TUGAS AKHIR - TM 141585

PEMODELAN DAN ANALISA ENERGI LISTRIK YANG DIHASILKAN MEKANISME PEMBANGKIT LISTRIK GELOMBANG LAUT TIPE KAYUH DAYUNG- *PIEZOELECTRIC*

MUH. IRVAN YUSUP
NRP. 2113 106 050

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

JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016

FINAL PROJECT – TM 141585

MODELING AND ANALYSIS OF ELECTRICAL ENERGY GENERATED BY SWING PADDLE-PIEZOELECTRIC OCEAN WAVE POWER PLANT MECHANISM

MUH. IRVAN YUSUP
NRP. 2113 106 050

Advisor
Dr.Wiwiek Hendrowati, ST., MT.

MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2016

PEMODELAN DAN ANALISA ENERGI LISTRIK YANG DIHASILKAN MEKANISME PEMBANGKIT LISTRIK GELOMBANG LAUT TIPE KAYUH DAYUNG *PIEZOELECTRIC*

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Desain
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :
Muh. Irvan Yusup
NRP. 2113 106 050

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Wiwiek Hendrowati, ST., MT. (NIP. 197004121997032003) .... (Pembimbing)
2. Dr.Eng. Harus Laksana Guntur, ST., M.Eng. (NIP. 197505111999031001) .... (Penguji I)
3. Moch. Solichin, ST., MT. (NIP. 198908172015041003) .... (Penguji II)
4. Aida Annisa Amin Daman, ST., MT. (NIP. 198907052015042005) .... (Penguji III)

SURABAYA
Januari, 2016

PEMODELAN DAN ANALISA ENERGI LISTRIK YANG DIHASILKAN MEKANISME PEMBANGKIT LISTRIK GELOMBANG LAUT TIPE KAYUH DAYUNG-*PIEZOELECTRIC*

Nama Mahasiswa : Muh. Irvan Yusup
NRP : 2113 106 050
Jurusan : Teknik Mesin, FTI – ITS
Dosen pembimbing : Dr. Wiwiek Hendrowati, ST., MT.

Abstrak

Krisis energi bukan lagi hal yang baru di Indonesia, Sehingga banyak pemikiran tentang pengembangan energi alternatif. Beberapa pengembangan telah dilakukan, seperti teknologi *micro hydro, bio mass,* energi matahari, dan energi laut. Dari beberapa energi alternatif yang ada, energi laut merupakan potensi yang perlu dikembangkan mengingat Indonesia adalah negara kepulauan dengan garis pantai terbesar kedua setelah kanada. Dengan demikian perlu dilakukan penelitian tentang energi laut.

Pada penelitian ini dilakukan proses *modeling* dan simulasi pada pembangkit listrik tenaga gelombang laut tipe kayuh dayung-*piezoelectric.* Prinsip kerja dari mekanisme pembangkit listrik tenaga gelombang laut ini adalah dengan memanfaatkan energi kinetik dari gelombang laut. Pada saat gelombang laut menyentuh permukaan dayung, maka dayung akan bergerak dan batang dayung akan mengungkit penggerak, sehingga poros pendorong akan bergerak secara horizontal dan kemudian menyentuh *piezoelectric*. Gaya dorong yang diberikan poros pada *piezoelectric* akan membuat *piezoelectric* terdefleksi, defleksi dari *piezoelectric* tersebut akan menghasilkan energi listrik berupa voltase, arus listrik dan daya listrik. Dengan memvariasikan frekuensi gelombang laut (0.8 Hz, 1 Hz, 1.2 Hz), tinggi gelombang laut (0.04 m, 0.05 m, 0.06 m),, dan jumlah *piezoelectric* (10, 20,

30) maka karakter energi yang dihasilkan *piezoelectric* dapat dipelajari.

Setelah melaksanakan pemodelan dan simulasi tentang PTLGL sistem kayuh dayung- *piezoelectric*, didapatkan hasil respon voltase maksimum sebesar 6.42 V didapatkan pada frekuensi 1.2 Hz, 6 cm tinggi gelombang dan 30 *piezoelectric*, untuk voltase minimum sebesar 1.24 V didapat pada frekuensi 0.8 Hz, 4 cm tinggi gelombang, dan 10 *piezoelectric*. Untuk arus listrik maksimum sebesar 20 mA didapatkan pada frekuensi 1.2 Hz, tinggi gelombang 6 cm, dan 10 *piezoelectric*, sedangkan hasil minimum sebesar 0.9 mA didapatkan pada frekuensi 0.8 Hz, 4 cm tinggi gelombang, dan 30 *piezoelectric*. Daya listrik maksimum sebesar 42 mW didapatkan pada frekuensi 1.2 Hz, tinggi gelombang 6 cm dan 10 *piezoelectric*, sedangkan daya minimum sebesar 1.4 mW didapatkan pada frekuensi 0.8 Hz, 4 cm tinggi gelombang dan 30 jumlah *piezoelectric*.

Kata Kunci : Energi Alternatif, Mekanisme kayuh dayung, *Piezoelectric, Renewable Energy*

MODELING AND ANALYSIS OF ELECTRICAL ENERGY GENERATED BY SWING PADDLE-PIEZOELECTRIC OCEAN WAVE POWER PLANT MECHANISM

Student Name : Muh. Irvan Yusup
Student No. : 2113 106 050
Department : Mechanical Engineering, FTI – ITS
Advisor : Dr. Wiwiek Hendrowati, ST., MT.

Abstract

Energy crisis is not a latest issue in Indonesia, therefore a lot of idea about alternative energy had been developed. A few of developed alternative energy such as micro hydro technology, bio mass, solar energy, and ocean wave energy. Of which there are several developed alternative energy, ocean wave energy is the most potential energy source to be seriously developed considering that coastline of Indonesia is the second largest after Canada. Thus, it is necessary to be researched.

Modeling and Simulation are executed in this research of swing paddle-piezoelectric ocean wave power plant. The mechanism of swing paddle-piezoelectric ocean wave power plant utilize the ocean wave kinetic energy. When the wave graze the paddle surface, the paddle moves so that the paddle rod swings. After the paddle rod swings, then the mass mechanism moves. Since the mass mechanism moves horizontally, the contact surface between mass mechanism and piezoelectric occur, which the applied axial force deflects piezoelectric within. Hence while the piezoelectric is deflected, the electrical element of the piezoelectric generates electrical energy in the form of voltage, current and electric power. By varying the frequency of the ocean waves (0.8 Hz , 1 Hz , 1.2 Hz) ,the high of ocean waves (0:04 am , 0:05 am , 0:06 am) , and the number of piezoelectric (10, 20 , 30), the energy characteristic generated by the piezoelectric can be learned .

After the modeling and simulation of swing paddle-piezoelectric ocean wave power plant are executed. The response of maximum voltage reached is 6.42 V, when 1.2 Hz of wave frequency, 6 cm of wave height and 30 of piezoelectric. The minimum voltage achieved is 1.24 V, when 0.8 Hz of wave frequency, 4 cm of wave height and 10 of piezoelectric. The maximum current reached is 20 mA, when 1.2 Hz of wave frequency,

6 cm of wave height, and 10 of piezoelectric. The minimum result of current is 0.9 mA, attained when 0.8 Hz of wave frequency, 4 cm of wave height, and 30 of piezoelectric. The maximum electrical power reached is 42 mW, when 1.2 Hz of wave frequency, 6 cm of wave height, 10 of piezoelectric. In other hand the minimum electrical power attained is 1.4 mW, when 0.8 Hz of wave frequency, 4 cm of wave height, 30 of piezoelectric.

Keyword : *Alternative energy, Piezoelectric, Renewable energy, Swing paddle mechanism*

KATA PENGANTAR

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

1. Ayah tercinta Daman Jubaedy, Ibu tercinta Empun Purnaesih, dan Adik-adik terkasih Ismi Rachmawati, Irma Damayanti. Keponakan paling ganteng Hauzan, Terima kasih atas segala cinta dan kasih sayang kalian.
2. Ibu Dr. Wiwiek Hendrowati, ST., MT. selaku dosen pembimbing. Terima kasih banyak atas saran, kesempatan diskusi, dan ilmu-ilmu baru yang sangat *progressive*, dan kesabaran dalam membimbing.
3. Bapak Dr. Eng Harus Laksana Guntur, ST., M.Eng., Bapak M. Solichin, ST., MT., Ibu Aida Annisa A. Daman, ST., MT., Selaku dosen penguji, terima kasih atas saran-sarannya dalam penyusunan tugas akhir ini.
4. Bapak Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA., selaku dosen wali. Terima kasih atas saran, dan perhatian Bapak selama ini.
5. Seluruh dosen yang telah memberikan ilmu yang tak ternilai harganya dan karyawan yang memberikan banyak kemudahan dan kerjasama selama ini.
6. Bibi Yanah, Paman Jasman, dan Sepupu-sepupu, Kiki, Teh Fita, Azis, Bang Andri, Teh Puspa, Kakak Putri. Terima kasih atas dukungannya.
7. Teman seperjuangan dalam Tugas Akhir ini Sinta, Fudin, Yabes. Terima kasih telah menjadi bagian dari kesuksesan terbaik yang pernah terukir.

8. Rekan-Rekan di Lab. Vibrasi & Sistem Dinamis, Bapak Made, Mas Yoga. Terima kasih atas diskusi yang sangat bermanfaat dan menyenangkan.
9. The Jakarta's Team, Bidoy, Faiz Flitzzz a.k.a Cahayalight , Boss Anton, Kamfon Leder, Ade "muda" 1skandar, Fudin SiFu, dan Cover by Adrieq. Terima kasih atas 730 episode saudara yang tertukar,dan terima kasih atas segala-galannya.
10. The PuckeyJack's, Cherdol, Handi Sulaiman Sukicot, terima kasih atas irama yang tak pernah merdu tapi membahagiakan.
11. Najmah Ulfa Safarina, terima kasih atas energi positif yang sampai ke ITS meskipun sedikit.
12. Rekan-rekan Lab. Manufaktur, Fakhruddin, Kiki, Roo Zzacck, Hanif terima kasih atas fasilitas lab-nya.
13. Rekan-rekan penghuni gelap lab. Manufaktur, Falah, Wisnu, Rei Sugara. Terima kasih atas kebersamaannya.
14. Jan Ployshompoo, terima kasih atas motivasi terbaiknya.
15. Teman-teman D-III Teknik Mesin PNJ yang tidak dapat saya sebutkan satu persatu.
16. Teman-teman Lintas Jalur S1 Teknik Mesin 2013 yang tidak dapat saya sebutkan satu persatu.
17. Serta seluruh pihak-pihak yang lain yang tidak dapat saya sebutkan satu persatu.

Saya mengucapkan terima kasih atas segala bantuan, bimbingan, dan fasilitas yang telah diberikan kepada saya hingga terselesaikannya laporan tugas akhir ini. Saya menyadari bahwa penelitian ini masih jauh dari sempurna, oleh karena itu saya mengharapkan saran dan kritik untuk perbaikan di masa mendatang. Semoga tugas akhir ini bisa memberikan manfaat bagi masyarakat luas.

Surabaya, Januari 2016

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL

LEMBAR PENGESAHAN

ABSTRAK i

ABSTRACT iii

KATA PENGANTAR..v

DAFTAR ISI vii

DAFTAR GAMBAR xi

DAFTAR TABEL xv

BAB I PENDAHULUAN 1

1.1 Latar Belakang 1

1.2 Rumusan Masalah 2

1.3 Batasan Masalah..3

1.4 Tujuan Penelitian..3

1.5 Manfaat Penelitian..3

BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI 5

2.1 Tinjauan Pustaka 5

2.1.1 Simulasi Cantilever Beam *Piezoelectric* oleh Andreza DKK [4]...5

2.1.2 Studi Eksperimen Pembebanan Pada *Piezoelectric* dengan Variasi Jumlah Blade oleh Gusti Fajar Romano [5] .7

2.1.3 Simulasi Pemanfaatan Energi Laut dengan Menggunakan *Piezoelectric* Tipe Coupled Bouy Oleh Nan Wu Dkk.[8] 8
2.2 Dasar Teori 9
2.2.1 Dasar Teori Gelombang Laut 9
2.2.2 Analisa Gaya Pada Gelombang Laut 12
2.2.3 Analisa Mekanika Getaran 13
2.2.4 Analisa *Piezoelectric* 17
BAB III METODOLOGI 25
3.1 Tahapan Penelitian 25
3.1.1 Diagram Alir 25
3.1.2 Penjelasan Diagram Alir 26
3.2 Rancangan Pemodelan 29
3.2.1 Perancangan Mekanisme 29
3.2.2 Persamaan Gerak Model 31
3.3 Persamaan Piezoelectric 34
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN 37
4.1 Data dan Spesifikasi alat pada proses Simulasi 37
4.1.1 Spesifikasi alat 37
4.1.2 Mekanisme Alat 37
4.2 Analisa 39
4.2.1 Karakteristik Gelombang Laut 39
4.2.2 Karakteristik Gaya Yang Dihasilkan Mekanisme 40
4.2.3 Karakteristik Respon Dinamis *Piezoelectric* 42

4.2.4 Karakteristik Energi Listrik Yang Dihasilkan 49
4.3 Pembahasan 58
4.3.1 Pengaruh Frekuensi Gelombang, Tinggi Gelombang dan Jumlah *Piezoelectric* Terhadap Perpindahan dan Kecepatan Massa Pendorong 58
4.3.2 Pengaruh Frekuensi Gelombang, Tinggi Gelombang dan Jumlah *Piezoelectric* Terhadap Energi Yang dihasilkan 61
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN 67
5.1 Kesimpulan 67
5.2 Saran 67
DAFTAR PUSTAKA 69
LAMPIRAN

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Cantilever beam dengan Piezoelectric [4] 5
Gambar 2. 2 Daya sebagai fungsi resistance dengan frekuensi yang berbeda [4] 6
Gambar 2. 3 Skema Mekanisme Ketika Gaya Eksitasi Ke Bawah(A. Tampak Depan, B. Tampak Belakang, C. prototype mekanisme)[5] 7
Gambar 2. 4 Mekanisme pelampung-piezoeletric [8] 8
Gambar 2. 5 Daya dan amplitudo yang dihasilkan sebagai fungsi panjang gelombang [8] 9
Gambar 2. 6 Definisi parameter pada ombak [3] 12
Gambar 2. 7 Skema sederhana gerak harmonic yang dipengaruhi base motion (a) dan free body diagram [6] 14
Gambar 2. 8 Poros tetap di COG (A) dan poros tidak dengan jarak d dari COG (B) 15
Gambar 2. 9 Mekanisme two degree of freedom [6]..................16
Gambar 2. 10 Free body diagram untuk sistem two degree of freedom [6] 16
Gambar 2. 11 Beberapa contoh bentuk piezoelectric [5] 18
Gambar 2. 12 Elemen penyusun Piezoelectric [2] 22
Gambar 2. 13 Free body diagram Piezoelectric [2]....................22
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian 26
Gambar 3.2 Instalasi PLTGL sistem kayuh dayung-piezoelectric pada kolam 29
Gambar 3.3 Mekanisme PLTGL sistem kayuh dayung-piezoelectric 30
Gambar 3.4 Free body diagram lengkap 31
Gambar 3.5 Free body diagram section 1..................................32
Gambar 3.6 free-body diagram untuk massa pendorong............33
Gambar 3.7 Free body diagram section 3..................................34

Gambar 4.1 Mekanisme PLTGL type kayuh dayung-piezoelectric 38
Gambar 4.2 free-body diagram untuk lengan dayung 40
Gambar 4.3 free-body diagram untuk massa pendorong.............41
Gambar 4.4 Gaya yang dihasilkan mekanisme............................42
PLTGL type kayuh dayung-piezoelectric...................................42
Gambar 4.5 Grafik perpindahan massa pendorong dengan variasi frekuensi gelombang 43
Gambar 4.6 Grafik perpindahan massa pendorong dengan variasi tinggi gelombang 43
Gambar 4.7 Grafik perpindahan massa pendorong dengan variasi jumlah piezoelectric..44
Gambar 4.8 Grafik kecepatan massa pendorong dengan variasi frekuensi gelombang 45
Gambar 4.9 Grafik kecepatan massa pendorong dengan variasi tinggi gelombang 46
Gambar 4.10 Grafik kecepatan massa pendorong dengan variasi jumlah piezoelectric..47
Gambar 4.11 Grafik voltase dengan variasi frekuensi gelombang 49
Gambar 4.12 Grafik voltase dengan variasi tinggi gelombang ...50
Gambar 4.13 Grafik voltase dengan variasi jumlah piezoelectric 51
Gambar 4.14 Grafik arus listrik dengan variasi frekuensi 52
Gambar 4.15 Grafik arus listrik dengan variasi tinggi gelombang 53
Gambar 4.16 Grafik arus listrik dengan variasi jumlah piezoelectric...53
Gambar 4.17 Grafik daya listrik dengan variasi frekuensi gelombang 54

Gambar 4.18 Grafik daya listrik dengan variasi tinggi gelombang 55
Gambar 4.19 Grafik daya listrik dengan variasi jumlah piezoelectric 56
Gambar 4.20 Pengaruh frekuensi terhadap perpindahan dan kecepatan massa pendorong 58
Gambar 4.21 Pengaruh tinggi gelombang terhadap perpindahan dan kecepatan massa pendorong 60
Gambar 4.22 Pengaruh frekuensi terhadap Voltase yang dihasilkan 61
Gambar 4.23 Pengaruh tinggi gelombang yang dihasilkan terhadap Voltase 62
Gambar 4.24 Pengaruh frekuensi yang dihasilkan terhadap kuat arus yang dihasilkan 63
Gambar 4.25 Pengaruh tinggi gelombang yang dihasilkan terhadap kuat arus yang dihasilkan 65

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Dimensi dan Properties dari *Piezoelectric [4]* 6
Tabel 2.2 Data hasil percobaan [5]... 7
Tabel 2.3 Sifat Mekanik Beberapa *Piezoelectric Material [5]* ... 19
Tabel 4.1 Tabel Data perpindahan dan kecepatan massa pendorong *piezoelectric* dengan variasi frekuensi, tinggi gelombang dan jumlah PZT.. 48
Tabel 4.2 Tabel Data energi rata-rata yang dihasilkan mekanisme dengan variasi frekuensi, tinggi gelombang dan jumlah PZT 57

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Krisis energi bukan lagi masalah baru untuk Indonesia, berbagai pihak telah menyatakan bahwa Indonesia dalam keadaan kritis dalam hal pengadaan energi, hal ini disebabkan karena cadangan energi fossil yang semakin menipis. Kendati demikian, banyak alternatif yang bisa dikembangkan. Berikut data kementrian ESDM tentang energi alternatif, micro hydro 450 MW, bio mass 50 GW, energy surya 4,8 KWh/m^2/hari dan potensi laut total sebesar 727.000 MW, namun untuk saat ini energi yang siap untuk dikembangkan berkisar 49.000 MW yang berasal dari gelombang laut dan pasang surut air laut. Dengan melihat potensi laut total sebesar 727.000 MW, jelas bahwa sektor arus laut yang harus diprioritaskan, mengingat bahwa total 727.000 MW sudah cukup untuk memenuhi kebutuhan listrik Indonesia, yang saat ini hanya berkisar 172.000 MW.

Di Indonesia teknologi gelombang laut sudah mulai dikembangkan, beberapa mekanisme gelombang laut sudah diuji coba. Supaya pemanfaatan energi laut di Indonesia didapatkan secara optimal, maka perlu dilakukan penelitian lebih lanjut. Penelitian tentang energi laut bisa dilakukan secara simulasi maupun melakukan percobaan dengan membuat model dengan ukuran laboratorium. Terdapat kelebihan dan kekurangan pada kedua metode tersebut. Metode eksperimen lebih mahal karena diperlukan biaya pembuatan alat, namun hasil penelitian bisa langsung diketahui. Sedangkan pada metode simulasi lebih hemat biaya, namun penelitian masih dianggap ideal.

Pada penelitian awal tentang pemanfaatan energy gelombang laut diperlukan ide-ide yang bisa mewakili dari gambaran teknologi yang dibutuhkan untuk pemanfaatan energi gelombang laut. Menimbang dari kekurangan dan kelebihan dari masing-masing metode, metode penelitian dengan simulasi lebih *reliable* untuk dicoba karena menghemat biaya, dan sangat

mungkin untuk memperkaya ide-ide tentang teknologi gelombang laut. Selain dari metode penelitian, beberapa hal yang perlu diperhatikan adalah pemilihan material, saat ini dikembangkan smart material yang dapat memanfaatkan sekecil apapun getaran yang ditimbulkan. *Piezoelectric* adalah material yang prospektif dalam pemanfaatan energi yang berhubungan dengan getaran. *Piezoelectric* sangat sensitif dan memiliki rasio harvesting energi terhadap massa lebih besar daripada motor linear sebagai generator. Maka dari itu, *Piezoelectric* merupakan alternatif yang sangat menarik untuk dikembangkan.

Dengan mempelajari karakter gelombang laut di Indonesia yang cenderung gelombangnya lebih besar dari arus laut, maka penelitian gelombang laut dengan sistem kayuh dayung dan dikombinasikan dengan *piezoelectric* sebagai pengganti generator, merupakan pilihan yang patut diperhitungkan dalam penelitian energi listrik gelombang laut. Keluaran energi listrik yang dihasilkan oleh pembangkit listrik dengan mekanisme kayuh dayung ini dapat diestimasi dengan metode simulasi.

