



TUGAS AKHIR - TM 141585

**STUDI EKSPERIMENTAL ENERGI LISTRIK YANG
DIHASILKAN OLEH MEKANISME *OCEAN WAVE
ENERGY HARVESTER* TIPE PELAMPUNG BOLA
DENGAN METODE *CANTILEVER PIEZOELECTRIC***

**ALMAARIF FAHREY NUH
NRP 2112 100 052**

Dosen Pembimbing
Dr. Wiwiek Hendrowati, ST., MT

Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2016



FINAL PROJECT - TM 141585

**EXPERIMENTAL STUDY OF ELECTRICAL
POWER GENERATED BY A FLOAT BALL TYPE
OCEAN WAVE ENERGY HARVESTER
MECHANISM INVOLVING THE USE OF
CANTILEVER PIEZOELECTRIC**

ALMAARIF FAHREY NUH
NRP 2112 100 052

Adviser
Dr. Wiwiek Hendrowati, ST., MT.

Mechanical Engineering Departement
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya
2016

**STUDI EKSPERIMENTAL ENERGI LISTRIK YANG
DIHASILKAN OLEH MEKANISME OCEAN WAVE ENERGY
HARVESTER TIPE PELAMPUNG BOLA DENGAN 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 :

ALMAARIF FAHREY NUH
NRP. 2112 100 052

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir

1. Dr. Wiwiek Hendrowati, ST, MT
NIP. 197004121997032003 (Pembimbing)
2. Prof. Ir. I Nyoman Sutantya, MSc, PhD
NIP. 195106051978031007 (Penguji I)
3. Dr. Harus Laksana Guntur, ST, M.Eng
NIP. 197505111999031007 (Penguji II)
4. Moch. Solichin, ST, MT
NIP. 198908172015041003 (Penguji III)

SURABAYA
JULI, 2016

STUDI EKSPERIMENTAL ENERGI LISTRIK YANG DIHASILKAN OLEH MEKANISME *OCEAN WAVE ENERGY HARVESTER* TIPE PELAMPUNG BOLA DENGAN METODE *CANTILEVER PIEZOELECTRIC*

Nama Mahasiswa : Almaarif Fahrey Nuh
NRP : 2112100052
Jurusan : Teknik Mesin FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Wiwiek Hendrowati, ST., MT.

ABSTRAK

Indonesia sebagai negara kepulauan memiliki potensi energi laut yang besar dimana energi gelombang laut merupakan jenis energi laut yang paling siap untuk diterapkan di Laut Indonesia. Terdapat beberapa lokasi potensi untuk Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut di Indonesia, salah satunya adalah Pulau Poteran, sebelah utara Pulau Madura, Jawa Timur yang memiliki potensi energi sekitar 1300 W/m^2 . Pada penelitian tugas akhir ini dibuat sebuah *prototype* alat *energy harvesting* metode *cantilever piezoelectric* dalam skala laboratorium dengan mengacu pada gelombang laut di daerah Poteran sebagai referensi pembuatan alat skala sebenarnya yang dapat diterapkan di perahu-perahu nelayan di Pulau Poteran.

Mekanisme *Energy harvester* ini dibuat dengan memanfaatkan frekuensi gelombang laut yang ditangkap oleh pelampung dan diteruskan menuju mekanisme *gear box*. Mekanisme *gear box* digunakan untuk meningkatkan frekuensi *cantilever piezoelectric* hingga mendekati frekuensi resonansi. Mekanisme *gear box* tersebut dilengkapi dengan blade pemukul yang nantinya memberikan gaya impak pada *cantilever piezoelectric* sehingga material tersebut mengalami defleksi. Defleksi inilah yang menimbulkan voltase atau energi listrik pada *cantilever piezoelectric*. Pada penelitian ini, dilakukan analisa

dengan variasi jumlah *cantilever piezoelectric*, dan amplitudo gelombang laut dengan nilai secara berturut-turut adalah 1 buah, 2 buah, 3 buah, 3,52 cm, 3,92 cm dan 4,7 cm.

Hasil dari tugas akhir ini adalah sebuah *prototype* mekanisme *ocean wave energy harvester* tipe pelampung bola menggunakan metode *cantilever piezoelectric*. Dari hasil pengujian eksperimen dengan variasi amplitudo gelombang dan jumlah *piezoelectric*, didapatkan nilai daya listrik bangkitan terbesar adalah $3,476 \times 10^{-7}$ watt pada amplitudo 4,7 cm dan jumlah *piezoelectric* sebanyak 3 buah. Semakin besar amplitudo gelombang, daya listrik bangkitannya akan semakin besar. Begitu pula ketika jumlah *piezoelectric*-nya bertambah, nilai daya listrik bangkitannya juga semakin besar.

Kata kunci: *cantilever piezoelectric*, *energy harvesting*, frekuensi, gelombang laut, pelampung bola

EXPERIMENTAL STUDY OF ELECTRICAL POWER GENERATED BY A FLOAT BALL TYPE OCEAN WAVE ENERGY HARVESTER MECHANISM INVOLVING THE USE OF CANTILEVER PIEZOELECTRIC

Name : Almaarif Fahrey Nuh
NRP : 2112100052
Major : Teknik Mesin FTI-ITS
Adviser : Dr. Wiwiek Hendrowati, ST., MT.

ABSTRACT

The Indonesian archipelago has great marine energy potential which sea wave energy is the readiest marine type energy to be applied in Indonesian Sea. There are several potential for sea wave power plant in Indonesia, one of which is Poteran Island, north of Madura Island, East Java, which has the potential energy of about 1300 W/m^2 . In this final project the author made an ocean wave energy harvester prototype in laboratory scale with the reference of the Poteran Island ocean wave characteristic, so this prototype can be using as a reference to make the real scale that can be applied in fishermen's fishing boats on Poteran Island

This energy harvester mechanism is made by utilizing the frequency of the waves captured by buoys or float ball and forwarded to the gear box. The gear box is used to increase the frequency of the mechanism so it can reach the cantilever piezoelectric resonance frequency. The gearbox is fitted with paddle blades that will provide the impact force on the cantilever piezoelectric so it will be deflected. This deflection has caused electrical power. In this study, conducted the analysis with the variations in the number of cantilever piezoelectric (one piece, two pieces, and three pieces) and ocean waves amplitude (3.52 cm, 3.92 cm, 4.7 cm).

The results of this study is a float ball type ocean wave energy harvester mechanism prototype. From the test results of experiments with variations in wave amplitude and the number of piezoelectric, the highest generated electrical power is 3.476×10^{-7} watt at 4.7 cm amplitude and three pieces of cantilever piezoelectric. The greater the amplitude of the wave, the generated electrical energy will be higher too. Similarly, when the number of piezoelectric increases, the value of the generated electrical power also getting higher.

Keyword(s): *cantilever piezoelectric, energy harvesting, frequency, float ball type, sea waves*

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xvii
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	4
BAB II KAJIAN PUSTAKA	
2.1. Kajian Terdahulu	5
2.2. Teori Gelombang laut	10
2.2.1. Karakteristik Gelombang Laut	10
2.2.2. Gaya Gelombang Laut	13
2.2.3. Bouyancy Force (Gaya Apung)	16
2.2.4. Gaya Generated	17
2.3. Teori Mekanika Getaran	17
2.3.1. Pengertian Getaran	17
2.3.2. Multi Derajat Kebebasan	18
2.3.3. Amplitudo	18
2.3.4. Frekuensi	18
2.4. Piezoelectric	19

2.4.1.	Material <i>Piezoelectric</i> Secara Umum	19
2.4.2.	Karakteristik dan Sifat Mekanik <i>Piezoelectric</i>	20
2.4.3.	Voltase Bangkitan, Arus, dan Daya pada Material <i>Piezoelectric</i>	21
2.4.4.	<i>Piezoelectric Constant</i>	24
2.5.	Gear Box	28
2.6.	Karakteristik Gelombang Laut Pulau Poteran, Jawa Timur 31	

BAB III METODOLOGI

3.1.	Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir	33
3.2.	Penjelasan Tahap Pengerjaan Tugas Akhir	34
3.2.1.	Studi Literatur.....	34
3.2.2.	Identifikasi Masalah	34
3.2.3.	Perancangan Mekanisme	34
3.2.4.	Pemodelan Matematika	41
3.2.4.1.	Analisa Gerak Gelombang Naik.....	42
3.2.4.2.	Analisa Gerak Gelombang Turun.....	51
3.2.4.3.	Voltase yang Dihasilkan <i>Piezoelectric</i>	60
3.2.4.4.	Arus yang Dihasilkan <i>Piezoelectric</i>	60
3.2.4.5.	Daya yang Dihasilkan <i>Piezoelectric</i>	60
3.2.5.	Perencanaan Pengujian Awal	60
3.2.6.	Pengambilan Data.....	62
3.2.7.	Analisa dan Pembahasan	65
3.2.8.	Penarikan Kesimpulan.....	65

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1	Data dan Spesifikasi Pengujian	67
-----	--------------------------------------	----

4.1.1 Kolam Pengujian	67
4.1.2. Mekanisme	67
4.2 Analisa Hasil Pengujian	69
4.2.1. Data Hasil Pengujian.....	69
4.2.2. Analisa Data Pengujian Voltase bangkitan material <i>piezoelectric</i> dengan variasi amplitudo gelombang	71
4.2.3. Analisa Data Pengujian Voltase bangkitan material <i>piezoelectric</i> dengan variasi jumlah <i>cantilever piezoelectric</i>	73
4.3. Pembahasan Hasil Pengujian.....	75
4.3.1. Pengaruh variasi Amplitudo Gelombang terhadap Voltase bangkitan material <i>piezoelectric</i>	76
4.3.2. Pengaruh Jumlah <i>Piezoelectric</i> terhadap Voltase bangkitan material <i>piezoelectric</i>	78
4.3.3. Pengaruh variasi Amplitudo Gelombang terhadap Arus bangkitan material <i>piezoelectric</i>	79
4.3.4. Pengaruh Jumlah <i>Piezoelectric</i> terhadap Arus bangkitan material <i>piezoelectric</i>	81
4.3.5. Pengaruh variasi Amplitudo Gelombang terhadap Daya bangkitan material <i>piezoelectric</i>	82
4.3.6. Pengaruh Jumlah <i>Piezoelectric</i> terhadap Daya bangkitan material <i>piezoelectric</i>	84
4.3.7. Perbandingan Pengaruh Amplitudo terhadap Daya bangkitan Hasil Pengujian dengan Teoritis.....	85
4.3.8. Perbandingan Pengaruh Jumlah <i>Piezoelectric</i> terhadap Daya bangkitan Hasil Pengujian dengan Teoritis	86
4.3.9. Perbandingan Daya yang Dihasilkan oleh Mekanisme pada Skala Laboratorium dengan Skala Riil	88

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan.....	91
5.2. Saran.....	92
DAFTAR PUSTAKA.....	93

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. cantilever beam yang ditambahkan sensor PZT ..	
5	
Gambar 2.2. (a) grafik voltase bangkitan terhadap waktu , (b) grafik letak pembebanan pada terhadap daya.....	5
Gambar 2.3. Skema mekanisme <i>vibration energy harvesting</i> yang dirancang (a) tampak depan, (b) <i>prototype</i>	6
Gambar 2.4. Grafik perbandingan frekuensi terhadap voltase bangkitan	7
Gambar 2.5. skema mekanisme <i>energy harvester</i> yang dirancang	8
Gambar 2.6. grafik perbandingan RMS dari daya dengan kedalaman laut, rasio panjang gelombang terhadap kedalaman laut	8
Gambar 2.7. grafik perbandingan RMS daya dengan tinggi gelombang	9
Gambar 2.8. grafik perbandingan RMS daya dengan rasio antara lebar dan ketebalan <i>cantilever</i>	9
Gambar 2.9. Sketsa Gelombang Laut.....	12
Gambar 2.10. Karakteristik Gelombang Laut Linier.....	12
Gambar 2.11. Karakteristik Gelombang Laut Non Linier.....	13
Gambar 2.12. Karakteristik Gelombang.....	13
Gambar 2.13. Analisa Gaya yang Dihasilkan Pelampung	16
Gambar 2.14. Gaya-gaya yang Bekerja pada Pelampung	17
Gambar 2.15. Sistem getaran multi derajat kebebasan.....	18

Gambar 2.16. Pemodelan Sederhana <i>Piezoelectric Harvester</i>	24
Gambar 2.17. Definisi Arah pada <i>Piezoelectric</i>	25
Gambar 2.18. Pasangan Roda gigi lurus (<i>spur gear</i>)	28
Gambar 2.19. Istilah-istilah pada Roda gigi lurus	29
Gambar 2.20. Gerak translasi dan rotasi pada rack dan pinion	30
Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian.....	34
Gambar 3.2. Flowchart Perancangan.....	36
Gambar 3.3. Pemodelan Mekanisme pada Perahu	36
Gambar 3.4. Bagian-bagian dari Mekanisme	37
Gambar 3.5. Jenis pelampung yang digunakan pada mekanisme	38
Gambar 3.6. Pegas.....	39
Gambar 3.7. Rack-pinion Gear.....	39
Gambar 3.8. Rangkaian roda gigi lurus pada mekanisme	40
Gambar 3.9. Poros	40
Gambar 3.10. <i>Blade</i>	41
Gambar 3.11. <i>Piezoelectric Minisense 100</i>	41
Gambar 3.12 Gerakan mekanisme (a) gerakan naik, (b) gerakan turun	42
Gambar 3.13 FBD kesetimbangan statis pelampung	42
Gambar 3.14 FBD kesetimbangan dinamis pelampung	43
Gambar 3.15 FBD <i>gear 1</i>	44
Gambar 3.16 FBD <i>gear 2</i>	45
Gambar 3.17 FBD <i>gear 3</i>	45
Gambar 3.18 FBD <i>gear 6</i>	46

Gambar 3.19 FBD <i>gear 5</i>	46
Gambar 3.20 FBD <i>gear 4</i>	47
Gambar 3.21 FBD <i>gear 7</i>	47
Gambar 3.22 FBD <i>gear 8</i>	48
Gambar 3.23 FBD <i>gear 9</i>	48
Gambar 3.24 FBD Pada <i>Blade</i> dan <i>Piezoelectric</i> (tampak belakang)	49
Gambar 3.25 FBD <i>piezoelectric</i>	49
Gambar 3.26 FBD kesetimbangan statis pelampung	51
Gambar 3.27 FBD dinamis pelampung	52
Gambar 3.28 FBD <i>gear 1</i>	53
Gambar 3.29 FBD <i>gear 4</i>	53
Gambar 3.30 FBD <i>gear 5</i>	54
Gambar 3.31 FBD <i>gear 6</i>	54
Gambar 3.32 FBD <i>gear 3</i>	55
Gambar 3.33 FBD <i>gear 5</i>	55
Gambar 3.34 FBD <i>gear 7</i>	56
Gambar 3.35 FBD <i>gear 8</i>	56
Gambar 3.36 FBD <i>gear 9</i>	57
Gambar 3.37 FBD Pada <i>Blade</i> dan <i>Piezoelectric</i> (tampak belakang)	57
Gambar 3.38 FBD <i>piezoelectric</i>	58
Gambar 3.39. Posisi Penempatan Mekanisme pada Kolam Pembuat Gelombang	61
Gambar 3.40. Kolam Pengujian	62
Gambar 3.41. <i>Digital Storage Oscilloscope</i>	62

Gambar 3.42. Diagram alir Pengambilan data	64
Gambar 4.1. <i>Prototype</i> Mekanisme (a) tampak atas, (b) tampak samping	68
Gambar 4.2. Peletakan Mekanisme di Kolam Pengujian	69
Gambar 4.3. Contoh hasil rekam <i>oscilloscope</i> dari pengujian	70
Gambar 4.4. Grafik hasil <i>smoothing</i>	70
Gambar 4.5 Grafik Perbandingan Voltase Bangkitan terhadap Amplitudo dengan Satu <i>Piezoelectric</i>	71
Gambar 4.7 Grafik Perbandingan Voltase Bangkitan terhadap Amplitudo dengan Tiga <i>Piezoelectric</i>	72
Gambar 4.8 Grafik Perbandingan Voltase Bangkitan Terhadap Jumlah <i>Piezoelectric</i> pada amplitudo 3,52 cm	74
Gambar 4.9 Grafik Perbandingan Voltase Bangkitan Terhadap Jumlah <i>Piezoelectric</i> pada amplitudo 3,92 cm	74
Gambar 4.10 Grafik Perbandingan Voltase Bangkitan Terhadap Jumlah <i>Piezoelectric</i> pada amplitudo 4,7 cm	75
Gambar 4.11. Grafik Pengaruh Amplitudo terhadap Voltase RMS Pengujian	77
Gambar 4.13. Grafik Perbandingan Arus RMS Pengujian terhadap Amplitudo	80
Gambar 4.14. Grafik Perbandingan Arus RMS Pengujian terhadap Jumlah <i>Piezoelectric</i>	81
Gambar 4.15. Grafik Perbandingan Daya RMS Pengujian terhadap Amplitudo	83
Gambar 4.16. Grafik Perbandingan Daya RMS Pengujian terhadap Jumlah <i>Piezoelectric</i>	84
Gambar 4.17. Grafik Perbandingan Pengaruh Amplitudo terhadap Daya secara Teoritis dan Pengujian	85

Gambar 4.18. Grafik Perbandingan Pengaruh Jumlah *Piezoelectric* terhadap Daya secara Teoritis dan Pengujian. 87

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Generated voltage, displacement, dan kapasitansi pada piezoelectric	22
Tabel 2.2. Data teknis beberapa jenis material piezoelectric	28
Tabel 3.1. Pengambilan Data	65
Tabel 4.1. Nilai root mean square dari hasil pengujian	76

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Potensi sumber daya energi laut Indonesia yang meliputi energi gelombang, pasang surut, dan panas laut mencapai 727.000 MW dengan perkiraan energi efektif yang dapat dimanfaatkan dengan teknologi sekarang berkisar 49.000 MW. Pijakan pemerintah Indonesia dalam pengembangan energi laut sudah dimulai sejak tahun 2007, yaitu sejak keluarnya undang-undang no. 17 tahun 2007 tentang Rencana Pembangunan Jangka Panjang Nasional (RPJPN). Hingga saat ini, sudah terdapat beberapa penelitian-penelitian dan pengembangan mengenai metode pemanen energi laut untuk dikonversi menjadi energi listrik sebagai pembangkit listrik di Indonesia, baik hanya dalam bentuk simulasi pemodelan mekanisme, hingga melakukan eksperimen secara langsung.

Dari beberapa jenis energi laut yang dapat dimanfaatkan, penelitian mengenai pemanfaatan energi gelombang laut dipilih sebagai tema penelitian ini karena teknologi yang ada sekarang paling siap untuk diterapkan di laut Indonesia. Selain itu, sudah terdapat pula studi atau penelitian mengenai lokasi-lokasi di Indonesia yang berpotensi menjadi lokasi Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut (PLTGL). Hingga saat ini sudah terdapat beberapa lokasi yang diteliti memiliki energi gelombang laut yang cukup besar untuk PLTGL, salah satunya yaitu Pulau Poteran. Pulau Poteran terletak di bagian tenggara Pulau Madura, Jawa Timur. Pulau ini memiliki potensi energi laut sekitar 1300 W/m².

Selain lokasi, sudah terdapat pula beberapa metode yang diteliti untuk menjadi pemanen energi gelombang laut diantaranya, *salter duck*, metode pelampung, dan *cantilever piezoelectric*. Diantara metode tersebut, pada penelitian ini dilakukan penelitian dengan metode *cantilever piezoelectric*. *Piezoelectric* merupakan suatu material yang memiliki

kemampuan untuk mengubah energi mekanis menjadi energi listrik ataupun sebaliknya. Beberapa studi telah menunjukkan bahwa penggunaan *cantilever piezoelectric* untuk memanen energi laut secara langsung hanya mampu menghasilkan daya pada ukuran miliwatt. Hal ini menunjukkan bahwa perlunya sebuah mekanisme baru untuk memaksimalkan potensi defleksi dan frekuensi resonansi dari *cantilever piezoelectric*.

Untuk itu, pada penelitian tugas akhir ini dibuat sebuah *prototype* alat *energy harvesting* metode *cantilever piezoelectric* dalam skala laboratorium dengan mengacu pada gelombang laut di daerah Poteran sebagai referensi pembuatan alat skala sebenarnya yang dapat diterapkan di perahu-perahu nelayan di Pulau Poteran. *Energy harvesting* ini menggunakan mekanisme gear box untuk meningkatkan frekuensi *cantilever piezoelectric* hingga mendekati frekuensi resonansi. Dimana dalam penelitian ini memanfaatkan energi kinetik yang dihasilkan oleh gelombang laut dan selanjutnya akan disalurkan menuju massa yang dilengkapi oleh pegas di atasnya serta *rack* di salah satu sisinya, gear box nantinya akan memutar *blade* yang akan memukul *cantilever piezoelectric*. Pada penelitian ini, dilakukan analisa dengan variasi jumlah *cantilever piezoelectric*, dan amplitudo gelombang laut. Dari penelitian ini didapat pengaruh jumlah *cantilever piezoelectric* dan amplitudo gelombang laut terhadap energi bangkitan yang dihasilkan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai mekanisme *energy harvesting* dengan metode *cantilever piezoelectric*. Dalam tugas akhir ini dilakukan beberapa rumusan masalah, antara lain:

1. Bagaimana merancang bangun *prototype* alat *energy harvesting* dengan metode *cantilever piezoelectric*?
2. Bagaimana pengaruh dari variasi jumlah *cantilever piezoelectric* terhadap daya bangkitan yang dihasilkan

pada mekanisme *energy harvesting* metode *cantilever piezoelectric*?

3. Bagaimana pengaruh dari variasi amplitudo gelombang laut terhadap daya bangkitan yang dihasilkan pada mekanisme *energy harvesting* metode *cantilever piezoelectric*?

