secara seri, maka nilai dari arus listrik bangkitannya tidak akan bertambah sama sekali. Pada kasus ini material *piezoelectric* dianggap sebagai sebuah hambatan yang dilalui oleh arus listrik, sehingga ketika dirangkai secara seri nilai arus listriknya akan tetap seiring dengan bertambahnya jumlah material *piezoelectric* tersebut.

Berdasarkan pada pembahasan di atas dapat ditarik kesimpulan bahwa dengan semakin besarnya jumlah material

piezoelectric, maka nilai dari arus listrik bangkitan yang dihasilkan mekanisme *ocean wave energy harvester* akan tetap. Nilai arus listrik terbesar berada pada arus listrik bangkitan pada frekuensi 1.4 Hz dengan nilai 1.25×10^{-6} A.



Gambar 4.26 Grafik pengaruh jumlah material *piezoelectric* terhadap daya listrik bangkitan dari masing-masing frekuensi gelombang laut

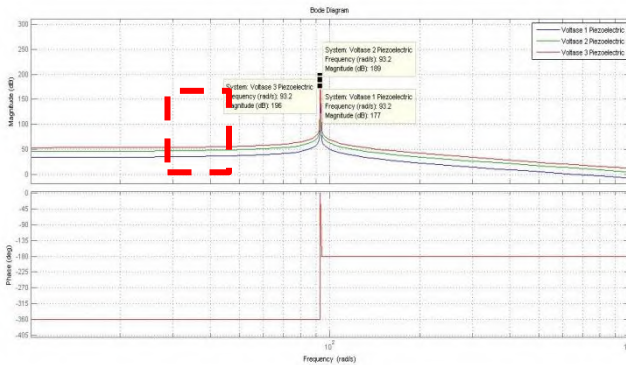
Gambar 4.26 di atas adalah grafik pengaruh jumlah material *piezoelectric* terhadap daya listrik bangkitan yang dihasilkan oleh mekanisme *ocean wave energy harvester*. Pada gambar tersebut terdapat tiga buah grafik yang masing-masing menunjukkan frekuensi dari gelombang laut dan divariasikan jumlah material *piezoelectric*-nya. Dari ketiga grafik tersebut terlihat bahwa *trendline* dari setiap grafiknya selalu naik seiring dengan bertambahnya jumlah material *piezoelectric*.

Kenaikan dari *trendline* grafik pada gambar 4.26 disebabkan karena bertambahnya jumlah material *piezoelectric* yang dipasang pada mekanisme *ocean wave energy harvester*. Dengan bertambahnya jumlah dari material *piezoelectric* yang dirangkai secara seri, maka nilai dari voltase bangkitannya juga akan semakin besar dan arus listriknya tetap. Semakin besarnya

voltase selalu berbanding lurus dengan nilai dayanya, sehingga daya listrik yang dibangkitkan oleh mekanisme *ocean wave energy harvester* juga akan semakin besar.

Berdasarkan pada pembahasan di atas dapat ditarik kesimpulan bahwa dengan semakin besarnya jumlah material *piezoelectric*, maka nilai dari daya listrik bangkitan yang dihasilkan mekanisme *ocean wave energy harvester* juga akan semakin besar. Dari grafik tersebut diketahui nilai daya listrik terbesar berada pada jumlah *piezoelectric* sebanyak 3 pada frekuensi gelombang 1.4 Hz dengan nilainya sebesar 2.11×10^{-6} watt.

Selain menggunakan grafik perubahan nilai voltase, arus listrik, dan daya listrik terhadap waktu (*time domain*), analisis pengaruh jumlah material *piezoelectric* juga bisa dilakukan melalui grafik perubahan nilai voltase, arus listrik, dan daya listrik terhadap frekuensi (*frequency domain*) grafik ini sering disebut dengan *bode diagram*. *Bode diagram* menampilkan grafik *magnitude*. Pada grafik *magnitude*, menunjukkan adanya nilai perbesaran (*gain*) antara *input* dan *output*. Grafik-grafik tersebut dapat dilihat pada gambar 4.27, 4.28, dan 4.29.