1.2 Rumusan Masalah

Mengacu pada latar belakang tentang pemanfaatan energi laut, diperlukan penelitian lebih lanjut. Dengan mekanisme dayung yang terkayuh oleh gelombang laut, pergerakan dari dayung dapat ditransmisikan kedalam suatu mekanisme, sehingga pergerakan tersebut dapat menghasilkan energi listik. Maka dari itu perumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana merancang dan mensimulasikan pembangkit listrik tenaga ombak dengan mekanisme sistem kayuh dayung?
2. Bagaimana pengaruh frekuensi gelombang laut terhadap energi listrik yang dihasilkan?
3. Bagaimana pengaruh tinggi gelombang laut terhadap energi listrik yang dihasilkan?
4. Bagaimana pengaruh jumlah *piezoelectric* terhadap energi listrik yang dihasilkan?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Perhitungan simulasi pada skala laboratorium.
2. Gelombang yang dihasilkan pada kolam dianggap konstan.
3. Eksitasi gelombang yang terbentuk adalah eksitasi harmonik.
4. Gelombang air yang terjadi merupakan gelombang yang merambat ke satu arah bergerak secara horizontal.
5. Pengaruh gaya vertikal diabaikan.
6. Redaman gesekan yang terjadi sangat kecil sehingga pada simulasi diabaikan.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian antara lain sebagai berikut:

1. Merancang dan mensimulasikan pembangkit listrik tenaga ombak dengan mekanisme sistem kayuh dayung.
2. Mengetahui pengaruh frekuensi gelombang laut terhadap energi listrik yang dihasilkan.
3. Mengetahui pengaruh tinggi gelombang terhadap energi listrik yang dihasilkan.
4. Mengetahui pengaruh jumlah *piezoelectric* terhadap energi listrik yang dihasilkan.

1.5 Manfaat Penelitian

1. Memajukan perkembangan pembangkit listrik di Indonesia, sehingga tercipta pembangkit energi listrik terbarukan dengan menggunakan *Piezoelectric*.
2. Solusi untuk krisis energi di Indonesia yang saat ini kekurangan pasokan listrik.
3. Mengoptimalkan sumber daya alam yang ada di Indonesia khususnya gelombang laut.

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

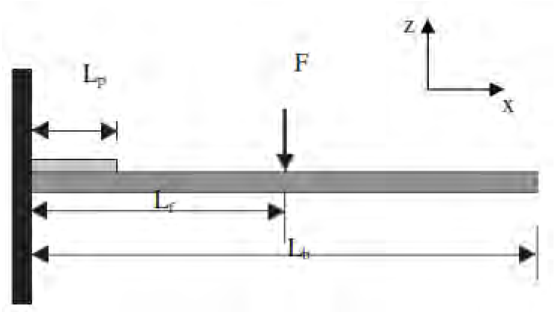
BAB II
TINJAUAN PUSTAKAN DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjaun Pustaka

2.1.1 Simulasi Cantilever Beam *Piezoelectric* oleh Andreza DKK [4]

Piezoelectric merupakan salah satu contoh smart material yang saat ini menjadi tren dan sangat populer dalam pemanfaatan energi. *Piezoelectric* telah dimanfaatkan diberbagai macam alat sebagai transduscer yang dapat mengubah energi listrik kedalam gerakan mekanis atau gaya. Pada penelitian ini dilakukan simulasi *piezoelectric* sebagai pembangkit energi, digunakan mekanisme single degree of freedom (DOF) untuk memperkirakan hasil parameter yang terdistribusi seperti pada penelitian menggunakan metode analisis.

Jenis *piezoelectric* yang dimodelkan adalah tipe cantilever beam PZT-PIC 255. Berikut *set up* pada *piezoelectric* yang dimodelkan.



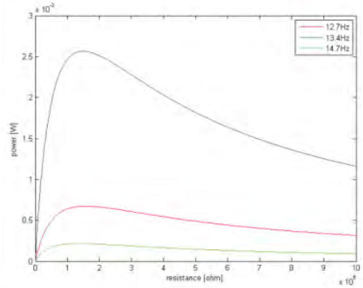
Gambar 2. 1 Cantilever beam dengan Piezoelectric [4]

Dimana L_p adalah panjang *Piezoelectric*, L_b adalah panjang cantilever beam, L_f adalah panjang pusat gaya. F adalah gaya yang diberikan. Spesifikasi *Piezoelectric* yang digunakan adalah sebagai berikut.

Tabel 2.1 Dimensi dan Properties dari *Piezoelectric [4]*

Material	Parameter	Value
Beam (steel)	Length L_b	0.5 m
	Width b	0.05 m
	Thickness t_b	0.04 m
	Density ρ	7.85 x 10^3 Kg/m3
	Young modulus E_b	210 x 10^9 Pa
PZT (PIC255)	Length L_p	0.05 m
	Width b	0.05 m
	Thickness t_a	0.5 x 10^{-3} m
	Piezoelectric constant e_{31}	11.2 Cm^2
	Dielectric constant ϵ_{33}	1800 ϵ_0

Gaya yang diaplikasikan pada proses simulasi adalah 1 N dengan frekuensi natural beam sebesar 13.4 Hz. Daya yang dihasilkan dari simulasi ini tergantung dari beberapa parameter, yaitu resistansi, posisi, frekuensi, dan panjang *Piezoelectric*. Hasil dari proses simulasi dapat dilihat pada grafik yang ditampilkan.

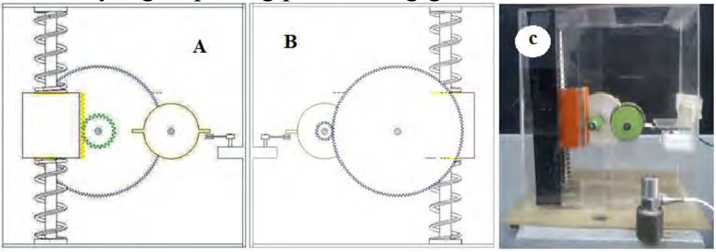


Gambar 2. 2 Daya sebagai fungsi resistance dengan frekuensi yang berbeda [4]

Pada gambar 2.2 dapat dilihat bahwa energy daya listrik maksimum yang dihasilkan didapatkan pada frekuensi 13.4 Hz dengan resistansi $1.5 \, x \, 10^6 \, ohm$.

2.1.2 Studi Eksperimen Pembebanan Pada *Piezoelectric* dengan Variasi Jumlah Blade oleh Gusti Fajar Romano [5]

Studi eksperimen yang dilakukan pada penelitian ini adalah menguji *piezoelectric* tipe cantilever beam yang dikenai pembebanan sehingga dihasilkan getaran haromik yang besar dengan frekuensi yang ditentukan. *Piezoelectric* akan terdefleksi oleh blade yang terpasang pada roda gigi.



Gambar 2. 3 Skema Mekanisme Ketika Gaya Eksitasi Ke Bawah(A. Tampak Depan, B. Tampak Belakang, C. prototype mekanisme)[5]

Dari hasil pengujian didapatkan bahwa voltase maksimum didapatkan pada jumlah blade 3 dengan frekuensi 15 Hz. Berikut data hasil pengujian menunjukkan voltase bangkitan dengan variasi jumlah blade dan frekuensi

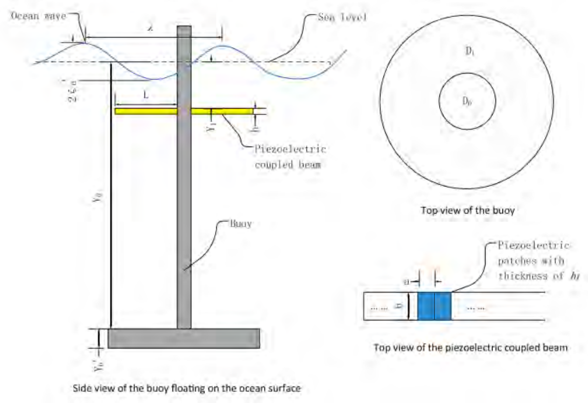
Tabel 2.2 Data hasil percobaan [5]

Jumlah Blade	Frekuensi (Hz)	Voltase (mv)
2	13	61.7477
	14	65.7546
	15	101.7655
3	13	107.8498
	14	141.4426
	15	1491.5
4	13	74.9453

	14	99.228
	15	847.222

2.1.3 Simulasi Pemanfaatan Energi Laut dengan Menggunakan *Piezoelectric* Tipe Coupled Bouy Oleh Nan Wu Dkk.[8]

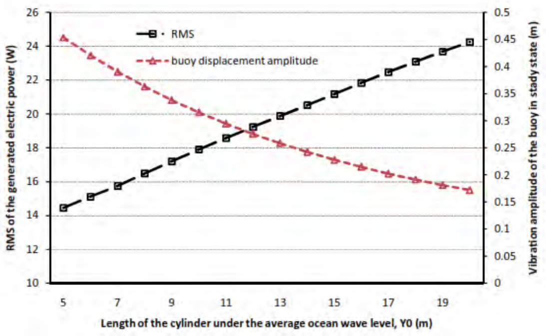
Prinsip kerja dari pemanfaatan energi laut dibuat dari beberapa piezoelectric coupled cantilever yang disambungkan pada struktur pelampung yang mengambang, yang dapat dengan mudah terlepas pada tinggian gelombang laut yang menengah dan sangat dalam untuk memanen energi. Pada struktur pelampung, silinder perangkat pengapung disambungkan ke silinder yang lebih besar. Energi listrik yang dihasilkan dikonversi dari gerakan transversal gelombang laut yang menyentuh *piezoelectric* yang terpasang pada pelampung yang fix (stator).



Gambar 2. 4 Mekanisme pelampung-piezoeletric [8]

Metode numerik dapat memperkirakan perhitungan energi listrik yang dihasilkan dari pelampung yang menyentuh *piezoelectric*. Pada penelitian ini didapatkan angka 24 Watt daya listrik yang dapat dihasilkan oleh *piezoelectric cantilever beam* dengan panjang 1m dan panjang pelampung yang bergerak

sepanjang 20 m. Dari hasil penelitian didapatkan bahwa watt RMS terbesar didapatkan ketika pada panjang silinder 5 m. Amplitudo maksimum pada panjang silinder 19 m. Hasil dari penelitian dapat diihat pada gambar 2.5.



Gambar 2. 5 Daya dan amplitudo yang dihasilkan sebagai fungsi panjang gelombang [8]

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Dasar Teori Gelombang Laut

2.2.1.1 Definisi Gelombang [7]

Gelombang adalah peristiwa naik turunnya permukan air laut dari ukuran kecil (riak) sampai yang paling panjang (pasang surut). Penyebab utama terjadinya gelombang adalah angin. Gelombang dipengaruhi oleh kecepatan angin, lamanya angin bertiup, dan jarak tanpa rintangan saat angin bertiup (fetch). Bhat (1978), Garisson (1993), dan Gross (1993) mengemukakan bahwa ada 4 bentuk besaran yang berkaitan dengan gelombang. Yakni :

a. Amplitudo gelombang (A) adalah jarak antara puncak gelombang dengan permukaan rata-rata air.
b. Frekuensi gelombang (f) adalah sejumlah besar gelombang yang melintasi suatu titik dalam suatu waktu tertentu (biasanya didefenisikan dalam satuan detik).

c. Kecepatan gelombang (C) adalah jarak yang ditempuh gelombang dalam satu satuan waktu tertentu.
d. Kemiringan gelombang (H/λ) adalah perbandingan antara tinggi gelombang dengan panjang gelombang

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

a. Crest : merupakan titik tertinggi atau puncak sebuah gelombang
b. Trough : merupakan titik terendah atau lembah sebuah gelombang
c. Wave height : merupakan jarak vertikal antara crest dan trough atau disebut juga tinggi gelombang
d. Wave lenght : merupakan jarak berturut-turut antara dua buah crest atau dua buah trough, disebut juga satu panjang gelombang
e. Wave period : waktu yang dibutuhkan crest untuk kembali pada titik semula secara berturut-turut, disebut juga periode gelombang
f. Wave steepnees : perbandingan antara panjang gelombang dengan tinggi gelombang, disebut juga kemiringan gelombang.

2.2.1.2 Faktor-faktor terjadinya Gelombang

Secara umum gelombang yang terjadi di laut dapat terbentuk dari beberapa faktor pnyebab seperti : angin, pasang surut, badai laut, dan seiche.

1. Gelombang yang disebabkan oleh angin

Angin yang bertiup di atas permukaan laut merupakan pembangkit utama gelombang. Bentuk gelombang yang dihasilkan cenderung tidak menentu dan bergantung pada beberapa sifat gelombang periode dan tinggi dimana gelombang dibentuk.

2. Gelombang yang disebabkan oleh pasang surut

Gelombang pasang surut yang terjadi di suatu perairan yang diamati adalah merupakan penjumlahan dari komponen-komponen pasang yang disebabkan oleh gravitasi bulan, matahari, dan benda-benda angkasa lainnya yang mempunyai periode sendiri. Tipe pasang berbeda-beda dan sangat tergantung dari tempat dimana pasang itu terjadi (Cappenberg, 1992).

3. Gelombang yang disebabkan oleh badai atau puting beliung

Bentuk gelombang yang dihasilkan oleh badai yang terjadi di laut merupakan hasil dari cuaca yang tiba-tiba berubah menjadi buruk terhadap kondisi perairan. Kecepatan gelombang tinggi dengan puncak gelombang dapat mencapai 7 – 10 meter. Bentuk gelombang ini dapat menghancurkan pantai dengan vegetasinya maupun wilayah pantai secara keseluruhan (Pond and Picard, 1978).

4. Gelombang yang disebabkan oleh tsunami

Gelombang tsunami merupakan bentuk gelombang yang dibangkitkan dari dalam laut yang disebabkan oleh adanya aktivitas vulkanis seperti letusan gunung api bawah laut, maupun adanya peristiwa patahan atau pergeseran lempengan samudera (aktivitas tektonik). Panjang gelombang tipe ini dapat mencapai 160 Km dengan kecepatan 600-700 Km/jam. Pada laut terbuka dapat mencapai 10-12 meter dan saat menjelang atau mendekati pantai tingginya dapat bertambah bahkan dapat mencapai 20 meter serta dapat menghancurkan wilayah pantai dan membahayakan kehidupan manusia, seperti yang terjadi di Kupang tahun 1993 dan di Biak tahun 1995 yang menewaskan banyak orang serta menghancurkan ekosistem laut (Dahuri,1996)

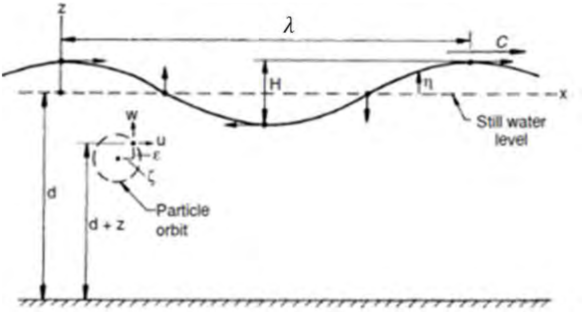
5. Gelombang yang disebabkan oleh *seiche*

Gelombang *seiche* merupakan *standing wave* yang sering juga disebut sebagai gelombang diam atau lebih dikenal dengan jenis gelombang stasioner. Gelombang ini merupakan *standing wave* dari periode yang relatif panjang dan umumnya dapat terjadi di kanal, danau dan sepanjang pantai laut terbuka. *Seiche*

merupakan hasil perubahan secara mendadak atau seri periode yang berlangsung secara berkala dalam tekanan atmosfir dan kecepatan angin (Pond and Picard, 1978).

2.2.2 Analisa Gaya Pada Gelombang Laut

2.2.2.1 *Wave Energy* (Energi dari Gelombang)



Gambar 2. 6 Definisi parameter pada ombak [3]

Total energi mekanik pada permukaan ombak adalah hasil penjumlahan dari energi kinetik dan energi potensial, persamaan untuk energi kinetik E_k adalah sebagai berikut [1]:

$$E_k = \frac{\rho\, g\, H^2 \lambda\, b}{16} \quad (1)$$

Dimana : E_k = Energi kinetik (joule)
ρ = masa jenis fluida (air tawar 1000 kg/m^3)
g = percepatan gravitasi (9.8 m/s^2)
H = tinggi gelombang (m)
λ = panjang gelombang (m)
b = lebar air laut yang mengenai dayung atau lebar dayung (m) .

Pada penelitian ini diasumsikan energi yang bekerja adalah hanya energi kinetik. Hal ini dikarenakan bahwa mekanisme hanya dapat menerima energi dari arah horizontal saja.

2.2.2.2 *Wave Power* (Tenaga dari Gelombang)

Tenaga ombak P adalah total energi ombak yang terjadi persatuan waktu yang ditransmisikan sesuai arah rambatnya. Persamaan tenaga ombak yaitu [3]:

$$P = \frac{E}{T} \tag{2}$$

Dimana :	P	= tenaga ombak (watt)
	T	= periode (s)

2.2.2.3 *Wave Force* (Gaya dari Gelombang)

Dengan mensubstitusikan dari persamaan [3] :

$$P = F\,c$$

$$F = \frac{P}{c}$$

Dimana :	F	= gaya ombak (N)
	c	= kecepatan ombak (m/s)

karena , $C = \frac{\lambda}{T}$ dimana λ adalah panjang gelombang. Maka,

$$F = \frac{E}{T}\,\frac{T}{\lambda}$$

$$F = \frac{E}{\lambda}$$

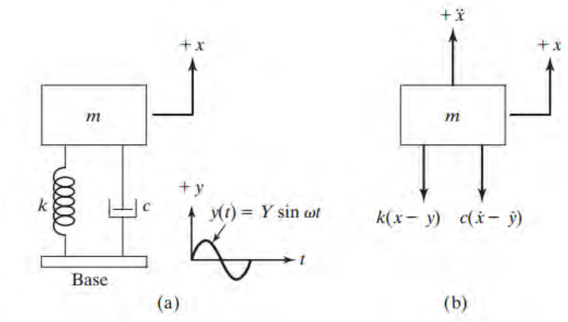
$$F = \frac{\rho\, g\, H^2 \lambda\, b}{16\,\lambda}$$

$$F = \frac{\rho\, g\, H^2\, b}{16} \tag{3}$$

2.2.3 Analisa Mekanika Getaran

2.2.3.1 Base Motion

Base atau pondasi dari tempat acuan benda tersebut melakukan gerakan dengan persamaan tertentu. Hal ini pasti memiliki pengaruh terhadap benda yang bergerak di atasnya. Pada gambar 2.7 akan dijelaskan secara sederhana tentang pengaruh dari *base motion.*



Gambar 2. 7 Skema sederhana gerak harmonic yang dipengaruhi base motion (a) dan free body diagram [6]

Dari gambar tersebut diperoleh persamaan gerak harmonik suatu benda akibat pengaruh dari *base motion* adalah :

$m\ddot{x} + c(\dot{x} - \dot{y}) + K(x - y) = 0$

$m\ddot{x} + c\dot{x} - c\dot{y} + kx - ky = 0$

$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = c\dot{y} + ky$

Jika z = x – y , melambangkan gerak relative dari massa (beban) terhadap *base*, maka persamaan diatas dapat ditulis menjadi :

$m(\ddot{z} + \ddot{y}) + c(\dot{z} + \dot{y}) + k(z + y) = c\dot{y} + ky$

$m\ddot{z} + m\ddot{y} + c\dot{z} + c\dot{y} + kz + ky = c\dot{y} + ky$

$$m\ddot{z} + c\dot{z} + kz = -m\ddot{y} \qquad (4)$$

$-m\ddot{y} = m\omega^2 Y sin\omega t$

Untuk sistem yang steady-state , persamaan tersebut menjadi :

$$z = Zsin\,(\omega t - \emptyset) \qquad (5)$$

Dimana Z adalah amplitudo dari z(t), dan dapat didefinisikan :

$$Z = \frac{m\omega^2 Y}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2}} \qquad (6)$$

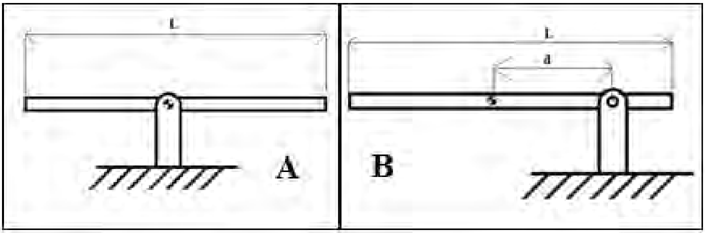
Sedangkan ∅ , didefinisikan sebagai berikut :

$$\emptyset = tan\left(\frac{c\omega}{k - m\omega^2}\right) \qquad (7)$$

2.2.3.3 Frekuensi Natural

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \qquad (8)$$

2.2.3.2 Momen Inersia



Gambar 2. 8 Poros tetap di COG (A) dan poros tidak dengan jarak d dari COG (B)

Untuk momen inersia pada poros tepat pada *center of gravity* batang maka persamaannya adalah sebagai berikut :

$$J_{batang} = \frac{1}{12} m. L^2 \qquad (9)$$

Sedangkan momen inersia dengan poros tidak pada center of gravity yaitu :

$$J_{batang} = \frac{1}{12} m. L^2 + m. d^2 \qquad (10)$$

Dimana :

J = momen inersia
m = massa batang
L = panjang keseluruhan batang
d = jarak antara pusat massa ke poros putar

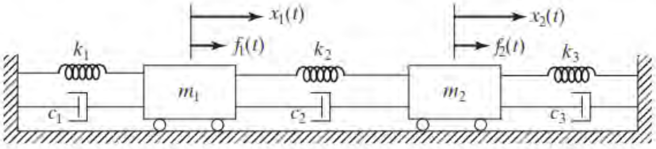
2.2.3.3 Derajat Kebebasan (*Degree of Freedom*) [6]

Derajat kebebasan *(Degree of Freedom)*, adalah kebebasan pergerakan sistem yang terdapat pada mekanisme. Yang paling sederhana adalah sistem yang memiliki satu derajat

kebebasan, artinya sistem tersebut hanya memiliki satu arah pergerakan massa. Semakin bebas pergerakan dari mekanisme, maka jumlah derajat kebebasannya pun semakin banyak.