1.3 Batasan Masalah

Dalam analisa di atas digunakan batasan masalah untuk membatasi ruang lingkup penelitian sebagai berikut:

1. Mekanisme dibuat dalam skala laboratorium
2. Kolam simulasi gelombang dalam keadaan baik.
3. Pegas dianggap mempunyai nilai kekakuan yang konstan.
4. Pengaruh gesekan dari alat dengan udara diabaikan.
5. Gesekan antar gear, gear dengan poros, poros dengan bearing diabaikan.
6. Keseluruhan massa yang bergerak dianggap kaku, sehingga defleksi elastis massa diabaikan.
7. Alat ukur yang digunakan, yakni oscilloscope dan multimeter dalam kondisi baik
8. Eksitasi dan frekuensi gelombang dianggap seragam
9. Perambatan gelombang dianggap seragam
10. Jenis *piezoelectric* yang digunakan adalah *polyvinylidene fluoride* (PVDF) dengan merk dagang *minisense 100*.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Melakukan perancangan *prototype* alat *energy harvesting* dengan metode *cantilever piezoelectric*.
2. Mengetahui pengaruh dari variasi jumlah *cantilever piezoelectric* terhadap daya bangkitan yang dihasilkan pada mekanisme *energy harvesting* metode *cantilever piezoelectric*.
3. Mengetahui pengaruh dari variasi amplitudo gelombang laut terhadap daya bangkitan yang dihasilkan pada

mekanisme *energy harvesting* metode *cantilever piezoelectric*.

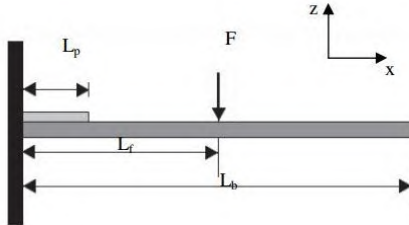
1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari dilakukannya penelitian ini adalah:

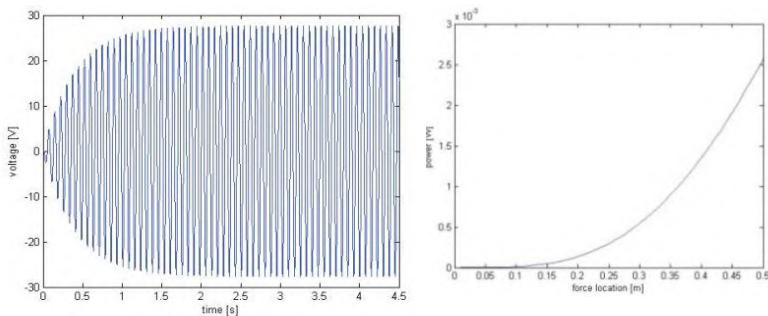
1. Dapat digunakan sebagai referensi untuk melakukan penelitian mengenai *energy harvesting* dengan eksitasi berupa gelombang laut berikutnya.
2. Dapat digunakan sebagai acuan untuk pengembangan sumber energi alternatif dengan metode *cantilever piezoelectric*.
3. Sebagai acuan untuk penelitian lebih lanjut dalam skala yang sebenarnya.

BAB II KAJIAN PUSTAKA

2.1. Kajian Terdahulu



Gambar 2.1. cantilever beam yang ditambahkan sensor PZT [1]

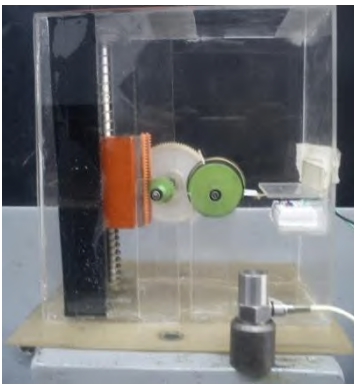


Gambar 2.2. (a) grafik voltase bangkitan terhadap waktu , (b) grafik letak pembebanan pada terhadap daya [1].

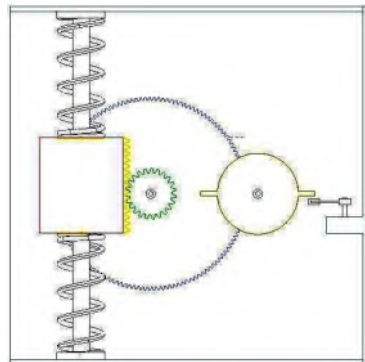
Pada tahun 2010, Andreza T melakukan penelitian mengenai karakteristik voltase bangkitan dari *piezoelectric cantilever* sebagai *energy harvester* dengan meletakkan elemen *piezoelectric* di atas sebuah *cantilever beam* dan memberikan gaya eksternal pada *cantilever beam* sebesar 1 Newton dengan variasi jarak pembebanan pada *cantilever beam*. Dari penelitian tersebut didapatkan hasil bahwa semakin jauh pembebanan yang dilakukan, maka semakin besar pula daya yang dihasilkan dari mekanisme ini. Pada penelitian ini didapatkan bahwa daya

maksimum sebesar 2,6 mW didapatkan dengan lokasi pembebanan sejauh 0,5m. Lokasi pembebanan 0,5m menunjukkan lokasi optimal gaya diberikan, yakni tepat di ujung batang [1].

Pada tahun 2015, Gusti Fajar melakukan studi karakteristik voltase bangkitan yang dihasilkan oleh mekanisme *vibration energy harvesting* metode *cantilever piezoelectric* dengan melakukan variasi jumlah blade yang digunakan untuk memukul *cantilever piezoelectric* dan frekuensi sumber getar. Pada mekanisme saudara Gusti, *piezoelectric* diberikan gaya yang berasal dari pergerakan roda gigi. Hasil dari pengujian ini didapatkan bahwa semakin besar frekuensi sumber getar, maka semakin besar pula voltase bangkitan yang dihasilkan. Sedangkan untuk jumlah blade, jumlah blade sebanyak 3 buah menghasilkan voltase bangkitan paling optimum. Dari penelitian saudara Gusti didapatkan nilai voltase bangkitan tertinggi sebesar 1,5 V saat frekuensi 15 Hz dan jumlah blade sebanyak 3 [2].

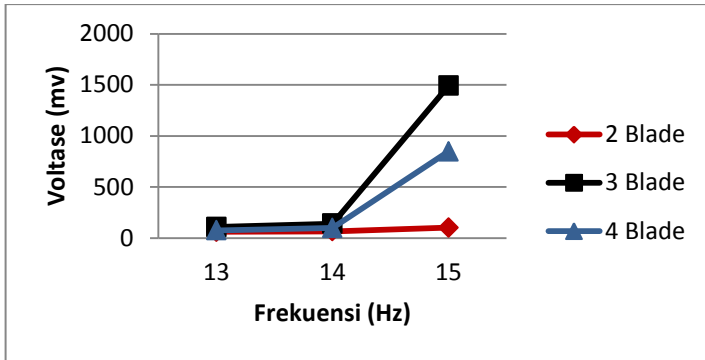


(a)



(b)

Gambar 2.3. Skema mekanisme *vibration energy harvesting* yang dirancang (a) tampak depan, (b) *prototype* [2]

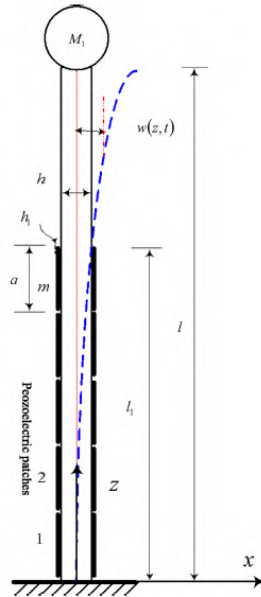


Gambar 2.4. Grafik perbandingan frekuensi terhadap voltase bangkitan [2]

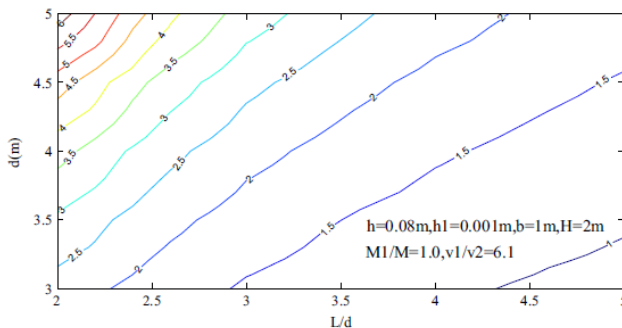
Pada tahun 2014, X.D. Xie, Q. Wang, dan N. Wu pada *Journal of Sound and Vibration* melakukan studi penelitian mengenai potensi dari *piezoelectric energy harvester* dari gelombang laut. Mereka menggunakan mekanisme *cantilever substrate* yang ditambah dengan *piezoelectric* untuk nilai rata-rata daya yang dihasilkan dari gerakan longitudinal gelombang laut dengan memvariasikan rasio lebar dan ketebalan *cantilever*, tinggi gelombang, kedalaman laut, rasio massa *proof* terhadap massa *cantilever*, dan rasio kedalaman air laut terhadap panjang gelombang. Hasil dari penelitian ini didapatkan bahwa nilai *root mean square* (RMS) dari daya yang dihasilkan bertambah seiring pertambahan rasio lebar dengan ketebalan *cantilever*, tinggi gelombang, kedalaman laut, rasio massa *proof* terhadap massa *cantilever*, dan rasio kedalaman air laut terhadap panjang gelombang [3].

Gambar 2.6. menunjukkan variasi RMS dari daya listrik yang dihasilkan terhadap kedalaman laut (d) dan rasio panjang gelombang terhadap kedalaman laut (L/d). Dari grafik didapatkan bahwa RMS dari daya listrik yang dihasilkan meningkat secara tidak linier terhadap pertambahan kedalaman laut dan penurunan L/d . Dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa semakin

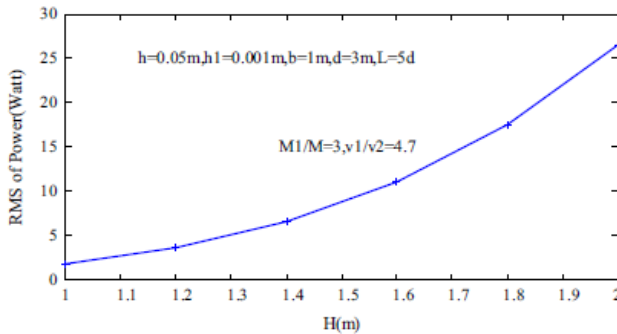
panjang *cantilever* di bawah laut, maka semakin baik gerak gelombang terhadap gerak bendungnya, oleh karenanya semakin meningkat pula energi yang dapat dipanen.



Gambar 2.5. skema mekanisme *energy harvester* yang dirancang [3]

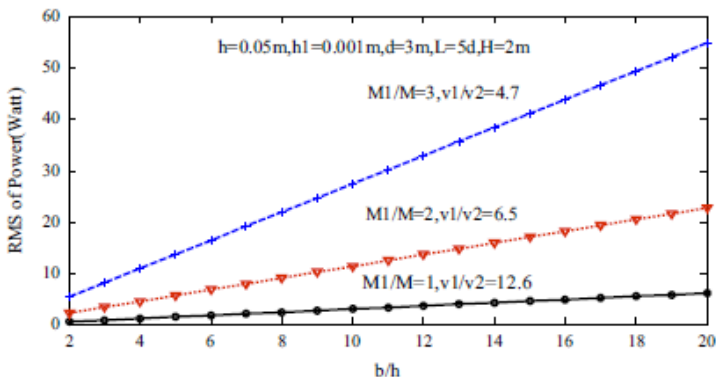


Gambar 2.6. grafik perbandingan RMS dari daya dengan kedalaman laut, rasio panjang gelombang terhadap kedalaman laut [3]



Gambar 2.7. grafik perbandingan RMS daya dengan tinggi gelombang [3]

Gambar 2.7. menunjukkan hubungan antara tinggi gelombang dengan RMS daya yang dihasilkan. Dari grafik didapatkan bahwa RMS naik secara tidak linier dengan kenaikan tinggi gelombang, dan dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi gelombang, maka semakin efisien proses pemanenan energi. Dengan nilai tertinggi RMS sebesar 27 W saat tinggi gelombang 2 m.



Gambar 2.8. grafik perbandingan RMS daya dengan rasio antara lebar dan ketebalan *cantilever* [3]

Gambar 2.8. mengilustrasikan efek dari rasio antara lebar dan ketebalan *cantilever* terhadap nilai RMS daya listrik yang dihasilkan dengan parameter kontrol sebagaimana tertera pada gambar tersebut. Terdapat dua hasil pengamatan, yang pertama bahwa RMS naik secara linier ketika rasio b/h diubah dari 2 menuju 20. Hal ini menunjukkan hubungan linier dari nilai lebar *cantilever* dengan daya listrik yang dihasilkan. Sedangkan yang kedua adalah nilai RMS yang meningkat secara nonlinier terhadap kenaikan $M1/M$. Rasio $M1/M$ memainkan peran sebagai pengubah frekuensi respon dari *harvester*. Dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa semakin lebar *cantilever* dan semakin tinggi frekuensi respon akan menghasilkan daya listrik yang lebih besar dimana daya tertinggi yang dapat diperoleh pada penelitian ini yaitu pada $M1/M = 3$, $b/h = 20$, dengan daya yang dihasilkan sebesar 55W.

Hasil akhir dari penelitian ini didapatkan bahwa nilai *root mean square* (RMS) dari daya yang dihasilkan bertambah seiring pertambahan rasio lebar dengan ketebalan *cantilever*, tinggi gelombang, kedalaman laut, rasio massa *proof* terhadap massa *cantilever*, dan rasio kedalaman air laut terhadap panjang gelombang dengan nilai RMS tertinggi yaitu 55 W saat $h = 0,05\text{m}$, $h_1 = 0,001\text{ m}$, $b = 1\text{m}$, $d = l = 3\text{m}$, $L = 5d$, $l_1 = 2/3 l$, dan $a = 0,1\text{m}$ [3].

2.2. Teori Gelombang laut

2.2.1. Karakteristik Gelombang Laut

Gelombang laut merupakan gerakan naik turunnya air laut. Gelombang laut terjadi karena adanya hembusan angin yang berlangsung secara kontinyu dan teratur di atas permukaan laut. Hembusan angin tersebut membentuk riak permukaan yang bergerak searah dengan hembusan angin, dan bila angin berhembus dalam waktu yang panjang dengan jarak yang cukup panjang, maka riak tersebut akan membentuk gelombang laut. Komponen gelombang laut secara individu masih akan memiliki sifat selayaknya gelombang di kondisi ideal. Sedangkan dalam

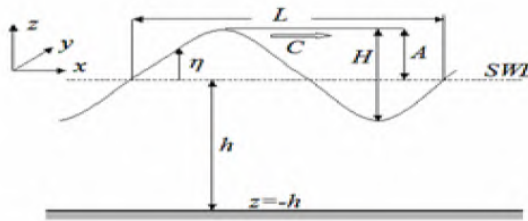
kondisi real, gelombang-gelombang yang memiliki kecepatan lebih tinggi akan melewati gelombang-gelombang lainnya yang lebih lambat, yang selanjutnya menyebabkan perubahan terus menerus bersamaan dengan gerakan gelombang-gelombang yang saling melampaui [4].

Sebuah gelombang terdiri dari beberapa bagian yaitu:

- a. Puncak gelombang (*Crest*) adalah titik tertinggi dari sebuah gelombang.
- b. Lembah gelombang (*Trough*) adalah titik terendah gelombang yang mana terletak diantara dua puncak gelombang.
- c. Tinggi Gelombang (H) adalah jarak tegak antara puncak gelombang dengan lembah gelombang.
- d. Panjang Gelombang (λ/L) adalah jarak mendatar antara dua puncak gelombang atau dua lembah gelombang.
- e. Periode Gelombang (T) adalah waktu yang diperlukan oleh dua puncak gelombang yang berurutan untuk melalui satu titik.

Selain bagian-bagian tersebut, ada 4 bentuk besaran berkaitan dengan gelombang yang dikemukakan oleh Bhat (1978), Garisson (1993), dan Gross (1993), yakni:

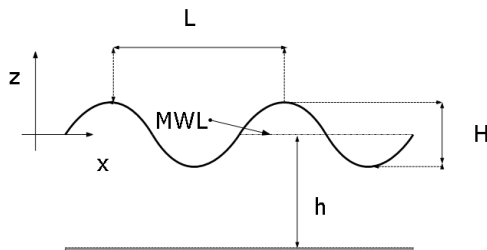
- a. Frekuensi gelombang (f) adalah banyaknya gelombang yang terbentuk dalam satu satuan waktu tertentu.
- b. Amplitudo gelombang (A) adalah jarak antara puncak gelombang dengan permukaan air rata-rata.
- c. Kecepatan gelombang (V) adalah jarak yang ditempuh gelombang dalam satu satuan waktu tertentu.
- d. Kemiringan gelombang (H/L) adalah perbandingan antara tinggi gelombang dengan panjang gelombang [4].



Gambar 2.9. Sketsa Gelombang Laut [4]

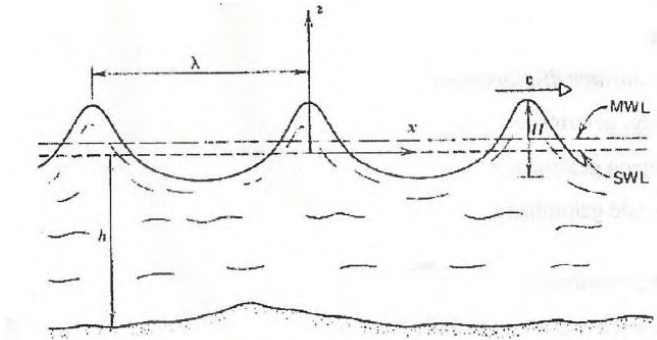
Pengetahuan dan pemahaman mengenai kondisi fisik gelombang laut sangat dibutuhkan guna mendalami sistem pembangkit listrik tenaga gelombang laut, karena sistem pembangkit listrik tenaga air laut menggunakan gelombang laut sebagai gaya eksitasi yang bekerja pada sistem.

Pada dasarnya, gelombang laut dibagi menjadi dua tipe, yaitu gelombang laut linier dan gelombang laut non linier. Gelombang laut linier memiliki ciri khusus yakni bentuknya yang sinusoidal. Dengan nilai SWL atau permukaan air lautnya dan MWL atau muka air laut rata-ratanya sama.



Gambar 2.10. Karakteristik Gelombang Laut Linier [4]

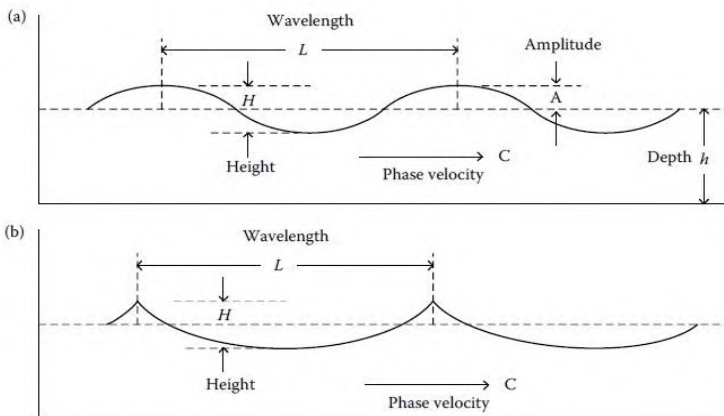
Sedangkan pada gelombang laut non linier, SWL dan MWLnya mempunyai selisih tertentu. Gelombang non linier akan menjadi gelombang linier kembali ketika batas SWL dan MWLnya berhimpit. Gelombang non linier selalu memiliki nilai kedudukan SWL di bawah dan MWL di atas.



Gambar 2.11. Karakteristik Gelombang Laut Non Linier [4]

2.2.2. Gaya Gelombang Laut

Energi laut datang bermacam-macam jenisnya, mulai dari energi dalam bentuk arus laut, arus pasang surut, panas laut, dan gelombang laut. Dari bentuk-bentuk energi laut tersebut sejauh ini yang dapat dimanfaatkan energinya adalah energi dari gelombang laut. Energi total gelombang adalah energi potensial gelombang dijumlahkan dengan energi kinetik gelombang.



Gambar 2.12. Karakteristik Gelombang [4]

$$E = \frac{1}{2} \rho g A^2 \quad 2.1.$$

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 dari periode gelombang, E dikalikan dengan kecepatan rambat gelombang yang didefinisikan sebagai v_g (Michhael Mc Cormick, 2010)

$$E_{rata-rata} = E \times v_g \quad 2.2.$$

$$E_{rata-rata} = \frac{1}{2} \rho g A^2 \frac{L}{2T} \quad 2.3.$$

dengan keterangan L adalah panjang gelombang dan T adalah periode gelombang. Jika periode gelombang dan panjang gelombang dihubungkan, maka

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \quad 2.4.$$

sehingga diperoleh nilai daya sebagai berikut:

$$P_w = \frac{\rho g A^2 T}{8\pi} \quad 2.5.$$

$$P_w = \frac{\rho g^2 (\eta(x,t))^2 T}{8\pi} \quad 2.6.$$

$$P_w = \frac{\rho g^2}{8\pi} \left(\frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t) \right)^2 T \quad 2.7.$$

$$= \frac{\rho g^2 H^2 T (\cos(kx - \sigma t))^2}{32\pi} \quad 2.8.$$

$$\text{dimana: } k = \frac{2\pi}{L} \quad 2.9.$$

$$\sigma = \frac{2\pi}{T} \quad 2.10.$$

sesuai dengan persamaan trigonometri, persamaan 2.7. dapat diuraikan menjadi:

$$(\cos(kx - \sigma t))^2 = (\cos kx \cdot \cos \sigma t + \sin kx \cdot \sin \sigma t)^2 \quad 2.11.$$

Pada saat $x = 0$, dikarenakan posisi pelampung tetap pada posisi awal, maka persamaan 2.11. dapat diselesaikan menjadi:

$$(\cos(kx - \sigma t))^2 = (\cos k \cdot 0 \cdot \cos \sigma t + \sin k \cdot 0 \cdot \sin \sigma t)^2 \quad 2.12.$$

$$(\cos(kx - \sigma t))^2 = (1 \cdot \cos \sigma t + 0)^2 \quad 2.13.$$

$$(\cos(kx - \sigma t))^2 = (\cos \sigma t)^2 \quad 2.14.$$

Selanjutnya substitusikan persamaan 2.10. kedalam persamaan 2.14. maka:

$$(\cos(kx - \sigma t))^2 = \left(\cos \frac{2\pi}{T}\right)^2 \quad 2.15.$$

Substitusikan persamaan 2.15. ke dalam persamaan 2.8., maka:

$$P_w = \frac{\rho g^2 H^2 T}{32\pi} \left(\cos \frac{2\pi}{T}\right)^2 \quad 2.16.$$

Dari persamaan 2.16 diatas, dapat diketahui gaya dari gelombang laut yang akan dikonversikan oleh mekanisme pelampung dengan rumusan sebagai berikut:

$$F_{wave} = \frac{P_{wave}}{cg} \quad 2.17.$$

$$F_{wave} = \frac{\rho g^2 H^2 T}{32\pi cg} \left(\cos \frac{2\pi}{T}\right)^2 \quad 2.18.$$

$$\text{Dimana : } c = \frac{1}{2} cg = \frac{\lambda}{T} = \frac{gT}{2\pi} \quad 2.19.$$

$$cg = 2c = \frac{gT}{\pi} \quad 2.20.$$

$$\text{Sehingga } F_{\text{wave}} = \frac{\rho g H^2}{32} \left(\cos \frac{2\pi}{T} \right)^2 \quad 2.21.$$

Keterangan:

g = percepatan gravitasi ($9,8 \text{ m/s}^2$)

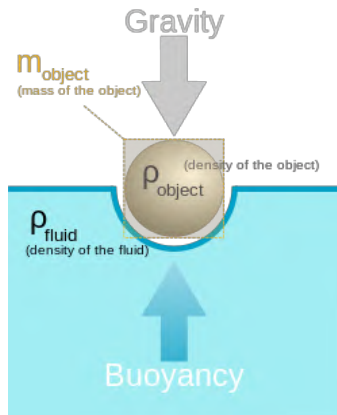
ρ = densitas air (1000 kg/m^3)

H = tinggi gelombang (m)

T = periode gelombang (s)

2.2.3. Bouyancy Force (Gaya Apung)

Gaya apung didefinisikan sebagai gaya tekan ke atas pada suatu benda yang mengapung sama dengan berat air yang dipindahkan. Gaya apung selalu sama dengan berat fluida yang dipindahkan.



