

TUGAS AKHIR - TM141585

PEMODELAN DAN ANALISIS ENERGI LISTRIK YANG DIHASILKAN PADA MEKANISME PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GELOMBANG AIR (PLTG-AIR) TIPE PELAMPUNG SILINDER DENGAN CANTILEVER PIEZOELECTRIC

SHERLY OCTAVIA SARASWATI NRP. 2112100084

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

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



FINAL PROJECT - TM141585

MODELING AND ELECTRICAL ENERGY GENERATED ANALYSIS BY MECHANISM OF OCEAN WAVE POWER PLANT CYLINDER BUOY TYPE WITH CANTILEVER PIEZOELECTRIC

SHERLY OCTAVIA SARSWATI NRP. 2112100084

Advisory Lecturer Dr. Wiwiek Hendrowati, ST.,MT.

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

PEMODELAN DAN ANALISA ENERGI LISTRIK YANG DIHASILKAN PADA MEKANISME PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GELOMBANG AIR (PLTG-AIR) TIPE PELAMPUNG SILINDER DENGAN CANTILEVER PIEZOELECTRIC

TUGAS AKHIR

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

Oleh:

SHERLY OCTAVIA SARASWATI NRP. 2112 100 084

Disetujul oleh Tim Penguji Fugas Akhir

 Dr. Wiwiek Hendrowati, ST, MT NIP. 197004121997032003

2. Prof. Ir. I Nyoman Sutantra, MSc.PhD NIP, 195106051978031002

 Dr. Harus Laksana Guntur, ST, M.Eng NIP. 197505111999031001

 Moch, Solichin, ST, MT NIP. 198908172015041003 June Conguji 1)

(Penguii III)

erobimbing)

SURABAYA JUNI, 2016

PEMODELAN DAN ANALISA ENERGI LISTRIK YANG DIHASILKAN PADA MEKANISME PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GELOMBANG AIR (PLTGA) TIPE PELAMPUNG SILINDER DENGAN CANTILEVER PIEZOELECTRIC

Nama Mahasiswa : Sherly Octavia Saraswati

NRP : 2112100084

Jurusan : Teknik Mesin FTI-ITS

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

ABSTRAK

Gelombang laut merupakan pergerakan naik dan turunnya muka air laut yang membentuk lembah dan bukit. Pemanfaatan energi gelombang laut untuk sumber energi alternatif sangat cocok diterapkan di Indonesia, dimana luas lautannya mencapai 2/3 dari keseluruhan luas Indonesia. Salah satu cara memanfaatkan energi gelombang laut adalah untuk menghasilkan listrik, atau yang biasa disebut pembangkit listrik tenaga gelombang laut (PLTGL). Pada penelitian ini akan dibuat simulasi mekanisme PLTGA tipe pelampung silinder dengan cantilever piezoelectric sebagai pengkonversi energi mekanik dari gearbox menjadi energi listrik. Cantilever piezoelectric material merupakan material memiliki kemampuan untuk membangkitkan potensial listrik sebagai respon dari tegangan mekanik yang diberikan pada material tersebut. Blade akan dipasang pada poros keluaran dari gearbox. Blade inilah yang nantinya akan memukul cantilever piezoelectric sehingga menyebabkan cantilever piezoelectric mengalami defleksi. Defleksi dari cantilever piezoelectric inilah yang menimbulkan voltase atau energi listrik pada cantilever piezoelectric. Variasi yang digunakan untuk mengetahui energi bangkitan optimum yang akan dihasilkan oleh mekanisme ini

berupa frekuensi gelombang laut (1Hz, 2Hz, dan 3Hz), dan jumlah *cantilever piezoelectric* (1, 3, dan 5). Didapatkan hasil simulasi berupa grafik respon perpindahan *cantilever piezoelectric* dan voltase terhadap fungsi frekuensi gelombang laut dan grafik respon perpindahan *cantilever piezoelectric* dan voltase terhadap fungsi jumlah *cantilever piezoelectric*. Dari hasil simulasi didapatkan nilai daya bangkitan maksimal yang dihasilkan 4.92E-06 Watt dengan menggunakan 5 *cantilever piezoelectric* pada frekuensi 1Hz

Kata kunci : frekuensi, energi listrik, cantilever piezoelectric, PLTGA tipe pelampung silinder, gelombang air

MODELING AND ELECTRICAL ENERGY GENERATED ANALYSIS BY MECHANISM OF OCEAN WAVE POWER PLANT CYLINDER BUOY TYPE WITH CANTILEVER PIEOELECTRIC

Student Name : Sherly Octavia Saraswati

NRP : 2112100084

Department : Teknik Mesin FTI-ITS

Advisor : Dr. Wiwiek Hendrowati, ST., MT.

ABSTRACT

A movement of ocean waves rising and falling sea levels that form the valley and the hills. The utilization of wave energy to alternative energy sources is very suitable to be applied in Indonesia, where the vast oceans reaches 2/3 of the total area of Indonesia. One way of utilizing wave energy is to generate electricity, or commonly called a sea wave power plant (PLTGL). In this study, the mechanism of the power plant will be made of simulation buoys air cylinder type with cantilever piezoelectric as converting mechanical energy into electrical energy from the gearbox. Cantilever piezoelectric material is a material that has the ability to generate electric potential in response to mechanical stress is given on the material. Blade would be installed on the output shaft of the gearbox. Blade was what will hit the piezoelectric cantilever causing the piezoelectric cantilever deflection Deflection of the cantilever was a cause of piezoelectric voltage or electrical energy to the piezoelectric cantilever. Variations were used to determine optimum energy generation that would be generated by this mechanism in the form of sea wave frequency (1Hz, 2Hz and 3Hz), and the number of piezoelectric cantilever (1, 3, and 5). The simulation results obtained in the form of piezoelectric cantilever displacement response graph of the function of frequency and voltage waves and piezoelectric cantilever displacement response graph and the

voltage on the function of the number of piezoelectric cantilever. From the simulation results obtained maximum value of generated power generation 4.92E-06 Watt by using a piezoelectric cantilever 5 at a frequency of 1Hz.

Kata kunci: frequency, electricity energy, cantilever piezoelectric, PLTGA cylinder buoy type, water wave

KATA PENGANTAR

Puji syukur dihaturkan kehadirat Allah Subhanallahu Wa Ta'ala, hanya karena tuntunan-Nya penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini. Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi persyaratan kelulusan pendidikan Sarjana S-1 di Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penyusunan Tugas Akhir ini dapat terlaksana dengan baik atas bantuan dan kerjasama dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

- Keluarga tersayang, khususnya kedua orangtua, Ayah Agus Yudianto dan Ibu Yuniarti, yang telah menjadi orang-orang terbaik dalam hidup penulis dan selalu memberikan doa dan dorongan dalam segala kondisi.
- 2. Adik kandung penulis, Vivi Agustina Ratnasari yang selalu memberikan dorongan moril dan terus memberikan semangat sampai penulis bisa menyelesaikan studinya.
- 3. Dr. Wiwiek Hendrowati ST, MT, yang selalu memberikan bimbingan dan arahan dalam penulisan Tugas Akhir ini.
- 4. Dr.Eng. Harus Laksana Guntur, ST.M.Eng, Prof. Ir. Nyoman Sutantra, MSc., Ph.D. dan Moch. Solichin, ST., MT. selaku dosen penguji yang telah memberikan saran dan kritik kepada penulis tentang Tugas Akhir ini.
- 5. Segenap dosen dan karyawan Jurusan Teknik Mesin FTI ITS, terima kasih atas ilmu yang disampaikan, semoga bermanfaat kedepannya bagi diri penulis dan bagi bangsa dan negara.
- 6. Maria, Sasa, Pindi, Orin dan Didin yang telah membantu, menemani, menghibur dan memberikan semangat penulis dari awal masuk kampus sampai menyelesaikan studinya.
- 7. Teman Riset penulis, Nadia, Reynuh dan Zulfan yang senantiasa memberi semangat, menemani, membimbing dan memberikan ilmu baru dalam dunia modeling.
- 8. Teman kos penulis Mbak Wuri, Mbak Linda, dan Zulia yang senantiasa menemani, selalu ada untuk penulis, memberi

- dorongan moril, selalu memberi semangat dan menghibur penulis saat sedang penat.
- 9. Teman-teman angkatan M55 yang senantiasa memberi motivasi dan menemani penulis selama kebersamaan empat tahun ini.

Dengan segala keterbatasan kemampuan serta pengetahuan penulis, tidak menutup kemungkinan Tugas Akhir ini jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis bersedia menerima kritik dan saran dari berbagai pihak untuk penyempurnaan lebih lanjut. Semoga hasil penulisan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi semua pihak.