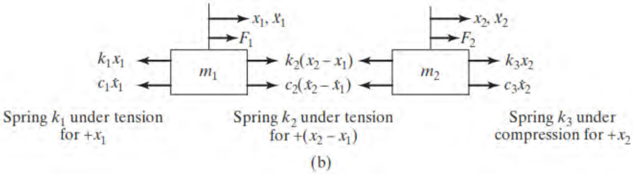
a. Two degree of freedom

Jika suatu mekanisme memiliki two degree of freedom, maka benda tersebut memiliki dua arah pergerakan yang berbeda. Bisa juga benda tersebut hanya memiliki pergerakan satu arah pada arah x saja, namun terdapat dua pergerakan ke arah x, maka pergerakan satu dimisalkan x_1 pergerakan lainya dimisalkan x_2. Besarnya pergerakan x_1 dan x_2 saling mempengaruhi. Pemodelan mekanisme dapat digambarkan sebagai berkut.



Gambar 2. 9 Mekanisme two degree of freedom [6]

Maka, penyelesaian pada kasus dua derajat kebebasan dapat diselesaikan dengan membuat free body diagram terlebih dahulu.



Gambar 2. 10 Free body diagram untuk sistem two degree of freedom [6]

dari free body diagram tersebut maka didapatkan persamaan gerak sebagai berikut.

$$m_1\ddot{x}_1(t) + (k_1 + k_2)x_1(t) - k_2x_2(t) + (c_1 + c_2)\dot{x}_1(t) - c_2\dot{x}_2(t) = F_1$$

$$m_2\ddot{x}_2(t) + (k_2 - k_3)x_2(t) - k_2x_1(t) + (c_2 - c_3)\dot{x}_2(t) - c_2\dot{x}_1(t) = F_2 \quad (11)$$

Maka matrix untuk persamaan diatas adalah :

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 - c_3 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 - k_3 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix}$$

2.2.4 Analisa *Piezoelectric*

2.2.4.1 Gambaraan Umum *Piezoelectric* [5]

Kata piezoelektrik berasal bahasa latin, *piezein* yang berarti diperas atau ditekan dan *piezo* yang bermakna didorong. Bahan *piezoelektric* ditemukan pertama kali pada tahun 1880-an oleh Jacques dan Pierre Curie. Kata *piezo* berarti tekanan, sehingga efek *piezoelektric* terjadi jika medan listrik tebentuk ketika material dikenai tekanan mekanik.

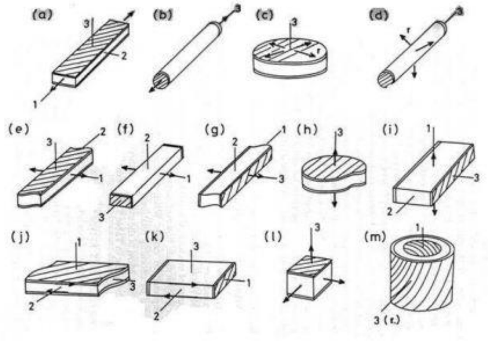
Material *piezoelectric* dapat dibagi menjadi 3 jenis yaitu :

- Kristal, seperti Quartz (SiO2), Gallium Orthophosphate(GaPO4)
- Keramik, seperti Barium Titanate (BaTiO3), Lead Zirconate Titanate(PZT)
- Polimer, seperti Polyvinylidene Diflouride(PVDF)

Material *piezoelectric* sangat sensitif terhadap adanya tegangan mekanik dan medan listrik. Jika tegangan mekanik diaplikasikan ke suatu material *piezoelectric* maka akan terjadi suatu medan listrik pada material tersebut, fenomena ini yang disebut efek *piezoelectric*. Efek *piezoelectric* mendeskripsikan hubungan antara tegangan mekanik dengan tegangan listrik pada benda padat. Efek *piezoelectric* tersebut bersifat *reversible* yaitu dapat menghasilkan *direct piezoelectric effect* (menghasilkan energi listrik jika diaplikasikan tegangan mekanik) dan menghasilkan *reverse piezoelectric effect* (menghasilkan tegangan dan atau regangan mekanik jika diaplikasikan beda potensial listrik).

2.2.4.2 Karakteristik *Piezoelectric* [5]

Setiap *piezoelectric* memiliki karakteristik yang berbeda, tergantung dari bentuk, pemanfaatan, sifat mekanik, energi yang dihasilkan, komposisi material, dan faktor lain yang mempengaruhi kinerjanya. *Piezoelectric* memiliki beberapa bentuk yang dapat dilihat pada gambar 2.11. Bentuk – bentuk tersebut disesuaikan untuk aplikasi – aplikasi tertentu.



Gambar 2. 11 Beberapa contoh bentuk piezoelectric [5]

Tiap-tiap bentuk *piezoelectric* yang berbeda memiliki energi bangkitan yang berbeda pula. Untuk besarnya energi bangkitan yang dihasilkan dipengaruhi oleh sifat mekanik dari *piezoelectric material* yang digunakan. Beberapa sifat mekanik tersebut dapat dilihat pada tabel 2.3. Selain itu, energi bangkitan yang dihasilkan oleh *piezoelectric material* dipengaruhi oleh energi atau usaha mekanik yang diterima oleh material *piezoelectric* tersebut. Energi mekanik yang diterima oleh *piezoelectric material* dapat dirumuskan sebagai berikut [5] :

$$W_{mech} = F . x_{PZT} \quad (12)$$

Dimana : F = adalah gaya total yang bekerja pada *piezoelectric* tersebut (Newton)

X_{piezo} =adalah *displacement* yang teradi pada material *piezoelectric* (m)

Tabel 2.3 Sifat Mekanik Beberapa *Piezoelectric Material [5]*

Symbol	Parameter		PVDF	Copolymer	Units
t	Thickness		9, 28, 52, 110	<1 to 1200	μm (micron, 10^{-6})
d_{31}	Piezo Strain Constant		23	11	10^{-12} $\frac{m/m}{V/m}$ or $\frac{C/m^2}{N/m^2}$
d_{33}			-33	-38	
g_{31}	Piezo Stress constant		216	162	10^{-3} $\frac{V/m}{N/m^2}$ or $\frac{m/m}{C/m^2}$
g_{33}			-330	-542	
k_{31}	Electromechanical Coupling Factor		12%	20%	
k_t			14%	25-29%	
C	Capacitance		380 for 28μm	68 for 100μm	pF/cm^2 @ 1KHz
Y	Young's Modulus		2-4	3-5	10^9 N/m^2
V_0	Speed of Sound	stretch:	1.5	2.3	10^3 m/s
		thickness:	2.2	2.4	
p	Pyroelectric Coefficient		30	40	10^{-6} C/m^2 °K
ε	Permittivity		106-113	65-75	10^{-12} F/m
$ε/ε_0$	Relative Permittivity		12-13	7-8	
$ρ_m$	Mass Density		1.78	1.82	10^3 kg/m^3
$ρ_e$	Volume Resistivity		>10^{13}	>10^{14}	Ohm meters
$R_□$	Surface Metallization Resistivity		<3.0	<3.0	Ohms/square for NiAl
$R_□$			0.1	0.1	Ohms/square for Ag Ink
tan $δ_e$	Loss Tangent		0.02	0.015	@ 1KHz
	Yield Strength		45-55	20-30	10^6 N/m^2 (stretch axis)
	Temperature Range		-40 to 80...100	-40 to 115...145	°C
	Water Absorption		<0.02	<0.02	% H_2O
	Maximum Operating Voltage		750 (30)	750 (30)	V/mil(V/μm), DC, @ 25°C
	Breakdown Voltage		2000 (80)	2000 (80)	V/mil(V/μm), DC, @ 25°C

Electromechanical coupling factor, k, merupakan indikator efektifitas material *piezoelectric* dalam mengubah energi listrik ke energi mekanik atau mengubah energi mekanik ke energi listrik. k disertai dua buah *subscript*, dimana dalam hal

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

Perlu diperhatikan bahwa dimensi dari elemen keramik mempengaruhi persamaan k yang digunakan. Misalnya, untuk keramik *piezoelectric* berbentuk piringan tipis (thin disc) dikenal adanya *planar coupling factor*, kp, yang menyatakan hubungan antara medan listrik yang paralel terhadap arah polarisasi elemen keramik (arah 3) dengan efek mekanik yang menghasilkan getaran radial relatif terhadap arah polarisasi (arah 1 dan arah 2). Disamping itu ada *thickness coupling factor*, kt, yang merupakan persamaan khusus untuk k_{33}, yang menyatakan hubungan antara medan listrik arah 3 dengan getaran mekanik pada arah yang sama. Faktor kt tersebut dikenal pula pada pelat *piezoelectric* yang memiliki dimensi permukaan yang relatif lebih besar dibandingkan dengan dimensi tebal. Elemen *piezoelectric* dengan bentuk ini memiliki frekuensi resonansi pada arah ketebalan yang lebih tinggi nilainya dibandingkan dengan frekuensi resonansi pada arah transversal (permukaan). Faktor kt lebih rendah daripada k_{33}, karena adanya kontraksi atau ekspansi pada tebal elemen sebagai akibat terjadinya getaran transversal dengan amplitudo besar pada frekuensi resonansi. Pada batang keramik langsing (thin rod, panjang > 10 x diameter) digunakan k_{31} untuk menyatakan faktor hubungan antara medan listrik pada arah 3 dengan getaran longitudinal pada arah 1, atau digunakan k_{33}

untuk menyatakan faktor hubungan antara medan listrik pada arah 3 dengan getaran longitudinal pada arah 3.

2.2.4.3 Voltase Bangkitan pada Piezoelectric Material [5]

Pada dasarnya voltase bangkitan yang dihasilkan *piezoelectric material* 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. Karena pergerakan dan perubahan jarak inilah yang menyebabkan munculnya beda tegangan yang dapat dimanfaatkan di berbagai aplikasi.

Akibat adanya perbedaan jarak, maka akan timbul beda potensial tegangan yang disebut *Pull-In Voltage*. Dimana besarnya *Pull-In Voltage* bergantung pada besarnya energi mekanik yang diterima material *piezo*, jenis material *piezo*, kapasitansi material *piezo*. Pengaruh tersebut dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$V = k_{31}\sqrt{\frac{2\,W_{mech}}{C}} \qquad (13)$$

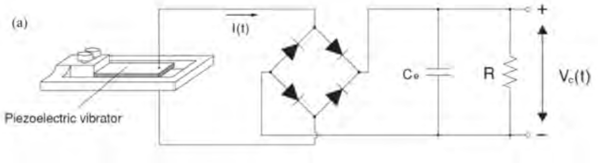
Dimana :
- V = Voltage (V)
- W_{mech} = Energi Mekanik (Joule)
- C = Kapasitansi Material (F)
- K_{31} = *Coupling Factor*

Sedangkan Kapasitansi dari *Piezoelectric* sendiri dirumuskan sebagai berikut :

$$C = \frac{\varepsilon 0 . \varepsilon r . A}{H_{PZT}} \qquad (14)$$

Dimana :
- C = kapasitansi (F)
- $\varepsilon 0$ = *permittivity* material
- εr = *Relative Permitivity* Material
- A = Luasan Material *Piezo* (m^2)
- H_{piezo} = Tebal Lapisan *Piezo* (m)

2.2.4.4 *Piezoelectric* Elemen [2]

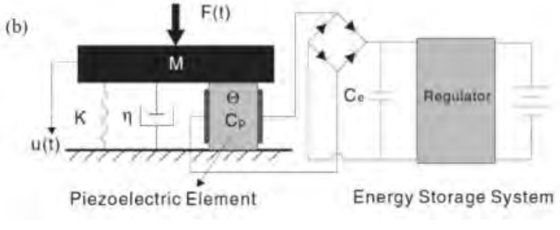


Gambar 2. 12 Elemen penyusun Piezoelectric [2]

Elemen-elemen penyusun *piezoelectric* cantilever beam, yaitu *piezoeletric*, beam, dan sistem penyimpanan energi. Pada penelitian ini digunakan hanya *piezoelectric*-nya saja yang dipasang pada mekanisme, sedangkan elemen penyimpanan pada *piezoelectric* pada penelitian ini tidak ditinjau.

2.2.4.5 Persamaan Gerak *Piezoelectric*

Sama seperti halnya material lainnya, *piezoelectric* memiliki massa, koefisien kekakuan dan koefisien redaman internal. Yang dimaksud dengan memiliki koefisien kekakuan dan redamana internal adalah *piezoelectric* diibaratkan memilki sistem seperti pada sistem suspensi. Maka dengan demikian diagram benda bebasnya bisa digambarkan sebagai berikut.



Gambar 2. 13 Free body diagram Piezoelectric [2]

Dengan mengacu pada diagram diatas maka mekanisme *piezoelectric* dapat disederhanakan menjadi [2]:

$$M\ddot{u}(t) + \eta\,\dot{u}(t) + Ku(t) + \Theta V_p = F(t) \qquad (15)$$

$$-\Theta\dot{u}(t) + C_p\dot{V}_p(t) = -I(t) \qquad \text{-}(16)$$

Dimana:

M = massa *Piezoelectric*
η = koefisien redaman *Piezoelectric*
K = koefisien kekakuan *Piezoelectric*
Θ = coupling faktor
V_p = voltase *Piezoelectric*
C_p = kapasitansi *Piezoelectric*
I = arus listrik pada *Piezoelectric*

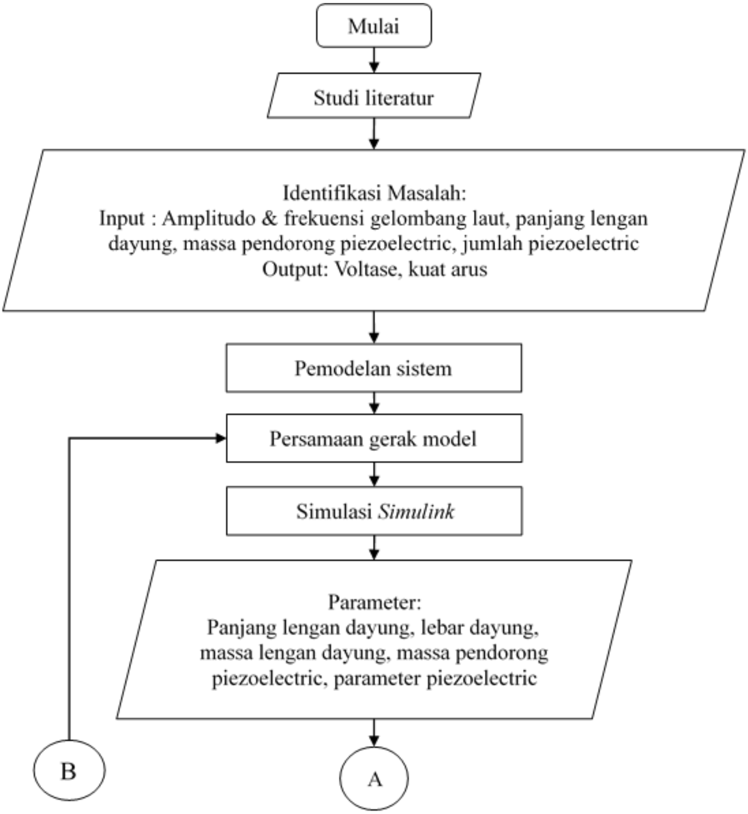
[Halaman ini sengaja dikosongkan]

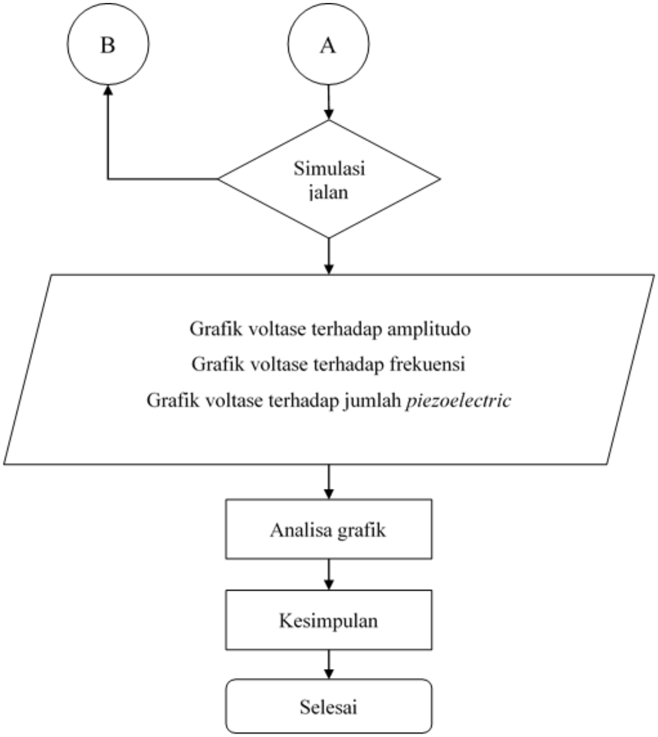
BAB III
METODOLOGI

3.1 Tahapan Penelitian

3.1.1 Diagram Alir

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





Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.1.2 Penjelasan Diagram Alir

Berikut adalah penjelasan diagram alir

1. Studi literatur
   Sebelum dilakukan penelitian, dilakukan studi mengenai literatur yang berkaitan dengan gelombang laut, mekanika getaran khususnya *multi degree of freedom*, bentuk dayung dan *piezoelectric*.
2. Indentifikasi masalah
   Input : Amplitudo dan frekuensi gelombang laut, panjang lengan dayung dan jumlah *piezoelectric*

Amplitude dan frekuensi gelombang laut mempengaruhi besar kecilnya energi gelombang laut yang didistribusikan kepada dayung, sehingga pada penelitian ini amplitudo gelombang laut divariasikan (0.04 m, 0.05 m, 0.05 m) dan variasi frekuensi (0.8 Hz, 1 Hz, 1.2 Hz). Sehingga dapat diketahui karakteristik listrik yang dihasilkan karena pengaruh amplitude dan frekuensi gelombang laut. Variasi jumlah *piezoelectric* (10 , 20 dan 30) , karena jumlah *piezoelectric* yang terpasang mempengaruhi energi bangkitan yang dihasilkan, dengan demikian jumlah *piezoelectric* yang ideal dapat diketahui sehingga dihasilkan energi listrik maksimum.

Output : Voltase dan kuat arus listrik

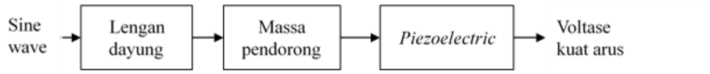
Output dari penelitian ini adalah besarnya voltase yang dihasilkan dan kuat arus yang terjadi. Sehingga dapat diketahui daya yang dihasilkan.

3. Pemodelan dari PLTGL sistem kayuh dayung-*piezoelectric*

   Pemodelan yang dilakukan pada PLTGL sistem kayuh dayung-piezoelectric *multi degree of freedom* dimulai dari memodelkan mekanisme dayung yang pengungkit, mekanisme *piezoelectric*.
4. Persamaan gerak

   Pada tahap ini model yang telah dirancang kemudian dianalisa persamaan geraknya melalui *free-body diagram* sampai ketahap *state variable*.
5. Simulasi simulink

   State variable yang didapatkan dari persamaan gerak dibuat blok diagram pada Simulink. Pada penelitian ini Simulasi terdiri dari 3 *subsystem* yaitu:

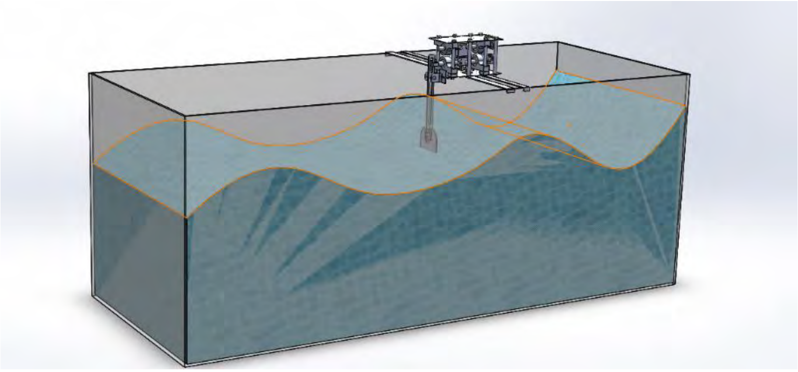


6. Simulasi Jalan
   Setelah melakukan pemodelan dan simulasi pada simulink, dilakukan *running* dari simulasi yang telah dibuat. Pada simulasi apabila sudah berjalan tanpa ada kesalahan dilanjutkan dengan variasi amplitudo (0.04 m, 0.05 m, 0.08 m, 0.06 m) dan variasi frekuensi (0.8 Hz, 1.2 Hz, 1.2 Hz) ,dan variasi jumlah *piezoelectric* (10 , 20 dan 30). Jika simulasi masih terdapat kesalahan dan belum bisa di-*running* maka dilakukan pengecekan pada persamaan gerak.
7. Grafik respon voltase terhadap variasi
   Dari hasil yang didapat yaitu voltase bangkitan, diplot kedalam grafik. Grafik tersebut membandingankan voltase bangkitan yang dihasilkan dengan variasi parameter. Ada empat grafik yang akan dianalisa yaitu grafik voltase terhadap frekuensi gelombang laut, grafik voltase terhadap amplitudo gelombang laut, grafik voltase terhadap jumlah piezoelectric.
8. Analisa grafik
   Pada grafik yang didapat pada proses simulasi, dilakukan analisa pengaruh perubahan parameter terhadap perubahan voltase.
9. Kesimpulan
   Dari hasil analisa grafik disimpulkan tentang pengaruh beberapa parameter terhadap voltase bangkitan, dan diketahui parameter yang paling besar pengaruhnya terhadap voltase yang dihasilkan.