Gambar 2.13. Analisa Gaya yang Dihasilkan Pelampung [4]

$$F_b = \rho_{\text{fluida}} \cdot V_{\text{benda}} \cdot g \quad 2.22.$$

Dimana:

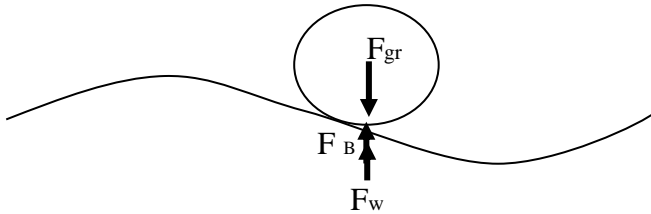
ρ = berat jenis fluida (kg/m^3)

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 menggerakkan pelampung ke atas dan ke bawah yang selanjutnya diteruskan ke roda gigi hingga mendefleksikan *piezoelectric*. *Free body diagram* pelampung dapat dilihat pada gambar 2.14.



Gambar 2.14. Gaya-gaya yang Bekerja pada Pelampung [4]

$$\begin{aligned}
 F_{gen} &= (F_w + F_b) - F_{gravitasi} \\
 &= [F_w + (\rho_{fluida} \cdot V_{fluida} \cdot g)] - (m \cdot g) \quad 2.23.
 \end{aligned}$$

Dimana, F_{gen} adalah gaya yang ditransferkan menuju pelampung, F_w adalah gaya gelombang, F_b adalah gaya apung pelampung, $F_{gravitasi}$ adalah gaya berat yang diterima sistem penangkap gelombang.

2.3. Teori Mekanika Getaran

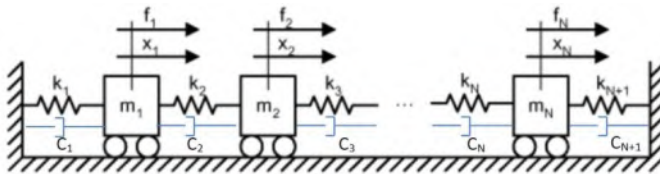
2.3.1. Pengertian Getaran

Getaran atau osilasi dapat didefinisikan sebagai gerakan bolak-balik suatu benda dari posisi awalnya dalam suatu waktu tertentu. Gerakan dari sebuah pendulum merupakan salah satu contoh sederhana getaran. Sistem getaran secara umum terdiri dari komponen yang mampu menyimpan energi potensial (pegas atau elastisitas material), komponen yang memiliki energi kinetik (massa atau inersia), dan komponen yang dapat menghilangkan energi tersebut (damper).

2.3.2. Multi Derajat Kebebasan

Derajat kebebasan atau biasa disebut *degree of freedom* merupakan jumlah total koordinat bebas yang dibutuhkan untuk menentukan posisi dari sebuah sistem terhadap referensi yang diam setiap saat. Umumnya, terdapat dua jenis derajat kebebasan yaitu satu derajat kebebasan (1dof) dan multi derajat kebebasan (multi dof).

Satu derajat kebebasan yakni sistem yang digunakan untuk menentukan kedudukan massa dalam ruang dengan satu arah koordinat bebas. Sedangkan multi derajat kebebasan yakni sistem yang digunakan untuk menentukan kedudukan massa dalam ruang yang membutuhkan banyak arah koordinat bebas (n). Contoh sistem getaran multi derajat kebebasan dapat digambarkan pada gambar 2.15 dibawah ini.



Gambar 2.15. Sistem getaran multi derajat kebebasan [5]

2.3.3. Amplitudo

Amplitudo merupakan pengukuran skalar non negatif dari besar osilasi suatu gelombang, atau amplitudo juga dapat diartikan sebagai simpangan terjauh dari garis kesetimbangan dalam gelombang sinusoidal.

2.3.4. Frekuensi

Frekuensi adalah ukuran jumlah putaran ulang setiap gerakan sistem atau jumlah gelombang per satuan waktu. Sebagai alternatifnya, frekuensi dapat diperoleh dari penentuan waktu antara dua peristiwa atau gerakan sistem (dan menyebutnya sebagai periode)

2.4. Piezoelectric

2.4.1. Material *Piezoelectric* Secara Umum

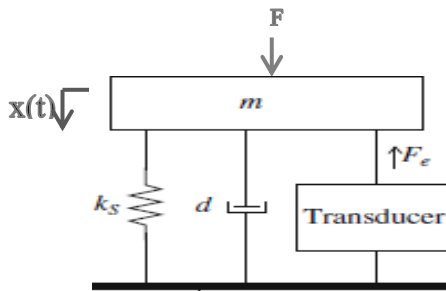
Berdasarkan *Piezoelectric Energy Harvesting: Modeling and Application* milik Inman, ketika suatu material *piezoelectric* diberikan tegangan mekanik, polarisasi listrik yang sebanding dengan tegangan yang diterapkan akan mengakibatkan timbulnya muatan/tegangan listrik. Efek *piezoelectric* ini berlaku reversibel, artinya material *piezoelectric* juga akan menghasilkan tegangan dan/atau regangan mekanik apabila material *piezoelectric* dialiri oleh listrik.

Material *Piezoelectric* sekarang menjadi pilihan terbaik dalam hal pengoversi energi karena *piezoelectric* merupakan satu-satunya material yang dapat mengonversi energi mekanik ke energi listrik secara langsung dengan *losses* yang minimum, salah satu contohnya *lead zirconate titanate* (PZT) yang mampu mengonversi 80% dari energi mekanik yang diberikan kepadanya menjadi energi listrik. Material ini sangat fleksibel, ringan, dan berupa lembaran yang tipis dengan ketebalan yang bervariasi mulai dari 0,01 mm hingga 0,2 mm. Namun, perlu dicatat pula bahwa *piezoelectric* merupakan material yang tergolong rapuh, sehingga desain perangkat piezo nantinya harus tetap berada pada batas elastisnya [6].

Efek *piezoelectric* banyak diaplikasikan dalam kehidupan, misalnya untuk menghasilkan dan mendeteksi suara, membangkitkan frekuensi elektronik, hingga membangkitkan listrik tegangan tinggi [7]. Selain itu, efek dasar dari beberapa instrumen teknik contohnya STM (*scanning tunneling microscope*), AFM (*atomic force microscope*), MTA (*microthermal analysis*), SNOM (*near-field scanning optical microscopy*) dll. Sedangkan untuk aplikasi *piezoelectric* sebagai *dampner* atau generator, material *piezoelectric* sudah diproduksi secara umum sekarang.

Piezoelectric dapat dijumpai dengan berbagai macam bentuk dan ukuran. Bentuk geometri maupun ukuran daripada *piezoelectric* memiliki pengaruh yang cukup besar terhadap

kemampuan menghasilkan energi bangkitannya. Dari beberapa bentuk struktur *piezoelectric*, sebagian besar bentuk *piezoelectric* yang digunakan sebagai pemanen energi adalah *cantilever beam* karena menghasilkan keluaran voltase dan daya yang paling tinggi dibandingkan struktur lain pada kondisi yang sama. Selain itu, energi bangkitan yang dihasilkan oleh material *piezoelectric* dipengaruhi oleh energi mekanik yang diterima oleh material *piezoelectric* tersebut. Besarnya gaya mekanik yang diterima oleh *piezoelectric* secara umum dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 2.16. *Free body diagram* dari *piezoelectric*

Berdasarkan *free body diagram* dari *piezoelectric* tersebut, diperoleh persamaan gaya yang bekerja pada *piezoelectric* adalah sebagai berikut:

$$F = m\ddot{x} + K_s x + d\dot{x} + F_e \quad 2.24$$

2.4.2. Karakteristik dan Sifat Mekanik *Piezoelectric*

Seperti yang telah dibahas sebelumnya, bahwa tiap-tiap bentuk *piezoelectric* mempengaruhi energi bangkitan yang dihasilkan. Namun bentuk *piezoelectric* tidak sepenuhnya menjadi tolok ukur dalam pemilihan *piezoelectric*. Selain bentuk, sifat mekanik dari material *piezoelectric* juga mempengaruhi energi bangkitan yg dihasilkan. Sifat mekanik yang menjadi patokan atau acuan dalam memilih material *piezoelectric* adalah *electromechanical coupling factor* (k),

Electromechanical coupling factor, k_{31} , menjadi indikator efektifitas material *piezoelectric* dalam mengubah energi listrik ke energi mekanik atau mengubah energi mekanik ke energi listrik. Nilai dari k tinggi yang mencerminkan efisiensi konversi energi, pada umumnya tidak memperhitungkan *losses* mekanis maupun elektris. Artinya, efisiensi dari *piezoelectric* ditentukan berdasarkan rasio konversi energi, yaitu energi yang dapat dihasilkan oleh elemen *piezoelectric* terhadap total energi yang diberikan [7].

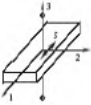
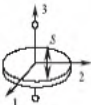

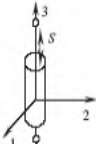

Perlu diketahui pula bahwa dimensi dari elemen keramik mempengaruhi persamaan k yang digunakan. Contohnya, adanya *planar coupling factor* (k_p) di *piezoelectric* yang berbentuk piringan tipis, *thickness coupling factor* (k_t) yang merupakan persamaan khusus untuk k_{33} , yang menyatakan hubungan antara medan listrik pada arah polarisasi elemen *piezoelectric*. Faktor k_t tersebut juga dikenal pada plat *piezoelectric* yang mempunyai dimensi permukaan relatif lebih besar daripada tebalnya.

2.4.3. Voltase Bangkitan, Arus, dan Daya pada Material *Piezoelectric*

Voltase bangkitan yang dihasilkan oleh material *piezoelectric* diakibatkan oleh adanya perbedaan muatan antar partikel kristal dalam *piezoelectric*. Ketika *piezoelectric* mendapatkan gaya eksternal, jarak antar partikel kristal *piezoelectric* akan berubah, baik semakin menjauh maupun semakin mendekat. Perubahan jarak inilah yang menyebabkan timbulnya beda tegangan yang dapat dimanfaatkan di berbagai aplikasi.

Beda potensial ini disebut *Generated Voltage*. Besar *generated voltage* yang dihasilkan bergantung pada besarnya energi mekanis yang diterima, jenis material, dan juga kapasitansi *piezoelectric*. Nilai *generated voltage* bergantung pada jenis dan bentuk *piezoelectric* itu sendiri yang dapat dilihat pada tabel 2.1. berikut ini:

Tabel 2.1. Generated voltage, displacement, dan kapasitansi pada piezoelectric

Action Mode (L , length; W , width; T , thickness; D , diameter)	Generated Voltage, V	Displacement, ΔL (ΔT)	Capacitance, C
Transverse length mode: $L > 3W > 3T$	$V = \frac{g_{31}F}{W}$	$\Delta l = \frac{d_{31}L}{T}V$	$C = \frac{\epsilon_3^T L W}{T}$
			
Thickness extension mode: $D > 5T$	$V = \frac{4Tg_{30}F}{\pi D^2}$	$\Delta T = d_{30}V$	$C = \frac{\pi \epsilon_3^T D^2}{4T}$
			
Radial mode: $D > 5T$	Not applied	$\Delta D = \frac{d_{11}D}{T}V$	$C = \frac{\pi}{4}K_1^T \epsilon_0 \frac{D^2}{T}$
			
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: $W > 5T, L > 5T$	$V = \frac{g_{15}F}{W}$	$\Delta x = d_{15}V$	$C = \frac{LW}{T}K_1^T \epsilon_0$
			

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.

Pada dasarnya voltase bangkitan yang dihasilkan material *piezoelectric* disebabkan oleh adanya muatan yang berbeda-beda antar partikel dalam *piezoelectric* itu sendiri. Dan ketika *piezoelectric* tersebut menerima gaya eksternal maupun mengalami defleksi, hal ini menyebabkan jarak antar partikel tersebut berubah baik itu semakin jauh atau semakin dekat. Akibat adanya perbedaan jarak, maka akan timbul beda potensial tegangan bangkitan, V_p , yang dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$V_p = \frac{3 d_{31} E w t x_p}{4 C} \quad 2.25$$

dimana :

- V_p = Tegangan bangkitan (V)
- d_{31} = Konstanta Regangan *Piezoelectric* (C/N)
- E = Modulus Young (N/m²)
- w = Lebar Material *Piezoelectric* (m)
- t = Tebal Material *Piezoelectric* (m)
- x_p = Defleksi Material *Piezoelectric* (m)
- C = Kapasitansi Material *Piezoelectric* (F)

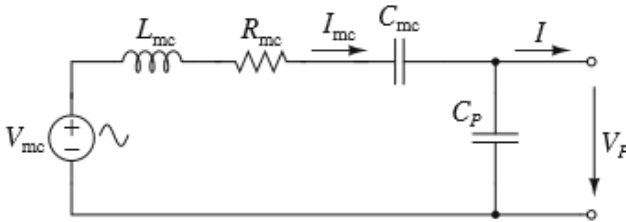
Sedangkan kapasitansi *piezoelectric* sendiri dirumuskan sebagai berikut:

$$C = \frac{\varepsilon^T_{33} \cdot L \cdot W}{T} \quad 2.26.$$

dimana:

- C = kapasitansi (F)
- ε^T_{33} = *permittivity* material terhadap tegangan konstan
- L = panjang material *piezoelectric* (m)
- T = tebal lapisan *piezoelectric* (m)
- W = lebar material *piezoelectric* (m)

Untuk memperoleh nilai arus dari *piezoelectric harvester*, terlebih dahulu dilakukan pemodelan *piezoelectric harvester* secara sederhana seperti pada gambar 2.17 berikut ini:



Gambar 2.17. Pemodelan Sederhana *Piezoelectric Harvester* [8]

Dari rangkaian tersebut didapatkan persamaan V_{mc} sebagai berikut:

$$V_{mc} = L_{mc} \frac{dI_{mc}}{dt} + R_{mc} I_{mc} + \frac{1}{C_{mc}} \int I_{mc} dt + V_p \quad 2.27.$$

dengan nilai $\Gamma = \sqrt{k_{31} k_p C_p}$, nilai $V_{mc} = \frac{F_{impact}}{\Gamma}$, nilai $L_{mc} = \frac{m}{\Gamma^2}$, nilai $R_{mc} = \frac{d}{\Gamma^2}$, dan nilai $C_{mc} = \frac{\Gamma^2}{k}$ maka nilai I_{mc} dapat diperoleh.

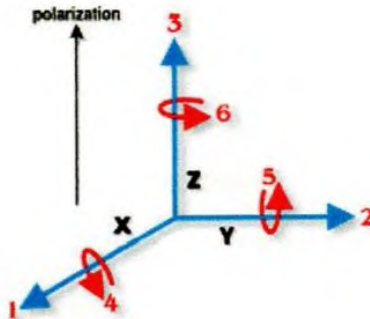
Sedangkan untuk daya yang dibangkitkan oleh *energy harvester* diperoleh dari persamaan sebagai berikut:

$$P = V_p \cdot I_{mc} \quad 2.28$$

2.4.4. Piezoelectric Constant

Material *piezoelectric* sering dijuluki sebagai material yang *anisotropic*. Untuk itu perlu ada konstanta fisik yang dapat menyatakan hubungan antara gaya mekanik dengan gaya listrik. Konstanta *piezoelectric* didefinisikan dengan dua buah *subscript* yang menyatakan arah. Arah medan listrik yang berhubungan dengan voltase atau arus dinyatakan pada *subscript* pertama, sedangkan arah tegangan atau regangan mekanik dinyatakan pada *subscript* kedua. Identifikasi arah sendiri mengacu pada 3 sumbu yang sama dengan sumbu X, Y, dan Z pada sistem ortogonal.

Untuk tegangan/regangan normal sumbu dinotasikan sebagai 1, 2, dan 3. Sedangkan untuk tegangan/regangan geser sumbu koordinat didefinisikan oleh 4, 5, dan 6.



Gambar 2.17. Definisi Arah pada *Piezoelectric* [7]

Beberapa konstanta juga dilambangkan dengan *superscript* yang menunjukkan spesifikasi kondisi mekanik dan elektrik. Beberapa *superscript* yang digunakan adalah:

- T : tegangan konstan (sistem bebas secara mekanik)
- S : regangan konstan (sistem dibatasi secara mekanik)
- E : medan listrik konstan (short circuit)
- D : perpindahan elektrik konstan (open circuit)

Berikut ini beberapa definisi mengenai konstanta *piezoelectric* dan persamaan yang digunakan pada beberapa konstanta tersebut:

a. *Piezoelectric Charge Constant*

Piezoelectric Charge Constant atau biasa dilambangkan dengan d merupakan polarisasi yang dibangkitkan per-unit tegangan mekanik kepada *piezoelectric*, atau regangan mekanik yang pada *piezoelectric* per-unit medan listrik yang diberikan. Pada tugas akhir ini akan digunakan konstanta d_{31} , dimana d_{31} merupakan polarisasi yang terinduksi paralel terhadap arah polarisasi (arah 3)

per unit tegangan normal yang diberikan pada arah 1, atau regangan yang terjadi dalam arah 1 per-unit medan listrik yang diberikan pada arah 3. [7]

Formula umum untuk d adalah

$$d = k\sqrt{s^E \epsilon^T} \quad (2.29.)$$

dimana:

d : *piezoelectric charge constant* (C/N)

k : *electromechanical coupling factor*

s : *elastic compliance* (m²/N)

e : *permittivity* (f/m)

b. *Piezoelectric Voltage Constant*

Piezoelectric Voltage Constant, dilambangkan dengan notasi g . *Piezoelectric Voltage Constant* adalah medan listrik yang dibangkitkan oleh *piezoelectric* per-unit tegangan mekanik yang diberikan, atau regangan mekanik yang diberikan ke *piezoelectric* per-unit perpindahan listrik yang diberikan. Pada tugas akhir ini akan digunakan konstanta g_{31} , dimana g_{31} adalah medan listrik yang terinduksi pada arah 3 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 [7].

Formula umum untuk g adalah

$$g = \frac{d}{\epsilon^T} \quad (2.30)$$

dimana:

g : *piezoelectric voltage constant* (Vm/N)

d : *piezoelectric charge constant* (C/N)

ϵ^T : *permittivity* (f/m)

c. *Permittivity*

Permittivitas atau konstanta dielektrik yang dilambangkan dengan ϵ^T adalah perpindahan dielektrik per-unit medan listrik. Terdapat dua jenis permittivitas yaitu permittivitas pada tegangan konstan (ϵ^T), dan permittivitas pada regangan konstan (ϵ^S) [7]. Sebagai contohnya,

- ϵ^T_{33} : Permittivitas untuk perpindahan dielektrik dengan medan listrik pada arah 3, pada kondisi tegangan konstan
- ϵ^S_{33} : Permittivitas untuk perpindahan dielektrik dengan medan listrik pada arah 3, pada kondisi regangan konstan

d. *Electromechanical Coupling Factor*

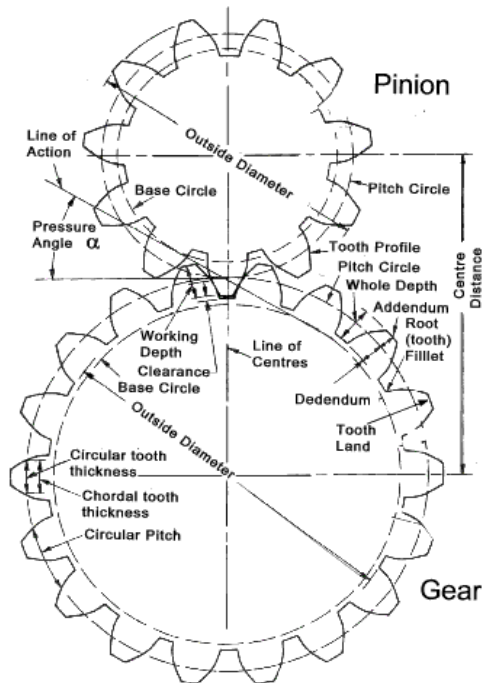
Electromechanical coupling factor, k , adalah indikator efektivitas material *piezoelectric* untuk mengubah energi listrik ke energi mekanik atau mengubah energi mekanik ke energi listrik. Nilai k tergantung pada spesifikasi yang telah diberikan oleh *supplier* material. Nilai k umumnya tidak memperhitungkan *losses* mekanik maupun elektrik. Dimensi dari *piezoelectric* mempengaruhi persamaan k yang digunakan. Salah satu contohnya yaitu untuk *piezoelectric* berbentuk piringan tipis dikenal adanya *planar coupling factor*, kp , disamping itu juga terdapat *thickness coupling factor*, kt , pada plat *piezoelectric* yang memiliki dimensi permukaan relatif lebih besar dibanding dimensi tebal [7].