Surabaya, Juli 2016

Penulis

DAFTAR ISI

ABSTRAK		i
ABSTRAC	Γ	iii
KATA PEN	GANTAR	V
	SAMBAR	
DAFTAR T	ABEL	Xiii
	DAHULUAN	
1.1 La	atar Belakang	1
1.2 Pe	erumusan Masalah	2
1.3 Tu	ıjuan Penelitian	3
	atasan Masalah	
	anfaat Penelitian	
	JAUAN PUSTAKA	
2.1 Ka	ajian Terdahulu	
2.1.1	Alat Pemanen Energi Tipe Pelampung	
	asar Teori	
2.2.1	Gelombang Laut	
2.2.2		
2.2.3	Gaya Apung (Bouyancy Force)	14
2.2.4	Gaya Generated	
	stem Dinamis	
2.3.1	Sistem Getaran Multi Derajat Kebebasan	
2.3.2	Momen Inersia Gabungan	
	oda Gigi (Gearbox)	
2.4.1	Momen	22
2.4.2	Konstanta Damping Torsi	
2.4.3	Momen Inersia	
2.4.4	Konstanta Kekakuan Torsi Poros	25
2.5 <i>Pi</i>	ezoelectric	
2.5.1	Pengertian Piezoelectric	
2.5.2	Bentuk Piezoelectric	26
2.5.3	Piezoelectric Konstan	27

2.5.4 Voltase Bangkitan Pada <i>Piezoelectric</i>	30
2.5.5 Piezoelectric Elemen	
2.5.6 Persamaan Gerak Piezoelectric	33
BAB III METODOLOGI	.35
3.1 Tahapan Penelitian	
3.1.1 Flowchart Penelitian	35
3.1.2 Penjelasan Flowchart Penelitian	36
BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN	55
4.1 Mekanisme PLTG-Air Pelampung Silinder Metode	
Cantiever Piezoelectric	. 55
4.1.1 Parameter Yang Digunakan	56
4.1.2 Contoh Perhitungan	57
4.2 Pemodelan Pada Simulink Matlab	. 60
4.2.1 Pemodelan Gaya Gelombang Air	60
4.2.2 Displacement Cantilever Piezoelectric Dengan Vari	
Frekuensi Dan Jumlah Cantilever Piezoelectric	61
4.2.3 Voltase Bangkitan Cantilever Piezoelectric Dengan	
Variasi Frekuensi Dan Jumlah Cantilever Piezoelectric	63
4.2.4 Arus Bangkitan Cantilever Piezoelectric Dengan	
Variasi Frekuensi Dan Jumlah Cantilever Piezoelectric	65
4.2.5 Daya Bangkitan Cantilever Piezoelectric Dengan	
Variasi Frekuensi Dan Jumlah Cantilever Piezoelectric	
4.3 Pembahasan	. 70
4.3.1 Pengaruh Frekuensi Dan Jumlah <i>Piezoelectric</i>	
Terhadap Voltase Bangkitan Piezoelectric	70
4.3.3 Pengaruh Frekuensi Dan Jumlah <i>Piezoelectric</i>	
Terhadap Daya Bangkitan Piezoelectric	
4.3.4 Rancangan PLTG-Air Yang Optimum	
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1 Kesimpulan	
5.2 Saran.	
DAFTAR PUSTAKA	. 82
LAMPIRAN	86

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Gerakan Gearbox Saat Bergerak Ke Atas Dai	1
Ke Bawah 5Error! Bookmark not define	ed.
Gambar 2.2 Perancangan PLTGL	
Gambar 2.3 Permodelan Mekanisme	7
Gambar 2.4 Grafik Hasil Percobaan	8
Gambar 2.5 Proses Pembentukan Gelombang Akibat Ang	in
-	9
Gambar 2.6 Satu Buah Gelombang	
Gambar 2.7 Sketsa Gelombang Laut	.10
Gambar 2.8 Karakteristik Gelombang	.12
Gambar 2.9 Analisa Gaya Yang Dihasilkan Pelampung	. 15
Gambar 2.10 Gaya-Gaya Yang Bekerja Pada Pelampung	. 16
Gambar 2.11 Sistem Pegas Multi-DOF	.18
Gambar 2.12 Kopling Langsung	.20
Gambar 2.13 Kopling Melalui Roda Gigi	.20
Gambar 2.14 Roda Gigi Lurus (Spur Gear)	.22
Gambar 2.15 Torsi Yang Bekerja Pada Poros Utama	.23
Gambar 2.16 Poros tetap di COG (A) dan poros tidak	
dengan jarak d dari COG (B)	.24
Gambar 2.17 Beberapa Contoh Bentuk Piezoelectric	.27
Gambar 2.18 Difinisi Arah Pada Elemen Piezoelectric	.28
Gambar 2.19 Electromechanical Pada Piezoelectric	.32
Gambar 2.20 Elemen Penyusun Piezoelectri	.33
Gambar 2.21 Piezoelectric	.33
Gambar 2.22 Free Body Diagram Piezoelectric	.34
Gambar 3.1 Flowchart Penelitian	
Gambar 3.2 Desain Konsep PLTG-Air Tipe Pelampung	
Silinder Dengan Cantilever Piezoelectric	

Gambar 3.3	Pemodelan Mekanisme PLTG-Air Metode
Pelampung Si	linder Cantilever Piezoelectric38
Gambar 3.4	(A)Mekanisme Gearbox Saat Pelampung
Bergerak Ke	Bawah, (B) Mekanisme Gearbox Saat
Pelampung B	ergerak Ke Atas38
Gambar 3.6	Mekanisme PLTG-Air41
Gambar 3.5	Diagram Alir Karakteristik Model PLTG-Air
	41
Gambar 3.7	Model Dinamis PLTG-Air41
Gambar 3.8	Mekanisme Kesetimbangan Statis Posisi Titik
Tumpu Pada S	Sebuah Poros42
Gambar 3.9	Free Body Diagram Pada Kesetimbangan
Statis	42
Gambar 3.10	Mekanisme Sistem Dinamis Pada Lengan 44
Gambar 3.11	Free Body Diagram Kesetimbangan
Dinamis Pada	Lengan Dan Pelampung44
Gambar 3.12	Mekanisme Gearbox45
Gambar 3.13	Free Body Diagram Jeq Saat Pelampung
Turun	47
Gambar 3.14	Free Body Diagram Jeq Saat Pelampung
Naik	49
Gambar 3.15	Pemodelan blade dengan cantilever
piezoelectric.	49
Gambar 3.16	Free Body Diagram Pada Blade dan
Piezoelectric	49
Gambar 3.17	Free Body Diagram Massa Piezoelectric 50
Gambar 3.18	Susunan dari material piezoelectric50
Gambar 3.19	Diagram sirkuit elektromagnetik cantilever
1	susunan seri51
Gambar 3.20	Diagram sirkuit elektromagnetik cantilever
piezoelectric	susunan paralel52

Gambar 4.1	Mekanisme PLTG-Air Tipe Pelampung	
Silinder Meto	de Cantilever Piezoelectric	.55
Gambar 4.2	Grafik pergerakan gelombang air	
menggunakan	satu buah cantilever piezoelectric dengan	
variasi frekue		.61
Gambar 4.3	Grafik pergerakan gelombang air saat	
frekuensi 1Hz	z dengan variasi jumlah cantilever piezoelec	tric
		.61
Gambar 4.4	Grafik Displacement Cantiever Piezoelectr	ic
Frekuensi 1H	z Terhadap Waktu Dengan Variasi Jumlah	
Cantiever Pie	zoelectric	62
Gambar 4.5	Grafik Displacement Satu Buah Cantiever	
Piezo e lectric	Terhadap Waktu Dengan Variasi Frekuensi.	.63
Gambar 4.6	Grafik Voltase Cantiever Piezoelectric	
Frekuensi 1H	z Terhadap Waktu Dengan Variasi Jumlah	
Cantiever Pie	zoelectric	64
Gambar 4.7	Grafik Voltase Satu Buah Cantilever	
Piezoelectric 1	Dengan Variasi Frekuensi	64
Gambar 4.8	Grafik Arus Cantiever Piezoelectric	
Frekuensi 1H	z Terhadap Waktu Dengan Variasi Jumlah	
Cantiever Pie	zoelectric	65
Gambar 4.9	Grafik Arus Satu Buah Cantilever	
Piezoelectric 1	Dengan Variasi Frekuensi	.66
Gambar 4.10	Grafik Daya Cantiever Piezoelectric	
Frekuensi 1H	z Terhadap Waktu Dengan Variasi Jumlah	
Cantiever Pie	zoelectric	.68
Gambar 4.11	Grafik Daya Satu Buah Cantilever	
Piezo e lectric	Dengan Variasi Frekuensi	.68
Gambar 4.12	Grafik pengaruh frekuensi gelombang air	
terhadap volta	ase bangkitan dari masing – masing jumlah	
cantilever pie	zoelectric	.70

Gambar 4.13	Grafik pengaruh jumlah cantilever
<i>piezoelectric</i> to	erhadap voltase bangkitan dari masing –
masing frekue	nsi gelombang air71
Gambar 4.14	Grafik pengaruh frekuensi gelombang air
terhadap arus l	istrik bangkitan dari masing – masing jumlah
cantilever piez	<i>toelectric</i> 73
Gambar 4.15	Grafik pengaruh jumlah cantilever
piezoelectric to	erhadap arus listrik bangkitan dari masing –
masing frekue	nsi gelombang air74
Gambar 4.16	Grafik pengaruh frekuensi gelombang air
terhadap daya	listrik bangkitan dari masing – masing jumlah
cantilever piez	coelectric76
Gambar 4.17	Grafik pengaruh jumlah cantilever
piezoelectric to	erhadap daya listrik bangkitan dari masing –
masing frekue	nsi gelombang air76

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Data Teknis Beberapa Jenis Piezoelectric Mater	ial .30
Tabel 2.2 Energi Bangkitan, Displacement Dan Kapasitan	si Pada
Piezoelectric	31
Tabel 4.1 Parameter gelombang	56
Tabel 4. 2 Perhitungan Momen Inersia	56
Tabel 4.3 Parameter Sistem Mekanisme PLTG-Air Tipe	
Pelampung Silinder	57

BABI

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Gelombang laut merupakan pergerakan naik dan turunnya muka air laut yang membentuk lembah dan bukit. Gelombang akan mempunyai bentuk ideal jika mengikuti gerak sinusoidal. Pemanfaatan energi gelombang laut untuk sumber energi alternative sangat cocok diterapkan di Indonesia, dimana berdasarkan UU No.4/PRP/1960 tentang perairan Indonesia, wilayah Indonesia mencapai 5.193.252 km² yang terdiri atas 1.890.754 km² luas daratan dan 3.302.498 km² luas lautan. Dengan kata lain luas lautannya mencapai 2/3 dari keseluruhan luas Indonesia. Inilah yang menjadikan Indonesia berpeluang besar sebagai salah satu negara yang mengembangkan *energy harvesting* (pemanen energi) dengan memanfaatkan potensi gelombang laut di perairan Indonesia.