3.2 Rancangan Pemodelan
3.2.1 Perancangan Mekanisme

Dalam perancangan ini hanya merancang tentang mekanisme dayung dan *piezoelectric*. Perancangan PLTGL sistem kayuh dayung-*piezoelectric* disesuaikan dengan skala laboratorium sehingga dapat terinstal pada kolam gelombang laut buatan yang terdapat di laboratorium vibrasi dan sistem dinamis. Perancangan model dilakukan dengan menggunakan *software Solidworks 2015* sehingga dapat ditampilkan hasil perancangan PLTGL sistem kayuh dayung-*piezoelectric* sebagai berikut.

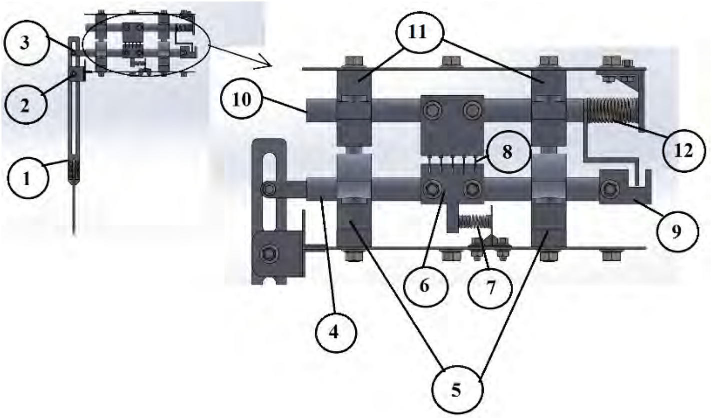
Dimensi dari PLTGL tipe kayuh dayung-piezoelectric ini



Gambar 3.2 Instalasi PLTGL sistem kayuh dayung-piezoelectric pada kolam

memiliki panjang 30 cm, lebar 15 cm, dan tinggi chassis 15.5 cm, serta panjang lengan dayung total 53 cm. Sehingga dapat diperkirakan jika diinstal pada kolam buatan seperti pada gambar 3.2.

3.2.1.1 Prinsip Kerja Mekanisme



Gambar 3.3 Mekanisme PLTGL sistem kayuh dayung-piezoelectric

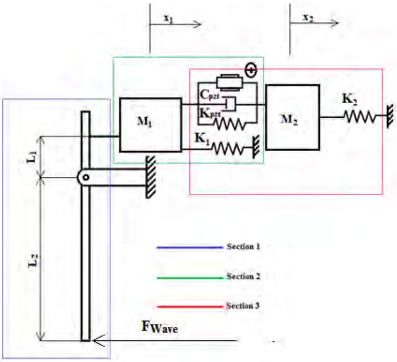
Keterangan gambar :

1. Batang dayung
2. Poros pengungkit dayung
3. Poros transmisi
4. Poros pendorong massa
5. Bantalan slider
6. Massa pendorong *piezoelectric*
7. Spring pembalik *piezoelectric*
8. Piezoelectric
9. Stopper pengaman *piezoelectric*
10. Poros pengaman *piezoelectric*
11. Bantalan poros pengaman *piezoelectric*
12. Spring pengaman *piezoelectric*

Prinsip kerja pembangkit listrik tenaga gelombang laut sistem kayuh dayung-*piezoelectric* adalah dengan memanfaatkan gaya horizontal gelombang. Pada saat gelombang menyentuh permukaan dayung maka dayung akan bergerak memutar dan poros pengungkit akan menggeser poros transmisi. Poros transmisi yang bergerak horizontal akan mendorong poros pendorong massa, dipasang dua bantalan *slider* agar poros pendorong massa bergerak secara horizontal sempurna. Setelah poros pendorong bergerak, poros tersebut akan menggerakkan massa yang menghimpit *piezoelectric*. Gaya yang diberikan massa pendorong akan membuat *piezoelectric* defleksi. Defleksi yang terjadi pada *piezoelectric* akan menghasilkan energi listrik. Defleksi maksimum *piezoelectric* yang diizinkan dalam perancangan PLTGL inia adalah 6 mm. Sehingga diperlukan mekanisme tambahan. Ketika massa pendorong bergerak lebih dari 6 mm maka stopper pengaman *piezoelectric* akan mendorong poros slider tempat dipasangnya *piezoelectric*. Pada saat pergerakan massa pendorong lebih dari 6 mm, *piezoelectric* akan bergerak mengikuti arah massa pendorong.

3.2.2 Persamaan Gerak Model

Pada penelitian ini free body diagram dapat digambarkan sebagai berikut:

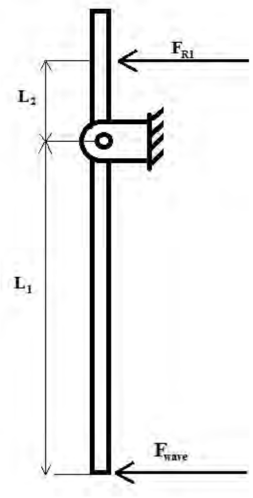


Gambar 3.4 Free body diagram lengkap

Dapat dilihat pada gambar 3.4 bahwa free body diagram secara lengkap PLTGL tipe kayuh dayung-*piezoelectric*, terdapat 3 section yang akan dirinci. Section pertama yaitu section pengaruh panjang lengan dayung dan inersia dayung, section kedua adalah bagian harvesting energy terdapat massa pendorong dan elemen piezoelectric, dimana *piezoelectric*-nya sendiri disimbolkan dengan *stiffness*, *damping coefficient*, dan *coupling factor.* Dan section 3 adalah bagian pengamanan piezoelectric ketika defleksi dari piezoelectric lebih dari 6 mm.

Free Body Diagram Section 1

Untuk mengetahui momen inersia pada section satu akan lebih mudah dengan membuat free body diagram. Pada *free body diagram section 1* dapat dilihat pada gambar 3.5



Gambar 3.5 Free body diagram section 1

L2 = 56 mm

L1 = 330 mm

L = 530 mm

$$\sum M = (J_o + md^2)\,\ddot{\theta}$$

$$F_{Wave}L_1 - F_{R1}L_2 = (\frac{1}{12}mL^2 + md^2)\ddot{\theta}$$

$$F_{Wave}0.33 - F_{R1}0.056 = \left((\frac{1}{12}0.28773x0.53^2) + (0.28773x0.24^2)\right)\ddot{\theta}$$

Dimana :

$$\ddot{\theta} = \frac{\ddot{x}_1}{L_2}$$

Maka F_{R1} dapat dihitung :

$$0.056F_r = 0.33F_{Wave} - \left(\left(\frac{1}{12} 0.28773x0.53^2\right) + \left(0.28773x0.24^2\right) \right) \frac{\ddot{x}_1}{0.056}$$

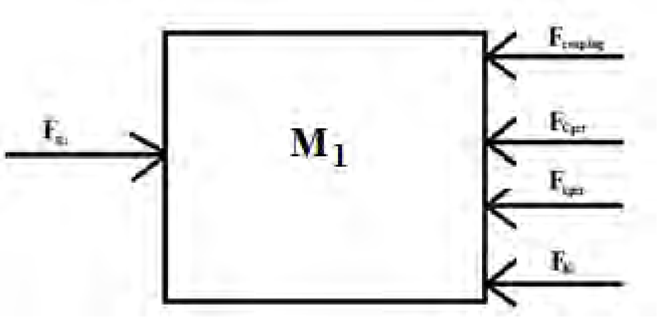
$$0.056F_r = 0.33F_{Wave} - \left(\left(\frac{1}{12} 0.28773x0.53^2\right) + \left(0.28773x0.24^2\right) \right) \frac{\ddot{x}_1}{0.056}$$

$$0.056F_r = 0.33F_{Wave} - 0.416\ddot{x}_1$$

$$F_r = 5.893F_{Wave} - 7.43179\ddot{x}_1$$

Pada *section* satu dapat diketahui bahwa gaya reaksi pada poros pendorong sebagai fungsi F_{wave}. Sehingga pada proses perhitungan selanjutnya akan lebih mudah untuk mensubstitusikan,

Free Body Diagram Section 2



Gambar 3.6 free-body diagram untuk massa pendorong

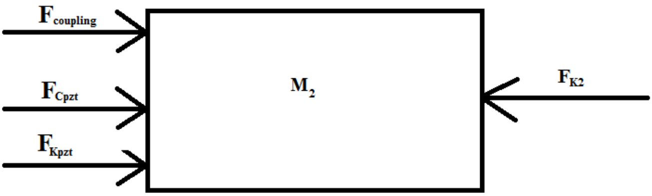
$$F_{R1} - F_{K1} - F_{Kpzt} - F_{Cpzt} = M_1\ddot{x}_1$$

$$5.893F_{Wave} - 7.43179\ddot{x}_1 - 0.38956\ddot{x}_1 - K_1x_1 - K_{pzt}(x_1 - x_2) - C_{pzt}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) = 0$$

$$5.893F_{Wave} = 7.43179\ddot{x}_1 + 0.38956\ddot{x}_1 + (K_1 + K_{pzt})x_1 - K_{pzt}x_2 + C_{pzt}\dot{x}_1 - C_{pzt}\dot{x}_2 = 0$$

$5.893F_{Wave} = 7.82135\ddot{x}_1 + (K_1 + K_{pzt})x_1 - K_{pzt}x_2 + C_{pzt}\dot{x}_1 - C_{pzt}\dot{x}_2 = 0$ (1)

Free Body Diagram Section 3



Gambar 3.7 Free body diagram section 3

$F_{Kpzt} + F_{Cpzt} + F_{coupling} - F_{K2} = M_2\ddot{x}_2$
$K_{pzt}(x_1 - x_2) + C_{pzt}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + \Theta V_p - K_2x_2 = M_2\ddot{x}_2$
$K_{pzt}(x_1 - x_2) + C_{pzt}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + \Theta V_p - K_2x_2 - M_2\ddot{x}_2 = 0$
(2)

Persamaan Gerak Model
$5.893F_{Wave} = 7.82135\ddot{x}_1 + (K_1 + K_{pzt})x_1 - K_{pzt}x_2 + C_{pzt}\dot{x}_1 - C_{pzt}\dot{x}_2 = 0$ (1)
$K_{pzt}(x_1 - x_2) + C_{pzt}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + \Theta V_p - K_2x_2 - M_2\ddot{x}_2 = 0$
(2)
$-\Theta\dot{u}(t) + C_p\dot{V}_p(t) = -I(t)$
(3)

3.3 Persamaan Piezoelectric

Salah satu output *piezoelectric* adalah voltase. Voltase dalam persamaan *piezoelectric* adalah sebagi berikut:

$V = \mathbf{\Theta}\sqrt{\frac{2\,.\,Wmech}{C}}$

Dimana :

$W_{Mech} = \Theta V_p . x_1$

$$C = \frac{\varepsilon 0.\varepsilon r.A}{H_{piezo}}$$

Dimana :

C	= kapasitansi (F)
$\varepsilon 0$	= *permittivity* material
εr	= *Relative Permitivity* Material
A	= Luasan Material *Piezo* (m^2)
H_{piezo}	= Tebal Lapisan *Piezo* (m)

Dan arus listrik yang terjadi dianalisa dengan rumus :

$$-\Theta \dot{u}(t) + C_p \dot{V}_p(t) = -I(t)$$

Dimana :

Θ	= Coupling faktor
$\dot{u}$	= Kecepatan defleksi *piezoelectric*
V_p	= Voltase *Piezoelectric*
C_p	= Kapasitansi *Piezoelectric*
I	= Arus listrik pada *Piezoelectric*

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB IV
ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dianalisa dan dibahas secara teoritis tentang voltase bangkitan yang dihasilkan oleh pembangkit listrik tenaga gelombang laut (PLTGL) *piezoelectric* tipe kayuh dayung. Penelitian ini dilakukan dengan melakukan proses simulasi menggunakan software Simulink Matlab 2014.

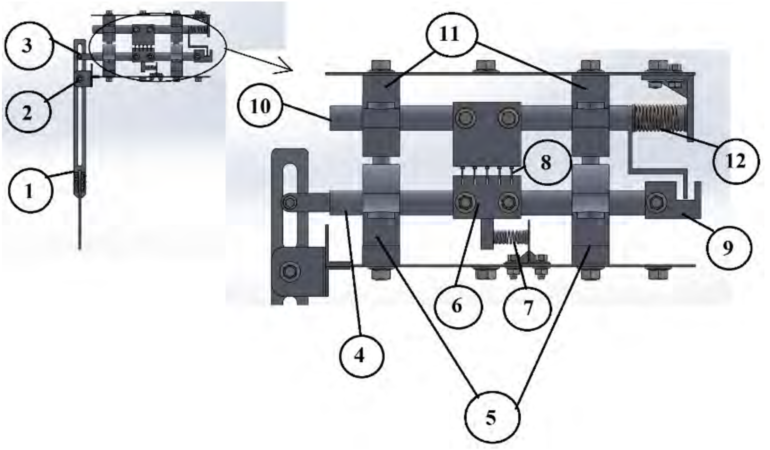
4.1 Data dan Spesifikasi alat pada proses Simulasi

4.1.1 Spesifikasi alat

- *Piezoelectic* (MiniSense 100)
- Kapasitansi *Piezoelectric* (C) = 244 Pf
- *Electromechanical coupling factor*(k_{31})=12 %
- Perpindahan *Piezoelectric* (Xp) = 6 mm
- Rangkaian *Piezoelectric* = Paralel
- Konstanta Pegas *Piezoelectric* (kp) = 17,5 N/m
- Konstanta damping *Piezoelectric* (Cp) = 0.00065 N.s/m
- Massa *Piezoelectric* (mp) = 0.6 gram
- Spesifikasi PLTGL kayuh-dayung
- Massa pendorong = 389. 56 gram
- Massa dayung = 287.73 gram
- Lebar dayung = 0.13 m
- Konstanta Pegas 1 = 200 N/m
- Konstanta Pegas 2 = 1000 N/m

4.1.2 Mekanisme Alat

Untuk dapat memahami prinsip kerja alat, berikut adalah gambar dari mekanisme pembangkit listrik tenaga gelombang laut type dayung-*piezoelectric*.



Gambar 4.1 Mekanisme PLTGL type kayuh dayung-piezoelectric

Keterangan gambar :

1. Batang dayung
2. Poros pengungkit dayung
3. Poros transmisi
4. Poros pendorong massa
5. Bantalan slider
6. Massa pendorong *piezoelectric*
7. Spring pembalik *piezoelectric* (pegas 1)
8. *Piezoelectric*
9. Stopper pengaman *piezoelectric*
10. Poros pengaman *piezoelectric*
11. Bantalan poros pengaman *piezoelectric*
12. Spring pengaman *piezoelectric* (pegas 2)

Prinsip kerja pembangkit listrik tenaga gelombang laut sistem kayuh dayung-*piezoelectric* adalah dengan memanfaatkan gaya horizontal gelombang. Pada saat gelombang menyentuh permukaan dayung maka dayung akan bergerak memutar dan poros pengungkit akan menggeser poros transmisi. Poros transmisi yang bergerak horizontal akan mendorong poros pendorong massa,

dipasang dua bantalan *slider* agar poros pendorong massa bergerak secara horizontal sempurna. Setelah poros pendorong bergerak, poros tersebut akan menggerakkan massa yang menghimpit *piezoelectric*. Gaya yang diberikan massa pendorong akan membuat *piezoelectric* defleksi. Defleksi yang terjadi pada *piezoelectric* akan menghasilkan energi listrik. Defleksi maksimum *piezoelectric* yang diizinkan dalam perancangan PLTGL inia adalah 6 mm. Sehingga diperlukan mekanisme tambahan. Ketika massa pendorong bergerak lebih dari 6 mm maka stopper pengaman *piezoelectric* akan mendorong poros slider tempat dipasangnya *piezoelectric*. Pada saat pergerakan massa pendorong lebih dari 6 mm, *piezoelectric* akan bergerak mengikuti arah massa pendorong.

4.2 Analisa

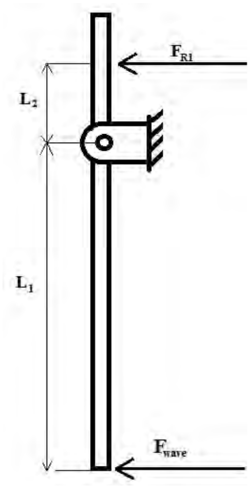
Pada penelitian ini dilakukan simulasi tentang karakteristik energi listrik yang dihasilkan oleh mekanisme pembangkit listrik tenaga gelombang laut tipe kayuh dayung-*piezoelectric*. proses simulasi dilakukan dengan menggunakan software simulink matlab 2014 dan terlebih dahulu memodelkan mekanisme menggunakan software solidwork 2015.

4.2.1 Karakteristik Gelombang Laut

Gelombang laut yang disimulasikan adalah gelombang buatan yang tedapat pada laboratorium vibrasi dan sistem dinamis. Pemodelan dengan menggunakan gelombang laut buatan bertujuan agar pada penelitian selanjutnya hasil dari karakteristk energi yang dihasilkan dapat divalidasi dengan metode eksperimen. Karakter gelombang laut buatan yang terdapat pada laboratorium vibrasi dan sistem dinamis merupakan karakter representatif yang menggambarkan gelombang laut secara sederhana. Tinggi gelombang yang dihasilkan gelombang laut buatan berkisar antara 4 cm hingga 10 cm, dan frekuensi gelombang berkisar 0.8 hingga 1.2 Hz. Dengan demikian pemodelan pada penelitian ini mengacu pada parameter yang mendekati parameter gelombang laut buatan.