Dibawah ini terdapat tabel dari koefisien-koefisien *piezoelectric* berdasarkan tipe *piezoelectricity*:

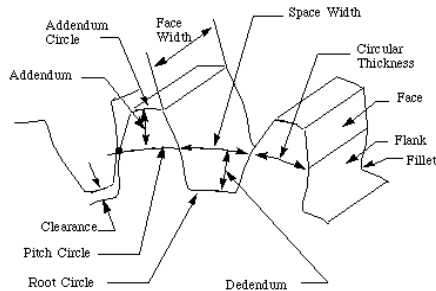
Tabel 2.2. Data teknis beberapa jenis material piezoelectric

Property	Units	PVDF Film	PZT	BaTiO ₃
Density	10^3 kg/m^3	1.78	7.5	5.7
Relative Permittivity	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	% at 1 KHz	12	30	21
Acoustic Impedance	$(10^6) \text{ kg/m}^2\text{-sec}$	2.7	30	30

2.5. Gear Box



Gambar 2.18. Pasangan Roda gigi lurus (*spur gear*) [9]



Gambar 2.19. Istilah-istilah pada Roda gigi lurus [9]

Langkah awal dalam melakukan perencanaan suatu transmisi daya adalah menentukan jenis transmisi yang digunakan, salah satu transmisi daya yang biasa digunakan adalah roda gigi. Demikian pula dalam memilih bahan untuk transmisi yang akan digunakan. Sistem transmisi tersebutlah yang didefinisikan sebagai *gearbox*. *Gearbox* memiliki beberapa fungsi, yakni: mengubah momen puntir yang akan diteruskan ke mesin, menyediakan rasio gigi yang sesuai dengan beban mesin, dan menghasilkan putaran mesin tanpa slip.

Dalam fungsinya untuk mengubah dan menyediakan rasio gigi, ada bermacam-macam jenis gigi yang dapat digunakan, salah satunya adalah roda gigi lurus. Roda gigi lurus atau biasa disebut *spur gear* digunakan untuk mentransmisikan daya dan gerak pada dua poros yang paralel. Roda gigi yang berfungsi sebagai penggerak dinamakan pinion, sedangkan roda gigi yang digerakkan dinamakan gear.

Terdapat beberapa besaran yang dibutuhkan atau digunakan dalam perencanaan roda gigi lurus ini, antara lain:

Diametral Pitch (P)

Merupakan jumlah gigi tiap satuan panjang lengkungan roda gigi atau jumlah gigi pada roda gigi dibagi dengan *pitch* diameter lingkarannya.

Velocity Ratio

Untuk memenuhi kebutuhan dari *gearbox* dalam mentransmisikan daya diperlukannya transmisi yang terdiri dari

beberapa tingkat perbandingan gigi. Perbandingan gigi tersebut dinamakan rasio gigi atau juga *velocity ratio*. Perbandingan rasio tersebut merupakan hasil bagi dari jari-jari roda gigi output dengan jari-jari roda gigi input.

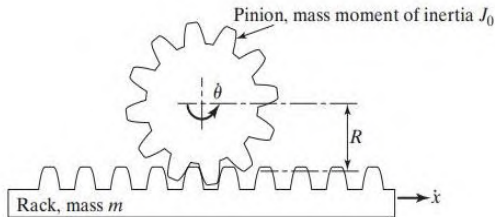
Persamaan dari *velocity ratio* adalah:

$$i = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{Nt_2}{Nt_1} = \frac{d_2}{d_1} \quad 2.31.$$

dimana:

i	:	<i>velocity ratio</i>
ω	:	kecepatan sudut
n	:	kecepatan keliling
Nt	:	jumlah gigi
d	:	<i>diameter pitch circle</i>

Gerak pergeseran suatu benda dengan bentuk permukaan dasar yang sama dengan lintasan didefinisikan sebagai gerak translasi, sedangkan gerak perputaran benda terhadap sumbu atau porosnya disebut gerak rotasi. Dalam suatu mekanisme pergerakan benda biasanya memiliki salah satu atau kedua gerak ini. *Rack-pinion* merupakan salah satu contoh mekanisme yang menerapkan prinsip gerak rotasi dan translasi, yakni mengonversikan gerak translasi menjadi rotasi atau sebaliknya.



Gambar 2.20. Gerak translasi dan rotasi pada rack dan pinion [2]

Hubungan antara gerak *rack-pinion* sesuai dengan persamaan berikut:

$$\dot{X} = \dot{\theta} \times R \quad 2.32.$$

Dimana \dot{X} adalah kecepatan translasi *rack*, $\dot{\theta}$ adalah kecepatan rotasi *pinion*, dan R adalah jari-jari *pinion*.

Sedangkan untuk massa equivalen dari *rack-pinion* adalah:

$$m_{eq} = m \times J_o/R^2 \quad 2.33.$$

2.6. Karakteristik Gelombang Laut Pulau Poteran, Jawa Timur

Energi gelombang laut dapat diketahui melalui karakteristik gelombang lautnya dengan menghitung kekuatan yang dapat ditimbulkan oleh gelombang laut, disimbolkan dalam Watt per satuan luas dengan menggunakan periode gelombang, amplitudo gelombang dan frekuensi gelombang sebagai parameternya. Pulau Poteran dipilih sebagai dasar penentuan parameter laboratorium pada penelitian ini karena karakteristik gelombang lautnya yang berpotensi untuk diterapkan sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut.

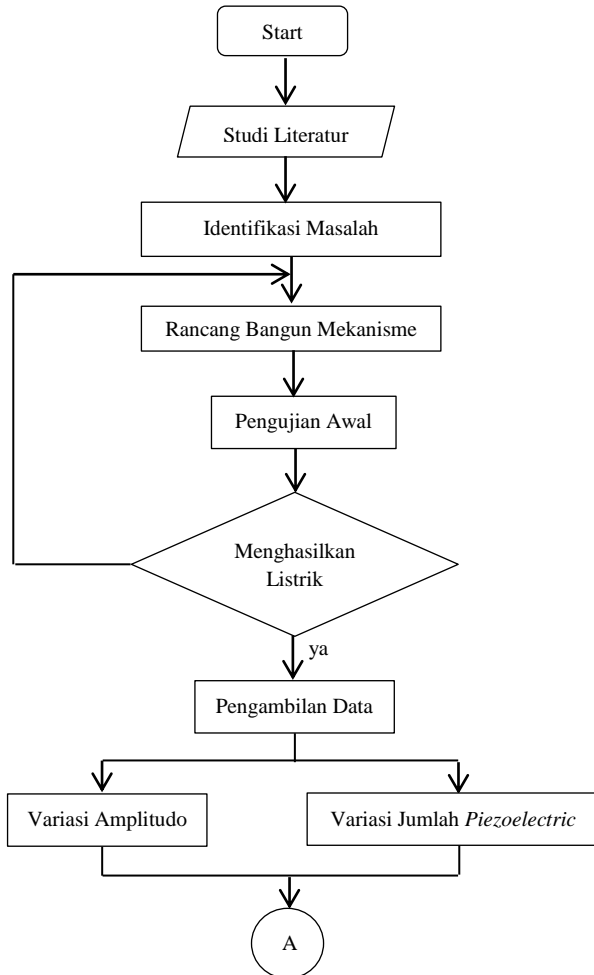
Berdasarkan penelitian dari Zulfikar Adlan pada tahun 2015 dengan menggunakan media citra satelit ALOS-PALSAR diperoleh karakteristik gelombang laut Pulau Poteran sebagai berikut:

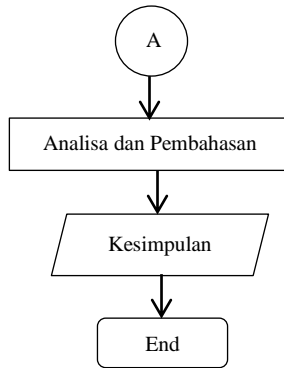
1. Amplitudo signifikan gelombang laut sebesar 3,713 meter
2. Amplitudo rata-rata gelombang laut adalah sebesar 2,986 meter
3. Panjang gelombang dominan sebesar 559,017 dan 883,883 meter
4. Periode gelombang sebesar 56,579 dan 89,360 sekon
5. Estimasi energi laut menggunakan metode *wave height* adalah sebesar 182 hingga 1317 W/m²
6. Estimasi energi laut menggunakan metode amplitudo adalah sebesar 258 W/m² [10]

BAB III METODOLOGI

3.1. Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir

Tahap-tahap pengerjaan tugas akhir yang dilaksanakan dapat dilihat pada diagram alir di bawah ini:





Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian

3.2. Penjelasan Tahap Pengerjaan Tugas Akhir

3.2.1. Studi Literatur

Bagian ini meliputi pengumpulan literatur dan buku-buku referensi yang memiliki kaitan dengan mekanika getaran, gelombang laut, dan material *piezoelectric* serta pengaruhnya. Literatur yang dipelajari selama pengerjaan tugas akhir ini dapat berupa tugas akhir yang sudah pernah ada, katalog, jurnal ilmiah, dan buku teks.

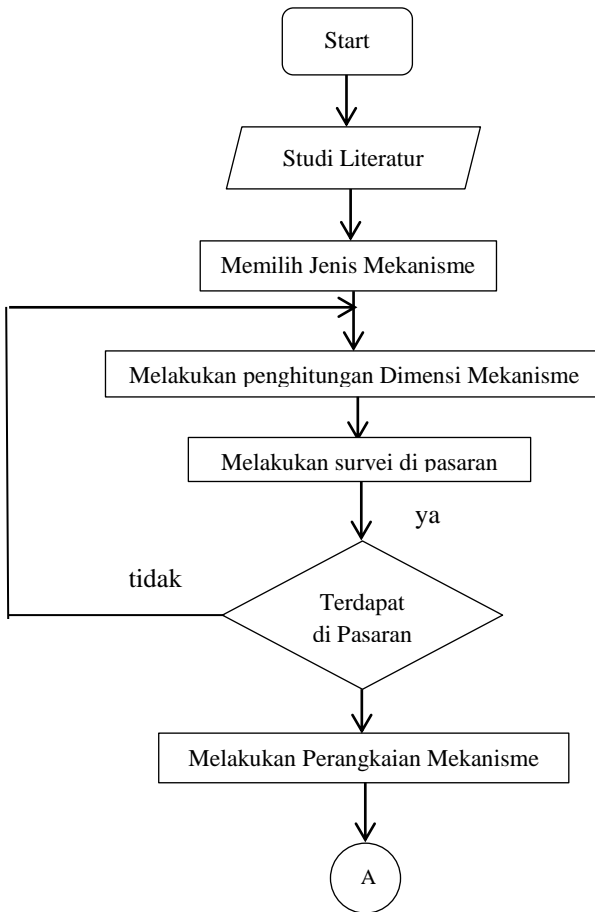
3.2.2. Identifikasi Masalah

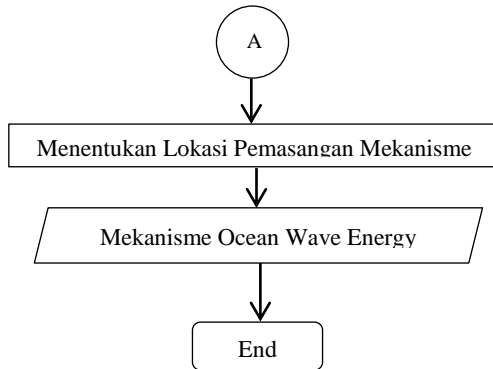
Pada tahap ini, topik dari penelitian yang dilakukan telah ditentukan yaitu mengenai pemanfaatan energi laut sebagai energi alternatif yang terbarukan, termasuk melakukan perancangan dan pembuatan mekanismenya dalam skala laboratorium. Mekanisme pelampung bola dengan metode *cantilever piezoelectric*. Tahap ini bertujuan untuk memilih input yang divariasikan. Variasi yang diinputkan yaitu berupa variasi jumlah piezoelectric dan amplitudo gelombang.

3.2.3. Perancangan Mekanisme

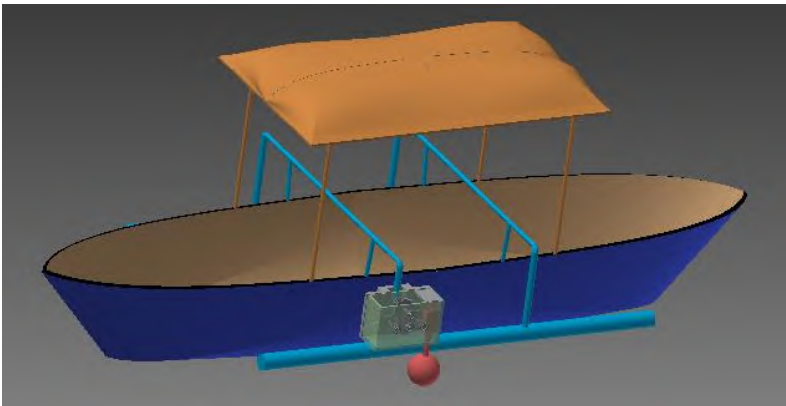
Tugas akhir ini bertujuan untuk mengetahui energi bangkitan yang dihasilkan oleh suatu alat *energy harvesting*

dengan metode *cantilever piezoelectric* dengan variasi amplitudo gelombang laut yang digunakan, dan jumlah *piezoelectric*. Pada tahap ini dilakukan perancangan mekanisme alat *energy harvesting* berupa model *prototype* dengan skala laboratorium, dimana langkah-langkah dalam proses perancangan mekanisme dapat dilihat pada gambar 3.2 yaitu flowchart perancangan.





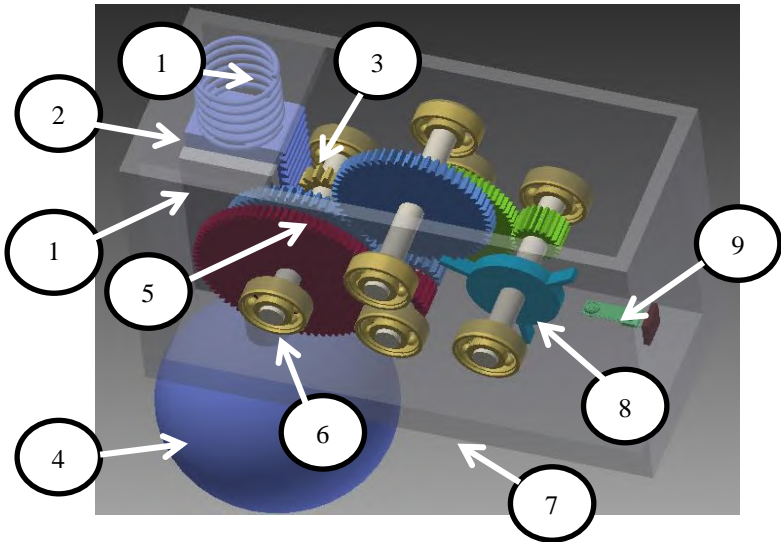
Gambar 3.2. Flowchart Perancangan



Gambar 3.3. Pemodelan Mekanisme pada Perahu

Prototype ini terdiri dari massa yang dilengkapi dengan pelampung yang diapungkan di permukaan air. Dimana saat gelombang mencapai pelampung, pelampung akan bergerak translasi dan menggerakkan rack yang dihubungkan dengan pelampung serta menggerakkan roda gigi. Roda gigi yang digunakan adalah jenis roda gigi lurus (*spur gear*) yang berfungsi untuk mengubah gerak translasi menjadi rotasi. Selain itu

prototype ini dilengkapi *blade* yang akan memberikan gaya *impact* kepada *cantilever piezoelectric*. Gaya *impact* ini akan memberikan defleksi pada *cantilever piezoelectric* sehingga *piezoelectric* menghasilkan energi listrik. Gambar 3.3. dan 3.4. menunjukkan permodelan mekanisme yang dibuat:



Gambar 3.4. Bagian-bagian dari Mekanisme

Keterangan gambar:

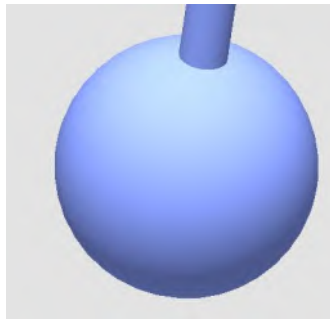
1. Pegas
2. Rack
3. Pinion
4. Pelampung
5. Rangkaian roda gigi
6. Bearing
7. Housing
8. Blade
9. Piezoelectric
10. *Stopper* (Penahan gerak Rack)

Cara kerja mekanisme ini adalah dengan memberikan gerak eksitasi yang berasal dari gelombang laut menuju ke pelampung yang nantinya menggerakkan *rack-pinion* dan susunan roda gigi lainnya, sehingga blade akan memukul *cantilever piezoelectric*. Mekanisme ini juga dilengkapi dengan *one-way bearing* yang dipasang pada roda gigi 2 dan 3 sehingga *gear box* hanya akan bergerak satu arah yaitu searah jarum jam saja guna memaksimalkan daya yang dihasilkan oleh mekanisme *energy harvesting* ini.

Pada mekanisme *energy harvesting* ini, digunakan komponen-komponen pendukung agar terbentuk sebuah mekanisme yang dapat menghasilkan listrik. Berikut ini adalah komponen-komponen pendukung beserta fungsinya:

1. Pelampung

Pelampung digunakan untuk meneruskan gerakan naik turun gelombang ke *rack-pinion gear*. Tipe pelampung yang digunakan adalah tipe pelampung dengan penampang bulat/bola guna memaksimalkan energi listrik yang dapat dipanen.



Gambar 3.5. Jenis pelampung yang digunakan pada mekanisme

2. Pegas

Pegas digunakan sebagai penyimpan energi saat gerak turun pelampung yang kemudian akan dilepaskan pada

gerak turun. Konstanta pegas didapatkan dari persamaan $K = F/\Delta x$



Gambar 3.6. Pegas

3. *Rack-pinion gear*

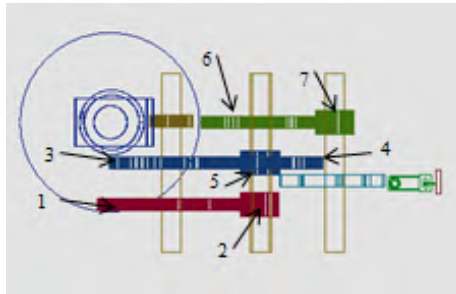
Rack-pinion gear merupakan pasangan gigi yang berfungsi untuk mengubah gerak translasi akibat gelombang yang diterima oleh pelampung menjadi gerak rotasi. Gerak rotasi tersebut berfungsi untuk menggerakkan rangkaian roda gigi yang terdapat di *gear box*. *Rack* yang digunakan memiliki dimensi panjang sebesar 8 cm guna memaksimalkan amplitudo dari gelombang laut yang menjadi eksitasi dalam mekanisme ini, sedangkan diameter *pinion* yang digunakan adalah 3,5 cm.



Gambar 3.7. Rack-pinion Gear

4. *Spur gear*

Rangkaian roda gigi lurus yang digunakan dalam mekanisme ini berjumlah 6 buah. Rangkaian roda gigi ini berfungsi untuk menaikkan putaran yang dihasilkan oleh *rack-pinion gear* guna memaksimalkan energi listrik yang dihasilkan oleh mekanisme ini.



Gambar 3.8. Rangkaian roda gigi lurus pada mekanisme

Keterangan:

1. Diameter 6 cm
 2. Diameter 1,4 cm
 3. Diameter 5 cm
 4. Diameter 5 cm
 5. Diameter 1,4 cm
 6. Diameter 5 cm
 7. Diameter 1,4 cm
5. Poros
 Poros digunakan untuk mentransmisikan daya atau putaran dari satu roda gigi ke roda gigi lainnya. Poros yang digunakan dalam mekanisme ini memiliki diameter 8mm.



Gambar 3.9. Poros

6. *Blade*

Blade menjadi transmisi putaran akhir dari rangkaian roda gigi yang berfungsi untuk mengubah gerak rotasi dari roda gigi menjadi gaya *impact* yang diberikan kepada *piezoelectric*.



Gambar 3.10. *Blade*

7. *Cantilever piezoelectric*

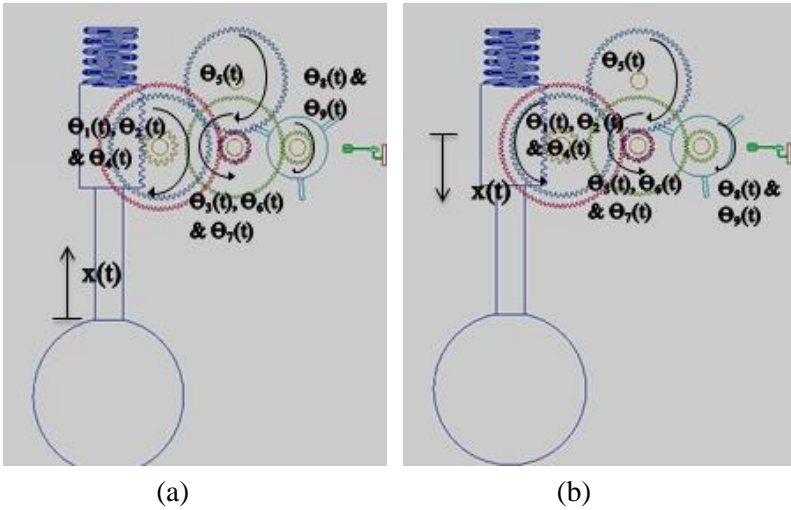
Cantilever piezoelectric digunakan untuk menghasilkan energi listrik. Gaya *impact* yang diberikan oleh blade akan menggetarkan *piezoelectric* sehingga timbul energi listrik dari mekanisme tersebut. *Piezoelectric* yang digunakan adalah *piezoelectric minisense 100* yang memiliki voltase bangkitan maksimum sebesar 6V.