Salah satu cara memanfaatkan energi gelombang laut adalah untuk menghasilkan listrik, atau yang biasa disebut pembangkit listrik tenaga gelombang laut (PLTGL). Sudah ada beberapa penelitian yang mengembangkan PLTGL ini. Pada penelitan I Made Susanto, 2015[1] dijelaskan tentang pemanfaatan prinsip GGL induksi yang dilakukan dalam skala laboratorium dengan menggunakan metode pelampung. Besar GGL induksi dipengaruhi oleh tiga faktor yaitu jumlah lilitan, kuat medan magnet, dan kecepatan gerak magnet. Sedangkan untuk sistem pembangkit listrik, yang mempengaruhi besar GGL induksi diantaranya terletak pada bentuk pelampung, panjang lengan, massa pelampung dan cepatnya putaran pada transmisi. Fungsi gaya inputan adalah dengan memanfaatkan gaya

angkat dari gelombang dan gaya apung dari pelampung. Sedangkan pada kasus pembangkit listrik tenaga gelombang laut, gaya apung dan gaya angkat dari gelombang laut sangat dipengaruhi oleh massa pelampung dan massa dari batang penggeraknya. Pada saat pergerakan turun secara riilnya dapat dimanfaatkan sebagai penggerak generator dengan memanfaatkan gaya berat batang dan gaya berat pelampung.

Melanjutkan penelitian yang sudah dilakukan I Made Susanto dimana voltase atau listrik yang dihasilkan berasal dari putaran generator, pada penelitian ini akan digunakan cantilever piezoelectric sebagai pengganti generator. Cantilever piezoelectric material merupakan material yang memiliki kemampuan untuk membangkitkan potensial listrik sebagai respon dari tegangan mekanik yang diberikan pada material tersebut. Blade akan dipasang seporos dengan poros keluaran pada gearbox. Blade inilah yang nantinya akan memukul cantilever piezoelectric sehingga menyebabkan cantilever piezoelectric mengalami defleksi. Defleksi dari cantilever piezoelectric inilah yang mempengaruhi energi listrik pada cantilever piezoelectric.

Penelitian ini dilakukan menggunakan metode simulasi. Dimana penggunaan simulasi dirasa lebih efisien, dikarenakan dengan simulasi dapat dilakukan variasi yang lebih banyak dibandingkan dengan langsung menggunakan metode eksperimen. Dan juga metode simulasi digunakan terlebih dahulu sebelum metode eksperimen, agar pada saat melakukakan eksperimen hasil yang didapatkan lebih valid.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijabarkan, maka pada penelitian ini disimulasikan rancangan dari mekanisme Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Air (PLTG-Air) yang menggunakan pelampung silinder. Inputan energi mekanik digunakan untuk menggerakkan *cantilever piezoelectric*, yang selanjutnya akan menghasilkan energi listrik. Sehingga dalam tugas akhir ini akan dilakukan beberapa hal, diantaranya:

- 1. Bagaimana permodelan PLTG-Air tipe pelampung silinder dengan menggunakan metode *cantilever piezoelectric*.
- 2. Bagaimana pengaruh permodelan PLTG-Air tipe pelampung silinder dengan menggunakan metode *cantilever piezoelectric* terhadap energi listrik yang dihasilkan.
- 3. Bagaimana menganalisa energi listrik yang dihasilkan PLTG-Air dari pelampung silinder dengan menggunakan metode *cantilever piezoelectric*.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian berdasarkan perumusan masalah adalah sebagai berikut:

- 1. Dapat merancang PLTG-Air tipe pelampung silinder dengan menggunakan metode *cantilever piezoelectric*.
- 2. Dapat memodelkan dan menganalisa energi listrik yang dihasilkan PLTG-Air tipe pelampung silinder dengan menggunakan metode *cantilever piezoelectric*.
- 3. Mengetahui analisa energi listrik yang dihasilkan PLTG-Air dari pelampung silinder dengan menggunakan metode *cantilever piezoelectric*.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

1. Memodelkan mekanisme PLTG-Air metode pelampung dengan menggunakan *cantilever piezoelectric*.

- 2. Gelombang yang merambat diasumsikan uniform dan searah.
- 3. Gerakan pelampung dianggap satu derajat kebebasan ke arah vertikal.
- 4. Nilai *damping* yang diakibatkan oleh gaya gesek pada *bearing* diabaikan.
- 5. Poros dianggap rigid.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang diperoleh dari penelitian ini adalah:

- 1. Mendapatkan energi listrik dengan memanfaatkan energi gelombang air dalam skala laboratorium.
- 2. Mengembangkan model pengbangkit listrik di Indonesia dengan menggunakan pelampung silinder metode *cantilever piezoelectric*.
- 3. Menjadi referensi dalam pembuatan alat pemanen energi dengan memanfaatkan energi gelombang air menggunakan pelampung silinder atau metode *cantilever piezoelectric* dalam skala yang lebih besar.
- 4. Mengoptimalkan sumber daya alam berupa gelombang air menjadi salah satu sumber energi terbarukan.

BAB II

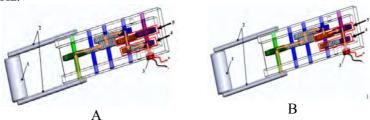
KAJIAN PUSTAKA

2.1 Kajian Terdahulu

2.1.1 Alat Pemanen Energi Tipe Pelampung

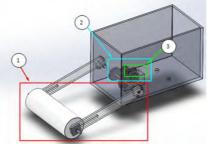
Pada tahun 2015[1], I Made Susanto melakukan studi karakteristik tentang energi listrik yang dihasilkan pembangkit listrik tenaga gelombang laut (PLTGL) metode pelampung silinder dengan variasi dimensi pelampung dan panjang lengan. Inputan awal didapatkan dari gelombang yang akan menggerakkan pelampung silinder naik-turun dan kemudian memutar gearbox dan generator, perubahan gerakan gear saat pelampung naik dan turun dapat dilihat pada gambar 2.1 dan 2.2. Variasi dimensi lengan yang digunakan yaitu 50 cm, 45 cm dan 30 cm dengan variasi dimensi pelampung 30 cm, 28 cm, dan 25 cm serta variasi frekuensi pada 1 Hz, 2 Hz dan 3 Hz.

Hasil yang diperoleh berdasarkan eksperimen ini adalah nilai daya listrik meningkat seiring dengan meningkatnya panjang pelampung, nilai voltase yang terbesar 0.2889V terjadi pada panjang lengan 30 cm, panjang pelampung 30 cm dan frekuensi 3 Hz.



Gambar 2.1 Gerakan Gearbox Saat Bergerak Ke Atas Dan Ke Bawah[1]

Masih di tahun yang sama pada 2015[2] Jemy Akvianto juga melakukan studi eksperimen dan analisa tentang energi listrik yang dihasilkan prototipe mekanisme PLTGL metode pelampung dengan variasi pembebanan dan panjang lengan. Variasi pembebanan secara berturut-turut sebesar 0.1 kg, 0.2 kg, dan 0.3 kg serta panjang lengan sebesar 35 cm, 40 cm dan 45 cm. Gambar perancangan PLTGL dapat dilihat pada gambar 2.2. Pelampung tersebut dapat bergerak naik turun, sehingga gerakan tersebut dapat dikonversikan ke gerakan berputar. Dipasang pula gearbox untuk mempercepat putaran input yang akan diteruskan menuju generator.



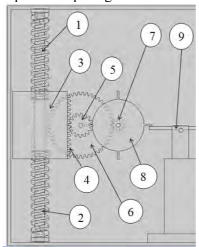
Gambar 2.2 Perancangan PLTGL[2]

Keterangan gambar:

- 1. Prototipe mekanisme perubah gerakan naik turun ombak menjadi gerakan rotasi.
- 2. Prototipe mekanisme mempercepat putaran.
- 3. Prototipe mekanisme gearbox yang diintegrasikan secara langsung dengan generator.

Hasil yang diperoleh berdasarkan eksperimen yang dilakukan yaitu nilai daya akan menurun seiring bertambahnya massa pelampung, sebaliknya nilai daya akan bertambah seiring bertambahnya panjang lengan pelampung. Nilai daya terbesar pada saat massa pelampung 0.1 kg, lengan pelampung 45 cm dengan frekuensi pembuat gelombang 15 Hz yaitu sebesar 3.66 miliWatt. Untuk efisiensi maksimumnya sebesar 0.15% dan efisiensi minimumnya sebesar 0.03%.