4.2.2 Karakteristik Gaya Yang Dihasilkan Mekanisme

Karakteristik gaya yang dihasilkan mekanisme merupakan gaya yang mendorong *piezoelectric* yang ditransmisikan melalui massa, dengan mekanisme sebagai berikut:



L2 = 56 mm
L1 = 330 mm
L = 530 mm

$$\sum M = (J_o + md^2)\,\ddot{\theta}$$

$$F_{Wave}L_1 - F_{R1}L_2 = (\frac{1}{12}mL^2 + md^2)\ddot{\theta}$$

$$F_{Wave}0.33 - F_{R1}0.056 = \left((\frac{1}{12}0.28773x0.53^2) + (0.28773x0.24^2)\right)\ddot{\theta}$$

Gambar 4.2 free-body diagram untuk lengan dayung

Dimana : $\ddot{\theta} = \frac{\ddot{x}_1}{L_2}$

$$F_{Wave}0.33 - F_{R1}0.056 = \left((\frac{1}{12}0.28773x0.53^2) + (0.28773x0.24^2)\right)\frac{\ddot{x}_1}{0.056}$$

Maka F_{R1} dapat dihitung :

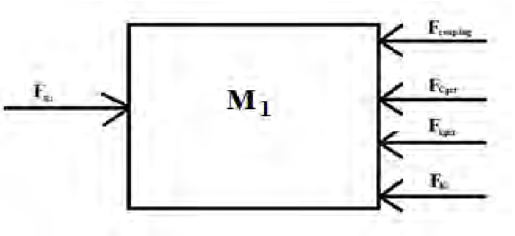
$$0.056F_r = 0.33F_{Wave} - \left((\frac{1}{12}0.28773x0.53^2) + (0.28773x0.24^2)\right)\frac{\ddot{x}_1}{0.056}$$

$$0.056F_r = 0.33F_{Wave} - \left((\frac{1}{12}0.28773x0.53^2) + (0.28773x0.24^2)\right)\frac{\ddot{x}_1}{0.056}$$

$$0.056F_r = 0.33F_{Wave} - 0.416\ddot{x}_1$$

$$F_r = 5.893F_{Wave} - 7.43179\ddot{x}_1$$

Gaya reaksi tersebut kemudian mendorong massa pendorong,



Gambar 4.3 free-body diagram untuk massa

sehingga persamaannya menjadi:

$$F_{R1} - F_{K1} - F_{Kpzt} - F_{Cpzt} = M_1 \ddot{x}_1$$

$$5.893 F_{Wave} - 7.43179 \ddot{x}_1 - 0.38956 \ddot{x}_1 - K_1 x_1 - K_{pzt}(x_1 - x_2)$$
$$- C_{pzt}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) = 0$$

$$5.893 F_{Wave} = 7.82135 \ddot{x}_1 + (K_1 + K_{pzt}) x_1 - K_{pzt} x_2 + C_{pzt} \dot{x}_1 -$$
$$C_{pzt} \dot{x}_2 = 0 \qquad (1)$$

Maka, F_{wave} yang ditransmisikan sebesar:

$$F = 5.893 \frac{\rho \; g \; H^2 \; b}{16}$$

Dengan memvariasikan ketinggian gelombang yaitu 4 cm 5 cm, dan 6cm dan frekuensi gelombang sebesar 0.8 Hz, 1 Hz, dan 1.2 Hz maka:

$$F_1 = 5.893 \frac{1000 \; 9.81 \; 0.04^2 \; 0.13}{16}$$

$$F_1 = 0.7515 \text{ N}$$

$$F_2 = 5.893 \frac{1000 \; 9.81 \; 0.05^2 \; 0.13}{16}$$

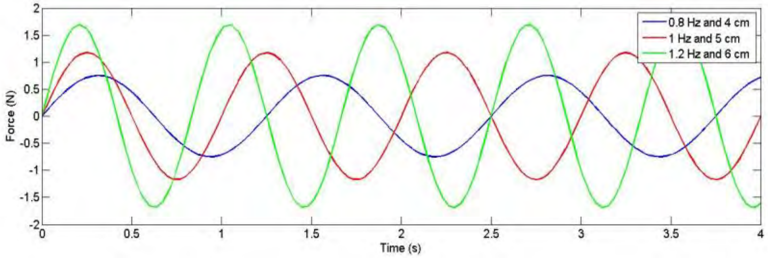
$$F_2 = 1.1742 \text{ N}$$

$$F_3 = 5.893 \frac{1000 \; 9.81 \; 0.06^2 \; 0.13}{16}$$

$$F_3 = 1.691 \text{N}$$

Dengan melakukan simulasi pada simulink matlab dapat dilihat pada gambar, dibawah ini:

Pada grafik dapat dilihat bahwa karakteristik gaya yang ditransmisikan oleh sistem berbeda-beda. Pada variasi tinggi gelombang 4 cm dan frekuensi 0.8 Hz ditandai oleh gelombang yang berwarna biru, gaya yang ditransmisikan paling kecil, demikian juga frekuensinya juga paling kecil, pada garis berwarna



Gambar 4.4 Gaya yang dihasilkan mekanisme PLTGL type kayuh dayung-piezoelectric

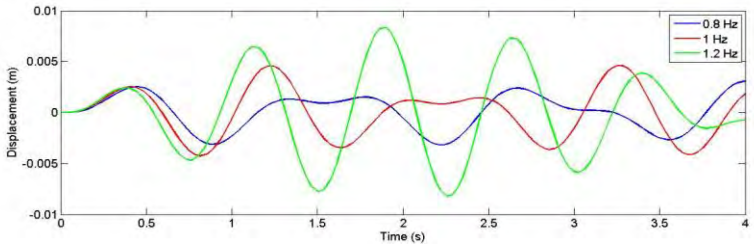
merah dilakukan variasi pada tinggi gelombang 5 cm dan frekuensi 1 Hz, gaya yang terjadi sebesar 1.1742 N. Gaya yang paling besar yaitu 1.691N dihasilkan pada ketinggian gelombang 6 cm dan frekuensi 1.2 Hz sehingga terlihat jelas bahwa semakin tinggi gelombang, semakin tinggi gaya tersebut terjadi, dan semakin besar frekuensi semakin banyak jumlah amplitudo gelombang terjadi. Kenaikan gaya gelombang karena pengaruh kenaikan ketinggian gelombang sesuai dengan formulasi pada gaya gelombang yaitu $F = \frac{\rho\, g\, H^2\, b}{16}$, dengan demikian kenaikan gaya gelombang sesuai dengan teori.

4.2.3 Karakteristik Respon Dinamis *Piezoelectric*

4.2.3.1 Karakteristik Displacement Massa Pendorong *Piezoelectric*

Setelah mendapatkan nilai gaya yang dihasilkan gelombang, kemudian pada subbab ini akan dimodelkan satu contoh analisa perpindahan massa pendorong dengan variasi frekuensi, variasi tinggi gelombang dan jumlah *piezoelectric*.

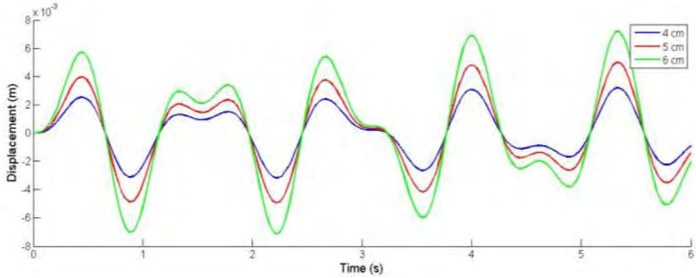
*ai*Pertama disimulasikan perpindahan dengan variasi frekuensi yaitu 0.8 Hz, 1 Hz dan 1.2 Hz pada tinggi gelombang 4 cm dan jumlah *piezoelectric* 20.



Gambar 4.5 Grafik perpindahan massa pendorong dengan variasi frekuensi gelombang

Dari hasil simulasi, dapat dilihat gambar 4.5 didapatkan hasil untuk masing-masing frekuensinya yaitu 0.8 Hz, 1 Hz, dan 1.2 besarnya perpindahan (rms) adalah 1.4 mm, 1.8 mm dan 3.1 mm. Dari hasil tersebut didapatkan bahwa perpindahan terbesar didapatkan pada frekuensi 1.2 Hz, dan perpindahan terkecil didapatkan pada frekuensi 0.8 Hz

Selanjutnya disimulasikan perpindahan dengan variasi

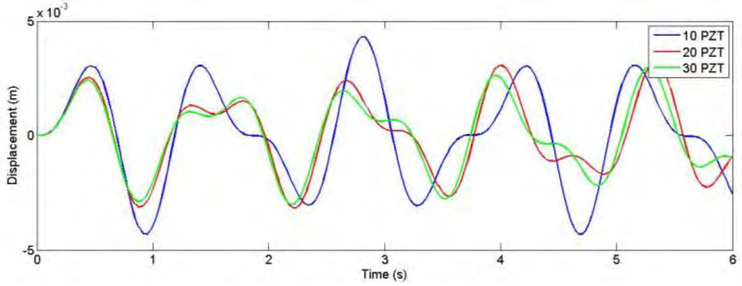


Gambar 4.6 Grafik perpindahan massa pendorong dengan variasi tinggi gelombang

tinggi gelombang 4 cm, 5 cm dan 6 cm, dengan frekuensi gelombang 0.8 Hz dan jumlah *piezoelectric* 20. Hasil dari proses simulasi ini dapat dilihat pada gambar 4.6.

Pada gambar 4.6 dapat dilihat bahwa *trendline* perpindahan naik seiring dengan naiknya tinggi gelombang, hasil yang didapatkan pada simulasi dengan masing-masing tinggi gelombang 4 cm, 5 cm, dan 6 cm adalah 1.4 mm, 2.1 mm, dan 3,1 mm. Dari hasil tersebut didapatkan perpindahan tertinggi pada tinggi gelombang 6 cm, dan hasil terendah pada tinggi gelombang 4 cm.

Setelah memvariasikan tinggi gelombang, kemudian disimulasikan perpindahan massa pendorong dengan variasi jumlah *piezoelectric*, jumlah *piezoelectric* yang divariasikan yaitu 10, 20 dan 30 *piezoelectric*, dengan masing-masing disimulasikan pada tinggi gelombang 4 cm dan frekuensi 0.8 Hz.



Gambar 4.7 Grafik perpindahan massa pendorong dengan variasi jumlah

Dari hasil proses simulasi dengan memvariasikan jumlah *piezoelectric* yang ditampilkan pada gambar 4.7, didapatkan *trendline* yang menurun. Pada jumlah *piezoelectric* 10 didapatkan perpindahan 2.5 mm, pada jumlah *piezoelectric* 20 didapatkan perpindahan massa pendorong sebesar 1.4 mm, dan pada jumlah *piezoelectric* sebanyak 30 didapatkan perpindahan massa pendorong sebesar 0.92 mm. Hasil terbesar didapatkan pada

jumlah *piezoelectric* sebanyak 10, sedangkan hasil terkecil didapatkan pada jumlah *piezoelectric* 10.

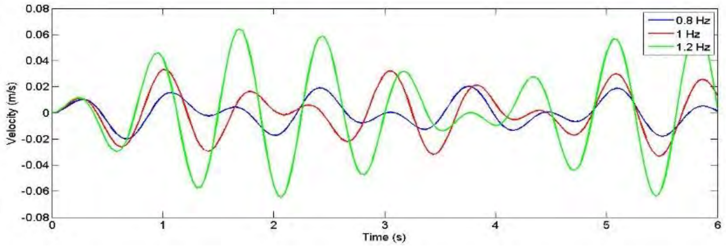
Untuk kenaikan besar displacement massa pendorong hal ini dikarenakan kenaikan gaya yang terjadi akibat tinggi gelombang mempengaruhi besarnya gaya gelombang. Semakin tinggi gaya gelombang semakin tinggi displacement diciptapakan, hal ini sesuai dengan rumus $F = \frac{\rho\, g\, H^2\, b}{16}$. Sedangkan untuk kenaikan displacement karena pengaruh frekuensi adalah frekuensi sangat berpengaruh terhadap daya yang dihasilkan, yaitu $P = \frac{E}{T}$

Diamana E adalah energi kinetik, sehingga semakin besar frekuensi yang diberikan , semakin besar energi yang dihasilkan, maka semakin besar displacement terjadi. Namun jika *piezoelectric* bertambah, maka kekakuan dari mekanisme bertambah sehingga sistem akan sulit terdorong.

4.2.3.2 Karakteristik Kecepatan Massa Pendorong *Piezoelectric*

Karakteristik kecepatan massa pendorong *piezoelectric* dipengaruhi oleh gaya gelombang yang terjadi, gaya gelombang dipengaruhi oleh ketinggian gelombang dan frekuensi gelombang. Berikut analisa tentang kecepatan defleksi dari *piezoelectric*

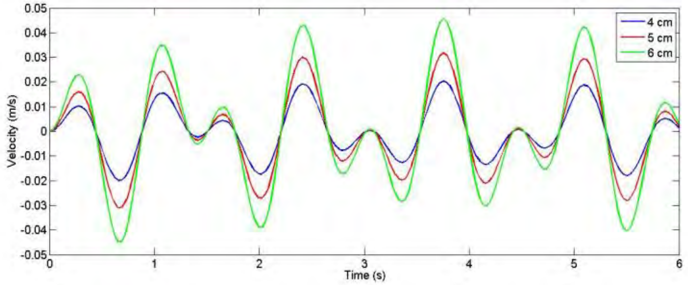
Pertama disimulasikan kecepatan deflekesi *piezoelectric* dengan variasi frekuensi yaitu 0.8 Hz, 1 Hz dan 1.2 Hz pada tinggi gelombang 4 cm dan jumlah *piezoelectric* 20.



Gambar 4.8 Grafik kecepatan massa pendorong dengan variasi frekuensi gelombang

Dari hasil simulasi, dapat dilihat gambar 4.8 didapatkan hasil untuk masing-masing frekuensinya yaitu 0.8 Hz, 1 Hz, dan 1.2 besarnya kecepatan (rms) adalah 10.6 mm/s, 17.6 mm/s dan 33.9 mm/s. Dari hasil tersebut didapatkan bahwa kecepatan terbesar didapatkan pada frekuensi 1.2 Hz, dan perpidahan terkecil didapatkan pada frekuensi 0.8 Hz

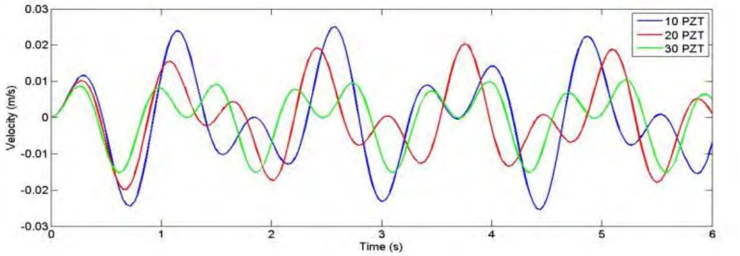
Selanjutnya disimulasikan kecepatan massa pendorong dengan variasi tinggi gelombang 4 cm, 5 cm dan 6 cm, dengan frekuensi gelombang 0.8 Hz dan jumlah *piezoelectric* 20. Hasil dari dari proses simulasi ini dapat dilihat pada gambar 4.9.



Gambar 4.9 Grafik kecepatan massa pendorong dengan variasi tinggi gelombang

Pada gambar 4.9 dapat dilihat bahwa *trendline* perpindahan naik seiring dengan naiknya tinggi gelombang, hasil yang didapatkan pada simulasi dengan masing-masing tinggi gelombang 4 cm, 5 cm, dan 6 cm adalah 10.6 mm/s, 16.5 mm/s, dan 23.3 mm/s. Dari hasil tersebut didapatkan perpindahan tertinggi pada tinggi gelombang 6 cm, dan hasil terendah pada tinggi gelombang 4 cm.

Setelah memvariasikan tinggi gelombang, kemudian disimulasikan perpindahan massa pendorong dengan variasi jumlah *piezoelectric*, jumlah *piezoelectric* yang divariasikan yaitu 10, 20 dan 30 *piezoelectric*, dengan masing-masing disimulasikan pada tinggi gelombang 4 cm dan frekuensi 0.8 Hz.



Gambar 4.10 Grafik kecepatan massa pendorong dengan variasi jumlah piezoelectric

Dari hasil proses simulasi dengan memvariasikan jumlah *piezoelectric* yang ditampilkan pada gambar 4.10, didapatkan *trendline* yang menurun. Pada jumlah *piezoelectric* 10 didapatkan kecepatan massa pendorong sebesar 19.6 mm/s, pada jumlah *piezoelectric* 20 didapatkan kecepatan massa pendorong sebesar 10.6 mm/s, dan pada jumlah *piezoelectric* sebanyak 30 didapatkan kecepatan massa pendorong sebesar 7.3 mm/s. Hasil terbesar didapatkan pada jumlah *piezoelectric* sebanyak 10, sedangkan hasil terkecil didapatkan pada jumlah *piezoelectric* 10.

Seperti halnya pada displacement, kecepatan defleksi *piezoelectric* sangat terpengaruh frekuesni gelombang, karena semakin besar frekuensi maka akan semakin besar daya ombak yang dihasilkan, seperti pada rumus $P = \frac{E}{T}$, dengan demikian bahwa kenaikan kecepatan massa pendorong karena pengaruh frekuensi sesuai dengan teori yang ada. Kemudian penyebab lain dari terjadinya peningkatan kecepatan massa pendorong adalah tinggi gelombang, jika tinggi gelombang besar, maka akan dihasilkan gaya ombak yang besar, dan jika gaya besar maka menyebabkan kecepatan massa pendorong juga semakin besar, hal ini tertera pada rumus $F = \frac{\rho\, g\, H^2\, b}{16}$. Dengan demikian, bahwa kenaikan kecepatan sangat dipengaruhi tinggi gelombang. Namun ketika jumlah *piezoelectric* bertambah, maka mekanisme

akan semakin kaku, sehingga akan sulit *piezoelectric* terdefleksi, dan kecepatan defleksi dari *piezoelectric* akan semakin kecil.

Tabel 4.1 Tabel Data perpindahan dan kecepatan massa pendorong *piezoelectric* dengan variasi frekuensi, tinggi gelombang dan jumlah PZT

PZT	H (m)	f (Hz)	x-RMS (mm)	v-RMS (m/s)
10	0.04	0.8	2.5	0.0196
		1	4.5	0.0398
		1.2	7.8	0.1557
	0.05	0.8	3.9	0.0305
		1	7.1	0.0619
		1.2	12.1	0.2433
	0.06	0.8	5.7	0.0443
		1	10.3	0.0891
		1.2	17.5	0.3530
20	0.04	0.8	1.4	0.0106
		1	1.8	0.0176
		1.2	3.1	0.0339
	0.05	0.8	2.1	0.0165
		1	2.8	0.0276
		1.2	4.8	0.0529
	0.06	0.8	3.1	0.0233
		1	4.1	0.0399
		1.2	6.8	0.0769
30	0.04	0.8	0.9	0.0073
		1	1.1	0.0109
		1.2	1.5	0.0172
	0.05	0.8	1.5	0.0113

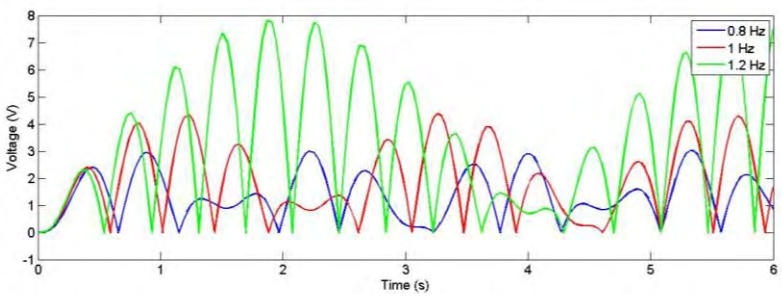
		1	1.8	0.0171
		1.2	2.4	0.0269
	0.06	0.8	2.6	0.0164
		1	2.1	0.0245
		1.2	3.4	0.0387

4.2.4 Karakteristik Energi Listrik Yang Dihasilkan

Energi listrik yang dihasilkan mekanisme, dianalisa dengan memodelkan voltase, kuat arus listrik dan daya listrik yang dihasilkan. Pemodelan dilakukan dengan memvariasikan tinggi gelombang, frekuesi gelombang, dan jumlah *piezoelectric*.

4.2.4.1 Voltase Yang Dihasilkan Mekanisme

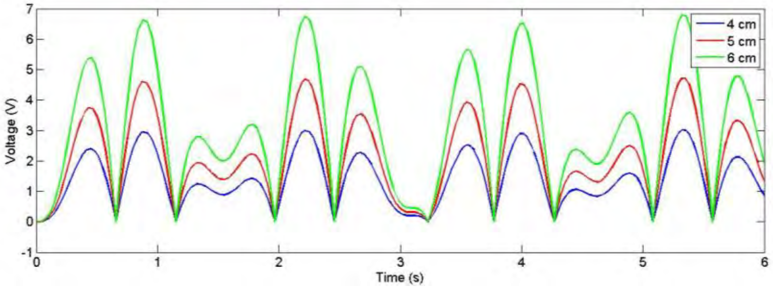
Pertama dilakukan analisa voltase yang dihasilkan dengan memvariasikan frekuensi gelombang, yaitu 0.8 Hz, 1 Hz, dan 1.2 Hz. Pada proses simulasi, tinggi gelombang yang dimodelkan adalah 4 cm dan jumlah *piezoelectric* sebanyak 20.



Gambar 4.11 Grafik voltase dengan variasi frekuensi gelombang

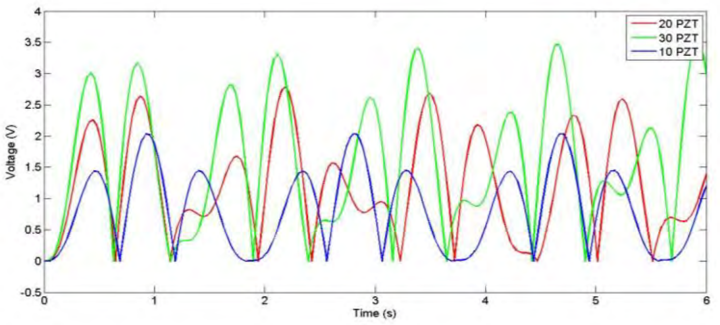
Pada gambar 4.11 didapatkan hasil dengan *trendline* kenaikan voltase sebanding dengan kenaikan frekuensi gelombang. Hasil RMS voltase dari masing-masing frekuensi 0.8 Hz, 1 Hz dan 1.2 Hz adalah 1.31 V, 1.79 V, dan 3.01 V. hasil tertinggi didapatkan pada frekuensi gelombang 1.2 Hz, dan hasil terendah didapatkan pada frekuensi gelombang sebesar 0.8 Hz.

Kemudian selanjutnya disimulasikan voltase dengan variasi tinggi gelombang. Tinggi gelombang yang divariasikan yaitu 4 cm, 5 cm dan 6 cm. Dengan menetapkan frekuensi gelombang sebesar 0.8 Hz, dan jumlah *piezoelectric* 20. Hasil dari proses simulasi dapat dilihat pada gambar 4.12.



Gambar 4.12 Grafik voltase dengan variasi tinggi gelombang

Hasil dari proses simulasi dengan memvariasikan tinggi gelombang didapatkan hasil dengan *trendline* kenaikan voltase sebanding dengan tinggi gelombang. Hasil dari masing-masing variasi tinggi gelombang 4 cm, 5 cm, dan 6 cm yaitu 1.31 V, 2.05 V, 2.95 V. Voltase yang didapatkan adalah nilai voltase RMS dari grafik voltase yang sinusoidal. Voltase terbesar didapatkan pada tinggi gelombang 6 cm, dan voltase terkecil didapatkan pada tinggi gelombang 4 cm.



Gambar 4.13 Grafik voltase dengan variasi jumlah piezoelectric

Pada gambar 4.13 divariasikan jumlah *piezoelectric* sebanyak 10 buah, 20 buah dan 30 buah. Dengan mengatur tinggi gelombang sebesar 4 cm, dan frekuensi gelombang 0.8 Hz. *Trendline* yang dihasilkan pada simulasi dengan memodelkan jumlah *piezoelectric* cenderung naik, kenaikan voltase yang dihasilkan sebanding kenaikan jumlah *piezoelectric*. Voltase yang dihasilkan dari masing-masing jumlah *piezoelectric*, 10 buah, 20 buah dan 30 buah yaitu 1.24 V, 1.31 V, 1.38 V. RMS Voltase terbesar didapatkan pada jumlah *piezoelectric* sebanyak 30 buah, dan RMS voltase terkecil didapatkan pada jumlah *piezoelectric* sebanyak 10 buah.