Gambar 3.11. Piezoelectric Minisense 100

3.2.4. **Pemodelan Matematika**

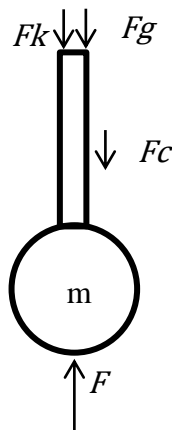
Setelah melakukan perancangan mekanisme, langkah selanjutnya yaitu merancang tentang perealisasi rancangan atau desain *prototype* ini. Skema gerakan dari mekanisme ini adalah:



Gambar 3.12 Gerakan mekanisme (a) gerakan naik, (b) gerakan turun

3.2.4.1. Analisa Gerak Gelombang Naik

a. Pelampung



Gambar 3.13 FBD kesetimbangan statis pelampung

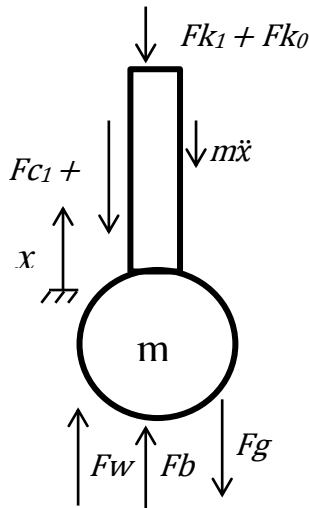
Ketika tidak terdapat gelombang, pelampung berada pada kondisi kesetimbangan statis yang gaya-gayanya hanya dipengaruhi oleh gaya *buoyancy* dan gaya gravitasi sehingga *free body diagram* (FBD) dari pelampung adalah sebagai berikut:

Dari FBD di atas maka akan didapat persamaan

$$Fb - Fg - Fk_0 - Fc_0 = 0 \quad 3.1$$

$$Fb = Fg + Fk_0 + Fc_0 \quad 3.2$$

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



Gambar 3.14 FBD kesetimbangan dinamis pelampung

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

$$m\ddot{x} + Kx + Fc_1 - Fg + Fw + Fb = 0 \quad 3.3$$

dengan memasukkan persamaan 3.2 ke persamaan 3.3, maka akan didapatkan

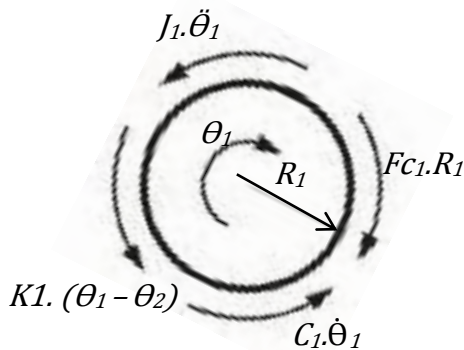
$$m\ddot{x} + Fk_l + Fc_l = Fw \quad (3.4)$$

dengan Fc_l adalah gaya kontak antara *rack* dan *pinion* dan Fg adalah gaya resultan antara gaya yang timbul dari gelombang laut (F_{wave}), gaya apung/*buoyancy* (Fb), dan gaya berat dari pelampung (Fg).

b. Spur Gear

Spur gear merupakan komponen dari gear box yang memiliki fungsi guna meningkatkan kecepatan putaran dan frekuensi dari *blade* pemukul agar mendekati frekuensi resonansi dari material *piezoelectric*.

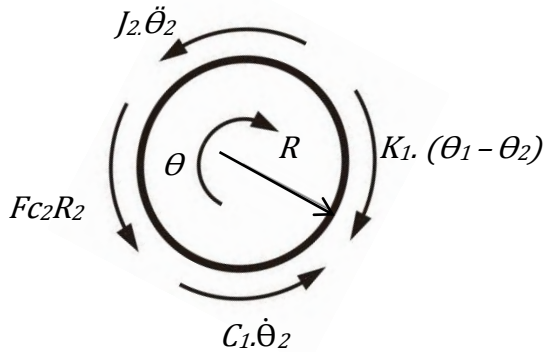
Pinion (Gear1)



Gambar 3.15 FBD gear 1

Dari FBD tersebut didapatkan persamaan gerak:

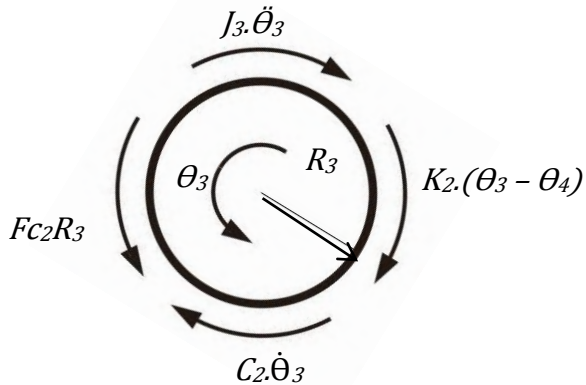
$$\ddot{\theta}_1 = \frac{1}{J_1} \cdot (Fc_l \cdot R_l + k_l \cdot \theta_2 - C_l \cdot \dot{\theta}_1 - k_l \cdot \theta_1) \quad (3.5)$$

Gear 2 (Poros 1, D = 6cm)

Gambar 3.16 FBD gear 2

Dari FBD tersebut didapatkan persamaan gerak:

$$\ddot{\theta}_2 = \frac{1}{J_2} \cdot (k_1 \cdot \theta_1 - F_{c2} \cdot R_2 - C_1 \cdot \dot{\theta}_2 - k_1 \cdot \theta_2) \quad (3.6)$$

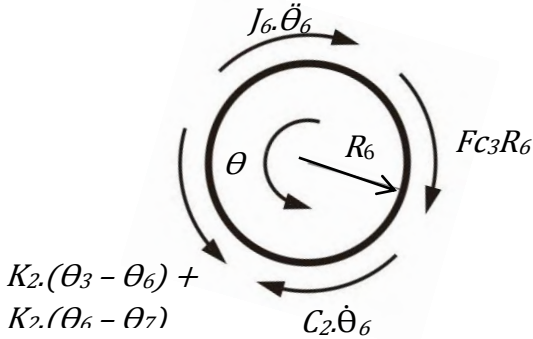
Gear 3 (Poros 2, D = 1,4 cm)

Gambar 3.17 FBD gear 3

Dari FBD tersebut didapatkan persamaan gerak:

$$\ddot{\theta}_3 = \frac{1}{J_3} \cdot (Fc_2.R_3 + k_2.\theta_4 - C_2.\dot{\theta}_3 - k_2.\theta_3) \quad (3.7)$$

Gear 6 (Poros 2, D = 1,4 cm)

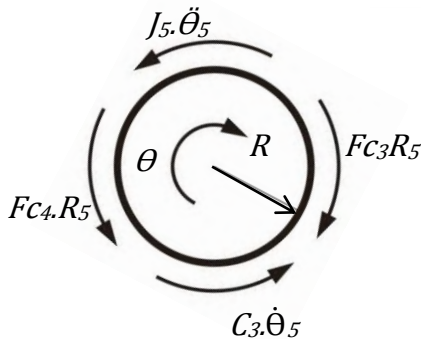


Gambar 3.18 FBD gear 6

Dari FBD tersebut didapatkan persamaan gerak:

$$\ddot{\theta}_6 = \frac{1}{J_6} \cdot (-Fc_3.R_6 + k_2.\theta_3 - C_2.\dot{\theta}_6 - k_2.\theta_7) \quad (3.8)$$

Gear 5 (Gear Pemhalik)

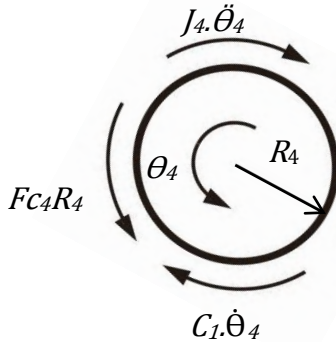


Gambar 3.19 FBD gear 5

Dari FBD tersebut didapatkan persamaan gerak:

$$\ddot{\Theta}_5 = \frac{1}{J_5} \cdot (F_{C_3} \cdot R_5 - C_3 \cdot \dot{\Theta}_5 - F_{C_4} \cdot R_5) \quad (3.9)$$

Gear 4 (Poros 1, D = 5cm)

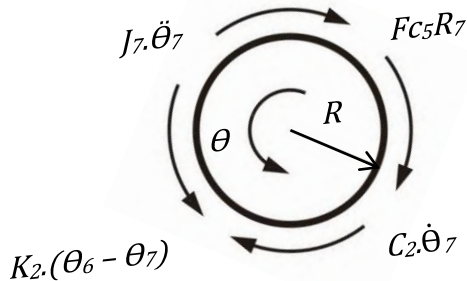


Gambar 3.20 FBD gear 4

Dari FBD tersebut didapatkan persamaan gerak:

$$\ddot{\Theta}_4 = \frac{1}{J_4} \cdot (F_{C_4} \cdot R_4 + C_2 \cdot \dot{\Theta}_4) \quad (3.10)$$

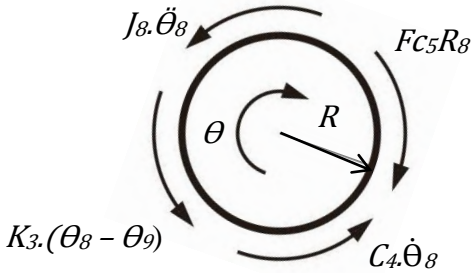
Gear 7 (Poros 2, D = 5cm)



Gambar 3.21 FBD gear 7

Dari FBD tersebut didapatkan persamaan gerak:

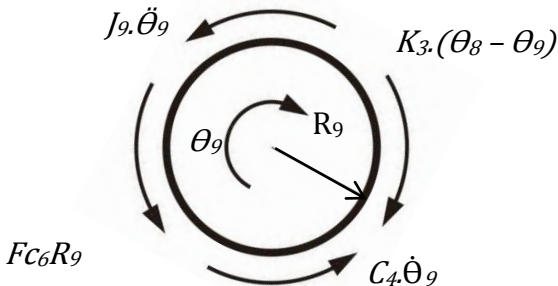
$$\ddot{\Theta}_7 = \frac{1}{J_7} \cdot (-F_{C_5} \cdot R_7 + k_2 \cdot \Theta_6 - C_2 \cdot \dot{\Theta}_7 - k_2 \cdot \Theta_7) \quad (3.11)$$

Gear 8 (Poros 3, D = 1,4 cm)

Gambar 3.22 FBD gear 8

Dari FBD tersebut didapatkan persamaan gerak:

$$\ddot{\theta}_8 = \frac{1}{J_8} \cdot (Fc_5 \cdot R_8 + k_3 \cdot \theta_8 - C_4 \cdot \dot{\theta}_8 - k_3 \cdot \theta_9) \quad (3.12)$$

Gear 9 (Blade)

Gambar 3.23 FBD gear 9

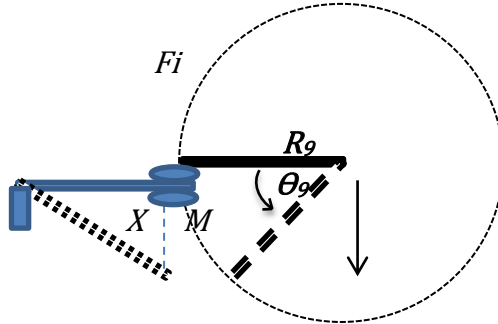
Dari FBD tersebut didapatkan persamaan gerak:

$$\ddot{\theta}_9 = \frac{1}{J_9} \cdot (-Fc_6 \cdot R_9 + k_3 \cdot \theta_8 - C_4 \cdot \dot{\theta}_9 - k_3 \cdot \theta_9) \quad (3.13)$$

c. Blade dan piezoelectric

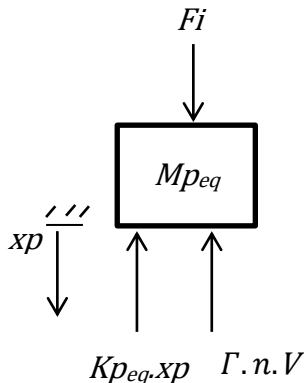
Blade adalah komponen yang akan memberikan gaya *impact* ke *piezoelectric* sehingga timbul tegangan listrik. Akibat

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 3.24 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 3.25 FBD *piezoelectric*

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

$$mp_{eq}\ddot{x}_p + Kp_{eq}x_p + \Gamma \cdot n \cdot V_p = F_i \quad (3.14)$$

d. Massa (Beban)

Pada persamaan gerak dinamis mekanisme, didapatkan:

$$m\ddot{x} + Fk_1 + Fc_1 = Fw$$

untuk memperoleh nilai dari massa ekuilavensi 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:

$$\begin{aligned} \ddot{x} = & \frac{1}{m}[-Kx + Fw - \frac{1}{R1} [J_1.\ddot{\theta}_1 + C_1.\dot{\theta}_1 + J_2.\ddot{\theta}_2 + C_2.\dot{\theta}_2 + \frac{R2}{R3} [J_3.\ddot{\theta}_3 \\ & + C_3.\dot{\theta}_3 + J_6.\ddot{\theta}_6 + C_2.\dot{\theta}_6 + \frac{R6}{R5} (J_5.\ddot{\theta}_5 + C_3.\dot{\theta}_5 + \frac{R5}{R4}(J_4.\ddot{\theta}_4 + C_1.\dot{\theta}_4)) \\ & + J_7.\ddot{\theta}_7 + C_2.\dot{\theta}_7 + \frac{R7}{R8} [J_8.\ddot{\theta}_8 + C_4.\dot{\theta}_8 + J_9.\ddot{\theta}_9 + C_4.\dot{\theta}_9 + \\ & Fc_6.R_9]]]] \quad (3.15) \end{aligned}$$

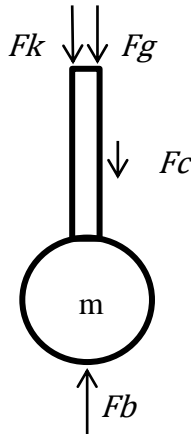
dimana:

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

3.2.4.2. Analisa Gerak Gelombang Turun

a. Pelampung



Gambar 3.26 FBD kesetimbangan statis pelampung

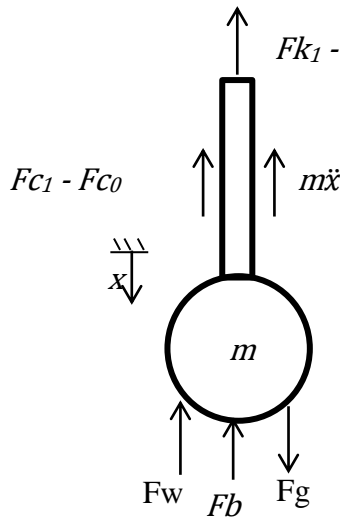
Ketika tidak terdapat gelombang, pelampung mengalami kesetimbangan statis yang gaya-gayanya hanya dipengaruhi oleh gaya *buoyancy* dan gaya gravitasi sehingga *free body diagram* (FBD) dari pelampung adalah sebagai berikut:

Dari FBD di atas maka akan didapat persamaan

$$F_b - F_g - F_{k_0} - F_{c_0} = 0 \quad (3.16)$$

$$F_b = F_g + F_{k_0} + F_{c_0} \quad (3.17)$$

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



Gambar 3.27 FBD dinamis pelampung

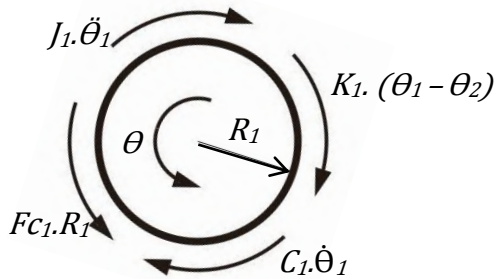
Dari *free body diagram* (FBD) tersebut didapat persamaan dinamis sebagai berikut:

$$\Sigma F = 0 \quad (3.18)$$

$$-m\ddot{x}_1 - F_{k_1} - F_{c_1} - F_w = 0 \quad (3.19)$$

$$\ddot{x} = \frac{1}{m} (-F_{c_1} - kx - F_w) \quad (3.20)$$

Spur Gear
Pinion (Gear 1)

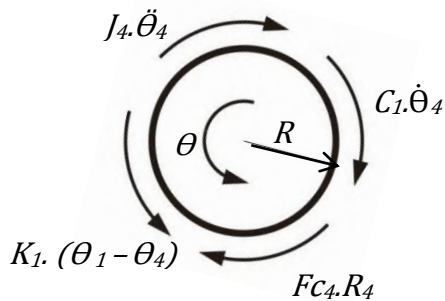


Gambar 3.28 FBD gear 1

Dari FBD tersebut diperoleh persamaan:

$$F_{C1} = \frac{1}{R_1} (J_1 \cdot \ddot{\theta}_1 + C_1 \dot{\theta}_1 + k_1(\theta_1 - \theta_2)) \quad (3.21)$$

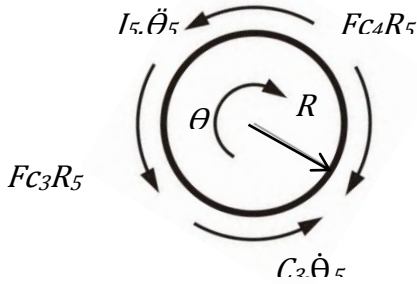
Gear 4 (Poros 1, D = 5cm)



Gambar 3.29 FBD gear 4

Dari FBD tersebut diperoleh persamaan:

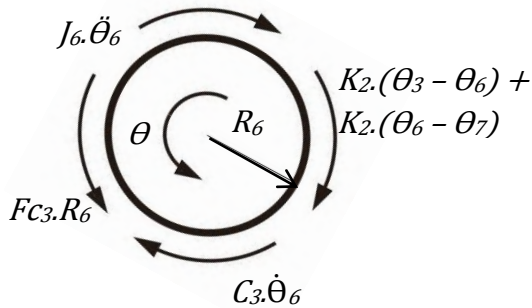
$$k_1 \cdot (\theta_1 - \theta_4) = J_4 \cdot \ddot{\theta}_4 + C_1 \dot{\theta}_4 + F_{C4} \cdot R_4 \quad (3.22)$$

Gear 5 (Gear Pembalik)

Gambar 3.30 FBD gear 5

Dari FBD tersebut diperoleh persamaan:

$$Fc_4 = \frac{1}{R_5} (J_5 \cdot \ddot{\theta}_5 + Fc_3 R_5 + C_3 \cdot \dot{\theta}_3) \quad (3.23)$$

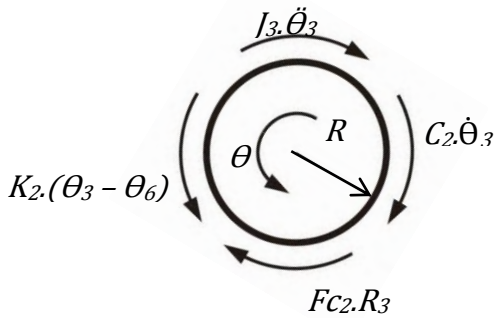
Gear 6 (Poros 2, D = 1,4 cm)

Gambar 3.31 FBD gear 6

Dari FBD tersebut diperoleh persamaan:

$$Fc_3 = \frac{1}{R_6} (J_6 \cdot \ddot{\theta}_6 + C_3 \dot{\theta}_6 + K_2 \cdot (\theta_3 - \theta_6) + K_2 \cdot (\theta_6 - \theta_7)) \quad (3.24)$$

Gear 3 (Poros 2, D = 1,4 cm)

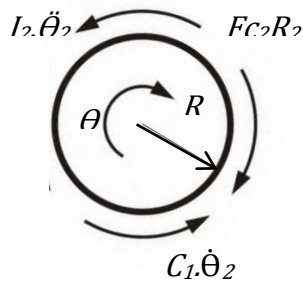


Gambar 3.32 FBD gear 3

Dari FBD tersebut diperoleh persamaan :

$$K_2 \cdot (\theta_3 - \theta_6) = J_3 \cdot \ddot{\theta}_3 + C_2 \dot{\theta}_3 + Fc_2 R_3 \quad (3.25)$$

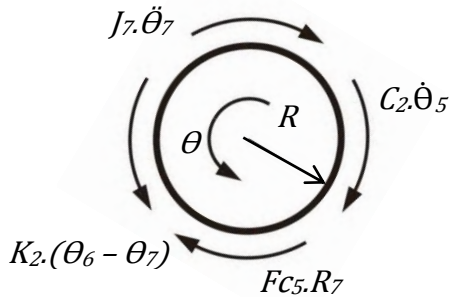
Gear 2 (Poros 1, D = 6cm)



Gambar 3.33 FBD gear 5

Dari FBD tersebut diperoleh persamaan:

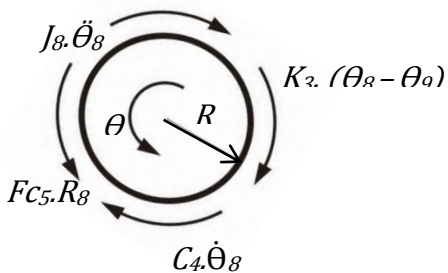
$$Fc_2 R_2 = J_2 \cdot \ddot{\theta}_2 + C_1 \dot{\theta}_2 \quad (3.26)$$

Gear 7 (Poros 2, D = 5cm)

Gambar 3.34 FBD gear 7

Dari FBD tersebut diperoleh persamaan :

$$K_2 \cdot (\theta_6 - \theta_7) = J_7 \cdot \ddot{\theta}_7 + C_2 \cdot \dot{\theta}_7 + F_{C5} R_7 \quad (3.27)$$

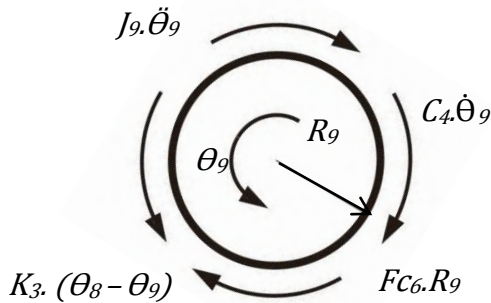
Gear 8 (Poros 3, D = 1,4 cm)

Gambar 3.35 FBD gear 8

Dari FBD tersebut diperoleh persamaan :

$$F_{c5} = \frac{1}{R_8} (J_8 \ddot{\theta}_8 + C_4 \dot{\theta}_8 + k_3(\theta_8 - \theta_9)) \quad (3.28)$$

Gear 9 (Blade)

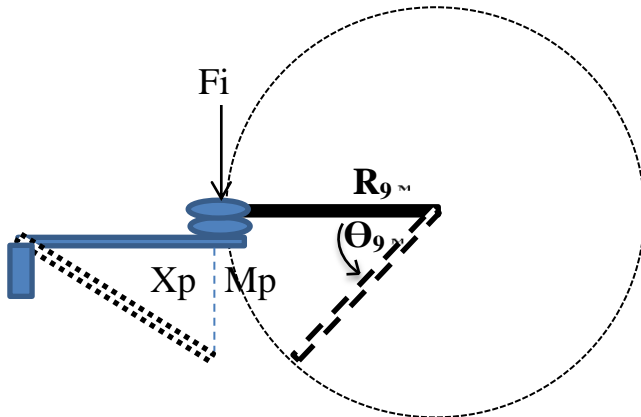


Gambar 3.36 FBD gear 9

Dari FBD tersebut diperoleh persamaan :