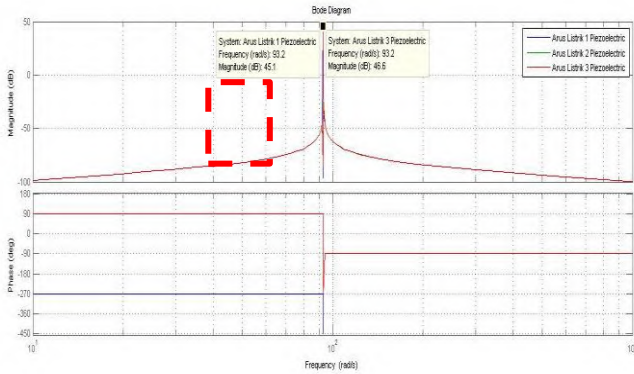


Gambar 4.27 *Bode diagram* voltase bangkitan dengan variasi jumlah material *piezoelectric*

Grafik di atas adalah *bode diagram* voltase bangkitan dari material *piezoelectric* dengan variasi jumlah material *piezoelectric*. Pada grafik di atas dapat dilihat bahwa dengan semakin besar nilai frekuensi dari gelombang, maka nilai perbesarannya akan semakin besar. Nilai perbesaran ini berbanding lurus dengan nilai voltase bangkitannya. Nilai perbesaran paling besar terjadi pada frekuensi 93.2 rad/s. frekuensi ini merupakan frekuensi resonansi dari *piezoelectric*.

Dari grafik tersebut terlihat bahwa nilai voltase bangkitan 1 material *piezoelectric* pada titik resonansinya mempunyai perbesaran 177 dB yang setara dengan 7.08×10^8 . Voltase bangkitan 2 material *piezoelectric* pada titik resonansinya mempunyai perbesaran 189 dB yang setara dengan 2.82×10^9 . Terakhir untuk voltase bangkitan 3 material *piezoelectric* pada titik resonansinya mempunyai perbesaran 196 dB yang setara dengan 6.3×10^9 . Tetapi untuk mekanisme *ocean wave energy harvester* kali ini hanya mampu mencapai frekuensi 37.68 rad/s sampai dengan 52.75 rad/s yang ditandai dengan garis putus-putus berwarna merah. Hal ini dikarenakan dipasaran tidak ada pasangan roda gigi yang mempunyai rasio *gear* yang sesuai untuk mencapai titik resonansi material *piezoelectric*.

Berdasarkan nilai perbesaran yang dihasilkan oleh masing-masing variasi jumlah material *piezoelectric* di atas, dapat disimpulkan bahwa dengan semakin banyak jumlah material *piezoelectric*, maka voltase yang dihasilkan juga akan semakin besar.



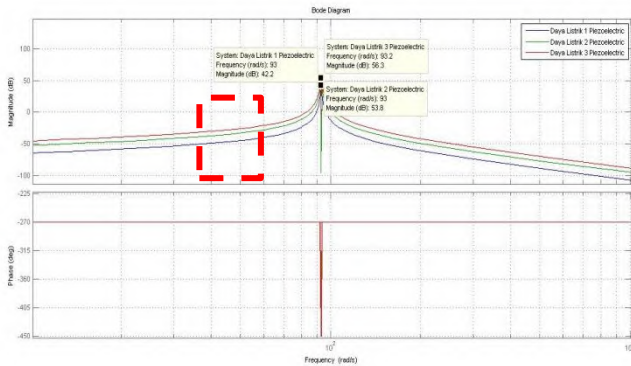
Gambar 4.28 *Bode diagram* arus listrik bangkitan dengan variasi jumlah material *piezoelectric*

Grafik di atas adalah *bode diagram* arus listrik bangkitan dari material *piezoelectric* dengan variasi jumlah material *piezoelectric*. Pada grafik diatas dapat dilihat bahwa dengan semakin besar nilai frekuensi dari gelombang, maka nilai perbesarannya akan semakin besar. Nilai perbesaran ini berbanding lurus dengan nilai arus listrik bangkitannya. Nilai perbesaran paling besar terjadi pada frekuensi 93.2 rad/s. frekuensi ini merupakan frekuensi resonansi dari *piezoelectric*.