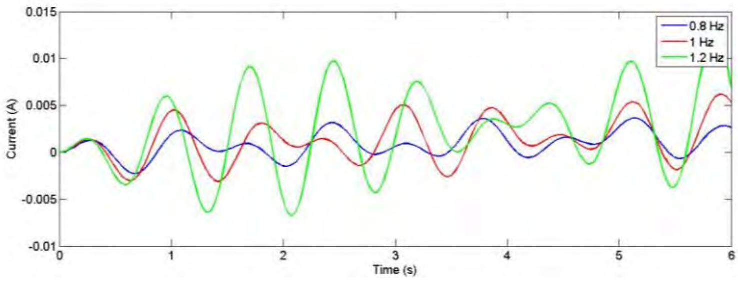
Ketika ketinggian gelombang dan frekuensi meningkat, maka akan semakin besar defleksi yang dihasilkan, defleksi yang dihasilkan semakin besar maka akan memperbesar energi mekanik yang terjadi pada *piezoelectric*, energi mekanik akan sebanding dengan voltase yang dihasilkan seperti pada rumus $V = k_{31}\sqrt{\frac{2\,W_{mech}}{C}}$, maka semakin bertambah energi mekanik maka akan semakin besar voltase yang dihasilkan. Namun jika *piezoelectric* bertambah defleksi akan turun namun coupling factor K_{31} akan meningkat. Rasio pengingkatan K_{31} yang lebih besar

daripada penurunan defleksi sehingga didapatkan voltase yang meningkat.

4.2.4.2 Arus Listrik Yang Dihasilkan Mekanisme

Arus listrik yang dimodelkan dianalisa dengan memvariasikan frekuensi gelombang, tinggi gelombang dan jumlah *piezoelectric*. Frekuensi gelombang yang divariasikan yaitu 0.8 Hz, 1 Hz dan 1.2 Hz, tinggi gelombang yang divariasikan yaitu 4 cm, 5 cm, dan 6 cm, dan jumlah *piezoelectric* yang divariasikan yaitu 10, 20 dan 30 buah.

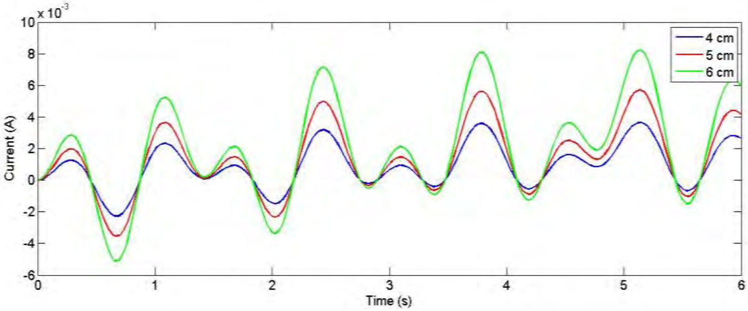
Pada proses pertama simulasi arus listrik divariasikan frekuensi yaitu 0.8 Hz, 1 Hz dan 1.2 Hz. Parameter tetap pada simulasi adalah tinggi gelombang 4 cm, dan jumlah *piezoelectric* 20. Hasil dari proses simulasi ditampilkan pada gambar 4.14.



Gambar 4.14 Grafik arus listrik dengan variasi frekuensi

Hasil simulasi arus listrik dengan memvariasikan frekuensi gelombang didapatkan *trendline* yang meningkat, kenaikan arus listrik sebanding dengan kenaikan kuat arus. Masing-masing hasil arus RMS listrik dari variasi frekuensi 0.8 Hz, 1 Hz, 1.2 Hz yaitu $1.3x10^{-3}$ A, $2.1x10^{-3}$ A, $4x10^{-3}$ A. Arus listrik terbesar didapatkan pada frekuensi 1.2 Hz, dan arus listrik terkecil terkecil didapatkan pada frekuensi 0.8 Hz.

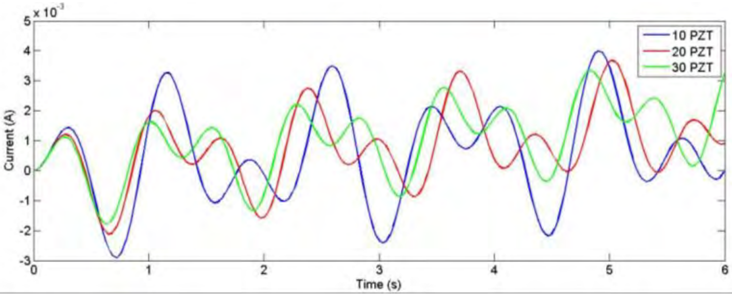
Kemudian divariasikan tinggi gelombang sebesar 4 cm, 5 cm, 6 cm. Parameter tetap pada proses simulasi yaitu frekuensi gelombang 0.8 Hz, dan jumlah *piezoelectric* 20.



Gambar 4.15 Grafik arus listrik dengan variasi tinggi gelombang

Didapatkan hasil dengan *trendline* kenaikan arus listrik sebanding dengan kenaikan tinggi gelombang. Hasil RMS arus dari masing-masing tinggi gelombang 4 cm, 5 cm, 6 cm adalah 1.3×10^{-3} A, 2.1×10^{-3} A, 3×10^{-3} A. hasil tertinggi didapatkan pada tinggi gelombang 6 cm, dan hasil terendah didapatkan pada frekuensi gelombang sebesar 4cm. Hal ini dapat dilihat pada gambar 4.15.

Variasi selanjutnya dalam analisa arus listrik, divariasikan jumlah *piezoelectric* sebanyak 10 buah, 20 buah dan 30 buah. Dengan mengatur tinggi gelombang sebesar 4 cm, dan frekuensi gelombang 0.8 Hz, didapatkan hasil seperti yang ditampilkan pada gambar 4.16.



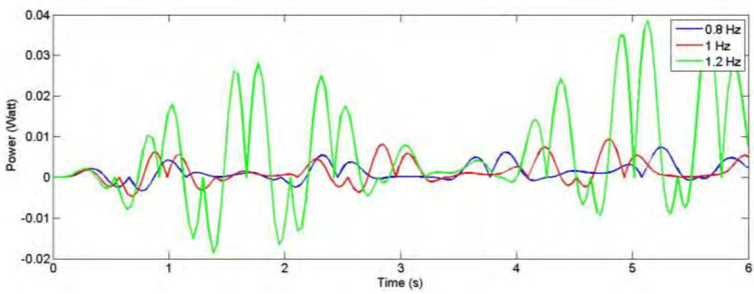
Gambar 4.16 Grafik arus listrik dengan variasi jumlah piezoelectric

Hasil yang didapatkan pada gambar 4.16 adalah *trendline* yang menurun, penurunan arus listrik berbanding terbalik dengan kenaikan *piezoelectric*. Masing-masing hasil dari variasi jumlah *piezoelectric* 10, 20, dan 30 adalah 2.1 $x10^{-3}$ A, 1.3 $x10^{-3}$ A, $0.95x10^{-3}$ A. Hasil arus listrik tertinggi didapat pada jumlah *piezoelectric* sebanyak 10 buah, dan hasil arus listrik terendah didapat pada jumlah *piezoelectric* sebanyak 30 buah.

Arus listrik terdapat hubungan dengan kecepatan *piezoelectric* terdefleksi, sehingga ketika ketinggian gelombang dan frekuensi naik, maka akan terjadi kenaikan kecepatan defleksi pada *piezoelectric*, dengan peningkatan kecepatan yang signifikan maka didapatkan kenaikan kuat arus listrik yang signifikan pula. Hal ini sesuai dengan rumus $-\Theta\dot{u}(t) + C_p\dot{V}_p(t) = -I(t)$ semakin besar kecepatan yang terjadi semakin besar pula kuat arus yang dihasilkan, Namun ketika jumlah *piezoelectric* bertambah maka akan didapatkan kecepatan yang menurun, kecepatan yang menurun akan mengakibatkan menurunnya kuat arus listrik yang dihasilkan.

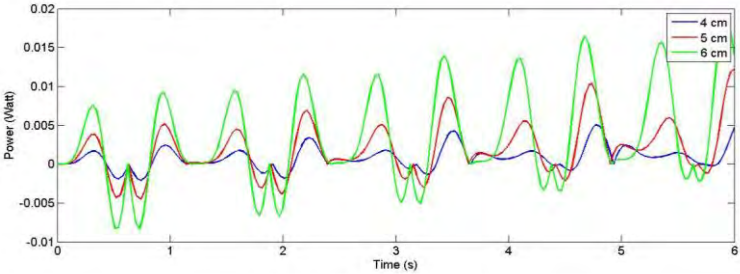
4.2.4.3 Daya Listik Yang Dihasilkan Mekanisme

Daya listrik yang dihasilkan dengan memvariasikan frekuensi sebesar 0.8 Hz, 1 Hz, dan 1.2 Hz, dengan tinggi gelombang 4 cm, dan jumlah *piezoelectric* 20 ditampilkan pada gambar 4.17.



Gambar 4.17 Grafik daya listrik dengan variasi frekuensi gelombang

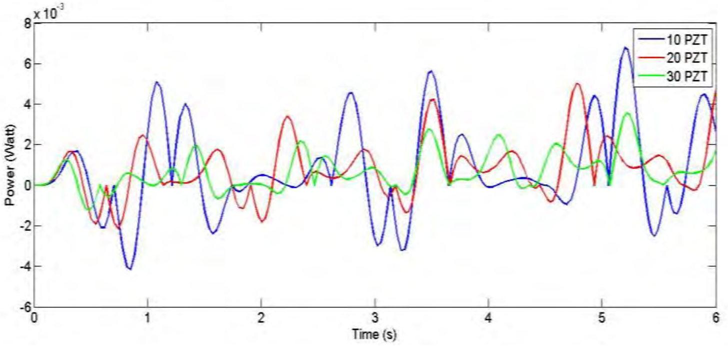
Pada gambar 4.17 didapatkan hasil dengan *trendline* kenaikan daya listrik sebanding dengan kenaikan frekuensi gelombang. Dari masing-masing variasi frekuensi 0.8 Hz, 1 Hz, 1.2 Hz yaitu $1.7 x 10^{-3}$ Watt, $3.7 x 10^{-3}$ Watt, $7.9 x 10^{-3}$ Watt. Dengan demikian daya listrik tertinggi didapatkan pada frekuensi 1.2 Hz, dan daya listrik terendah didapatkan pada 0.8 Hz.
Kemudian selanjutnya disimulasikan daya listrik dengan variasi tinggi gelombang. Tinggi gelombang yang divariasikan yaitu 4 cm, 5 cm dan 6 cm. Dengan menetapkan frekuensi gelombang sebesar 0.8 Hz, dan jumlah *piezoelectric* 20. Hasil dari proses simulasi dapat dilihat pada gambar 4.18.



Gambar 4.18 Grafik daya listrik dengan variasi tinggi gelombang

Hasil dari proses simulasi daya listrik dengan memvariasikan tinggi gelombang didapatkan hasil dengan *trendline* kenaikan daya sebanding dengan tinggi gelombang. Hasil dari masing-masing variasi tinggi gelombang 4 cm, 5 cm, dan 6 cm yaitu $1.71 x 10^{-3}$ Watt, $4.31 x 10^{-3}$ Watt, $8.87 x 10^{-3}$ Watt. Daya listrik terbesar didapatkan pada tinggi gelombang 6 cm, dan daya listrik terkecil didapatkan pada tinggi gelombang 4 cm.

Variasi selanjutnya dalam menganalisa daya, divariasikan jumlah *piezoelectric* sebanyak 10 buah, 20 buah dan 30 buah. Dengan mengatur tinggi gelombang sebesar 4 cm, dan frekuensi gelombang 0.8 Hz, didapatkan hasil seperti yang ditampilkan pada gambar 4.19



Gambar 4.19 Grafik daya listrik dengan variasi jumlah piezoelectric

Hasil yang didapatkan pada gambar 4.19 adalah *trendline* yang menurun, penurunan arus listrik berbanding terbalik dengan kenaikan *piezoelectric*. Masing-masing hasil dari variasi jumlah *piezoelectric* 10, 20, dan 30 adalah 2.6 $x10^{-3}$ Watt, 1.7 $x10^{-3}$ Watt, $1.4x10^{-3}$ Watt. Hasil daya listrik tertinggi didapat pada jumlah *piezoelectric* sebanyak 10 buah, dan hasil daya listrik terendah didapat pada jumlah *piezoelectric* sebanyak 30 buah.

Ketika tinggi gelombang dan frekuensi gelombang naik, maka voltase dan kuat arus naik, maka akan didapatkan daya listrik yang naik pada kenaikan voltase dan kuat arus. Hal ini sesuai dengan rumus P = V.I. Namun jika *piezoelectric* bertambah maka voltase meningkat, dan kuat arus menurun, penurunan kuat arus lebih besar daripada kenaiakan voltase sehingga didapatkan hasil bahwa setiap kenaikan *piezoelectric* terjadi penurunan daya listrik yang dihasilkan.

Tabel 4.2 Tabel Data energi rata-rata yang dihasilkan mekanisme dengan variasi frekuensi, tinggi gelombang dan jumlah PZT

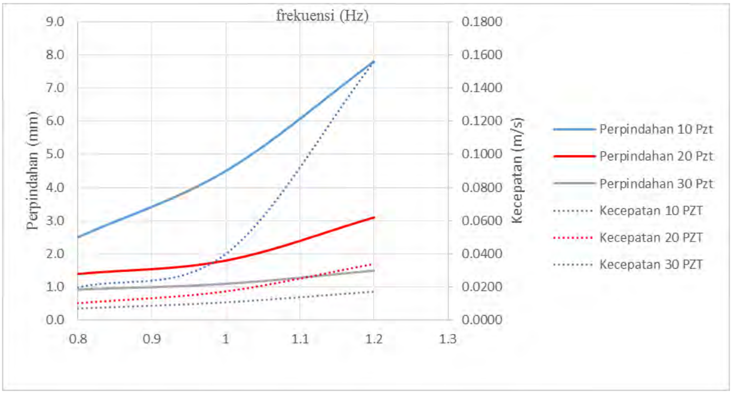
PZT	H (m)	f (Hz)	V-RMS (V)	I-RMS (A)	P-RMS (Watt)
10	0.04	0.8	1.247	0.002	0.003
		1	2.086	0.005	0.011
		1.2	2.114	0.009	0.019
	0.05	0.8	2.076	0.003	0.007
		1	2.069	0.008	0.017
		1.2	2.107	0.014	0.030
	0.06	0.8	2.059	0.005	0.009
		1	2.080	0.012	0.024
		1.2	2.114	0.020	0.042
20	0.04	0.8	1.315	0.001	0.002
		1	1.790	0.002	0.004
		1.2	3.014	0.004	0.012
	0.05	0.8	2.055	0.002	0.004
		1	2.797	0.003	0.009
		1.2	4.132	0.006	0.026
	0.06	0.8	2.960	0.003	0.009
		1	4.145	0.005	0.019
		1.2	4.153	0.009	0.037
30	0.04	0.8	1.381	0.001	0.001
		1	1.632	0.001	0.002
		1.2	2.219	0.002	0.005
	0.05	0.8	2.158	0.002	0.003
		1	2.551	0.002	0.005
		1.2	3.468	0.003	0.011
	0.06	0.8	3.082	0.002	0.007

		1	3.673	0.003	0.011
		1.2	6.426	0.005	0.030

4.3 Pembahasan

4.3.1 Pengaruh Frekuensi Gelombang, Tinggi Gelombang dan Jumlah *Piezoelectric* Terhadap Perpindahan dan Kecepatan Massa Pendorong

Setelah dilakukan analisa perpindahan massa pendorong variasi frekuensi (0.8 Hz, 1 Hz, 1.2 Hz) dan *piezoelectric* (10, 20, 30) dengan tinggi gelombang 4 cm, kemudian dilakukan pembahasan mengenai pengaruh perpindahan massa pendorong *piezoelectric* terhadap frekuensi gelombang dan jumlah *piezoelectric*.



Gambar 4.20 Pengaruh frekuensi terhadap perpindahan dan kecepatan massa pendorong

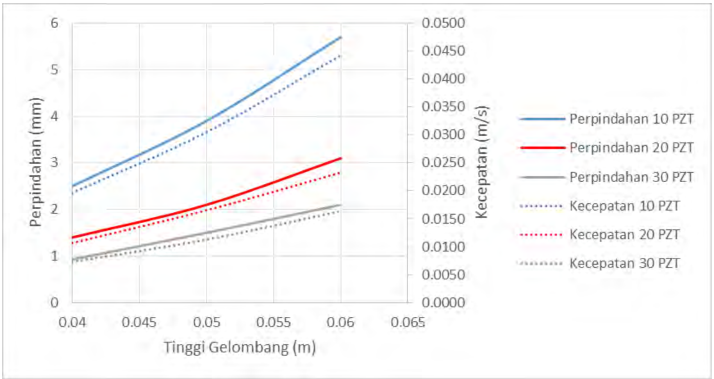
Gambar 4.20 adalah pengaruh dari kenaikan frekuensi dan pengaruh jumlah piezoeletric, *trendline* yang dihasilkan cukup meningkat, pada jumlah *piezoelectric* sebanyak 10 buah, jika diberikan frekuensi sebesar 0.8 Hz didapatkan perpindahan dan kecepatan massa pendorong sebesar 2.5 mm dan 0.0196 m/s , sedangkan jika frekuensi dinaikkan menjadi 1 Hz maka perpindahan dan kecepatan menjadi 4.5 mm dan 0.0398 m/s , jika

frekuensi dinaikkan menjadi 1.2 Hz maka perpindahan dan kecepatan massa pendorong menjadi 7.8 mm dan 0.1557 m/s, pun demikian hasil yang ditampilkan pada jumlah *piezoelectric* sebanyak 20, dan 30. Meskipun hasil tidak signifikan seperti pada jumlah *piezoelectric* 10, namun *trendline* masih meningkat.

Kenaikan perpindahan dan kecepatan *piezoelectric* dipengaruhi oleh frekuensi gelombang, dengan semakin tingginya frekuensi gelombang maka akan semakin tinggi daya gelombang yang ditransmisikan, seperti pada rumus $P = \frac{E}{T}$, maka hal ini sesuai dengan teori yang sudah ada.

Namun lain halnya dengan jumlah *piezoelectric*, hasil yang ditampilkan menurun seiring dengan bertambahnya *piezoelectric*. Pada frekuensi 0.8 Hz ketika jumlah *piezoelectric* 10 didapatkan perpindahan massa pendorong sebesar 2.5 mm, kemudian jika jumlah *piezoelectric*nya bertambah menjadi 20 buah, perpindahan massa pendorong menjadi 1.4 mm, kemudian jumlah *piezoelectric* dinaikkan menjadi 30, maka perpindahan menjadi 0.9 mm. hal ini membuktikan bahwa semakin bertambahnya *piezoelectric* maka akan semakin kecil perpindahan dan kecepatan massa pendorong. Hal ini dikarenakan elemen *piezoelectric* memiliki kekakuan, dengan demikian jika semakin bertambahnya *piezoelectric* maka akan semakin bertambah pula kekakuan dari mekanisme, sehingga diperlukan gaya yang lebih besar untuk membuat perpindahan massa pendorong yang lebih besar, jika gaya yang diberikan sama, maka perpindahan massa pendorong akan semakin kecil. Maka dengan ngacu pada persamaan $5.893F_{Wave} = 7.82135\ddot{x}_1 + (K_1 + K_{pzt})x_1 - K_{pzt}x_2 + C_{pzt}\dot{x}_1 - C_{pzt}\dot{x}_2$ maka jika *piezoelectric* bertambah K_{pzt}, maka untuk memenuhi persamaan tersebut perpindahan dan kecepatan akan semakin kecil.

Selanjutnya akan dibahas mengenai pengaruh tinggi gelombang terhadap perpindahan yang dihasilkan. Berikut adalah grafik pengaruh tinggi gelombang terhadap respon perpindahan dan kecepatan massa pendorong yang ditampilkan pada gambar 4.21.



Gambar 4.21 Pengaruh tinggi gelombang terhadap perpindahan dan kecepatan massa pendorong

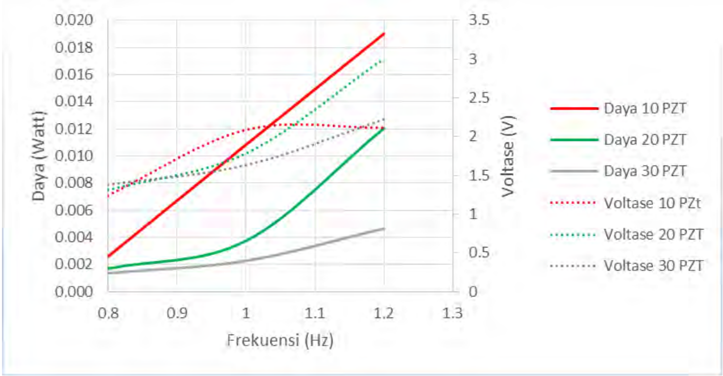
Pada gambar 4.21 terlihat bahwa *trendline* yang meningkat, hal ini membuktikan berarti seiring dengan bertambahnya tinggi gelombang maka akan semakin bertambah pula perpindahan massa pendorong. Pada jumlah *piezoelectric* sebanyak 10 dapat dilihat ketika tinggi gelombang 4 cm perpindahan dan kecepatan massa pendorong sebesar 2.5 mm dan 0.0196 m/s , sedangkan ketika tinggi gelombang 5 cm perpindahan dan kecepatan massa pendorong sebesar 3.9 mm dan 0.0305 m/s, dan ketika tinggi gelombang bertambah menjadi 6 cm perpindahan massa pendorong 5.7 mm dan kecepatan menjadi 0.0443 m/s. Trendline respon perpindahan dan kecepatan yang dihasilkan naik seiring dengan kenaikan tinggi gelombang.