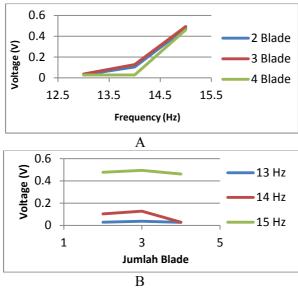
Di tahun 2015 [3], Joenta Indraswara melakukan studi yang karakteristik tentang voltase bangkitan dihasilkan mekanisme vibration energy harvesting menggunakkan metode cantilever piezoelectric-pengungkit daya dengan variasi jumlah blade pemukul dan frekuensi sumber getar. Piezoelectric merupakan media energy converter, dimana material piezoelectric dapat mengubah strain mekanik menjadi arus listrik atau voltase. Variasi jumlah blade yang digunakan yaitu 2 blade, 3 blade dan 4 blade. Inputan berupa sumber getar yang akan menggerakkan massa yang dihubungkan dengan gearbox yang akan memberikan frekuensi eksitasi lebih besar. Putaran dari gearbox diteruskan ke blade yang nantinya akan memukul pengungkit, dimana pengungkit ini secara bolak-balik akan memukul piezoelectric yang diletakkan di atas dan di bawah dari ujung lain pengungkit. Piezoelectric yang terkena pukulan akan terdefleksi menghasilkan voltase bangkitan. Untuk lebih jelasnya mekanisme dapat dilhat pada gambar 2.3.



Gambar 2.3 Permodelan Mekanisme[3]

Keterangan gambar:

- 1. Pegas 1
- 2. Pegas 2
- 3. Massa
- 4. Rack
- 5. Gear 1
- 6. Gear 2
- 7. Gear 3
- 8. One Way Gear dan Blade
- 9. Pengungkit
- 10. Cantilever Piezoelectric 1
- 11. Cantilever Piezoelectric 2



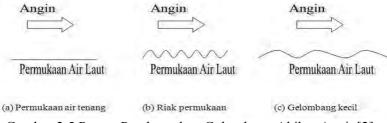
Gambar 2.4 Grafik Hasil Percobaan[3]

Hasil yang diperoleh menyatakan semakin besar frekuensi sumber getaran yang diberikan maka voltase bangkitan yang dihasilkan juga semakin besar. Voltase terbesar ditunjukkan dengan menggunakan jumlah blade sebanyak tiga. Untuk lebih jelasnya, hasil percobaan dapat dilihat pada gambar 2.4(A) yang merupakan grafik perbandingan voltase bangkitan terhadap frekuensi secara pengujian dan 2.4(B) yang merupakan grafik perbandingan voltase bangkitan terhadap jumlah blade secara pengujian.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Gelombang Laut

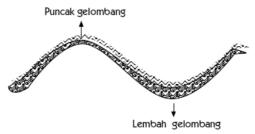
Gelombang merupakan gerakan naik turunnya air laut yang membentuk lembah dan bukit mengikuti gerak sinusoidal. Prinsip dasar terjadinya gelombang laut adalah jika ada dua massa benda yang berbeda kerapatannya (densitasnya) bergesekan satu sama lain, maka pada bidang geraknya akan terbentuk gelombang. Gelombang laut tidak terjadi secara sendirinya, melainkan disebabkan oleh adanya angin. Namun proses terbentuknya gelombang laut oleh gerakan angin belum sepenuhnya dapat dijelaskan secara terperinci. Menurut perkiraan, gelombang terjadi karena hembusan angin secara teratur, terusmenerus di atas permukaan air laut. Hembusan angin yang demikian akan membentuk riak permukaan yang bergerak searah dengan hembusan angin tersebut [4]. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 2.5.



Gambar 2.5 Proses Pembentukan Gelombang Akibat Angin[2]

Bila angin berhembus dalam waktu yang cukup lama dan meliputi jarak permukaan laut yang cukup besar, maka riak air akan tumbuh menjadi gelombang. Pada saat yang bersamaan, riak permukaan baru akan terbentuk di atas gelombang yang terbentuk, dan selanjutnya akan berkembang menjadi gelombang – gelombang baru tersendiri. Proses yang demikian tentunya akan berjalan terus menerus (kontinyu), dan bila gelombang diamati pada waktu dan tempat tertentu, akan terlihat sebagai kombinasi perubahan-perubahan panjang gelombang dan tinggi gelombang yang saling bertautan. Komponen gelombang secara individu masih akan mempunyai sifat-sifat seperti gelombang pada kondisi ideal, yang tidak terpengaruh oleh gelombang-gelombang lain. Sedang dalam kenyataannya, sebagai contoh, gelombang-gelombang yang bergerak secara cepat akan melewati gelombang-gelombang lain yang lebih pendek (lamban), yang

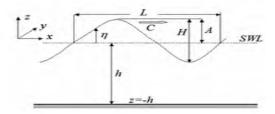
selanjutnya mengakibatkan terjadinya perubahan yang terusmenerus bersamaan dengan gerakan gelombang-gelombang yang saling melampaui [5].



Gambar 2.6 Satu Buah Gelombang [4]

Satu buah gelombang seperti pada Gambar 2.6 terdiri dari :

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



Gambar 2.7 Sketsa Gelombang Laut [5]

Untuk dasar menentukan kandungan energi gelombang,

diperlukan beberapa istilah seperti yang terlihat pada gambar 2.7 yang berada dalam koordinat x-y dimana gelombang merambat searah sumbu x.

Keterangan:

d : Jarak antara muka air rata dan dasar laut (kedalaman laut)

 η : Fluktuasi muka air terhadap muka air diam [η = A cos (kx– σt)]

A : Amplitudo gelombang

H : Tinggi gelombang (H = 2A)

L : Panjang gelombang, jarak antara dua puncak gelombang yang berurutan

T : Periode gelombang, yaitu interval waktu yang diperlukan oleh partikel air untuk kembali pada kedudukan yang sama dengan sebelumnya

C : Kecepatan rambat gelombang (C = L/T)

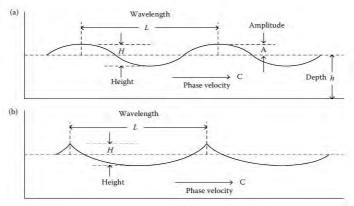
k : Angka gelombang ($k = 2\pi / L$)

 σ : Frekuensi gelombang ($\sigma = 2\pi / T$)

g : Gravitasi ($g = 9.81 \text{ m/s}^2$)

2.2.2 Analisa Gaya Pada Gelombang Laut

Energi gelombang total terdiri dari jumlah energi kinetik dan energi potensial[6]. Energi potensial gelombang laut adalah energi yang tersimpan pada gelombang dimana besarnya dari energi potensial tersebut tergantung dari dimana gelombang itu merambat, tinggi gelombang, dan waktu periode dari gelombang tersebut.



Gambar 2.8 Karakteristik Gelombang [7]

Total energi potensial dan energi kinetik dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$E_{density} = \rho_{water} \cdot g \cdot \frac{H^2}{8} = \rho_{water} \cdot g \cdot A^2 / 2$$
 (2.1)

$$P_{density} = \frac{E_{density}}{T} = \rho_{water}.g.\frac{H^2}{(8T)} = \rho_{water}.g.A^2/(2T) \quad (2.2)$$

$$E = \frac{1}{2}\rho g A^2 \tag{2.3}$$

Dimana:

E = Energi potensial (joule)

 $g = Percepatan grafitasi (9,8 m/s^2)$

 $\rho = Densitas air (1000 \text{ kg/m}^3)$

A = Amplitude gelombang (m)

T = Periode gelombang (s)

L = Panjang gelombang (m)

Untuk mendapatkan rata – rata energi atau daya dari periode gelombang, energi E pada persamaan (2.3) dikalikan dengan kecepatan rambat gelombang (v_g) pada persamaan (2.4), (Michhael Mc Cormick, 2010) [7].

$$v_g = \frac{L}{2T} \tag{2.4}$$

$$P_{w} = \frac{1}{2} \rho g A^{2} \frac{L}{2T} \tag{2.5}$$

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tag{2.6}$$

Subtitusi persamaan (2.6) ke persamaan (2.5) sehingga didapatkan:

$$P_{W} = \frac{\rho g^2 A^2 T}{8\pi} \tag{2.7}$$

$$P_{w} = \frac{\rho \cdot g^{2} \cdot (\eta_{(x,t)})^{2} \cdot T}{8\pi}$$
 (2.8)

$$P_{W} = \frac{\rho \cdot g^{2}}{8\pi} \left(\frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t) \right)^{2} \cdot T$$
 (2.9)

$$P_W = \frac{\rho \cdot g^2 \cdot H^2 \cdot T(\cos(kx - \sigma t))^2}{32\pi}$$
 (2.10)

Dimana:

$$k = \frac{2\pi}{L} \tag{2.11}$$

$$\sigma = \frac{2\pi}{T} \tag{2.12}$$

Dengan trigonometri maka persamaan (2.10) dapat diuraikan sebagai berikut:

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

$$(\cos(kx - \sigma t))^{2} = (\cos kx \cdot \cos \sigma t + \sin kx \cdot \sin \sigma t)^{2}$$
(2.13)

$$(\cos(kx - \sigma t))^2 = (\cos kx \cdot \cos \sigma t + \sin kx \cdot \sin \sigma t)^2 \quad (2.14)$$

Pada saat x = 0, karena posisi pelampung tetap pada posisi awal, maka dapat diselesaikan sebagai berikut:

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

$$\cos 0 = 1 ; \sin 0 = 0$$

Maka:

$$(\cos(kx - \sigma t))^2 = (1.\cos \sigma t + 0)^2 (\cos(kx - \sigma t))^2 = (1.\cos \sigma t)^2$$
 (2.15)