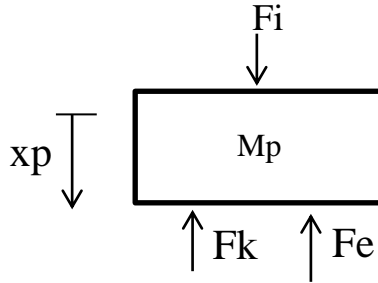
$$k_3 \cdot (\theta_8 - \theta_9) = J_9 \ddot{\theta}_9 + C_4 \dot{\theta}_9 + F_{c6} \cdot R_9 \quad (3.29)$$

b. Blade dan piezoelectric



Gambar 3.37 FBD Pada Blade dan Piezoelectric (tampak belakang)

Gambar 3.37 adalah gambar FBD kontak antara *blade* dengan *piezoelectric*. Persamaan gerak dari *piezoelectric* akibat gaya impact yang ditimbulkan oleh gerak rotasi dari *blade* dapat dimodelkan secara sederhana menurut gambar 3.38 berikut:



Gambar 3.38 FBD *piezoelectric*

Dari FBD diatas dapat diturunkan persamaan gerak piezoelectric sebagai berikut:

$$M_{peq} \ddot{x}_p + K_{peq} x_p + \Gamma.n.V_p = F_i \quad (3.30)$$

d. Massa (Beban)

Pada persamaan gerak pelampung didapat persamaan 3.17:

$$-m\ddot{x}_1 - F_{k1} - F_{c1} - F_w = 0$$

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 diatas menjadi:

$$\ddot{x} = \frac{1}{m} [-kx - F_w - \frac{1}{R_1} [J_1.\ddot{\Theta}_1 + C_1\dot{\Theta}_1 + J_2.\ddot{\Theta}_2 + C_1\dot{\Theta}_2 + \frac{R_4}{R_5} [J_5.\ddot{\Theta}_5 + C_3\dot{\Theta}_3 + \frac{R_5}{R_6} [J_6.\ddot{\Theta}_6 + C_3\dot{\Theta}_6 + J_3.\ddot{\Theta}_3 + C_2\dot{\Theta}_3 + \frac{R_3}{R_2} (J_2.\ddot{\Theta}_2$$

$$+ C_1.\dot{\Theta}_2) + J_7.\ddot{\Theta}_7 + C_2.\dot{\Theta}_7 + \frac{R7}{R8} [J_8.\ddot{\Theta}_8 + C_4.\dot{\Theta}_8 + J_9.\ddot{\Theta}_9 + C_4.\dot{\Theta}_9 + Fc_6.R_9]]] \quad (3.31)$$

dimana:

- 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

3.2.4.3. Voltase yang Dihasilkan *Piezoelectric*

Setelah besaran *Fimpact* yang diberikan kepada *piezoelectric* telah diketahui, selanjutnya adalah menghitung besarnya voltase bangkitan yang dihasilkan oleh *piezoelectric*. Berdasarkan dasar teori yang ada, persamaan yang digunakan untuk memperoleh voltase bangkitan *piezoelectric* tipe *cantilever* adalah persamaan 2.25:

$$V = \frac{g_{31}}{W} F_{impact}$$

3.2.4.4. Arus yang Dihasilkan *Piezoelectric*

Arus keluaran dari mekanisme *energy harvester* ini didapatkan melalui persamaan 2.27:

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

Dengan memasukkan nilai V_{mc} , L_{mc} , R_{mc} , C_{mc} , V_p , maka arus yaitu \dot{I}_{mc} dan I_{mc} dapat diperoleh

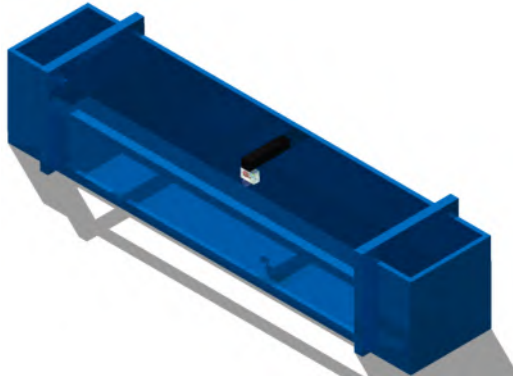
3.2.4.5. Daya yang Dihasilkan *Piezoelectric*

$$P = V_p \cdot I_{mc}$$

3.2.5. Perencanaan Pengujian Awal

Berdasarkan pemodelan pengujian yang telah direncanakan, selanjutnya dilakukan pengujian awal. Pengujian awal bertujuan untuk memvalidasi hasil simulasi dengan eksperimen. Jika nantinya voltase bangkitan memiliki perbedaan yang cukup besar dibandingkan dengan simulasi yang telah dibuat, maka dilakukan perhitungan ulang pada perencanaan mekanisme, sehingga didapatkan mekanisme yang mendekati

pemodelan awal yang telah dibuat. Pemodelan dan simulasi mengikuti hasil yang dilakukan oleh saudara Zulfan Wildan F. pada tahun 2016.



Gambar 3.39. Posisi Penempatan Mekanisme pada Kolam Pembuat Gelombang

Untuk lebih jelasnya berikut ini diagram alir dari proses validasi hasil eksperimen dengan hasil pemodelan.

Dalam proses pengujian awal dan pengambilan data nantinya, akan digunakan beberapa peralatan sebagai penunjang atau pembantu dalam proses ini selain mekanisme *energy harvester* itu sendiri, yaitu:

1. Kolam pembuat simulasi gelombang

Kolam pengujian yang telah dibuat oleh penelitian sebelumnya ini memiliki dimensi kolam 5x1x1 meter. Ombak buatan yang dibuat dengan menggunakan motor AC. Dalam penelitian ini gerakan gelombang laut disimulasikan dengan mekanisme dari kolam tersebut sesuai dengan amplitude dan frekuensi gelombang laut yang diinginkan.



Gambar 3.40. Kolam Pengujian

2. *Digital Storage Oscilloscope*

Digital storage oscilloscope digunakan untuk merekam data tegangan yang dihasilkan oleh *energy harvester*. Data tersebut berupa grafik voltase bangkitan *piezoelectric* terhadap waktu.



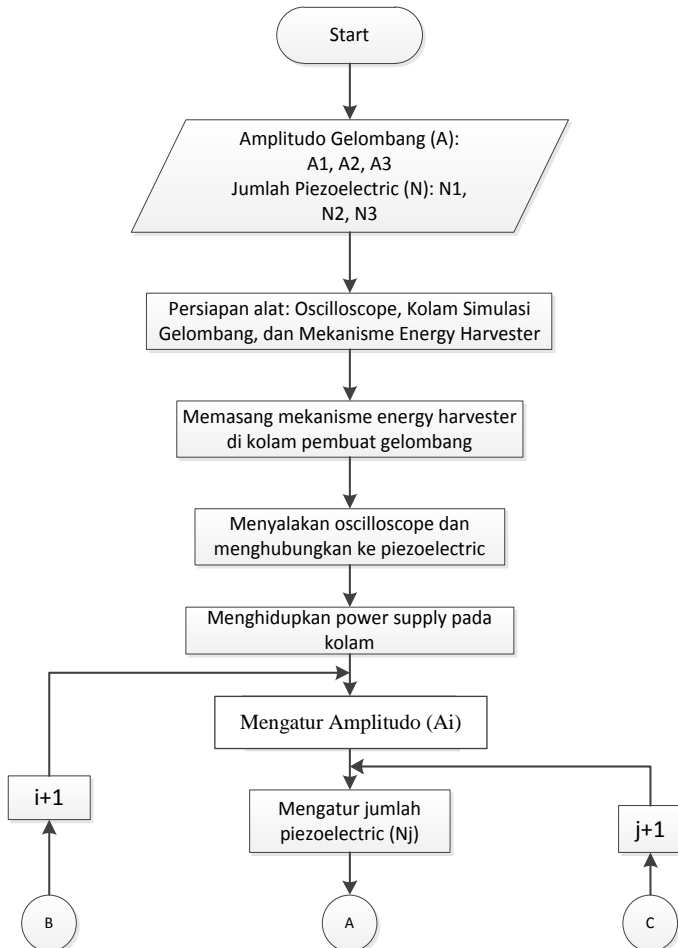
Gambar 3.41. *Digital Storage Oscilloscope*

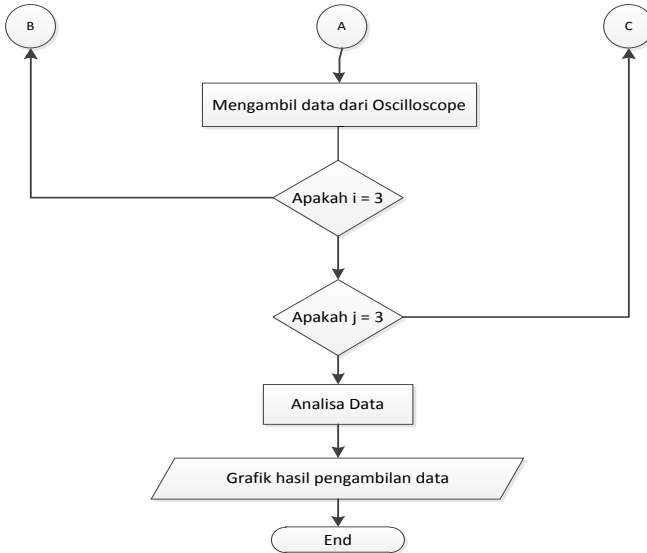
3.2.6. Pengambilan Data

Setelah mekanisme memenuhi pemodelan awal, maka pengambilan data berupa voltase bangkitan dapat dilakukan. Hal ini dilakukan dengan tujuan membandingkan antara hasil praktik

dengan teoritis. Sehingga jika terjadi perbedaan yang sangat jauh, berarti terjadi kesalahan dalam mekanisme maupun dalam proses pengambilan data yang nantinya dapat segera diatasi dan diperbaiki.

Berikut ini diagram alir dalam pengambilan data eksperimen:





Gambar 3.42. Diagram alir Pengambilan data

Sesuai dengan penjelasan pada sub-bab sebelumnya, variasi yang digunakan dalam mekanisme ini adalah:

- a. Variasi amplitudo gelombang
Pengujian ini menggunakan tiga variasi amplitudo gelombang yaitu 3.9cm, 4.1 cm, dan 4.9 cm.
- b. Variasi jumlah *piezoelectric*.
Pengujian ini menggunakan tiga variasi jumlah *piezoelectric* yaitu 1, 2, dan 3 buah *piezoelectric* yang elektrisnya disusun secara seri.



(a)

(b)

(c)

Gambar 3.43. Susunan Variasi *Piezoelectric*

(a) Satu buah

(b) Dua buah

(c) Tiga buah

3.2.7. Analisa dan Pembahasan

Setelah pengambilan data selesai, dilakukan analisa dan pembahasan hasil data yang didapatkan. Analisa diawali dengan analisa hasil secara teoritis, guna menjadi pembandingan dengan percobaan. Dalam analisa dan pembahasan pada tugas akhir ini akan dicari pengaruh variasi frekuensi gelombang dan *piezoelectric* dalam voltase bangkitan yang dihasilkan.

Tabel 3.1. Pengambilan Data

Amplitudo Gelombang	Jumlah <i>Piezoelectric</i>	Data Pengujian	
		Voltage (rms)	Daya Eksperimen (Watt)
A1	N1		
	N2		
	N3		
A2	N1		
	N2		
	N3		
A3	N1		
	N2		
	N3		

3.2.8. Penarikan Kesimpulan

Dalam kesimpulan dijelaskan analisa fenomena yang terjadi dalam tugas akhir ini dan bagaimana tren yang ada dari sejumlah data yang diambil. Dengan memiliki data dari pengambilan secara eksperimen dan data dalam analisa teoritis, maka akan didapatkan perbedaan dari kedua data tersebut, dan dari perbedaan hasil tersebut dapat dicari penyebab perbedaan tersebut.

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Data dan Spesifikasi Pengujian

Pada subbab ini dijelaskan tentang data dan spesifikasi aspek-aspek yang nantinya digunakan dalam analisa pengujian, mulai dari data dan spesifikasi dari peralatan yang digunakan dan mekanisme yang telah dibuat.

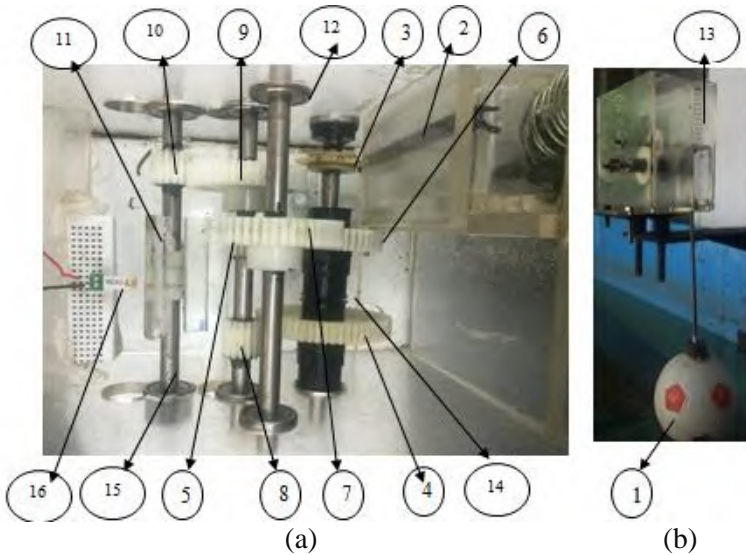
4.1.1 Kolam Pengujian

Pengujian ini dilakukan pada kolam pengujian berupa simulator gelombang air. Simulator gelombang ini terdiri dari beberapa komponen utama yaitu motor AC 3 fasa, pompa sentrifugal, dan juga inverter. Pada simulator gelombang ini nilai frekuensi yang diubah di inverter selalu berbanding lurus dengan nilai amplitudo gelombang yang dihasilkan. Pada pengujian ini digunakan stroke sepanjang 15 cm dengan variasi sebagai berikut:

- Frekuensi inverter 10 Hz
Amplitudo gelombang : 3,52 cm
Frekuensi gelombang : 1 Hz
- Frekuensi inverter 12 Hz
Amplitudo gelombang : 3,92 cm
Frekuensi gelombang : 1,2 Hz
- Frekuensi inverter 14 Hz
Amplitudo gelombang : 4,7 cm
Frekuensi gelombang : 1,4 Hz

4.1.2. Mekanisme

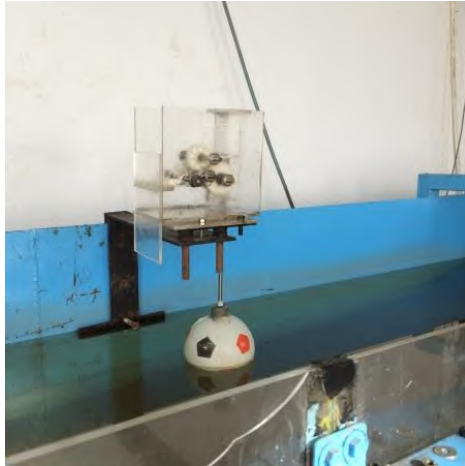
Berikut ini merupakan gambaran mekanisme *ocean wave energy harvester*:



Gambar 4.1. *Prototype* Mekanisme (a) tampak atas, (b) tampak samping

Keterangan gambar:

- | | |
|---|---------------------------|
| 1. Pelampung Bola | 9. Gear 7 (D = 5cm) |
| 2. <i>Rack</i> yang dilengkapi dengan chain | 10. Gear 8 (D = 1,4cm) |
| 3. <i>Sprocket</i> (Gear 1) | 11. <i>Blade</i> (Gear 9) |
| 4. Gear 2 (D = 6cm) | 12. Bearing |
| 5. Gear 3 (D = 1,4cm) | 13. Pegas |
| 6. Gear 4 (D = 5cm) | 14. One-way Bearing |
| 7. Gear 5 (D = 5cm) | 15. Poros |
| 8. Gear 6 (D = 1,4cm) | 16. <i>Piezoelectric</i> |



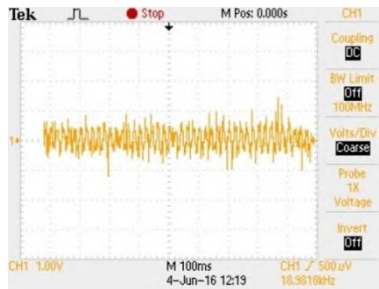
Gambar 4.2. Peletakan Mekanisme di Kolam Pengujian

4.2 Analisa Hasil Pengujian

Pada subbab ini dijelaskan tentang hasil data pengujian yang telah dilakukan, yang kemudian dianalisa dan dijadikan dasar dalam pembahasan bagaimana pengaruh amplitudo atau frekuensi dan jumlah piezoelectric terhadap energi listrik yang dihasilkan dari pengujian.

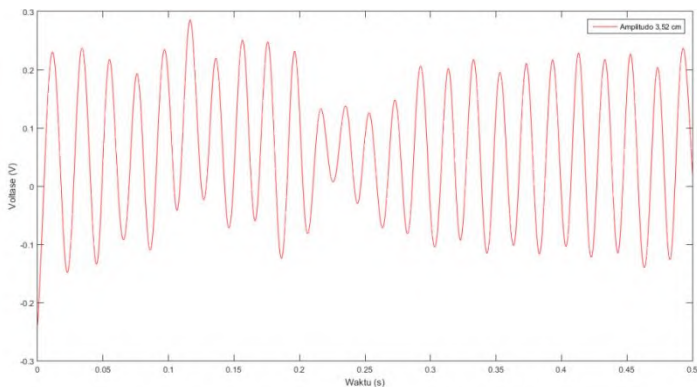
4.2.1. Data Hasil Pengujian

Setelah dilakukan pengujian pada mekanisme *ocean wave energy harvester* tipe pelampung bola dengan metode *cantilever piezoelectric* didapatkanlah hasil pengujian yang terekam oscilloscope pada gambar 4.3.



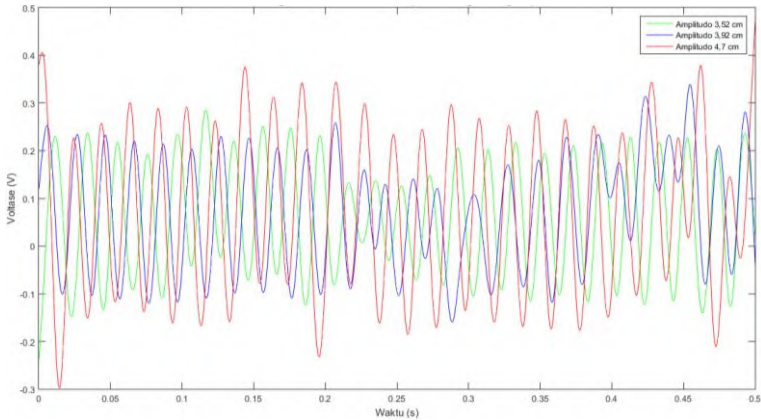
Gambar 4.3. Contoh hasil rekam *oscilloscope* dari pengujian

Dari hasil yang direkam oleh *oscilloscope*, dilakukan proses *filtering* data dan *smoothing* data untuk memperhalus grafik hasil pengujian seperti pada gambar 4.4, setelah langkah *filtering*, selanjutnya dilakukan penghitungan nilai *rms* (*root mean square*) pada data hasil *filtering* untuk melihat besarnya voltase bangkitan rata-rata yang dihasilkan oleh mekanisme ini.

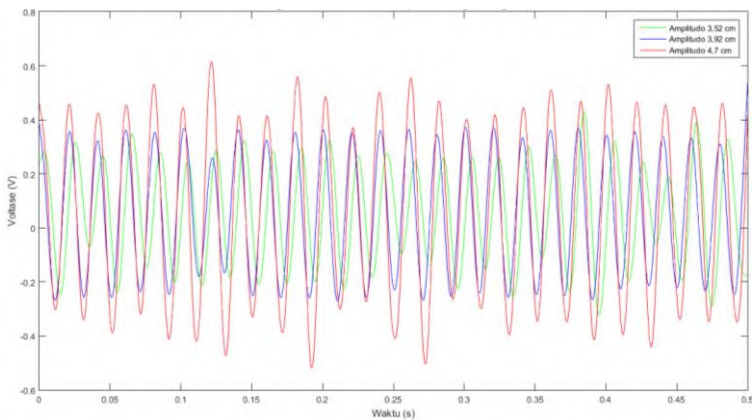


Gambar 4.4. Grafik hasil *smoothing*

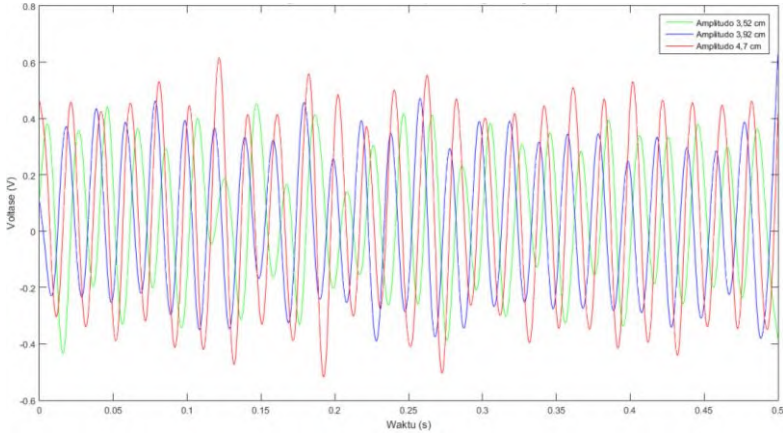
4.2.2. Analisa Data Pengujian Voltase bangkitan material *piezoelectric* dengan variasi amplitudo gelombang



Gambar 4.5 Grafik Perbandingan Voltase Bangkitan terhadap Amplitudo dengan Satu *Piezoelectric*



Gambar 4.6 Grafik Perbandingan Voltase Bangkitan terhadap Amplitudo dengan Dua *Piezoelectric*



Gambar 4.7 Grafik Perbandingan Voltase Bangkitan terhadap Amplitudo dengan Tiga *Piezoelectric*

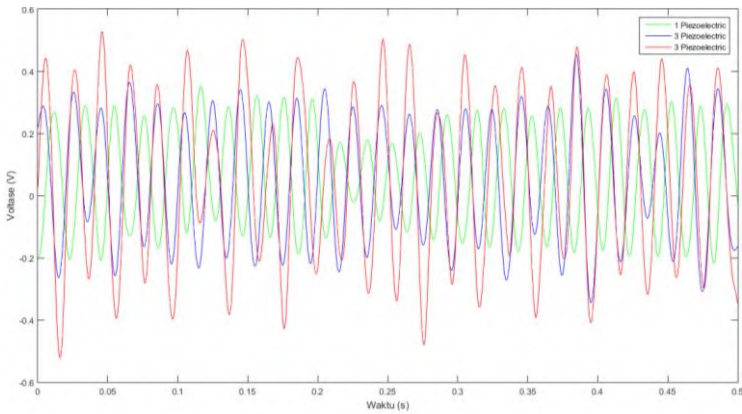
Pada subbab ini dianalisa grafik hasil pengujian mengenai pengaruh variasi amplitudo terhadap voltase bangkitan material *piezoelectric* pada mekanisme *ocean wave energy harvester* tipe pelampung bola dengan metode *cantilever piezoelectric*. Variasi amplitudo yang digunakan adalah 3,52 cm, 3,92 cm, dan 4,7 cm. Gambar 4.5, 4.6, 4.7 adalah grafik voltase bangkitan untuk 1 *piezoelectric*, 2 *piezoelectric*, dan 3 *piezoelectric*, pada variasi amplitudo hasil pengujian. Pada grafik terlihat nilai voltase bangkitan untuk variasi amplitudo 3,52 cm ditandai dengan warna biru, untuk variasi amplitudo 3,92 cm ditandai dengan warna hijau, sedangkan untuk variasi amplitudo 4,7 cm ditandai dengan warna merah dengan kisaran waktu yang digunakan yaitu 0 – 0,5 detik.