Semakin besar tinggi gelombang semakin besar gaya gelombang yang terjadi, hal ini sesuai dengan formulasi $F = \frac{\rho\, g\, H^2\, b}{16}$, jika tinggi gelombang H meningkat, maka F meningkat,

dengan demikian perpindahan dan kecepatan pun akan bertambah untuk memenuhi persamaan $5.893F_{Wave} = 7.82135\ddot{x}_1 + (K_1 + K_{pzt})x_1 - K_{pzt}x_2 + C_{pzt}\dot{x}_1 - C_{pzt}\dot{x}_2$.

4.3.2 Pengaruh Frekuensi Gelombang, Tinggi Gelombang dan Jumlah *Piezoelectric* Terhadap Energi Yang dihasilkan

Pengaruh frekuensi gelombang terhadap energi yang dihasilkan disajikan dalam bentuk voltase, kuat arus, dan daya listrik, pada gambar 4.22 ditampilkan pengaruh frekuensi gelombang terhadap voltase dan daya listrik.

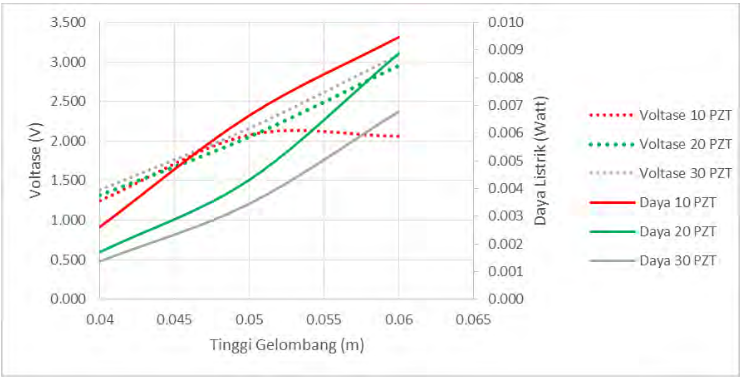


Gambar 4.22 Pengaruh frekuensi terhadap Voltase yang dihasilkan

Pada gambar 4.22 dihasilkan *trendline* yang naik, pada jumlah *piezoelectric* 10, voltase yang didapatkan yaitu 1,24 V, kemudian naik ke 2.08, dan 2.11 V. Pada jumlah *piezoelectric* 20 didapatkan voltase sebesar 1.31 V, 1.79 dan 3.01 V. dan pada jumlah *piezoelectric* 30 voltase didapatkan sebesar 1.38 V, 1.63 Vkemudian 2.22 V. Kemudian pada gambar 4.19 juga ditampilkan pengaruh frekuensi terhadap daya listrik, *trendline* daya listrik yang dihasilkan naik seiring dengan bertambahnya kenaikan frekuensi. Daya listrik yang dihasilkan pada 10 piezeolectric dengan frekuensi 0.8 Hz, 1 Hz, 1.2 Hz yaitu 2.6 mW, 10.8 mW dan 19 mW, sedangkan untuk jumlah *piezoelectric* 20 yaitu 1.7 mW,

3.8 mW, 12.1 mW, untuk jumlah *piezoelectric* 30 yaitu 1.4 mW, 2.3 mW, dan4.7 mW.

Kenaikan voltase diakibatkan karena kenaikan defleksi *piezoelectric*, kenaikan defleksi *piezoelectric* meingngkat karena kenaikan perpindahan massa pendorong, kenaikan perpindahan massa pendorong yang semakin membesar dipengaruhi oleh gaya gelombang yang besar frekuensi yang besar. Jika dilihat dari formulasi V $= k_{31}\sqrt{\frac{2\,W_{mech}}{C}}$, sudah jelas bahwa dengan bertambahnya defleksi *piezoelectric* akan semakin bertambah energi mekanik yang diserap oleh *piezoelectric*, semakin besar energi mekanik yang diserap maka akan meningkatkan voltase bangkitan. Sedangkan yang mempengaruhi defleksi *piezoelectric* yang besar adalah daya yang semakin besar karena pengaruh frekuensi.



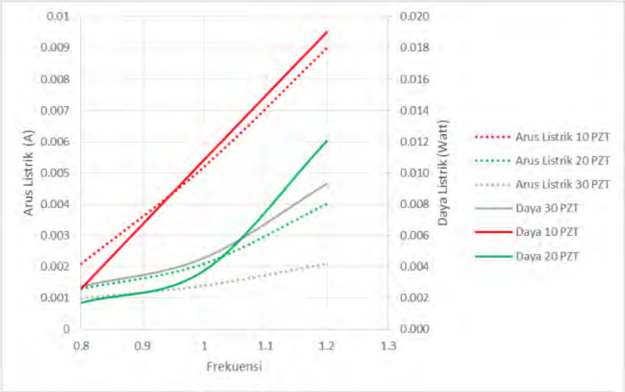
Gambar 4.23 Pengaruh tinggi gelombang yang dihasilkan terhadap Voltase

Terlihat pada gambar 4.23 pada *piezoelectric* 10 dihasilkan voltase yaitu 1.24 V, 2.07V, dan 2.06 V, pada *piezoelectric* 20 dihasilkan 1.31 V, 2.055 V, 2.96 V, dan pada jumlah *piezoelectric* 30 1.38 V, 2.16 V, dan 3.08 V terhadap pengaruh tinggi gelombang yaitu 4 cm, 5 cm, dan 6 cm. sedangkan untuk daya listrik pada 10 *piezoelectric* yaitu 3 mW, 7 mW, 9 mW,

pada 20 *piezoelectric* 2 mW, 4 mW, 9mW, dan pada *piezoelectric* 30 didapatkan hasil 1 mW, 3 mW, dan 7mW.

Tinggi gelombang mempengaruhi gaya yang terjadi, hal ini dapat dilihat pada formulasi $F = \frac{\rho\, g\, H^2\, b}{16}$, maka dengan bertambahnya tinggi gelombang akan semakin besar gaya yang mendorong massa pendorong, dengan demikian semakin besar perpindahan massa pendorong, dengan semakin besarnya perpindahan massa pendorong maka akan semakin besar pula defleksi *piezoelectric*. *Piezoelectric* yang terdefleksi yang besar akan menghasilkan penyerapan energi mekanik yang besar, penyerapan energy mekanik yang besar akan menghasilkan voltase yang besar. Hal ini sesuai dengan rumus yang sudah ada yaitu :

$V = k_{31}\sqrt{\frac{2\, W_{mech}}{C}}$, dengan demikian kenaikan ini sesuai dengan rumus pada persamaan *piezoelectric*.



Gambar 4.24 Pengaruh frekuensi yang dihasilkan terhadap kuat arus yang dihasilkan

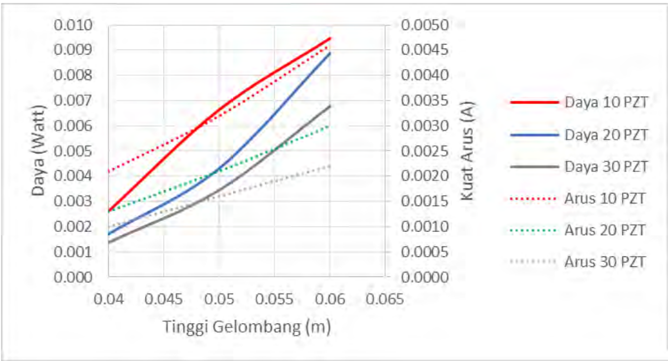
Hasil pada simulasi dengan menetapkan parameter tinggi gelombang 4 cm. Pengaruh frekuensi dapat dilihat pada gambar 4.24, ketika jumlah *piezoelectric* 10 didapatkan hasil 2.1 mA, 5.2 mA dan 9 mA,ketika jumlah *piezoelectric* 20 didapatkan respon

kuat arus 1.3 mA, 2.1 mA dan 4 mA, untuk *piezoelectric* 30 didapatkan hasil 0.9 mA, 1.4 mA dan 2.1 mA untuk masing-masing frekuensi 0.8 Hz, 1 Hz, dan 1.2 Hz. respon kuat arus listrik justru berbanding terbalik dengan jumlah *piezoelectric* sehingga didapatkan kuat arus yang tinggi pada *piezoelectric* dengan jumlah 10, dan kuat arus yang sangat kecil ketika pada jumlah *piezoelectric* 30.

Hal yang mempengaruhi respon kuat arus yang dihasilkan mekanisme menurun terhadap jumlah *piezoelectric* adalah kecepatan terdefleksinya *piezoelectric* yang sangat rendah, dengan kata lain bahwa pada jumlah *piezoelectric* 10, sistem tidak terlalu stiff sehingga massa pendorong masih leluasa untuk mendorong *piezoelectric* hingga ke 6 mm, dengan demikian bahwa kuat arus yang dihasilkan maksimal. Ketika pada jumlah *piezoelectric* 20 dan 30 maka sistem akan lebih kaku, sehingga defleksi *piezoelectric* yang tidak maksimal, pengaruh dari defleksi *piezoelectric* yang tidak maksimal yaitu kurangnya energi mekanik yang diserap mekanisme, sehingga penyerapan energi berupa arus juga berkurang.

Semakin tinggi frekuensi maka akan semakin tinggi daya gelombang dihasilkan, semakin tinggi daya gelombang akan mempercepat *piezoelectric* terdefleksi, dengan mengacu pada formulasi $-\Theta\dot{u}(t) - C_p\dot{V}_p(t) = -I(t)$, hal ini jelas dengan semakin tingginya kecepatan defleksi maka akan semakin memperbesar kuat arus listrik yang dihasilkan.

Selanjutnya akan dibahas menganai respon *piezoelectric* terhadap respon kuat arus yang dihasilkan, dengan memvariasikan tinggi gelombang dengan menetapkan parameter frekuensi sebesar 1.2 Hz.



Gambar 4.25 Pengaruh tinggi gelombang yang dihasilkan terhadap kuat arus yang dihasilkan

Pada grafik menunjukkan bahwa semakin tinggi gelombang laut, maka akan semakin tinggi juga kuat arus yang dihasilkan, namun ketika jumlah *piezoelectric* bertambah maka akan terjadi penurunan kuat arus. Pada jumlah *piezoelectric* 10 didapatkan hasil kuat arus yang maksimum yaitu sebesar 2.1 mA, 3.2 mA, 4.6 mA untuk masing-masing tinggi gelombang 4 cm, 5 cm, dan 6 cm. namun sebaliknya pada jumlah *piezoelectric* 20 dan 30 didapatkan nilai kuat arus yang lebih rendah yaitu, 1.3 mA, 2.1 mA, 3 mA untuk jumlah *piezoelectric* 20, dan 0.9 mA, 1.6 mA, 2.2 mA untuk jumlah *piezoelectric* 30.

Dengan melihat data yang dihasilkan, maka kecepatan defleksi *piezoelectric* mempengaruhi kuat arus yang dihasilkan. Hal yang mempengaruhi kecepatan defleksi *piezoelectric* adalah semakin besarnya gaya gelombang yang mendorong massa pendorong, gaya yang semakin besar dihasilkan karena pengaruh tinggi gelombang seperti pada rumus $F = \frac{\rho\, g\, H^2\, b}{16}$, maka semakin besar gaya yang terjadi akan semakin memperbesar kecepatan *piezoelectric* terdefleksi. Seperti pada persamaan $5.893F_{Wave} = 7.82135\ddot{x}_1 + (K_1 + K_{pzt})x_1 - K_{pzt}x_2 + C_{pzt}\dot{x}_1 - C_{pzt}\dot{x}_2$ agar persamaan tersebut setimbang maka kecepatan akan bertambah karena gaya bertambah karena tinggi gelombang

bertambah. Arus listrik yang lebih tinggi dihasilkan karena kecepatan defleksi *piezoelectric* yang semakin tinggi, hal ini sesuai dengan formulasi $-\Theta\dot{u}(t) - C_p\dot{V}_p(t) = -I(t)$, dimana semakin besar kecepatan semakin besar pula kuat arus listrik yang dihasilkan.

Pada grafik daya listrik yang dihasilkan terlihat bahwa *trendline* daya listrik yang naik terhadap kenaikan tinggi dan frekuensi gelombang. Hal yang mempengaruhi kenaikan daya listrik bangkitan adalah kenaikan voltase dan kuat arus listrik yang dihasilkan seiring bertambahnya tinggi dan frekuensi gelombang. Mengacu pada formulasi P = V.I , maka kenaikan day listrik sesuai dengan persamaan yang sudah ada.

Lain halnya pada variasi jumlah *piezoelectric*, semakin bertambah *piezoelectric* maka akan semakin besar voltase bangkitan namun kuat arus listrik yang dihasilkan menurun. Jika penambahan *piezoelectric* tidak sebanding dengan gaya mekanisme, maka akan menaikkan voltase yang tidak terlalu besar namun akan menurunkan kuat arus dengan signifikan, efeknya akan terjadi penurunan daya listrik yang dihasilkan jika *piezoelectric* semakin bertambah. Namun jika penambahan *piezoelectric* ideal, dalam hal ini setelah *piezoelectric* melewati batas jenuhnya maka daya listrik yang dihasilkan akan mengalami kenaikan seiring dengan bertambahnya *piezoelectric*.

BAB V
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Frekuensi dan tinggi gelombang berbanding lurus dengan besar perpindahan dan kecepatan massa pendorong, semakin besar frekuensi gelombang terjadi maka semakin besar perpindahan dan kecepatan massa pendorong terjadi, semakin besar perpindahan massa semakin besar defleksi piezoelectric, sehingga energi mekanik yang diserap semakin banyak dengan demikian voltase yang dihasilkan lebih besar. Semakin besar kecepatan defleksi piezoelectric semakin besar arus listrik yang dihasilkan. Dengan demikian daya listrik yang dihasilkan akan meningkat sering dengan meningkatnya frekuensi dan tinggi gelombang.

Jumlah piezoelectric mempengaruhi voltase bangkitan yang dihasilkan, namun akan menurunkan kuat arus listrik dikarenakan kecepatan defleksi yang semakin berkurang. Penambahan jumlah piezoelectric yang tidak ideal akan menaikkan voltase yang tidak terlalu signifikan namun menurunkan kuat arus listrik secara drastis, sehingga jika penambahan piezoelectric dilakukan sebelum titik jenuhnya maka piezoelectric tersebut akan mengalami penurunan daya listrik, bukan menaikkan dayanya.

5.2 Saran

1. Menambah variasi pengaruh parameter terhadap energi listrik yang dihasilkan, sehingga penelitian lebih komplex dan komprehensif.
2. Untuk penelitian selanjutnya dianjurkan mengaplikasikan mekanisme *multi-stage harvesting energy* pada PLTGL kayuh dayung-*piezoelectric* ini, sehingga energi listrik bisa terserap disegala kondisi gelombang.
3. Pada penelitian selanjutnya, divalidasi dengan melakukan eksperimen dengan membuat PLTGL tipe kayuh dayung-*piezoelectric* agar energi yang yang sebenarnya terserap dapat diketahui.

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

measurement SPECIALTIES

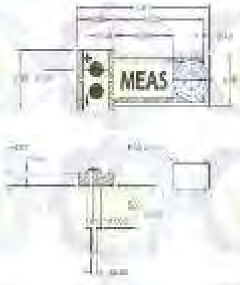
MiniSense 100 Vibration Sensor

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

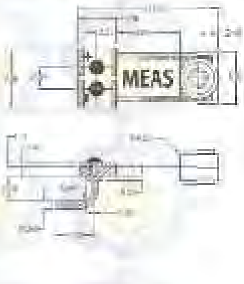
The Minisense 100 is a low-cost cantilever-type vibration sensor loaded by a mass to offer high sensitivity at low frequencies. The pins are designed for easy installation and are solderable. Horizontal and vertical mounting options are offered as well as a reduced height version. The active sensor area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

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

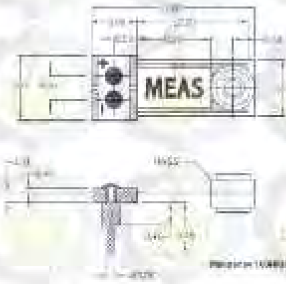
Dimensions (in millimeters)



Minisense 100H



Minisense 100V



APPLICATIONS

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

FEATURES

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

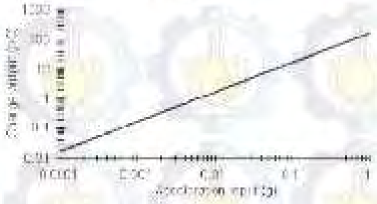
measurement SPECIALTIES

MiniSense 100 Vibration Sensor

performance specifications

Frequency Response

Linearity



Typical properties/specifications

Typical Properties (at 25 °C)

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

Environmental Specifications

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

MiniSense 100 Vibration Sensor

measurement SPECIALTIES

functional description

The MiniSense 100 acts as a cantilever-beam accelerometer. When the beam is mounted horizontally, acceleration in the vertical plane creates bending in the beam, due to the inertia of the mass at the tip of the beam. Strain in the beam creates a piezoelectric response, which may be detected as a charge or voltage output across the electrodes of the sensor.

The sensor may be used to detect either continuous or impulsive vibration or impacts. For excitation frequencies below the resonant frequency of the sensor, the device produces a linear output governed by the "baseline" sensitivity quoted above. The sensitivity at resonance is significantly higher. Impacts containing high-frequency components will excite the resonance frequency, as shown in the plot above (response of the MiniSense 100 to a single half-sine impulse at 100 Hz, of amplitude 0.9 g). The ability of the sensor to detect low frequency motion is strongly influenced by the external electrical circuit, as described below (see "Electrical Description").

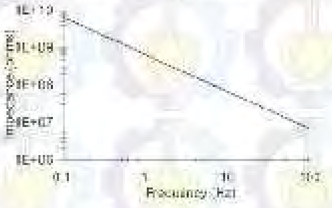
electrical description

The MiniSense 100 behaves electrically as an "active" capacitor: it may be modelled as a perfect voltage source (voltage proportional to applied acceleration) in series with the quoted device capacitance. Any external input or load resistance will form a high-pass filter, with a roll-off frequency as tabulated above, or calculated from the formula $f(c) = 1/(2\pi RC)$. The impedance of the sensor is approximately 650 M ohm at 1 Hz. The active sensor element is electrically shielded, although care should be taken in the PCB design to keep unshielded traces as short as possible.

Lower Limiting Frequency (-3 dB roll-off)

External R (Ω)	LLF (Hz)	Desired LLF (Hz)	Required R (Ω)
10 M	65	10	65 M
100 M	6.5	1	650 M
1 G	0.65	0.1	6.5 G

Electrical Impedance



Low frequency roll-off

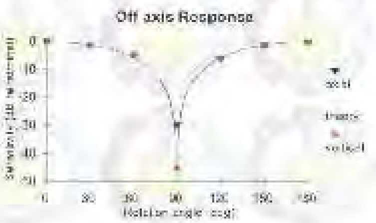
measurement SPECIALTIES

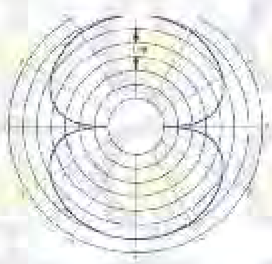
MiniSense 100 Vibration Sensor

off-axis sensitivity

The sensitivity of the Minisense 100 follows a cosine law when rotated horizontally around its axis, or vertically around its mid-point. At 90 degrees rotation in either plane, both baseline sensitivity and sensitivity at resonance are at a minimum. In theory, sensitivity should be zero in this condition. It is likely that some sensitivity around the resonance frequency will still be observed – but this may be unpredictable and is likely to be at least -16 dB with reference to the on-axis response. Note that the sensitivity at 30 degrees rotation is -1.25 dB (87% of on-axis response), at 60 degrees, it falls to -6 dB (50%).

The plots below show the change in sensitivity observed for either:
1) Rotation about major axis of sensing element, or
2) Rotation about mid-point of sensing element.