Substitusikan peramaan (2.12) kepersamaan (2.15), maka:

$$(\cos(kx - \sigma t))^2 = \left(1.\cos\frac{2\pi t}{T}\right)^2 \tag{2.16}$$

Substistusikan persamaan (2.15) kepersamaan (2.13), maka:

$$P_{W} = \frac{\rho \cdot g^{2} \cdot H^{2} \cdot T}{32\pi} \left(\cos \frac{2\pi t}{T}\right)^{2} \tag{2.17}$$

Dari persamaan 2.17 diatas, dapat diketahui gaya gelombang yang dikonversikan oleh mekanisme pelampung dengan rumusan sebagai berikut:

$$F wave = \frac{P_{wave}}{c_q} \tag{2.18}$$

Sehingga,

$$F wave = \frac{\rho g^2 H^2 T}{32\pi c_q} \left(\cos\frac{2\pi t}{T}\right)^2 \tag{2.19}$$

Dimana c_g merupakan setengah cepat rambat suatu gelombang (c) dengan persamaan:

$$c = \frac{\lambda}{T} = \frac{1}{2}c_{g}$$

$$c_{g} = 2c$$

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

$$F_{w} = \frac{\rho g^{2}H^{2}T}{32\pi c_{g}} \left(\cos\frac{2\pi t}{T}\right)^{2} = \frac{\rho g^{2}H^{2}T^{2}}{64\pi\lambda} \left(\cos\frac{2\pi t}{T}\right)^{2} = \frac{\rho g.H^{2}}{32} (\cos\frac{2\pi t}{T})^{2}$$
(2.20)

Keterangan:

g = Percepatan grafitasi (9.8 m/s²)

 ρ = Densitas air (1000 kg/m³)

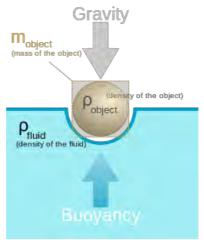
A = Amplitudo gelombang (m)

 λ = Panjang gelombang (m)

T = Periode gelombang (s)

2.2.3 Gaya Apung (Bouyancy Force)

Gaya apung disebut juga *bouyancy force* (F_b), merupakan gaya tekan ke atas dari suatu benda yang mengapung, dimana besarnya sama dengan berat air yang dipindahkan (*Archimedes Principle*) seperti terlihat pada gambar 2.9.



Gambar 2.9 Analisa Gaya Yang Dihasilkan Pelampung[5]

$$F_b = \rho_{fluida}.V_{benda}.g \tag{2.21}$$

Dimana:

= Berat jenis air (kg/m³) ρ

= Volume benda tenggelam (m³) = Gaya gravitasi (m/s²) V

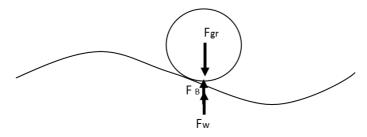
g

2.2.4 Gaya Generated

Gaya *generated* merupakan gaya yang dihasilkan dari resultan gaya yang terdiri dari gaya gelombang, gaya apung pelampung dan gaya grafitasi, untuk dapat menggerakkan lengan dan pergerakan diteruskan ke roda gigi utama untuk menggerakkan blade. FBD pelampung dapat terlihat pada gambar 2.10.

$$F_{generated} = (F_w + F_b) - F_{grafitasi}$$
 (2.22)

$$F_{\text{generated}} = [F_w + (\rho_{fluida}.V_{fluida} \text{ tercelup} \cdot g)] - (m.g)$$
(2.23)



Gambar 2.10 Gaya-Gaya Yang Bekerja Pada Pelampung[5] Keterangan :

 $F_{generated}$ = gaya yang ditansferkan oleh gelombang.

F_w = gaya yang dihasilkan oleh gelombang.

 F_b = gaya apung pelampung.

 $F_{gravitasi}$ = gaya berat yang diterima sistem penangkap gelombang.

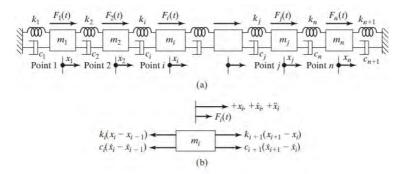
2.3 Sistem Dinamis

Sistem dinamis merupakan suatu metode untuk mendeskripsikan, memodelkan, dan mensimulasikan suatu sistem yang dinamis (dari waktu ke waktu yang terus berubah). Terdapat

dua jenis, sistem massa diskret dan sistem massa kontinu. Pada sistem getaran massa diskret setiap massa dianggap sebagai bodi kaku dan tidak mempunyai elastisitas. Sebaliknya pada sistem massa kontinyu, massa yang bergetar tidak dianggap sebagai bodi kaku tetapi mempunyai elastisitas sehingga dimungkinkan adanya gerak relatif di antara titik-titik pada massa tersebut. Sistem massa kontinyu memiliki n derajat kebebasan yang tak berhingga.

2.3.1 Sistem Getaran Multi Derajat Kebebasan (m-DOF)

Derajat kebebasan adalah jumlah minimum koordinat independen yang diperlukan untuk menentukan posisi dari semua bagian sistem yang dianalisa pada sebarang waktu. Sistem getaran mesin dengan multi derajat kebebasan (MDOF) adalah sistem yang digunakan untuk menentukan kedudukan massa dalam ruang yang membutuhkan banyak (n) arah koordinat bebas. Sistem getaran tersebut dapat digambarkan dalam sistem massa pegas seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.11 berikut ini. Bila gerakan massa m₁ dan m₂ secara vertikal dibatasi paling sedikit dibutuhkan satu koordinat x (t) untuk menentukan kedudukan massa pada berbagai waktu. Berarti membutuhkan dua buah koordinat bersama-bersama untuk menentukan kedudukan massa yaitu kedudukan massa satu pada waktu tertentu (x₁) dan kedudukan massa dua pada waktu tertentu (x_2) .



Gambar 2.11 Sistem Pegas Multi-DOF[8]

Untuk membuat persamaan gerak gambar 2.11(a) menggambar free-body diagram terlebih dahulu, kemudian menurunkan persamaan dengan menggunakan hukum kedua Newton. Free-body diagram untuk massa m_i ditunjukkan oleh gambar 2.11(b). Dengan menggunakan hukum kedua Newton didapatkan persamaan gerak untuk m_i

$$m_i \ddot{x_i} - c_i \dot{x_i} + (c_i + c_{i+1}) \dot{x_i} - c_{i+1} \dot{x_{i+1}} - k_i x_{i-1} + (k_i + k_{i+1}) x_i - k_{i+1} x_{i+1} = F_i \; ; \qquad i = 2, 3, ..., n-1$$
(2.24)

Persamaan gerak dari m_1 dan m_n dapat diperoleh dari persamaan 2.24. Bila i = 1 maka $x_0 = 0$, sedangkan untuk i = n nilai $x_{n+1} = 0$. Sehingga persamaan geraknya menjadi :

$$m_{1}\ddot{x}_{1}-(c_{1}+c_{2})\dot{x}_{1}-c_{2}\dot{x}_{2}+(k_{1}+k_{2})x_{1}-k_{2}x_{2}=F_{1}$$
(2.25)

$$m_{n}\ddot{x}_{n}-c_{n}\dot{x}_{n-1}+(c_{n}+c_{n+1})\dot{x}_{n}-k_{n}x_{n-1}+(k_{n}+k_{n+1})x_{n}=F_{n}$$
(2.26)

Subtitusi persamaan (2.24) dan (2.26) ke dalam bentuk matrix seperti persamaan di bawah ini:

$$[m]\ddot{\vec{x}} + [c]\dot{\vec{x}} + [k]\vec{x} = \vec{F}$$
 (2.27)

Dimana [m], [c], dan [k] adalah matriks dari massa, damping dan pegas, dimana matriksnya dijabarkan pada persamaan di bawah ini :

$$\begin{bmatrix} K \end{bmatrix} = \\ \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 & & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & -k_3 & k_3 + k_4 & & 0 & 0 \\ & \vdots & & \ddots & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & -k_N & (k_N + k_{N+1}) \end{bmatrix}$$
 (2.30)

2.3.2 Momen Inersia Gabungan

Momen inersia gabungan digunakan untuk menghitung total momen inersia antar massa. Dalam penggubungan tersebut perlu ditinjau *kopling* yang digunakan antar massa. *Kopling* sendiri terbagi dari *kopling* langsung dan *kopling* melalui roda gigi.

a. Kopling langsung

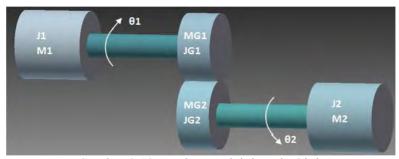


Gambar 2.12 Kopling Langsung

Gabungan momen inersia dari dua massa seperti pada gambar 2.12, dimana di*kopling* secara langsung adalah dengan menjumlahkan momen inersia massa 1 dengan momen inersia massa 2.

$$J_{Total} = J_1 + J_2 (2.31)$$

b. Kopling melalui roda gigi



Gambar 2.13 Kopling Melalui Roda Gigi

Untuk kopling melalui dua roda gigi dapat dilihat pada gambar 2.13. Gear 1 (G_1) satu sumbu dengan massa 1 (M1), dan gear 2 (G_2) satu sumbu dengan massa 2 (M2). Gear ratio (N) merupakan perbandingan gigi *output* terhadap *input*. Momen inersia total dari sistem dapat dihitung menggunakan hukum kekekalan energi, dimana energi kinetik di sisi

massa 1 sama dengan penjumlahan energi kinetik pada masing-masing elemen dari transmisi.