Dari grafik tersebut terlihat bahwa nilai arus listrik bangkitan 1 material *piezoelectric* pada titik resonansinya mempunyai perbesaran 45.1 dB yang setara dengan 179. Arus listrik bangkitan 2 material *piezoelectric* pada titik resonansinya mempunyai perbesaran 45.1 dB yang setara dengan 179. Terakhir untuk arus listrik bangkitan 3 material *piezoelectric* pada titik resonansinya mempunyai perbesaran 46.6 dB yang setara dengan 213. Tetapi untuk mekanisme *ocean wave energy harvester* kali ini hanya mampu mencapai frekuensi 37.68 rad/s sampai dengan 52.75 rad/s yang ditandai dengan garis putus-putus berwarna merah. Hal ini dikarenakan dipasaran tidak ada pasangan roda

gigi yang mempunyai rasio *gear* yang sesuai untuk mencapai titik resonansi material *piezoelectric*.

Berdasarkan nilai perbesaran yang dihasilkan oleh masing-masing variasi jumlah material *piezoelectric* di atas, dapat disimpulkan bahwa dengan semakin banyak jumlah material *piezoelectric*, maka arus listrik yang dihasilkan akan terus sama.



Gambar 4.29 *Bode diagram* daya listrik bangkitan dengan variasi jumlah material *piezoelectric*

Grafik di atas adalah *bode diagram* daya listrik bangkitan dari material *piezoelectric* dengan variasi jumlah material *piezoelectric*. Pada grafik diatas dapat dilihat bahwa dengan semakin besar nilai frekuensi dari gelombang, maka nilai perbesarannya akan semakin besar. Nilai perbesaran ini berbanding lurus dengan nilai daya listrik bangkitannya. Nilai perbesaran paling besar terjadi pada frekuensi 93.2 rad/s. frekuensi ini merupakan frekuensi resonansi dari *piezoelectric*.

Dari grafik tersebut terlihat bahwa nilai daya listrik bangkitan 1 material *piezoelectric* pada titik resonansinya mempunyai perbesaran 42.2 dB yang setara dengan 128. Daya listrik bangkitan 2 material *piezoelectric* pada titik resonansinya mempunyai perbesaran 53.8 dB yang setara dengan 489.8. Terakhir untuk daya listrik bangkitan 3 material *piezoelectric*

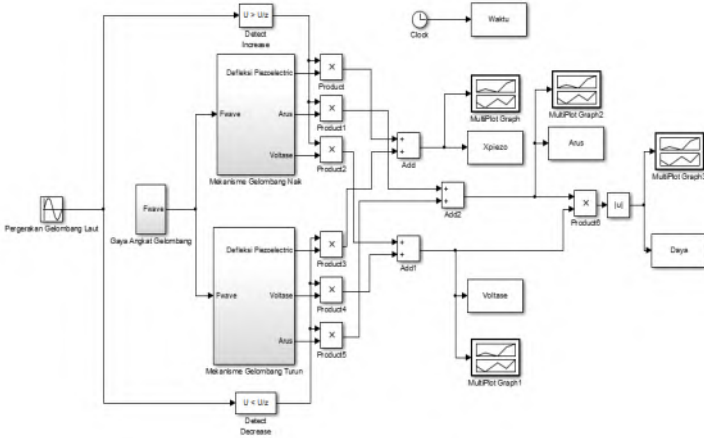
pada titik resonansinya mempunyai perbesaran 56.3 dB yang setara dengan 653.1. Tetapi untuk mekanisme *ocean wave energy harvester* kali ini hanya mampu mencapai frekuensi 37.68 rad/s sampai dengan 52.75 rad/s yang ditandai dengan garis putus-putus berwarna merah. Hal ini dikarenakan dipasaran tidak ada pasangan roda gigi yang mempunyai rasio *gear* yang sesuai untuk mencapai titik resonansi material *piezoelectric*.

Berdasarkan nilai perbesaran yang dihasilkan oleh masing-masing variasi jumlah material *piezoelectric* di atas, dapat disimpulkan bahwa dengan semakin banyak jumlah material *piezoelectric*, maka daya listrik yang dihasilkan juga akan semakin besar.