Gambar 4.5 merupakan grafik pengujian pada satu buah *piezoelectric* untuk 3 variasi amplitudo. Dari grafik tersebut dapat dianalisa bahwa nilai voltase tertinggi untuk pada amplitudo 3,52 cm adalah 0,289 V, nilai voltase tertinggi untuk amplitudo 3,92 cm adalah 0,369 V, dan nilai voltase tertinggi untuk amplitudo

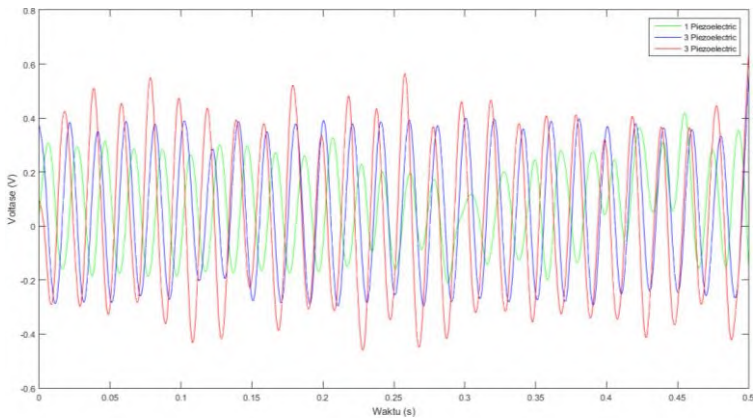
4,7 cm adalah 0,478 V. Gambar 4.6 merupakan grafik pengujian pada dua buah *piezoelectric* untuk 3 variasi amplitudo, dimana nilai voltase tertinggi untuk amplitudo 3,52 cm adalah 0,389 V, nilai voltase tertinggi untuk amplitudo 3,92 cm adalah 0,399 V, dan nilai voltase tertinggi untuk amplitudo 4,7 cm adalah 0,628 V. Gambar 4.7 merupakan grafik pengujian pada tiga buah *piezoelectric* untuk 3 variasi amplitudo dengan nilai voltase tertinggi untuk amplitudo 3,52 cm adalah 0,458 V, nilai voltase tertinggi untuk amplitudo 3,92 cm adalah 0,479 V, dan nilai voltase tertinggi untuk amplitudo 4,7 cm adalah 0,635 V.

4.2.3. Analisa Data Pengujian Voltase bangkitan material *piezoelectric* dengan variasi jumlah *cantilever piezoelectric*

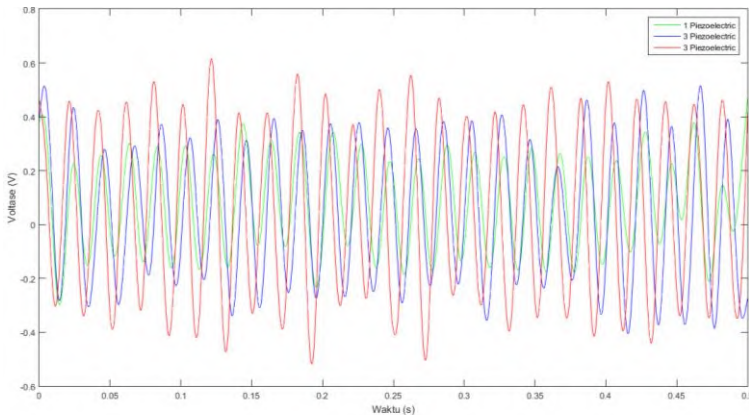
Gambar 4.8, 4.9, 4.10 adalah grafik perbandingan jumlah *piezoelectric* terhadap voltase bangkitan yang digunakan untuk menganalisa pengaruh jumlah *piezoelectric* terhadap voltase bangkitan secara pengujian pada mekanisme *ocean wave energy harvester* tipe pelampung bola dengan metode *cantilever piezoelectric*. Jumlah *piezoelectric* yang digunakan adalah 1 buah, 2 buah, dan 3 buah, dimana *piezoelectric* ini dipasangkan secara seri untuk meningkatkan nilai voltase bangkitan dari *piezoelectric* itu sendiri. Untuk variasi 1 *piezoelectric* ditandai dengan warna hijau, 2 *piezoelectric* ditandai dengan warna biru, dan 3 *piezoelectric* ditandai dengan warna merah dengan kisaran waktu grafik 0 – 0,5 detik.



Gambar 4.8 Grafik Perbandingan Voltase Bangkitan Terhadap Jumlah *Piezoelectric* pada amplitudo 3,52 cm



Gambar 4.9 Grafik Perbandingan Voltase Bangkitan Terhadap Jumlah *Piezoelectric* pada amplitudo 3,92 cm



Gambar 4.10 Grafik Perbandingan Voltase Bangkitan Terhadap Jumlah *Piezoelectric* pada amplitudo 4,7 cm

Gambar 4.8 merupakan grafik pengujian pada amplitudo 3,52 cm untuk 3 variasi jumlah *piezoelectric*. Dari grafik tersebut dapat dianalisa bahwa nilai voltase tertinggi untuk satu buah *piezoelectric* adalah 0,289 V, nilai voltase tertinggi untuk dua buah *piezoelectric* adalah 0,389 V, dan nilai voltase tertinggi untuk tiga buah *piezoelectric* adalah 0,458 V. Gambar 4.9 merupakan grafik pengujian pada amplitudo 3,92 cm untuk 3 variasi jumlah *piezoelectric*, dimana nilai voltase tertinggi untuk satu buah *piezoelectric* adalah 0,369 V, nilai voltase tertinggi untuk dua buah *piezoelectric* adalah 0,399 V, dan nilai voltase tertinggi untuk tiga buah *piezoelectric* adalah 0,479 V. Gambar 4.10 merupakan grafik pengujian pada amplitudo 4,7 cm untuk 3 variasi jumlah *piezoelectric*. Nilai voltase tertinggi untuk satu buah *piezoelectric* adalah 0,477 V, nilai voltase tertinggi untuk dua buah *piezoelectric* adalah 0,628 V, dan nilai voltase tertinggi untuk tiga buah *piezoelectric* adalah 0,635 V.

4.3. Pembahasan Hasil Pengujian

Dari hasil data pengujian mekanisme *ocean wave energy harvester* tipe pelampung bola dengan metode *cantilever*

piezoelectric dengan variasi amplitudo atau frekuensi dan jumlah *piezoelectric*, dilakukan pembahasan voltase, arus, dan daya rata-rata berdasarkan hasil *root mean square* masing-masing variasi seperti tercantum dalam tabel 4.1. berikut ini.

Tabel 4.1. Nilai *root mean square* dari hasil pengujian

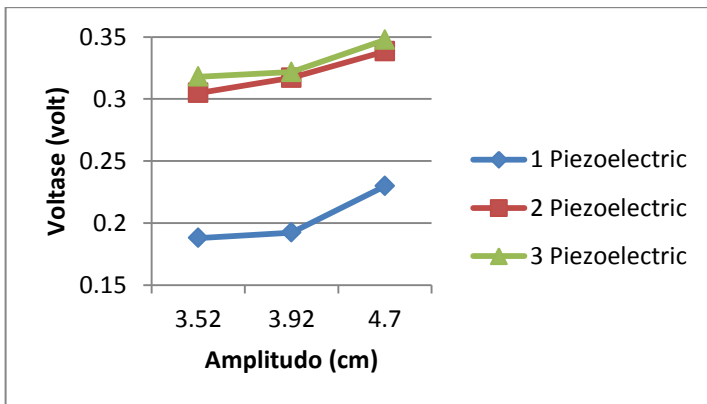
Jumlah Piezo	Amplitudo (cm)	Vrms (Volt)	Irms (Ampere)	Prms (Watt)
1	3.52	0.1879	4×10^{-7}	$7,52 \times 10^{-8}$
	3.92	0.1923	6×10^{-7}	$1,15 \times 10^{-7}$
	4.7	0.2298	1×10^{-6}	$2,3 \times 10^{-7}$
2	3.52	0.3048	4×10^{-7}	$1,22 \times 10^{-7}$
	3.92	0.3171	6×10^{-7}	$1,90 \times 10^{-7}$
	4.7	0.3383	1×10^{-6}	$3,38 \times 10^{-7}$
3	3.52	0.3179	4×10^{-7}	$1,27 \times 10^{-7}$
	3.92	0.3216	6×10^{-7}	$1,93 \times 10^{-7}$
	4.7	0.3476	1×10^{-6}	$3,48 \times 10^{-7}$

4.3.1. Pengaruh variasi Amplitudo Gelombang terhadap Voltase bangkitan material *piezoelectric*

Pengaruh variasi amplitudo terhadap voltase bangkitan hasil pengujian rata-rata ditunjukkan pada gambar 4.11 sesuai dengan tabel 4.3 yang selanjutnya dilakukan pembahasan pengaruh besarnya amplitudo dengan variasi amplitudo 3,52 cm, 3,92 cm, dan 4,7 cm terhadap besarnya voltase yang dihasilkan. Pada gambar 4.11. terlihat bahwa terdapat tiga grafik yaitu grafik berwarna biru, hijau, dan merah. Grafik berwarna biru menunjukkan hubungan voltase terhadap amplitudo yang

didapatkan dari pengujian dengan menggunakan 1 *piezoelectric*. Grafik berwarna hijau menunjukkan hubungan voltase terhadap amplitudo yang didapat dari pengujian dengan menggunakan 2 *piezoelectric*, sedangkan grafik berwarna merah menunjukkan hubungan voltase terhadap amplitudo yang didapat dari pengujian dengan menggunakan 3 *piezoelectric*.

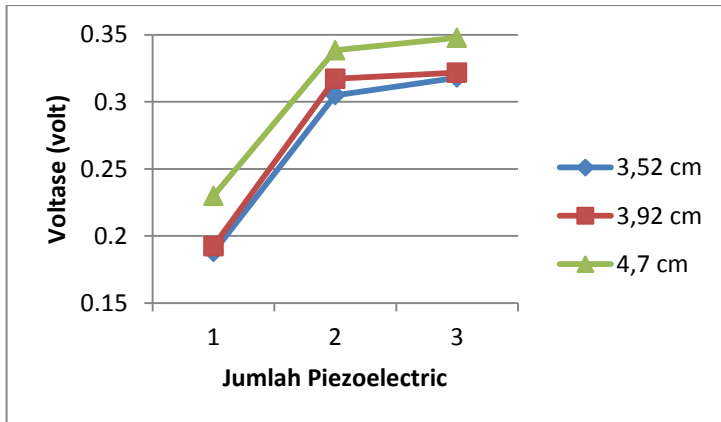
Pada gambar 4.11 *trendline* yang terbentuk pada ketiga grafik di atas sama, yaitu mengalami peningkatan seiring peningkatan amplitudo. Adapun data voltase bangkitan melalui pengujian yang diperoleh pada penggunaan 1 *piezoelectric* untuk amplitudo 3,52 cm adalah 0,1879 V, amplitudo 3,92 cm adalah 0,1923 V, dan amplitudo 4,7 cm adalah 0,223 V. Pada penggunaan 2 buah *piezoelectric* untuk amplitudo 3,52 cm didapatkan voltase bangkitan sebesar 0,3048 V, amplitudo 3,92 cm adalah 0,3171 V, dan amplitudo 4,7 cm adalah 0,3383 V. Pada penggunaan 3 buah *piezoelectric* untuk 3,52 cm adalah 0.318 V, amplitudo 3,92 cm adalah 0,3216 V, dan amplitudo 4,7 cm adalah 0,3792 V.



Gambar 4.11. Grafik Pengaruh Amplitudo terhadap Voltase RMS Pengujian

Grafik hasil pengujian ini memiliki kesesuaian *trendline* dengan teori, bahwa semakin tinggi nilai amplitudo maka semakin tinggi pula voltase bangkitan yang dihasilkan. Hal ini dikarenakan penambahan amplitudo menyebabkan penambahan nilai gaya gelombang laut (F_{wave}). Gaya gelombang laut menjadi masukan untuk mekanisme *ocean wave energy harvester ini*. Semakin meningkatnya gaya gelombang menyebabkan meningkatnya pula kecepatan sudut pada *blade*. Kecepatan sudut *blade* berbanding lurus dengan gaya pukul yang diberikan oleh *blade* kepada *piezoelectric*. Sehingga semakin meningkat defleksi yang terjadi pada *piezoelectric*, dan semakin meningkat pula voltase bangkitan yang dihasilkannya.

4.3.2. Pengaruh Jumlah *Piezoelectric* terhadap Voltase bangkitan material *piezoelectric*.



Gambar 4.12. Grafik Pengaruh Jumlah *Piezoelectric* terhadap Voltase RMS Pengujian

Gambar 4.12. menunjukkan nilai perbandingan voltase bangkitan terhadap jumlah *piezoelectric* dengan variasi amplitudo

berdasarkan data voltase *rms* pada tabel 4.3. Dimana grafik berwarna biru menunjukkan hubungan voltase bangkitan terhadap jumlah *piezoelectric* pada amplitudo 3,52 cm. Grafik berwarna merah menunjukkan hubungan voltase bangkitan terhadap jumlah *piezoelectric* pada amplitudo 3,92 cm. Sedangkan grafik berwarna hijau menunjukkan hubungan voltase bangkitan terhadap jumlah *piezoelectric* pada amplitudo 4,7 cm.

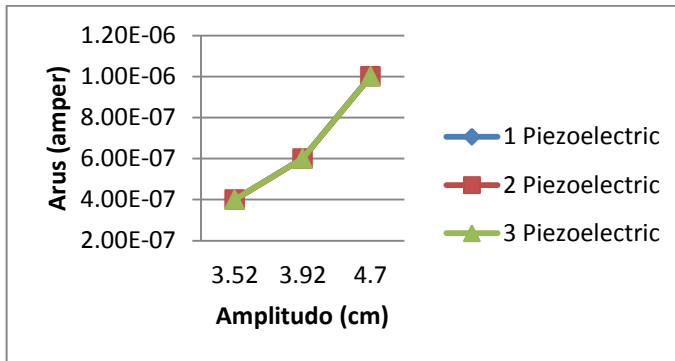
Pada gambar 4.12. dapat dilihat bahwa ketiga grafik mengalami kenaikan *trendline* nilai voltase bangkitan seiring bertambahnya jumlah *piezoelectric*. Adapun data voltase bangkitan melalui pengujian yang diperoleh pada pengujian amplitudo 3,52 cm untuk 1 buah *piezoelectric* adalah 0,1879 V, 2 buah *piezoelectric* adalah 0,3048 V, dan 3 buah *piezoelectric* adalah 0,3179 V. Pada pengujian amplitudo 3,92 cm untuk 1 buah *piezoelectric* didapatkan voltase bangkitan sebesar 0,1923 V, 2 buah *piezoelectric* adalah 0,3171 V, dan 3 buah *piezoelectric* 0,3216 V. Pada pengujian amplitudo 4,7 cm untuk 1 buah *piezoelectric* adalah 0,2298 V, 2 buah *piezoelectric* adalah 0,3383 V, dan 3 buah *piezoelectric* adalah 0,3476 V.

Kenaikan *trendline* grafik perbandingan voltase *rms* dengan jumlah *piezoelectric* sesuai dengan teori yang ada, di mana kenaikan ini disebabkan karena *piezoelectric* berperan sebagai beban atau hambatan yang dialiri oleh arus listrik secara seri, sehingga akibat rangkaian seri tersebut nilai voltasenya meningkat seiring bertambahnya jumlah material *piezoelectric*.

4.3.3. Pengaruh variasi Amplitudo Gelombang terhadap Arus bangkitan material *piezoelectric*

Setelah pembahasan data voltase, selanjutnya dilakukan pembahasan nilai arus bangkitan rata-rata yang dihasilkan oleh mekanisme. Pertama adalah pembahasan mengenai pengaruh variasi amplitudo gelombang terhadap arus bangkitan material *piezoelectric*. Dari hasil data arus pada tabel 4.3, dibuat grafik hasil pengujian mengenai pengaruh variasi amplitudo terhadap arus bangkitan material *piezoelectric*. Grafik ini digunakan untuk

membahas pengaruh amplitudo terhadap arus bangkitan hasil pengujian pada mekanisme. Gambar 4.13. adalah grafik pengaruh amplitudo terhadap arus bangkitan dari masing-masing variasi jumlah *piezoelectric* hasil pengujian.



Gambar 4.13. Grafik Perbandingan Arus RMS Pengujian terhadap Amplitudo

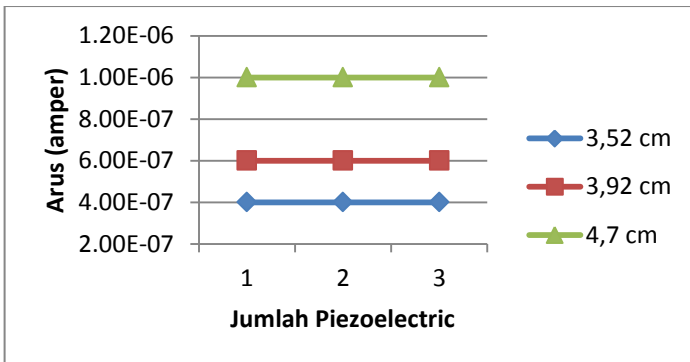
Dari gambar 4.13. terlihat bahwa terdapat tiga grafik yaitu grafik berwarna biru, hijau, dan merah. Grafik berwarna biru menunjukkan hubungan arus terhadap amplitudo yang didapatkan dari pengujian dengan menggunakan 1 *piezoelectric*. Grafik berwarna hijau menunjukkan hubungan arus terhadap amplitudo yang didapat dari pengujian dengan menggunakan 2 *piezoelectric*, sedangkan grafik berwarna merah menunjukkan hubungan arus terhadap amplitudo yang didapat dari pengujian dengan menggunakan 3 *piezoelectric*.

Pada gambar 4.13 *trendline* yang terbentuk pada ketiga grafik di atas sama, yaitu mengalami peningkatan dari amplitudo 3,52 cm dengan frekuensi 1 Hz menuju amplitudo 4,7 cm dengan frekuensi 1,4 Hz. Adapun data arus bangkitan melalui pengujian yang diperoleh pada penggunaan 1 *piezoelectric* untuk amplitudo 3,52 cm adalah 4×10^{-7} A, sedangkan untuk amplitudo 3,92 cm adalah 6×10^{-7} A, dan untuk amplitudo 4,7 cm adalah 1×10^{-6} A.

Pada penggunaan 2 buah *piezoelectric* untuk amplitudo 3,52 cm didapatkan nilai arus bangkitannya adalah sebesar 4×10^{-7} A, sedangkan untuk amplitudo 3,92 cm adalah 6×10^{-7} A, dan untuk amplitudo 4,7 cm adalah 1×10^{-6} A. Pada penggunaan 3 *piezoelectric* untuk amplitudo 3,52 cm adalah 4×10^{-7} A, sedangkan untuk amplitudo 3,92 cm adalah 6×10^{-7} A, dan untuk amplitudo 4,7 cm adalah 1×10^{-6} A

Grafik pengaruh amplitudo terhadap arus pada variasi jumlah *piezoelectric* ini sudah sesuai dengan teori, di mana secara teoritis semakin tinggi nilai amplitudo maka semakin tinggi pula arus bangkitan yang dihasilkan. Kenaikan arus ini disebabkan karena pertambahan amplitudo juga meningkatkan frekuensi putaran dari *blade* yang memukul *piezoelectric*. Semakin meningkatnya frekuensi putaran dari *blade* semakin meningkat pula pukulan *blade* kepada *piezoelectric*, sehingga semakin tinggi pula nilai arus yang dihasilkan oleh mekanisme.

4.3.4. Pengaruh Jumlah *Piezoelectric* terhadap Arus bangkitan material *piezoelectric*.



Gambar 4.14. Grafik Perbandingan Arus RMS Pengujian terhadap Jumlah *Piezoelectric*

Gambar 4.14. merupakan grafik hasil pengujian mengenai pengaruh jumlah *piezoelectric* terhadap arus bangkitan material *piezoelectric*. Grafik ini digunakan untuk mengetahui pengaruh pengaruh jumlah *piezoelectric* terhadap arus bangkitan. Pada gambar 4.14. terdapat tiga grafik yaitu grafik berwarna biru, hijau, dan merah. Grafik berwarna biru menunjukkan hubungan arus terhadap jumlah *piezoelectric* yang didapatkan dari pengujian dengan menggunakan amplitudo 3,52 cm. Grafik berwarna hijau menunjukkan hubungan arus terhadap jumlah *piezoelectric* yang didapat dari pengujian dengan menggunakan amplitudo 3,92 cm, sedangkan grafik berwarna merah menunjukkan hubungan arus terhadap jumlah *piezoelectric* yang didapat dari pengujian dengan menggunakan amplitudo 4,7 cm.