[illegible]

ordering information

Description	Model No.	Part No.
Horizontal Mounting	LDTC-V	1005939-1
Vertical Mounting	LDTC-H	1005940-1
Horizontal Mounting Reduced Height	LDTC-RH	1006015-1

North America

Measurement Specialties, Inc.
1000 Lucas Way
Hampton, VA 23666
Sales and Customer Service
Tel: +1-800-745-8008 or
+1-757-766-1500
Fax: +1-757-766-4297
Technical Support
Email: piezo@meas-spec.com

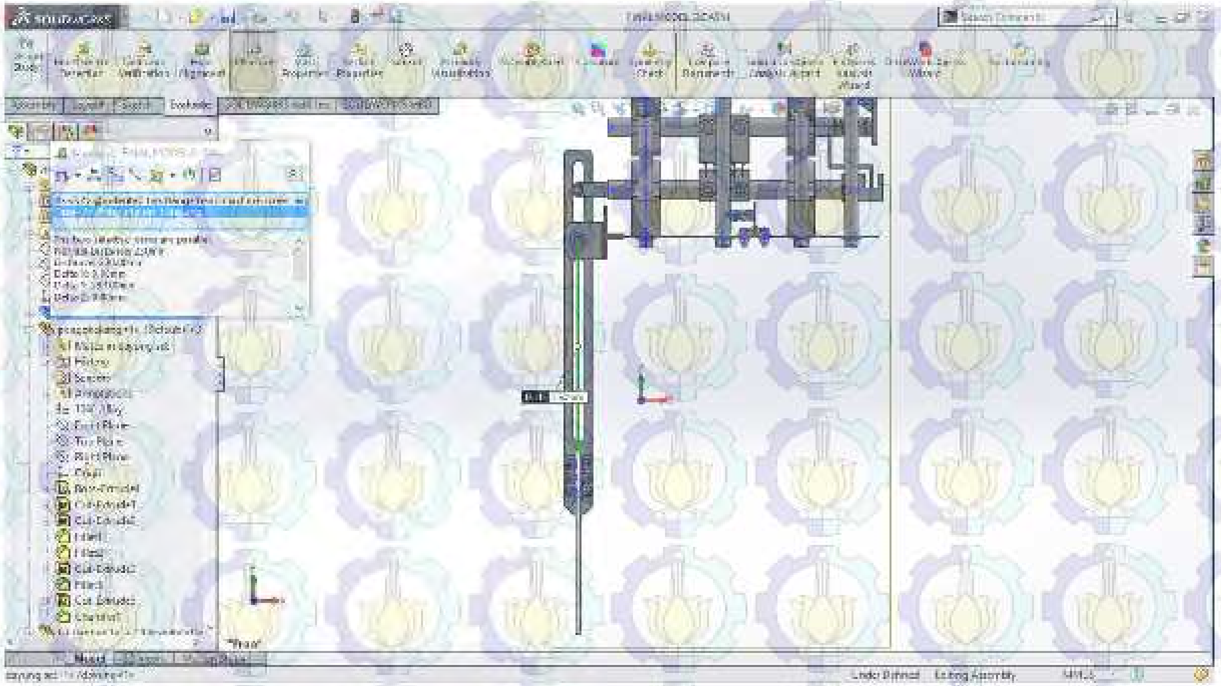
Europe

MEAS Deutschland GmbH
Hauert 13
44227 Dortmund
Germany
Sales and Customer Service
Tel: +49 (0)231 9740 21
Technical Support
Tel: +49 (0)6074 862822
Email: piezoeurope@meas-spec.com

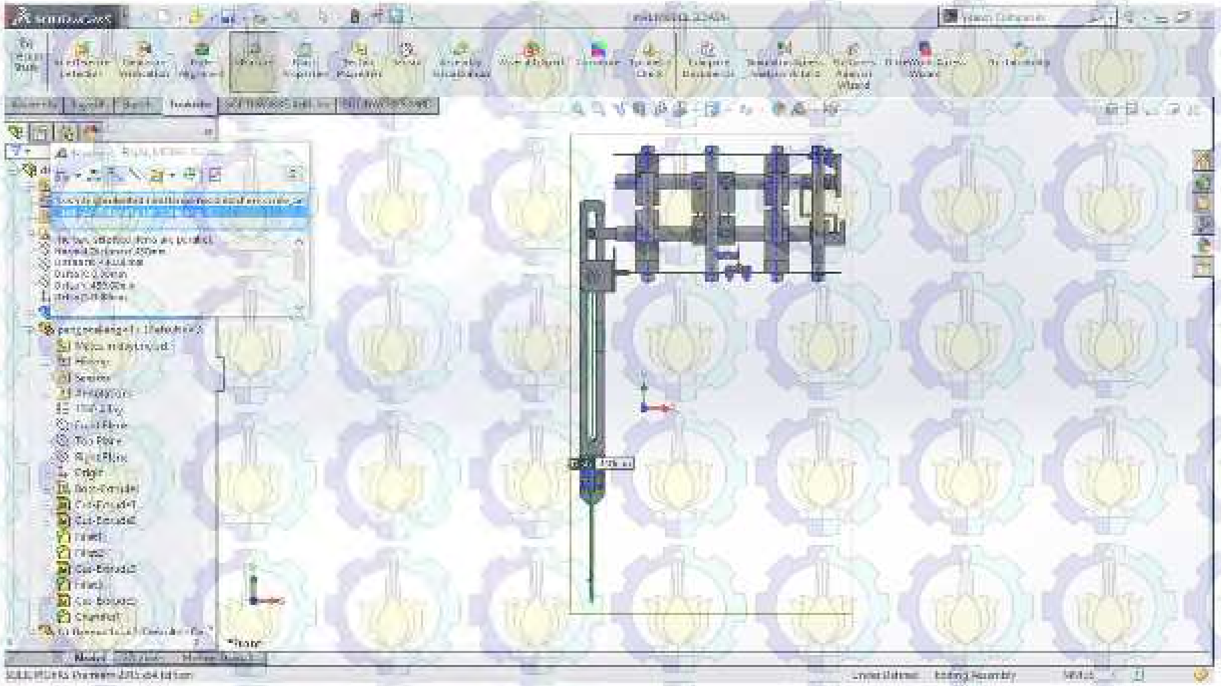
Asia

Measurement Specialties (China), Ltd.
No. 26 Langshan Road
Shenzhen High-Tech Park (North)
Nanshan District
Shenzhen, China 518107Sales and
Customer Service
Tel: +86 755 3330 5088
Technical Support
Email: piezo@meas-spec.com

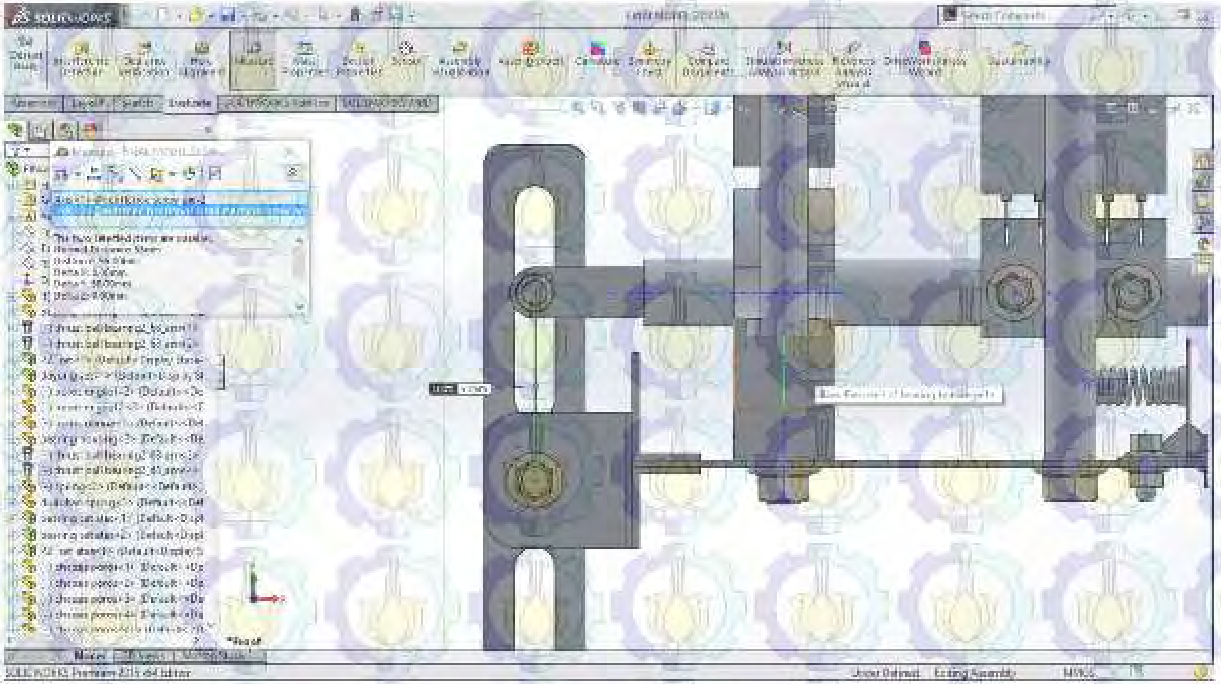
Jarak lengan dayung terhadap pusat massa



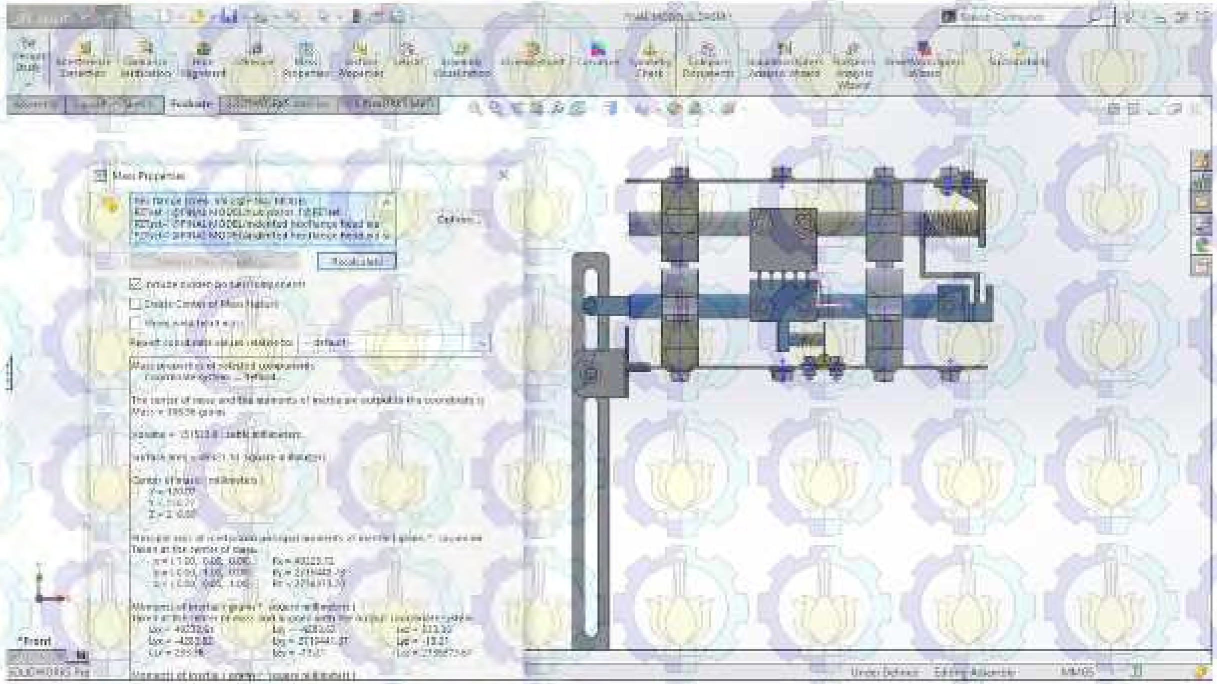
Panjang total lengan dayung



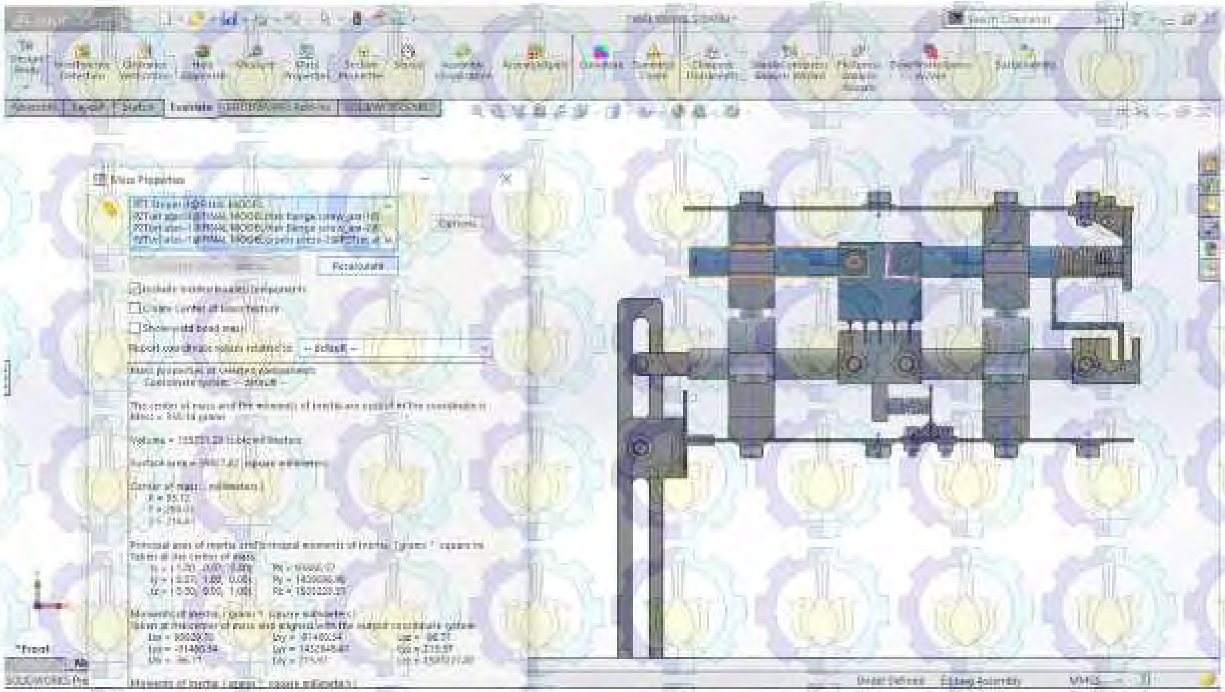
Panjang lengan dayung pengokang



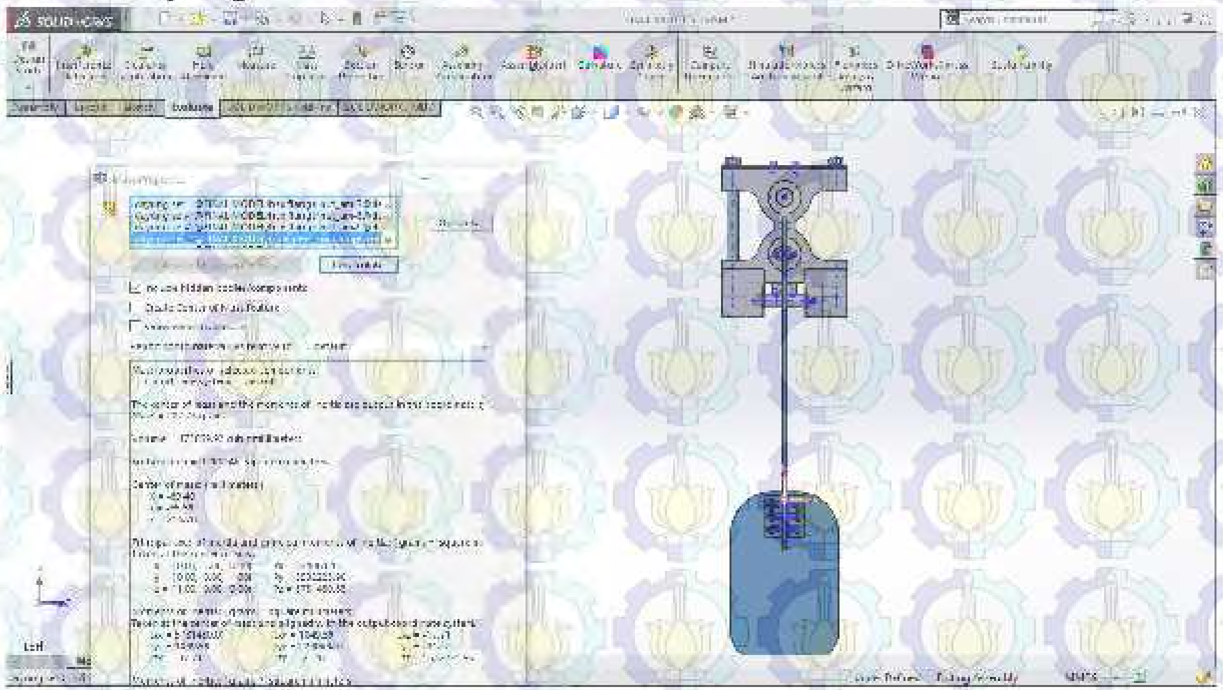
Massa pendorong piezoelectric



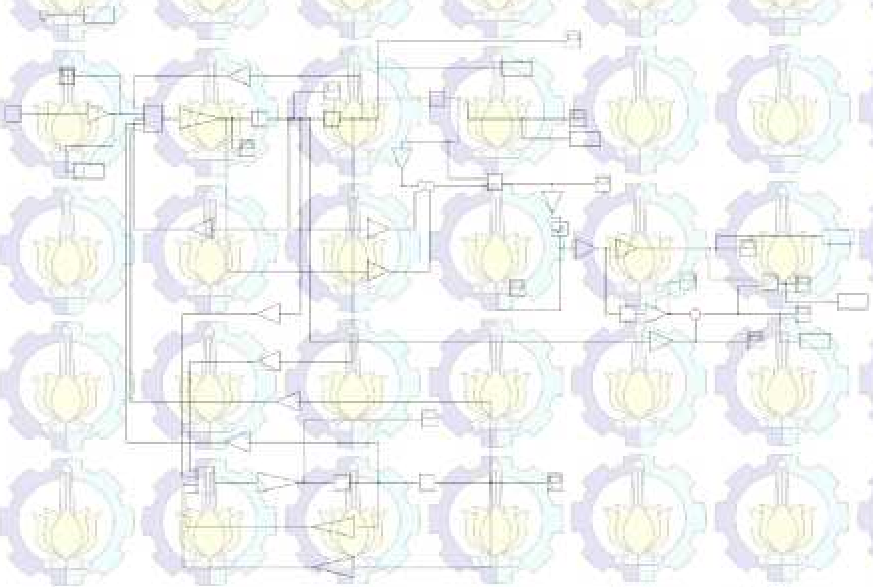
Massa 2



Massa dayung



Blok diagram simulink matlab



DAFTAR PUSTAKA

[1] E. McCormick, Michael. 2010. **Ocean Engineering Mechanics with Aplications**. Cambride University Press, Cambride.

[2] J. Inman, Daniel dan Alper Erturk. 2011. **Piezoelectric Energy Harvesting**. John Wiley & Sons Ltd, West Sussex.

[3] M. Robert, Sorensen. 2006. **Basic Coastal Engineering**. Springer, Pennsylvania.

[4] Mineto, A. T., Braun, M. P., Navarro, H. A., Varoto, P. S. 2010. "Modeling of a Cantilever Beam for Piezoelectric Energy Harvesting" **9th Brazilian conference on Dynamics, Control Applications.**

[5] Romano, Gusti Fajar. 2015. "Studi Karakteristik Voltase Bangkitan Yang Dihasilkan oleh Mekanisme *Vibration Energy Harvesting* Menggunakan Metode *Cantilever Piezoelectric* Dengan Variasi Jumlah *Blade* dan Frekuensi Sumber Getar". **Jurusan Teknik Mesin**.

[6] S. Rao, Singiresu. 2004. **Mechanical Vibration**. Prentice Hall PTR, Singapore.

[7] Suhandaeka. **Gelombang Laut.** 2012. <URL:http://suhandaeka.blogspot.co.id/2012/03/gelombang-laut.html> .

[8] Wu, Nan., Wang, Quan ., Xie, XiangDong. 2015. "Ocean Wave Energy Harvesting with a Piezoelectric Coupled Buoy Structure". **Department of Mechanical Engineering, University of Manitoba.**

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BIODATA PENULIS

Muh. Irvan Yusup dilahirkan di Sukabumi, 28 September 1991. Penulis merupakan putra pertama dari pasangan Daman Jubaedy dan Empun Purnaesih.

Penulis memulai pendidikan dasar di SDN Pasir Halang 2 dan lulus pada tahun 2004. Kemudian melanjutkan ke jenjang pendidikan menengah pertama SMPN 2 Sukaraja dan lulus pada tahun 2007, setelah itu penulis melanjutkan pendidikan menengah atas di SMAN 3 Sukabumi. Penulis mengawali pendidikan tinggi di D-III Teknik Mesin Politeknik Negeri Jakarta, dan lulus tahun 2013. Pada tahun 2014 penulis melanjutkan pendidikan tinggi ke S1 Teknik Mesin LJ Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) pada bidang studi Desain.

Penulis sangat tertarik dalam bidang otomotif dan *Green Energy*. Pada tahun 2012 penulis mengikuti kompetisi mobil hemat energi Internasional di ajang *Shell Eco Marathon Asia 2012,* di Sepang, Malaysia. Pada tahun 2012 penulis juga mengukiti kompetisi mobil hemat energi Nasinonal *Indonesia Energy Marathon Challenge,* di Kenjeran, Surabaya dan berhasil meraih posisi pertama untuk kategori *Urban Electric*. Pencapaian tersebut memotivasi penulis untuk meneliti dibidang lain yang sangat strategis dan futuristik yaitu *green energy*. Maka dari itu penulis melakukan penelitian pada tugas akhir dengan judul "Pemodelan dan Analisa Energi Listrik yang dihasilkan Mekanisme PLTGL Tipe Kayuh Dayung-*Piezoelectric.* Penulis sangat terbuka untuk diskusi mengenai *Green Energy* terutama gelombang laut.

Alamat Email : yusuf.irvan@gmail.com

[Halaman ini sengaja dikosongkan]