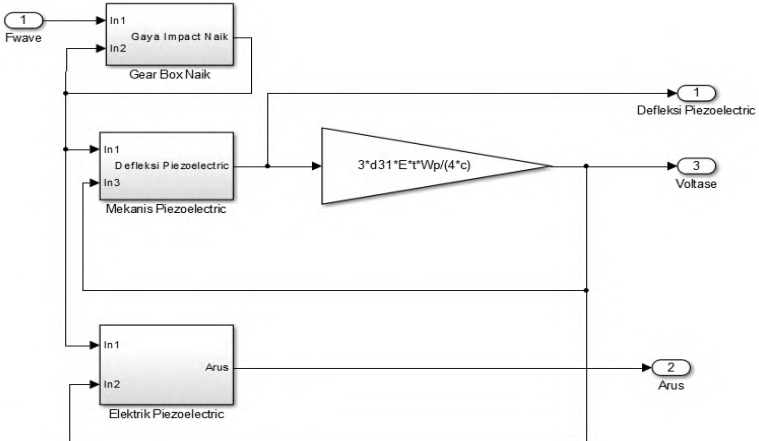
LAMPIRAN

Lampiran 1: Simulasi Block Diagram Mekanisme menggunakan MATLAB Simulink

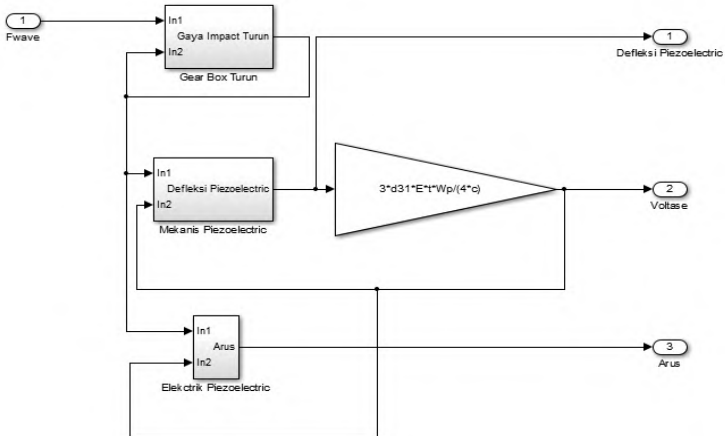
- Mekanisme Total



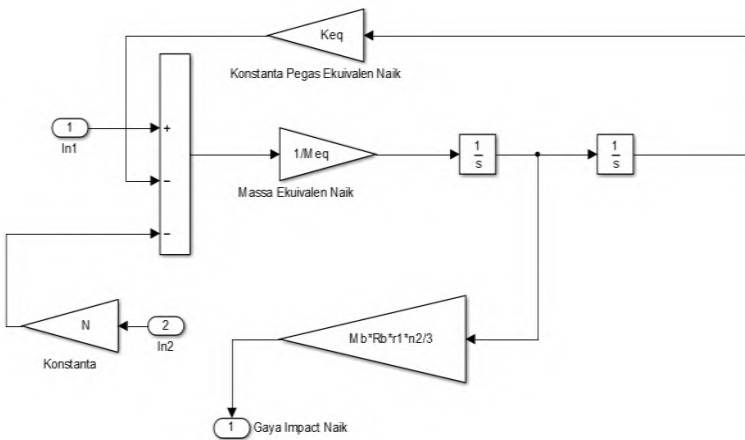
- Mekanisme Gelombang Naik



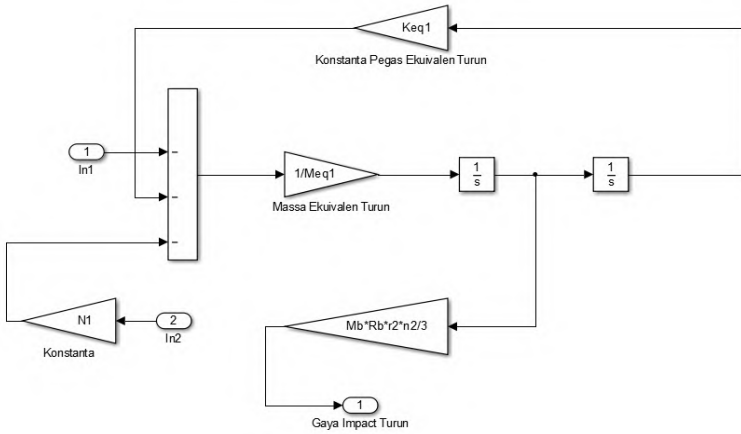
- Mekanisme Gelombang Turun



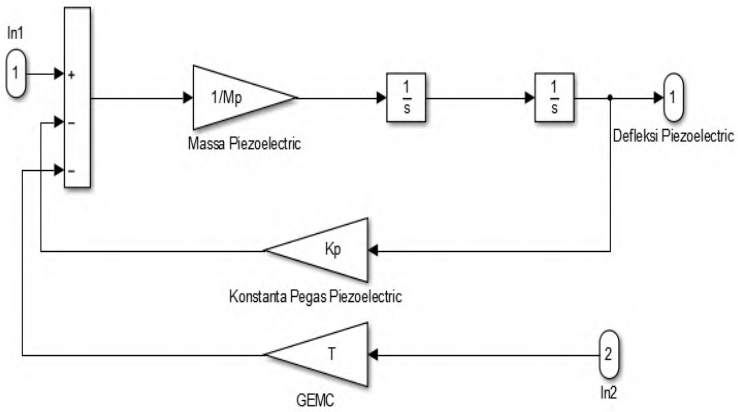
- Gear Box Naik



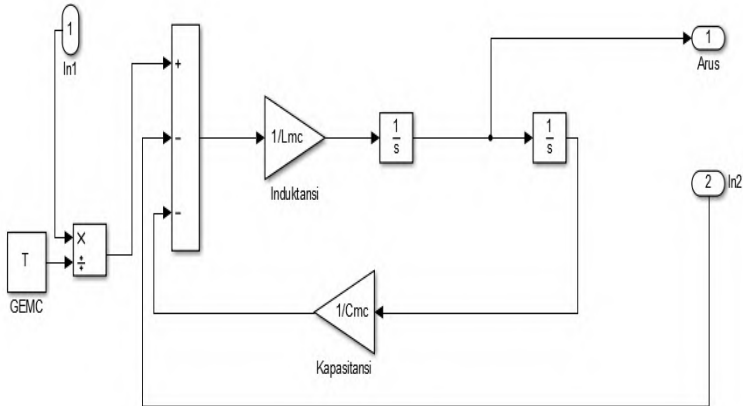
• *Gear Box Turun*



• *Mekanis Piezoelectric*



- Elektrik *Piezoelectric*



Lampiran 2: *Transfer Function Mekanisme*

Untuk mendapatkan grafik *frequency domain* harus ditentukan dahulu *transfer function* dari masing-masing parameter. *Transfer function* tersebut menentukan besarnya perbesaran (*gain*) dari *bode diagram* yang dihasilkan oleh MATLAB. *Transfer function* tersebut dapat dilihat dalam persamaan di bawah ini.

$$\Sigma F = 0$$

$$M_{eq}\ddot{X}(t) + K_{eq}X(t) + \Gamma Vp(t) = Fi(t)$$

$$M_{eq}S^2X(s) + K_{eq}X(s) + \Gamma Vp(s) = Fi(s)$$

$$X(s) = \frac{Fi(s) - \Gamma Vp(s)}{M_{eq}S^2 + K_{eq}}$$

$$g_1 = \frac{1}{M_{eq}S^2 + K_{eq}}$$

$$g_2 = -\frac{\Gamma}{M_{eq}S^2 + K_{eq}}$$

$$X(s) = g_1Fi(s) + g_2Vp(s)$$

Hubungan mekanik dan elektrik dari material *piezoelectric* adalah:

$$Vp(t) = \frac{3d_{31}E_p w_p t}{4c} X(t)$$

$$Vp(s) = \frac{3d_{31}E_p w_p t}{4c} X(s)$$

$$g_3 = \frac{3d_{31}E_p w_p t}{4c}$$

$$Vp(s) = g_3 X(s)$$

Jika persamaan $Vp(s)$ disubstitusikan ke persamaan $X(s)$, maka persamaannya akan menjadi:

$$X(s) = g_1 Fi(s) + g_2 g_3 X(s)$$

$$\frac{X(s)}{Fi(s)} = \frac{g_1}{(1 - g_2 g_3)}$$

maka Voltase bangkitan dari material *piezoelectric* adalah

$$X(s) = g_1 Fi(s) + g_2 Vp(s)$$

$$\frac{1}{g_3} Vp(s) = g_1 Fi(s) + g_2 Vp(s)$$

$$\frac{Vp(s)}{Fi(s)} = \frac{g_1 g_3}{(1 - g_2 g_3)}$$

Setelah menentukan *transfer function* dari mekanik dan hubungannya dengan elektrik dari material *piezoelectric*, selanjutnya akan dilakukan penentuan *transfer function* dari respons elektriknya. Respons elektrik dari material *piezoelectric* adalah sebagai berikut:

$$V_{mc}(t) = L_{mc} \ddot{Q}(t) + R_{mc} \dot{Q}(t) + \frac{1}{C_{mc}} Q(t) + Vp(t)$$

$$\frac{Fi(t)}{\Gamma} = L_{mc} \ddot{Q}(t) + R_{mc} \dot{Q}(t) + \frac{1}{C_{mc}} Q(t) + Vp(t)$$

$$\frac{Fi(s)}{\Gamma} = L_{mc} S^2 Q(s) + \frac{1}{C_{mc}} Q(s) + Vp(s)$$

$$\frac{Fi(s)}{\Gamma} - Vp(s) = (L_{mc}S^2 + \frac{1}{C_{mc}})Q(s)$$

$$Q(s) = \frac{\frac{Fi(s)}{\Gamma} - Vp(s)}{(L_{mc}S^2 + \frac{1}{C_{mc}})}$$

$$g_4 = \frac{\frac{1}{\Gamma}}{(L_{mc}S^2 + \frac{1}{C_{mc}})}$$

$$g_5 = -\frac{1}{(L_{mc}S^2 + \frac{1}{C_{mc}})}$$

$$Q(s) = g_4 Fi(s) + g_5 Vp(s)$$

$$Q(s) = g_4 Fi(s) + g_5 \frac{g_1 g_3}{(1 - g_2 g_3)} Fi(s)$$

$$\frac{Q(s)}{Fi(s)} = g_4 + \frac{g_1 g_3 g_5}{(1 - g_2 g_3)}$$

Untuk mendapatkan daya, maka akan digunakan perumusan sebagai berikut:

$$\dot{Q}(t) = sQ(s)$$

$$g_6 = s$$

$$\dot{Q}(t) = g_6 Q(s)$$

maka, persamaannya akan menjadi:

$$P = Vp(t)\dot{Q}(t)$$

$$P = Vp(s) \cdot sQ(s)$$

$$P = g_6 Vp(s)Q(s)$$

Setelah semua *transfer function* didapatkan, selanjutnya akan dibuat *bode diagram* dengan menggunakan MATLAB.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Setelah dilakukan analisis dan pembahasan pada energi listrik yang dihasilkan oleh simulasi mekanisme *ocean wave energy harvester* tipe pelampung bola dengan menggunakan metode *cantilever piezoelectric*, dapat diambil kesimpulan bahwa:

1. Variasi frekuensi dan amplitudo gelombang berpengaruh terhadap energi listrik bangkitan. Variasi tersebut mengakibatkan voltase bangkitan semakin besar. Semakin besarnya frekuensi mengakibatkan arus bangkitannya semakin besar. Dengan semakin besarnya arus dan voltase bangkitan mengakibatkan daya listriknya juga akan semakin besar. Daya listrik terbesar pada jumlah material *piezoelectric* 1, 2, dan 3 berurut-urut yaitu 1.899×10^{-6} watt, 3.723×10^{-6} watt, dan 5.411×10^{-6} watt yang sama-sama terjadi frekuensi gelombang 1.4 Hz dan amplitudo 4.7 cm.
2. Variasi jumlah material *piezoelectric* yang elektriknya dirangkai secara seri berpengaruh terhadap energi listrik bangkitan. Dengan semakin bertambahnya jumlah material *piezoelectric*, maka nilai voltase akan semakin besar dan nilai arus listriknya tetap. Dengan semakin besarnya nilai voltase bangkitan mengakibatkan nilai daya listrik menjadi semakin besar. Daya listrik terbesar dari frekuensi gelombang 1 Hz dengan amplitudo 3.52 cm, 1.2 Hz dengan amplitudo 3.92 cm, dan 1.4 Hz dengan amplitudo 4.7 cm berurut-urut adalah 1.599×10^{-6} watt, 2.428×10^{-6} watt, dan 5.411×10^{-6} watt.
3. Daya listrik bangkitan terbesar dari mekanisme *ocean wave energy harvester* tipe pelampung bola dengan menggunakan metode *cantilever piezoelectric* adalah 2.11×10^{-6} watt. Nilai ini terjadi ketika material *piezoelectric* berjumlah 3 pada frekuensi gelombang 1.4 Hz dengan amplitudo 4.7 cm.
4. Energi listrik menjadi sangat besar ketika frekuensi pukulan pada material *piezoelectric* berada pada frekuensi resonansi

dari material *piezoelectric*. Material *piezoelectric* ini mengalami resonansi pada titik 93.2 rad/s dengan perbesaran (*gain*) pada jumlah material *piezoelectric* 3 sebesar 56.3 dB yang setara dengan 653.1.

5.2 Saran

Setelah mengerjakan tugas akhir kali ini saran yang akan disampaikan adalah:

1. Penelitian selanjutnya seharusnya menggunakan material *piezoelectric* dengan nilai kapasitansi yang lebih besar agar energi listrik yang dihasilkan juga semakin besar.
2. Penangkap energi gelombang seharusnya dibuat dengan menggunakan lengan agar gaya yang dihasilkan oleh gelombang bisa dimanfaatkan dengan maksimal.
3. Eksperimen untuk pemodelan ini seharusnya menggunakan data hasil simulasi dari tugas akhir ini sebagai data pembanding.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Budio, S. P. 2012. "**Dinamika**". Malang: Fakultas Teknik Jurusan Teknik Sipil Universitas Brawijaya.
- [2] Hehn, T., Mnnoli, Y. 2015. "**CM OS Circuits for Piezoelectric Energy Harvesters Efficient Power Ekstraktion, Interface Modelling and Loss Analysis**". Business Media Dordrecht.
- [3] Indraswara, J. 2015. "**Studi Karakteristik Voltase Bangkitan yang Dihasilkan Mekanisme *Vibration Energy Harvesting* Menggunakan Metode *Cantilever Piezoelectric* Pengukit dengan Variasi Jumlah *Blade* Pemukul dan Frekuensi Sumber Getar**". Surabaya: ITS Press.
- [4] Krisdianto, A. N. 2011. "**Studi Karakteristik Energi yang Dihasilkan Mekanisme *Vibration Energy Harvesting* dengan Metode *Piezoelectric* untuk Pembebanan Frontal dan Lateral**". Surabaya: ITS Press.
- [5] Losong, Yabes David. 2015. "**Permodelan dan Analisa Energi Listrik yang Dihasilkan Model Mekanisme Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut (PLTGL) Tipe Pelampung-*Piezoelectric***". Surabaya: ITS Press.
- [6] Motter, D., dkk. 2012. "***Vibration Energy Harvesting Using Piezoelectric Transducer and Non-Controlled Rectifiers Circuit***". Foz do iguaco: UNESP.
- [7] Nadzir, Z. A. 2015. "**Estimasi Gelombang Laut Menggunakan Citra Satelit Alos-Palsar**". Surabaya: ITS Press.
- [8] Prakash, G. R., dkk. 2012. "***Study of Effect on Resonance Frequency of Piezoelectric Unimorph Cantilever for Energy Harvsting***". Karnataka: Departement of Electronics and Communication Engineering Basaveshwar Engineering College.