$$W = \frac{1}{2}J_1\dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2}J_{G1}\dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2}J_{G2}\dot{\theta}_2^2 + \frac{1}{2}J_2\dot{\theta}_2^2$$
 (2.32)

Kemudian semua elemen direfleksikan ke sumbu massa 1, sehingga persamaannya menjadi sebagai berikut.

$$W = \frac{1}{2}\dot{\theta}_{1}^{2} \left(J_{1} + J_{G1} + J_{G2}\frac{\dot{\theta}_{2}^{2}}{\dot{\theta}_{1}^{2}} + J_{2}\frac{\dot{\theta}_{2}^{2}}{\dot{\theta}_{1}^{2}}\right)$$

$$\frac{1}{2}J_{Total}\dot{\theta}_{1}^{2} = \frac{1}{2}\dot{\theta}_{1}^{2} \left(J_{1} + J_{G1} + J_{G2}\frac{\dot{\theta}_{2}^{2}}{\dot{\theta}_{1}^{2}} + J_{2}\frac{\dot{\theta}_{2}^{2}}{\dot{\theta}_{1}^{2}}\right)$$

$$J_{Total} = \left(J_{1} + J_{G1} + J_{G2}\frac{\dot{\theta}_{2}^{2}}{\dot{\theta}_{1}^{2}} + J_{2}\frac{\dot{\theta}_{2}^{2}}{\dot{\theta}_{1}^{2}}\right)$$

$$J_{Total} = \left[J_{1} + J_{G1} + (J_{G2} + J_{2})\frac{\dot{\theta}_{2}^{2}}{\dot{\theta}_{1}^{2}}\right]$$

Dengan gear ratio:

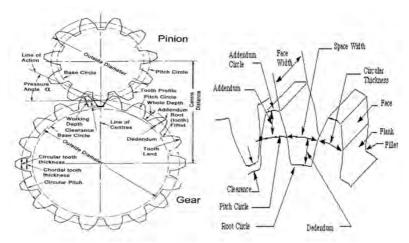
$$\frac{\theta_1}{\theta_2} = \frac{\dot{\theta}_1}{\dot{\theta}_2} = \frac{r_2}{r_1} = N$$

Maka persamaan menjadi

$$J_{Total} = \left[J_1 + J_{G1} + (J_{G2} + J_2) \left(\frac{1}{N} \right)^2 \right]$$
 (2.33)

2.4 Roda Gigi (Gearbox)

Roda gigi merupakan salah satu alat pemindah tenaga yang berfungsi sebagai pengubah momen yang akan diteruskan ke mesin, menyediakan rasio gigi yang sesuai dengan beban mesin dan menghasilkan putaran mesin tanpa selip. Roda gigi lurus (*Spur Gear*) digunakan untuk mentransmisikan daya dan gerak pada dua poros yang paralel. Pada gambar 2.14 dapat dilihat gambaran dari spur gear, dimana ukuran yang kecil dari pasangan roda gigi disebut pinion (berfungsi sebagai penggerak) sedangkan yang besar disebut gear (yang digerakkan).



Gambar 2.14 Roda Gigi Lurus (Spur Gear)[8]

Maka untuk mencari rasio roda gigi dapat digunakan persamaan sebagai berikut:

$$\frac{\theta_1}{\theta_2} = \frac{r_2}{r_1} = N \tag{2.34}$$

Dimana

$$r_1.\theta_1 = r_2.\theta_2 \tag{2.35}$$

$$r_1 \cdot \theta_1 = r_2 \cdot \theta_2$$
 (2.35)
 $\frac{r_2}{r_1} = \frac{n_2}{n_1} = N$ (2.36)

Keterangan:

 r_1 = Jari-jari roda gigi input (m).

 r_2 = Jari-jari roda gigi outpu (m).

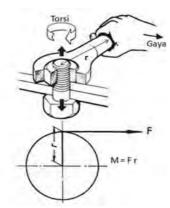
n = kecepatan keliling (rpm)

N = Rasio gear (m).

2.4.1 Momen

Momen merupakan vektor M yang arahnya tegak lurus terhadap bidang benda. Arah M adalah tergantung pada arah berputarnya benda akibat gaya F. Arah dari momen dapat ditentukan dengan menggunakan konversi tanda misalnya tanda plus (+) untuk arah momen yang berlawan arah jarum jam, dan tanda minus (-) untuk yang searah jarum jam. Penentuan tanda dari momen ini harus konsisten untuk semua persoalan. Momen torsi terlihat pada Gambar 2.15, dengan rumusan sebagai berikut :

$$Mt = F.r (2.37)$$



Gambar 2.15 Torsi Yang Bekerja Pada Poros Utama[1]

Keterangan:

M = momen

F = gaya yang bekerja

r = lengan gaya.

2.4.2 Konstanta Damping Torsi

Konstanta damping torsi merupakan gaya gesek yang diterima dari poros jika poros itu diputar, dimana untuk menghitung damping torsi (B_t) adalah *viscosity* dikali luas permukaan kontak dibagi ketebalan viskositas fluida [9], maka untuk mencari damping torsi dapat digunakan persamaan berikut.

$$B_t = \frac{\mu \cdot A}{h} \tag{2.38}$$

Keterangan:

 B_t = Konstanta damping bearing

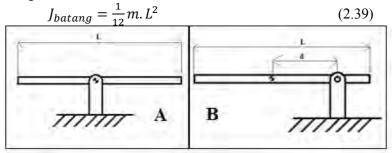
 $\mu = Viscosity$ (Pa-s)

 $A = \text{Luas area kontak } (\text{m}^2)$

h = Ketebalan viscous fluid (m)

2.4.3 Momen Inersia

Momen inersia merupakan hasil kali massa sebuah partikel (m) dengan kuadrat jarak partikel dari titik rotasinya (r). Untuk momen inersia pada poros tepat pada *center of gravity* batang seperti pada gambar 2.16 (A) maka persamaannya adalah sebagai berikut :



Gambar 2.16 Poros tetap di COG (A) dan poros tidak dengan jarak d dari COG (B)[10]

Sedangkan momen inersia dengan poros tidak pada *center of gravity* seperti pada gambar 2.16 (B) yaitu :

$$J_{batang} = \frac{1}{12} m. L^2 + m. d^2$$
 (2.40)

Dimana:

J = momen inersia m = massa batang

L = panjang keseluruhan batang

d = jarak antara pusat massa ke poros putar

2.4.4 Konstanta Kekakuan Torsi Poros

Konstanta kekakuan torsi poros merupakan perkalian modulus elastisitas bahan dengan diameter poros dan panjang poros, maka untuk mencari kekakuan torsi poros[11] dengan rumusan sebagai berikut:

$$K = \frac{\pi \times G}{32 \times l} \times d^4 \tag{2.41}$$

Keterangan:

K = Kekakuan torsi poros (Nm/rad)

 $G = Modolus \ elastistas$ bahan (N/m^2) , bahan yang digunakan gray cast iron, sehingga besarnya $G = 6.6 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$

1 = Panjang poros (m).

d = Diameter poros (m).

2.5 Piezoelectric

2.5.1 Pengertian Piezoelectric

Piezoelectric material merupakan material yang memiliki kemampuan untuk membangkitkan potensial listrik sebagai respon dari tegangan mekanik yang diberikan pada material tersebut, pada umumnya kristal batuan, keramik, termasuk tulang dan polimer. Kata piezo berasal dari bahasa Yunani piezo atau piezein yang berarti memeras atau menekan. Efek piezoelectric ditemukan oleh Jacques dan Pierre Curie bersaudara pada tahun 1880. Mereka menemukan bahwa jika sebuah tegangan mekanik diaplikasikan pada suatu kristal tertentu seperti tourmaline, quartz, topaz, garam rochelle dan gula tebu akan muncul suatu muatan listrik dan tegangan listrik tersebut proporsional dengan tegangan mekanik yang diberikan. Material piezoelectric dapat dibagi menjadi 3 jenis yaitu:

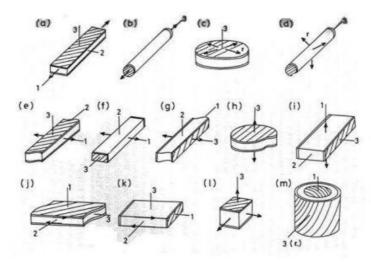
• Kristal, seperti Quartz (SiO2), Gallium Orthophosphate(GaPO4)

- 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 terjadi suatu medan listrik pada material tersebut, fenomena efek piezoelectric. Efek piezoelectric ini vang disebut mendeskripsikan hubungan antara tegangan mekanik dengan tegangan listrik pada benda padat. Efek piezoelectric tersebut menghasilkan bersifat reversible vaitu dapat (menghasilkan energi piezoelectric effect iika diaplikasikan tegangan mekanik) dan menghasilkan reverse piezoelectric effect(menghasilkan tegangan dan/atau mekanik jika diaplikasikan beda potensial listrik).

2.5.2 Bentuk Piezoelectric

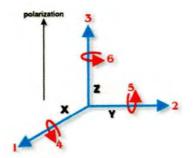
Setiap *piezoelectric* memiliki karakteristik yang berbeda, tergantung dari bentuk, pemanfaatan, sifat mekanik, energi yang dihasilkan, komposisi material, dan faktor lain yang mempengaruhi kinerjanya. *Piezoelectric* memiliki beberapa bentuk yang dapat dilihat pada gambar 2.17. Bentuk – bentuk tersebut disesuaikan untuk aplikasi – aplikasi tertentu. Tiap-tiap bentuk *piezoelectric* yang berbeda memiliki energi bangkitan yang berbeda pula. Untuk besarnya energi bangkitan yang dihasilkan dipengaruhi oleh sifat mekanik dari *piezo* material yang digunakan.