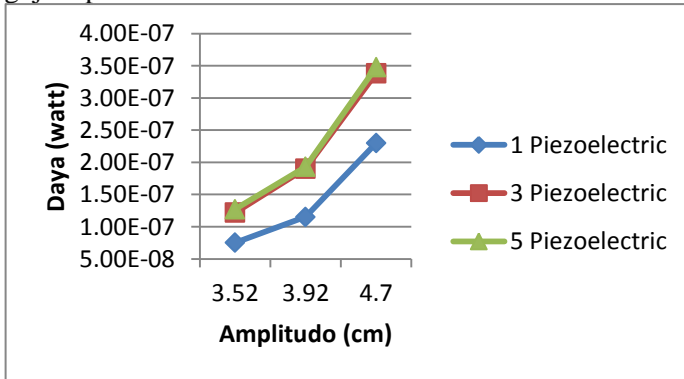
Trendline yang terbentuk pada ketiga grafik di gambar 4.14 memiliki kesamaan, yaitu memiliki nilai yang konstan seiring dengan peningkatan jumlah *piezoelectric*. Adapun data arus bangkitan melalui pengujian yang diperoleh pada penggunaan amplitudo 3,52 cm untuk masing-masing jumlah *piezoelectric* adalah 4×10^{-7} A, sedangkan untuk amplitudo 3,92 cm adalah 6×10^{-7} A, dan untuk amplitudo 4,7 cm adalah 1×10^{-6} A.

Grafik pengaruh jumlah *piezoelectric* terhadap arus pada variasi amplitudo ini sesuai dengan teori, di mana secara teoritis semakin banyak jumlah *piezoelectric* tidak mempengaruhi nilai arus yang dihasilkan. Hal ini disebabkan karena *piezoelectric* dirangkai secara seri, dimana pada kasus ini material *piezoelectric* yang dianggap sebagai sebuah beban yang dilalui oleh arus listrik, maka nilai dari arus listrik yang melewati beban tersebut cenderung konstan.

4.3.5. Pengaruh variasi Amplitudo Gelombang terhadap Daya bangkitan material *piezoelectric*

Setelah diperoleh data voltase dan arus bangkitan rata-rata hasil pengujian, selanjutnya dilakukan perhitungan untuk mendapatkan nilai daya bangkitan yang dihasilkan oleh

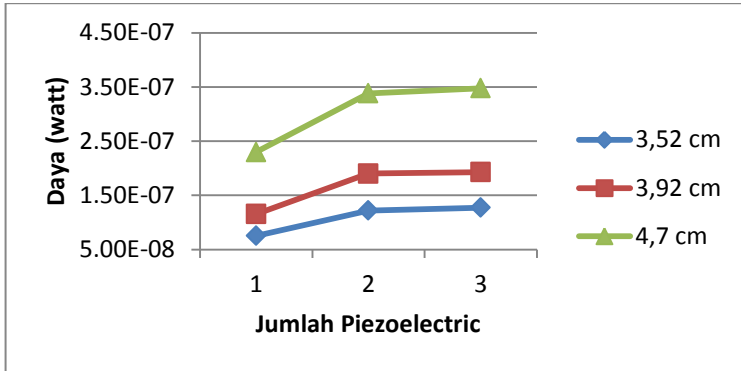
mekanisme. Pertama, dilakukan pembahasan grafik amplitudo gelombang terhadap nilai daya bangkitan yang digunakan untuk mengetahui pengaruh amplitudo terhadap daya bangkitan hasil pengujian pada mekanisme.



Gambar 4.15. Grafik Perbandingan Daya RMS Pengujian terhadap Amplitudo

Gambar 4.15. merupakan grafik pengaruh amplitudo gelombang terhadap nilai daya bangkitan rata-rata dari mekanisme. Grafik berwarna biru menunjukkan hubungan daya terhadap amplitudo yang didapatkan dari pengujian dengan menggunakan 1 *piezoelectric*. Grafik berwarna hijau menunjukkan hubungan daya terhadap amplitudo yang didapat dari pengujian dengan menggunakan 2 *piezoelectric*, sedangkan grafik berwarna merah menunjukkan hubungan daya terhadap amplitudo yang didapat dari pengujian dengan menggunakan 3 *piezoelectric*. *Trendline* yang terbentuk pada ketiga grafik di atas sama, yaitu mengalami peningkatan dari amplitudo 3,52 cm dengan frekuensi 1 Hz menuju amplitudo 4,7 cm dengan frekuensi 1,4 Hz. Adapun data daya terbesar berada pada amplitudo 4,7 cm, dengan jumlah *piezoelectric* 3 buah yaitu 3.476×10^{-7} Watt.

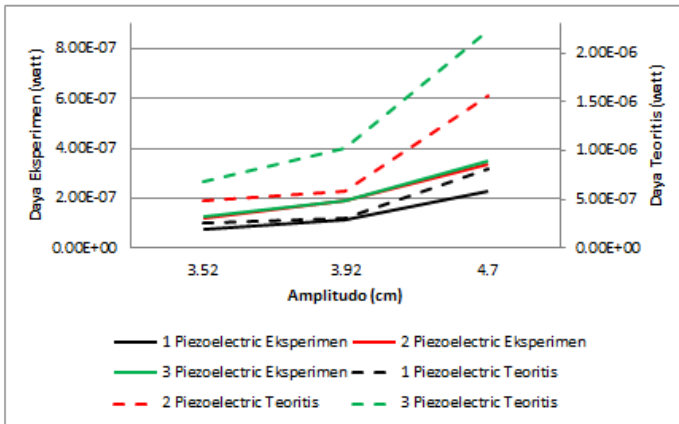
4.3.6. Pengaruh Jumlah *Piezoelectric* terhadap Daya bangkitan material *piezoelectric*.



Gambar 4.16. Grafik Perbandingan Daya RMS Pengujian terhadap Jumlah *Piezoelectric*

Gambar 4.16 adalah grafik pengaruh jumlah *piezoelectric* terhadap daya bangkitan dari masing-masing variasi amplitudo hasil pengujian. Pada gambar 4.16. terdapat tiga grafik yaitu grafik berwarna biru, hijau, dan merah. Grafik berwarna biru menunjukkan hubungan daya terhadap jumlah piezoelectric yang didapatkan dari pengujian dengan menggunakan amplitudo 3,52 cm. Grafik berwarna hijau menunjukkan hubungan daya terhadap jumlah *piezoelectric* yang didapat dari pengujian dengan menggunakan amplitudo 3,92 cm, sedangkan grafik berwarna merah menunjukkan hubungan daya terhadap jumlah *piezoelectric* yang didapat dari pengujian dengan menggunakan amplitudo 4,7 cm. *Trendline* yang terbentuk pada ketiga grafik di gambar 4.17 sama, yaitu meningkat seiring dengan peningkatan jumlah *piezoelectric*. Berdasarkan grafik, nilai daya tertinggi terjadi pada jumlah *piezoelectric* 3 dan amplitudo 4,7 cm yaitu 3.476×10^{-7} Watt

4.3.7. Perbandingan Pengaruh Amplitudo terhadap Daya bangkitan Hasil Pengujian dengan Teoritis



Gambar 4.17. Grafik Perbandingan Pengaruh Amplitudo terhadap Daya secara Teoritis dan Pengujian

Dalam proses validasi data, dilakukan perbandingan grafik antara daya bangkitan hasil pengujian dengan daya bangkitan teoritis hasil simulasi. Pertama dilakukan pembahasan grafik perbandingan pengaruh amplitudo terhadap daya bangkitan hasil pengujian dengan teoritis yang ditunjukkan pada gambar 4.17. Pada gambar 4.17 terdapat enam grafik yang menunjukkan hubungan daya dengan amplitudo pada masing-masing variasi jumlah piezoelectric. Grafik berwarna coklat menunjukkan hubungan daya terhadap amplitudo yang didapatkan dari pengujian dengan menggunakan 1 *piezoelectric*. Grafik berwarna hitam menunjukkan hubungan daya terhadap amplitudo yang didapat dari pengujian dengan menggunakan 2 *piezoelectric*, sedangkan grafik berwarna biru menunjukkan hubungan daya terhadap amplitudo yang didapat dari pengujian dengan menggunakan 3 *piezoelectric*. Grafik berwarna garis hitam putus-putus menunjukkan hubungan daya terhadap amplitudo yang

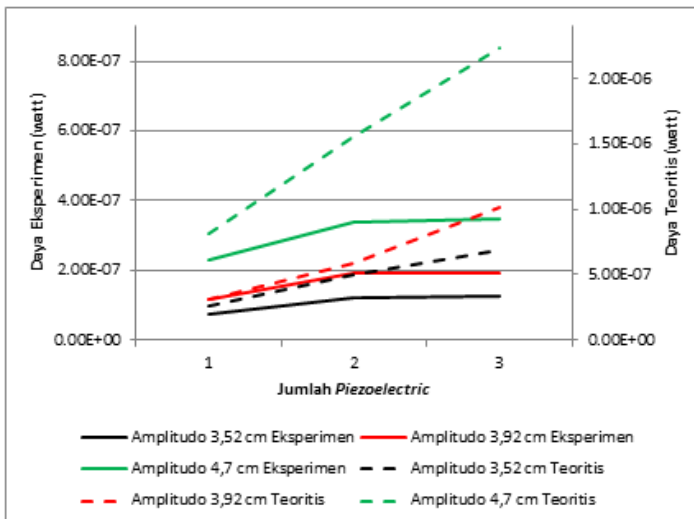
didapat secara teoritis dengan menggunakan 1 *piezoelectric*. Grafik berwarna garis merah putus-putus menunjukkan hubungan daya terhadap amplitudo yang didapat secara teoritis dengan menggunakan 2 *piezoelectric*, sedangkan grafik berwarna garis coklat putus-putus menunjukkan hubungan daya terhadap amplitudo yang didapat secara teoritis dengan menggunakan 3 *piezoelectric*

Berdasarkan data pengujian pada tabel 4.3, grafik perbandingan daya terhadap amplitudo pada variasi jumlah *piezoelectric* yang ditunjukkan pada gambar 4.17 ini sudah sesuai dengan teori atau hasil simulasi, di mana secara teoritis semakin tinggi nilai amplitudo maka semakin tinggi pula nilai daya bangkitan yang dihasilkan. Hal ini disebabkan karena pertambahan amplitudo akan meningkatkan nilai voltase bangkitan akibat naiknya gaya gelombang laut (F_{wave}) dan meningkatkan nilai arus bangkitan akibat bertambahnya kecepatan putaran blade. Nilai daya yang dihasilkan oleh mekanisme akan berbanding lurus dengan bertambahnya nilai voltase dan arus listriknya, sehingga dengan bertambahnya nilai voltase dan arus bangkitan, maka nilai daya juga akan semakin tinggi. Namun, nilai daya hasil eksperimen cenderung lebih rendah dibandingkan dengan teoritis. Hal ini terjadi akibat gesekan yang terjadi antar gear, gesekan antara poros dengan bearing, dan inersia poros yang pada perhitungan teoritis diabaikan sedangkan memiliki efek cukup signifikan pada saat eksperimen, khususnya pada inersia poros.

4.3.8. Perbandingan Pengaruh Jumlah *Piezoelectric* terhadap Daya bangkitan Hasil Pengujian dengan Teoritis

Untuk pembahasan grafik perbandingan pengaruh jumlah *piezoelectric* terhadap daya bangkitan hasil pengujian dengan teoritis yang ditunjukkan pada gambar 4.18. Pada gambar 4.18 terdapat enam grafik yang menunjukkan hubungan daya dengan amplitudo pada masing-masing variasi jumlah *piezoelectric*. Grafik berwarna biru menunjukkan hubungan daya terhadap

jumlah piezoelectric yang didapatkan dari pengujian dengan menggunakan amplitudo 3,52 cm. Grafik berwarna hijau menunjukkan hubungan daya terhadap jumlah *piezoelectric* yang didapat dari pengujian dengan menggunakan amplitudo 3,92 cm, sedangkan grafik berwarna hitam menunjukkan hubungan daya terhadap jumlah *piezoelectric* yang didapat dari pengujian dengan menggunakan amplitudo 4,7 cm. Grafik berwarna garis hitam putus-putus menunjukkan hubungan daya terhadap jumlah piezoelectric yang didapatkan secara teoritis dengan menggunakan amplitudo 3,52 cm. Grafik berwarna garis merah putus-putus menunjukkan hubungan daya terhadap jumlah *piezoelectric* yang didapat secara teoritis dengan menggunakan amplitudo 3,92 cm, sedangkan grafik berwarna garis hijau putus-putus menunjukkan hubungan daya terhadap jumlah *piezoelectric* yang didapat secara teoritis dengan menggunakan amplitudo 4,7 cm.



Gambar 4.18. Grafik Perbandingan Pengaruh Jumlah *Piezoelectric* terhadap Daya secara Teoritis dan Pengujian

Dari data tersebut, grafik perbandingan jumlah *piezoelectric* terhadap daya bangkitan pada tiap-tiap variasi amplitudo ini sesuai dengan teori atau hasil simulasi, di mana secara teoritis semakin banyak jumlah *piezoelectric* semakin tinggi nilai daya yang dihasilkan. Dimana peningkatan yang terjadi berbanding lurus dengan peningkatan voltase bangkitannya. Hal ini dikarenakan rangkaian elektrik pada material *piezoelektrik* adalah seri, yang mana nilai dari voltase akan semakin tinggi seiring dengan peningkatan jumlah *piezoelectric* dengan nilai arus yang tetap. Sedangkan pada grafik terlihat besarnya peningkatan daya pengujian yang tidak sesuai dengan daya teoritis yakni dari jumlah *piezoelectric* 2 buah menuju ke 3 buah. Hal ini dikarenakan pada jumlah *piezoelectric* 3 buah, kemampuan dari mekanisme untuk memukul *piezoelectric* menurun akibat ketahanan material yang meningkat. Hal ini menyebabkan nilai voltase bangkitan yang dihasilkan tidak meningkat secara signifikan, sehingga menyebabkan nilai daya yang dihasilkan juga tidak mengalami peningkatan yang signifikan.

4.3.9. Perbandingan Daya yang Dihasilkan oleh Mekanisme pada Skala Laboratorium dengan Skala Riil

Dalam perencanaan pembuatan mekanisme secara massal diperlukan sebuah estimasi atau perkiraan besarnya daya yang dihasilkan oleh mekanisme *ocean wave energy harvester* apabila diterapkan pada gelombang laut riil. Pada perbandingan daya kali ini, digunakan kondisi eksisting gelombang laut pada Pulau Poteran yang mana digunakan sebagai referensi awal pembuatan mekanisme ini. Perbandingan daya ini dilakukan secara teoritis, tidak mengacu pada hasil perhitungan secara teoritis, dikarenakan tidak diketahuinya nilai daya yang dihasilkan pada kondisi riil.

1. Mekanisme pada skala Laboratorium

Analisa menggunakan 3 piezo dengan rincian gaya wave yang diterima oleh mekanisme mengacu pada persamaan 2.21. dengan nilai amplitudo 4,7 cm dan frekuensi 1,4 Hz. Dari

persamaan tersebut didapatkan nilai *root mean square* dari defleksi piezoelectric yaitu sebesar 6 mm. Berdasarkan hasil defleksi tersebut didapatkan nilai sebagai berikut:

$$\text{rms Voltase} = 2,1616 \text{ V}$$

$$\text{rms Arus} = 1,23 \times 10^{-6}$$

$$\text{rms Daya} = 2,1141 \times 10^{-6}$$

2. Mekanisme pada skala riil

Analisa dilakukan menggunakan 1 piezo dengan rincian gaya wave yang diterima oleh mekanisme mengacu pada persamaan 2.21. dengan nilai amplitudo 3,713 m dan frekuensi 0,0176 Hz. Dari persamaan tersebut didapatkan nilai *root mean square* dari defleksi piezoelectric yaitu sebesar 72 cm. Berdasarkan hasil defleksi tersebut maka jumlah *piezoelectric* optimum yang dapat digunakan yakni berjumlah 120 buah, sehingga didapatkan hasil sebagai berikut:

$$\text{rms Voltase} = 9226,3 \text{ V}$$

$$\text{rms Arus} = 0,0162$$

$$\text{rms Daya} = 121,28 \text{ watt}$$

Berdasarkan hasil perhitungan tersebut didapatkan perbandingan besarnya daya yang dihasilkan pada skala laboratorium terhadap skala riil yaitu $2,141 \times 10^{-6} : 121,28 = 1 : 56.10^6$

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Setelah melakukan analisis dan pembahasan pada energi listrik yang dibangkitkan oleh mekanisme *ocean wave energy harvester* tipe pelampung bola dengan menggunakan metode *cantilever piezoelectric*, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Telah dihasilkan prototipe mekanisme *ocean wave energy harvester* dengan diameter pelampung bola 20 cm, rasio roda gigi saat gelombang naik 1 : 15, rasio roda gigi saat gelombang turun 1 : 12,8, dan blade berjumlah 3 buah.
2. Variasi amplitudo dan frekuensi gelombang berpengaruh terhadap besarnya energi listrik yang dihasilkan. Pengaruh amplitudo terhadap voltase yakni, semakin tinggi amplitudo gelombang, semakin tinggi pula nilai voltase bangkitannya. Sedangkan semakin tinggi amplitudo yang diiringi dengan semakin tingginya frekuensi gelombang, nilai arus yang dibangkitkan juga semakin tinggi, dimana arus optimum terjadi pada amplitudo 4,7 cm dengan frekuensi 1,4 Hz.
3. Pada variasi amplitudo gelombang, semakin tinggi arus dan voltase bangkitan menyebabkan meningkatnya daya yang dibangkitkan. Dimana daya listrik terbesar pada jumlah material *piezoelectric* 1, 2, dan 3 berturut-turut adalah $2,298 \times 10^{-7}$ watt, $3,383 \times 10^{-7}$ watt, dan $3,476 \times 10^{-7}$ watt yang terjadi pada amplitudo 4,7 cm dengan frekuensi 1,4 Hz.
4. Variasi jumlah material *piezoelectric* yang rangkaian elektriknya dirangkai secara seri berpengaruh terhadap energi listrik bangkitan. Semakin meningkatnya jumlah material *piezoelectric*, maka nilai voltase akan semakin besar, sedangkan nilai arus listriknya tetap.
5. Pada variasi jumlah material *piezoelectric*, semakin tinggi nilai voltase bangkitan mengakibatkan nilai daya listrik

menjadi semakin besar . Daya listrik terbesar dari amplitudo gelombang 3,52 cm dengan frekuensi 1 Hz, amplitudo 3.92 cm dengan frekuensi 1.2 Hz, dan amplitudo 4.7 cm dengan frekuensi 1.4 Hz berurut-urut adalah $1,27 \times 10^{-7}$ watt, $1,93 \times 10^{-7}$ watt, dan $3,476 \times 10^{-7}$ watt.

6. Daya listrik terbesar yang dibangkitkan oleh mekanisme *ocean wave energy harvester* tipe pelampung bola dengan menggunakan metode *cantilever piezoelectric* adalah $3,476 \times 10^{-7}$ watt. Nilai ini terjadi ketika material *piezoelectric* berjumlah 3 pada frekuensi gelombang 1,4 Hz dengan amplitudo 4,7 cm.

5.2. Saran

Setelah mengerjakan tugas akhir ini penulis menyampaikan beberapa saran yakni:

1. Mekanisme penangkap energi gelombang pada penelitian selanjutnya sebaiknya menggunakan pelampung berlengan sehingga seluruh gaya gelombang dapat dimanfaatkan dengan maksimal
2. Pada penelitian selanjutnya diharapkan menggunakan material *cantilever piezoelectric* dengan nilai kapasitansi yang lebih besar agar energi listrik yang dihasilkan lebih tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Mineto, A. (2010). Modeling of a Cantilever Beam for Piezoelectric Energy Harvesting. *9th Brazilian Conference on Dynamics, Control and their Applications*.
- [2] Romano, G. F. (2015). *Studi Karakteristik Voltase Bangkitan yang Dihasilkan oleh Mekanisme Vibration Energy Harvesting Menggunakan Metode Cantilever Piezoelectric dengan Variasi Jumlah Blade dan Frekuensi Sumber Getar*. Tugas Akhir pada Jurusan Teknik Mesin: ITS Press.
- [3] Xie, X., Wang, Q., & Wu, N. (2014). *Potential of a Piezoelectric Energy Harvester from Sea Waves*. *Journal of Sound and Vibration*.
- [4] 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*. Tugas Akhir pada Jurusan Teknik Mesin: ITS Press.
- [5] S. Rao, S. (2004). *Mechanical Vibration*. Singapore: Prentice Hall PTR.
- [6] Ott, J. (2013). *Design of a Piezoelectric Energy Harvesting for Shallow Ocean Waves*. Faculty of Rensselaer Polytechnic Institute Thesis: Renss.
- [7] Noven, K. A. (2011). *Studi Karakteristik Energi yang Dihasilkan Mekanisme Vibration Energy Harvesting dengan Metode Piezoelectric untuk Pembebanan Frontal dan Lateral*. Tugas Akhir pada Jurusan Teknik Mesin: ITS Press.
- [8] Manoli, T. a. (2015). *CMOS Circuits for Piezoelectric Energy Harvesters*. Springer Science+Business Media Dordrecht.
- [9] Deutschman, A. D., Michels, W., & dan Wilson, C. E. (1975). *Machine Design*. New York: Macmillan Publishing Co. Inc.

- [10] Nadzir, Z. A. (2015). *Estimasi Tinggi Gelombang Laut Menggunakan Citra Satelit ALOS-PALSAR Studi Kasus: Perairan Pulau Poteran, Sumenep*. Tugas Akhir pada Jurusan Teknik Geomatika: ITS Press.

BIODATA PENULIS



Almaarif Fahrey Nuh adalah anak pertama dari dua bersaudara, lahir di Surabaya 02 Maret 1995, putra dari pasangan Bapak Muhammad Mudhiq dan Ibu Febriana Rejeki Phirtaminingsih. Penulis besar di Sidoarjo dengan berlatar belakang pendidikan di SDN Pucang IV Sidoarjo (2000-2006), SMP Negeri 1 Sidoarjo (2006-2009), SMAN 1 Sidoarjo (2009-2012) dan menempuh pendidikan Sarjana Teknik Mesin di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Penulis semasa kuliah aktif berorganisasi di Himpunan Mahasiswa Mesin Departemen KESMA (Kesejahteraan Mahasiswa) mulai dari staf pada periode 2013-2014 kemudian menjabat sebagai Kepala Departemen Kesejahteraan Mahasiswa pada periode 2014-2015. Penulis juga aktif dalam Himpunan Mahasiswa Islam sebagai Sekretaris Umum HMI Cabang Surabaya Komisariat Mesin SN pada periode 2014-2015 dan Wakil Sekretaris Umum Bidang Penelitian dan Pengembangan HMI Cabang Surabaya periode 2016-2017.

Berpegang pada moto hidup “Yakin Usaha Sampai” menjadikan penulis pribadi yang pekerja keras dan pantang menyerah. Penulis sangat terbuka apabila terdapat saran, kritik, serta masukan terkait penelitian ini dapat dikirimkan ke alamat e-mail almaarif.yakusa12@gmail.com