- [9] Rifai, R. F. 2014. "**Rancang Bangun Simulator Gelombang Laut Berskala Laboratorium dengan Variasi Frekuensi dan Amplitudo**". Surabaya: ITS Press.
- [10] Riyani, V. 2012. "**Pemodelan dan Analisa Energi yang Dihasilkan Mekanisme *Multilayer Piezoelectric Vibration Energy Harvesting***". Surabaya: ITS Press.
- [11] Romano, G. F. 2015. "**Studi Karakteristik Voltase Bangkitanyang Dihasilkan oleh Mekanisme *Vibration Energy Harvesting* Menggunakan Metode *Cantilever Piezoelectric* dengan Variasi Jumlah *Blade* dan Frekuensi Sumber Getar**". Surabaya: ITS Press.
- [12] S. Rao, Singiresu, 2004. "**Mechanical Vibration**". Singapore: Prentice Hall PTR
- [13] Susanto, I. M. 2015. "**Studi Karakteristik Energi Listrik yang Dihasilkan Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut (PLTGL) Metode Pelampung dengan Variasi Dimensi Pelampung dan Panjang Lengan**". Surabaya; ITS Press.
- [14] Vinolo, C., dkk. 2014. "***Sea Wave Energy Harvester Based on Impacts***". Barcelona: Universitat Politecnica de Catalunya.

BIODATA PENULIS



Zulfan Wildan Firdaus adalah nama yang diberikan oleh pasangan suami istri Khusnul dan Lailul Rohmah. Kedua orang ini adalah orang tua kandung dari penulis. Penulis lahir di Kota Lumajang pada tanggal 7 Juli 1994. Riwayat pendidikan dari penulis dimulai dari kota kelahirannya, yaitu lebih tepatnya di RA Muslimat NU 28 Suko Rogotrungan Lumajang. Kemudian penulis melanjutkan pendidikannya di MI AL-Ghozali Gambiran Lumajang selama 6 tahun masa studi. Di tingkat SMP penulis melanjutkan studinya di SMPN 1 Sukodono Lumajang selama 3 tahun. Kemudian dilanjutkan dengan masa studi 3 tahun di SMAN 2 Lumajang yang merupakan masa studi terakhir penulis di Kota Lumajang. Setelah itu penulis melanjutkan studinya di tingkat sarjana di salah satu universitas ternama yang ada di Indonesia. Universitas ini bernama Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Di universitas ini penulis masuk pada jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri dan menyelesaikan masa studinya pada tahun keempat.

Pada masa perkuliahannya, penulis mengikuti berbagai jenis kegiatan, baik akademik maupun non akademik. Pada tahun pertama masa perkuliahannya penulis mengikuti berbagai macam kepanitiaan kegiatan mulai dari skala jurusan sampai skala nasional. Pada tahun kedua perkuliahannya penulis masuk pada himpunan mahasiswa jurusan yang diberi nama Himpunan Mahasiswa Mesin FTI-ITS dan menjabat sebagai staff departemen kesejahteraan mahasiswa. Di tahun ketiga perkuliahannya, penulis menjabat sebagai kepala biro akademik HMM FTI-ITS. Pada tahun yang sama pula penulis menjadi ketua sebuah organisasi sosial yang bergerak dalam bidang dakwah yang diberi nama Al-Azhar Community (AAC). Jabatan ini

berlangsung selama 2 tahun hingga masa perkuliahan dari penulis berakhir.

Penulis memiliki hobi bersepeda dan memancing. Sedangkan untuk motto hidup dari penulis adalah “Hari Esok Tidak Akan Sama dengan Hari Ini”, karena hari esok adalah takdir dan ketentuan Tuhan semata. Hal inilah yang membuat penulis selalu tidak mudah menyerah dalam menghadapi berbagai macam kesulitan hidup. Untuk semua informasi, kritik, dan saran mengenai tugas akhir kali ini adapat menghubungi penulis melalui email zulfanwildanfirdaus@gmail.com.