Gambar 2.17 Beberapa Contoh Bentuk *Piezoelectric*[12]

2.5.3 Piezoelectric Konstan

Keramik *piezoelectric* merupakan material anisotropic. Untuk itu diperlukan konstanta phisik yang dapat menyatakan hubungan antara arah gaya mekanik dan gaya listrik yang diberikan atau dihasilkan. Hubungan tersebut tergantung dari sifat keramik *piezoelectric*, ukuran dan bentuk elemen, serta arah dari eksitasi mekanik atau elektrik. Identifikasi arah pada elemen piezoelectric mengacu pada 3 sumbu yang analog dengan sumbu X, Y dan Z pada sistem sumbu ortogonal. Untuk gaya / tegangan normal ketiga sumbu yang bersesuaian dengan sumbu X, Y, Z dinotasikan sebagai 1, 2, dan 3. Sedangkan untuk gaya / tegangan geser, ketiga sumbu koordinat tersebut direpresentasikan oleh subscript 4, 5, dan 6. Pada umumnya polarisasi keramik ditentukan sejajar dengan sumbu 3, yang mana arah polarisasi tersebut ditetapkan selama proses produksi untuk mengaktifkan material seperti tampak pada gambar 2.18.



Gambar 2.18 Difinisi Arah Pada Elemen Piezoelectric[12]

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

Beberapa konstanta material piezoceramic ditandai dengan superscript yang menyatakan spesifikasi kondisi mekanik dan elektrik. Superscript yang digunakan adalah T, S, E, dan D. Contoh, K_3^T menyatakan konstanta dielectric relative diukur dalam arah polarisasi (3), pada tegangan konstan.

Dimana:

T = tegangan konstan (sistem bebas secara mekanik)

S = regangan konstan (sistem dibatasi secara mekanik)

E = medan listrik konstan (*short circuit*)

D = perpindahan elektrik konstan (open circuit)

Beberapa definisi tentang konstanta yang sering digunakan adalah .

a. Piezoelectric Charge Constant

Piezoelectric charge constant (d) adalah polarisasi yang dibangkitkan per-unit tegangan mekanik yang diaplikasikan pada material *piezoelectric*, atau regangan mekanik yang terjadi pada material *piezoelectric* per-unit medan listrik yang diberikan. Sebagai contohnya, d_{33} , d_{31} , dan d_{15}

b. Piezoelectric Voltage Constant

Piezoelectric voltage constant (g) adalah medan listrik yang dibangkitkan oleh material piezoelectric per-unit tegangan mekanik yang diberikan, atau regangan mekanik yang ditunjukkan oleh material piezoelectric per-unit perpindahan listrik yang diberikan. Sebagai contohnya g₃₁, g₃₃ dan g₁₅. G₃₁ adalah medan listrik yang terinduksi pada arah 3 (paralel terhadap arah polarisasi elemen) per unit tegangan normal yang diberikan pada arah 1, atau regangan yang terjadi dalam arah 1 per-unit perpindahan listrik yang diberikan pada arah 3.

c. Electromechanical coupling factor

Electromechanical coupling factor (k), merupakan indikator efektifitas material piezoelectric dalam mengubah energi listrik ke energi mekanik atau mengubah mekanik ke energi listrik. k disertai dua buah *subscript*, dimana dalam hal direct effect subscript pertama menunjukkan arah listrik yang energi 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 mencerminkan efisiensi konversi energi, pada umumnya tidak memperhitungkan dielectric losses atau mechanical losses. Ketelitian pengukuran efisiensi ditentukan berdasar pada rasio konversi energi, yaitu energi yang dapat dihasilkan oleh elemen piezoelectric terhadap total energi yang diberikan pada elemen. Berdasar pada pengukuran tersebut, elemen piezoelectric dengan desain sistem yang baik dapat menghasilkan efisiensi mencapai 90%. Perlu diperhatikan bahwa dimensi dari elemen keramik mempengaruhi persamaan k yang digunakan. Untuk lebih jelasnya koefisien- koefisien piezoelectric dapat dilihat pada tabel 2.1 berikut.

Tabel 2.1 Data Teknis Beberapa Jenis *Piezoelectric* Material[12]

Property	Units	PVDF Film	PZT	BaTiO ₃
Density	10^3 kg/ m^3	1.78	7.5	5.7
Relative	$\varepsilon/\varepsilon_0$	12	1,200	1,700
Permitivity				
d ₃₁ constant	$(10^{-12})C/N$	23	110	78
g ₃₁ constant	$(10^{-3})Vm/N$	216	10	5
k ₃₁ constant	% at 1KHz	12	30	21
Acoustic	$10^6 kg/m^2 sec$	27	30	30
Impedance	·			

2.5.4 Voltase Bangkitan Pada Piezoelectric

Piezoelectric material menghasilkan voltase bangkitan dikarenakan adanya muatan yang berbeda-beda antar partikel dalam piezoelectric itu sendiri. Saat piezoelectric dikenai gaya eksternal atau terdefleksi, terdapat perubahan pada jarak antar partikel, baik itu semakin jauh atau semakin dekat. Karena pergerakan dan perubahan jarak inilah yang menyebabkan munculnya beda tegangan yang kemudian dapat dimanfaatkan. 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.

Voltase bangkitan berbeda-beda tergantung dari bentuk *piezoelectric*, untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada tabel 2.2.

Tabel 2.2 Energi Bangkitan, Displacement Dan Kapasitansi Pada *Piezoelectric*[12]

Piezoelectric[12]					
Action Mode (L, length; W, width; T, thickness; D, diameter)	Generated Voltage, V	Displacement, $\Delta L (\Delta T)$	Capacitance, C		
Transverse length mode: $L > 3W > 3T$	$V = \frac{g_{31}}{W}F$	$\Delta l = \frac{d_{31}L}{T}V$	$C = \frac{\varepsilon_3^T LW}{T}$		
Thickness extension mode: $D > 5T$	$V = \frac{4Tg_3}{\pi D^2} F$	$\Delta T = d_{39}V$	$C = \frac{\pi \epsilon_3^7 D^2}{4 \text{T}}$		
Radial mode: $D > 5T$	Not applied	$\Delta D = \frac{d_{\rm M}D}{T}V$	$C = \frac{\pi}{4} K_3^T \epsilon_0 \frac{D^2}{T}$		

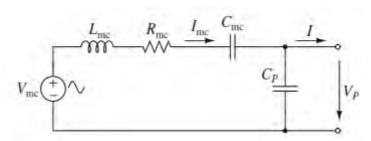
Longitudinal mode:
$$L>3D$$

$$V=\frac{4L}{\pi D^2}g_{33}F \qquad \qquad \Delta L=d_{33}V \qquad \qquad C=\frac{\pi D^2}{4L}K_3^{7}\varepsilon_0$$

Thickness shear mode:
$$W > 5T$$
, $L > 5T$ $V = \frac{g_{15}}{W}F$ $\Delta x = d_{15}V$ $C = \frac{LW}{T}K_1^T \varepsilon_0$



Note: F is the force and ε_3^T is dielectric permittivity of the material at constant stress in direction 3, K_t^T is relative dielectric constant $(K_t^T = \varepsilon_t^T/\varepsilon_0)$, and ε_0 is dielectric permittivity in vacuum.



Gambar 2.19 Electromechanical Pada Piezoelectric

Dari gambar 2.19 dapat diketahui persamaan electrik dari piezoelectric sebagai berikut:

$$V_{mc} = L_{mc} \cdot \frac{d\dot{I}_{mc}}{dt} + R_{mc} \cdot I_{mc} + \frac{1}{c_{mc}} \int I_{mc} \, dt + V_p \tag{2.42}$$

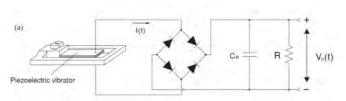
Dimana:

 $L_{mc} = Inductance (H)$

 V_p = Voltase (V) C_{mc} = Kapasitansi (μ F) I_{mc} = Arus yang dihasilkan (Ampere)

 R_{cm} = Resistansi (ohm)

2.5.5 *Piezoelectric* Elemen

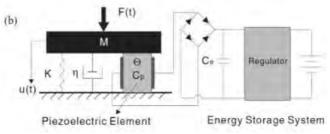


Gambar 2.20 Elemen Penyusun Piezoelectric[12]

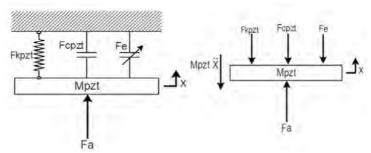
Elemen-elemen penyusun *piezoelectric cantilever beam*, yaitu *piezoeletric*, *beam*, dan sistem penyimpanan energi seperti terlihat pada gambar 2.20. Pada penelitian ini digunakan hanya *piezoelectric*nya saja yang dipasang pada mekanisme, sedangkan elemen penyimpanan pada *piezoelectric* pada penelitian ini tidak ditinjau.

2.5.6 Persamaan Gerak Piezoelectric

Piezoelectric memiliki massa, koefisien kekakuan dan koefisien redaman coefisien internal. Koefisien kekakuan dan redamana internal pada piezoelectric diibaratkan seperti sistem pada sistem suspensi. Jika suatu elemen piezoelectric diberikan gaya luar dan mengalami defleksi, seperti pada gambar 2.21, maka terdapat gaya-gaya yang terjadi cantilever piezoelectric seperti yang digambarkan pada free body diagram pada gambar 2.22.[13]



Gambar 2.21 Piezoelectric[12]



Gambar 2.22 Free Body DiagramPiezoelectric[3]

Dengan mengacu pada diagram pada gambar 2.22, maka mekanisme *piezoelectric* dapat disederhanakan menjadi:

$$Fa = Mpzt\ddot{x} + Fc pzt + Fk pzt + Fe$$
 (2.43)

$$Fa(t) = M_{pzt}\ddot{x}(t) + C_{pzt}\dot{x}(t) + k_{pzt}x(t) + \Theta Vp(t)$$
 (2.44)
Dimana:

 M_{pzt} = massa piezoelectric

C_{pzt} = damping dari *cantilever beam*

k_{pzt} = Konstanta pegas *piezoelectric*

 Θ = Coupling Factor

 $V_p(t)$ =Voltase bangkitan pada *piezoelectric*

 C_p = Kapasitansi *Piezoelectric*

I = Arus listrik pada *piezoelectric*

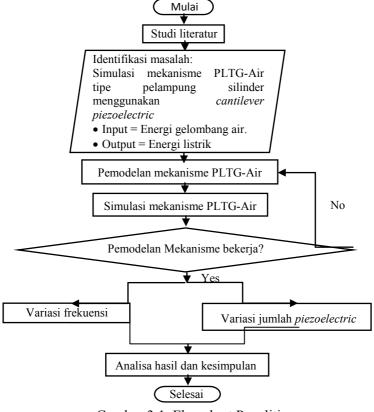
BABIII

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tahapan Penelitian

3.1.1 Flowchart Penelitian

Metodologi yang digunakan dalam penelitian ini berbasis simulasi. Metodogi yang akan dilakukan sesuai dengan diagram alir pada gambar 3.1.



Gambar 3.1 Flowchart Penelitian

3.1.2 Penjelasan Flowchart Penelitian

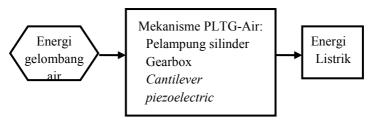
3.1.2.1 Studi Literatur

Studi literatur meliputi pengumpulan segala literatur dan buku-buku referensi, baik yang terdahulu maupun yang terbaru, kemudian merumuskan permasalahan yang ada dan mencari solusi dengan mengumpulkan literatur tersebut serta teori yang terkait dengan permasalahan yang ada. Literatur tersebut terkait dengan konsep pemanfaatan energi gelombang air, mekanisme *energy harvesting* dan *cantilever piezoelectric*. Literatur yang dipelajari selama pengerjaan tugas akhir dapat berupa tugas akhir yang pernah ada, artikel, *text book*, *handbook*, katalog, dan jurnal.

3.1.2.2 Identifikasi Masalah

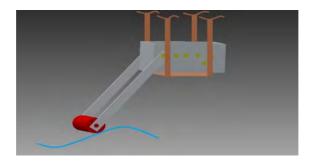
Pada tugas akhir ini digunakan *cantilever piezoelectric* pada mekanisme PLTG-Air untuk mengubah energi gelombang air menjadi energi listrik. Terdapat dua parameter yang menjadi identifikasi permasalahan yaitu variable *input* serta variable *output*. Parameter yang dijadikan variable *input*-nya berupa amplitudo dan frekuensi gelombang air yang diteruskan ke gearbox, sedangkan variable *output*-nya berupa *displacement*, voltase dan daya yang dihasilkan oleh *cantilever piezoelectric*.

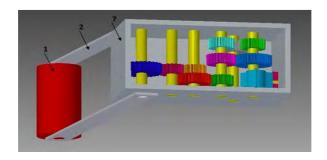
3.1.2.3 Pemodelan Mekanisme



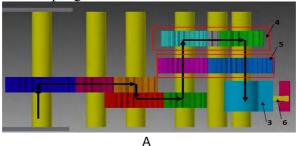
Gambar 3.2 Desain Konsep PLTG-Air Tipe Pelampung Silinder Dengan *Cantilever Piezoelectric*

Desain konsep mekanisme dari Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Air (PLTG-Air) metode pelampung silinder dengan cantilever piezoelectric ditunjukkan oleh gambar 3.2. Dalam mekanisme PLTG-Air terdapat komponen penting yaitu lengan pengungkit dan pelampung yang dapat menghasilkan kecepatan sudut dan torsi ketika diberikan input berupa energi gelombang air. Desain untuk peletakan mekanisme PLTG-Air dapat dilihat pada gambar 3.3(A), dimana housing dibuat diam sehingga saat pelampung silinder dikenai gaya gelombang maka pelampung akan bergerak naik turun. Besar kecilnya gaya gelombang dipengaruhi oleh amplitudo dan frekuensi gelombang sehingga jarak peletakan mekanisme dari permukaan gelombang tidak mempengaruhi gaya gelombang. Kecepatan sudut dan torsi yang dihasilkan lengan pengungkit akan diteruskan ke mekanisme gearbox. Rasio putaran gearbox adalah 1:5 [1]. Torsi yang dihasilkan gearbox akan digunakan untuk memukul cantilever piezoelectric. Cantilever piezoelectric akan menghasilkan energi listrik dalam bentuk voltase. Untuk lebih jelasnya detail mekanisme dapat dilihat pada gambar 3.3(B)





B
Gambar 3.3 Pemodelan Mekanisme PLTG-Air Metode
Pelampung Silinder Cantilever Piezoelectric



5 5 3 6

В

Gambar 3.4 (A)Mekanisme Gearbox Saat Pelampung Bergerak Ke Bawah, (B) Mekanisme Gearbox Saat Pelampung Bergerak Ke Atas

Keterangan:

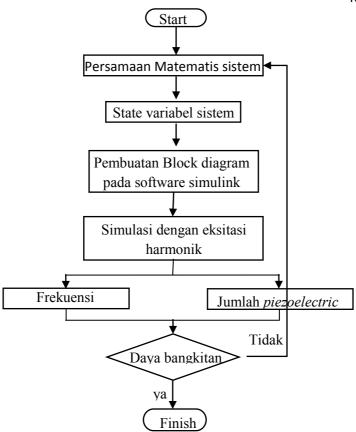
- 1 = Pelampung
- 2 = Lengan pengungkit
- 3 = Blade
- 4 = Gearbox pada saat pelampung bergerak naik
- 5 = Gearbox pada saat pelampung bergerak turun
- 6 = Piezoelectric
- 7 = Housing

Prinsip kerja alat pada saat mekanisme seperti gambar 3.4(A) yaitu pada saat lengan bergerak ke bawah akibat berat lengan dan pelampung, gaya diteruskan ke gearbox dan dilanjutkan ke gearbox 4. Torsi hanya bisa lewat pada sistem gearbox 4 sedangkan pada sistem gearbox 5 roda gigi terlepas karena terdapat *one way bearing*. Putaran sistem gearbox 4 diteruskan ke *cantilever piezoelectric* melalui blade. Penggunaan mekanisme *one way bearing* bertujuan untuk mengontrol putaran gearbox pada saat lengan bergerak ke atas maupun ke bawah, sehingga blade tetap berputar pada satu arah dan kontinyu.

Mekanisme seperti ditunjukkan gambar 3.4(B) adalah saat lengan bergerak ke atas karena pengaruh gelombang air maka gaya yang dihasilkan oleh lengan akan dilanjutkan ke gearbox dan diteruskan ke gearbox 5. Torsi hanya bisa lewat ke sistem gearbox 5, sedangkan pada sistem gearbox 4 netral karena dipasang sebuah *one way bearing*. Dari sistem gearbox 5 diteruskan ke *cantilever piezoelectric* melalui blade. Blade berputar dengan kecepatan sudut lima kali lebih besar dari kecepatan sudut putaran roda gigi input.

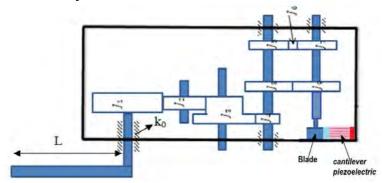
3.1.2.4 Simulasi Mekanisme PLTG-AIR

Pada simulasi dan pemodelan PLTG-Air ini dilakukan dengan metode *state-variabel* dengan melakukan beberapa tahapan seperti ditunjukkan flowchart pada gambar 3.5.

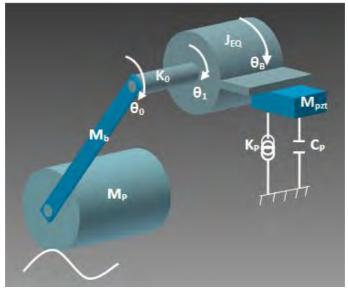


Gambar 3.5 Diagram Alir Karakteristik Model PLTG-Air

♣ Penyederhanaan model fisik sistem



Gambar 3.6 Mekanisme PLTG-Air



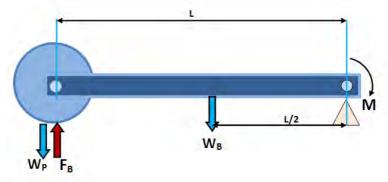
Gambar 3.7 Model Dinamis PLTG-Air

Untuk mempermudah proses analisa maka terlebih dahulu perlu dilakukan penyederhanaan dari bentuk fisik PLTG-AIR seperti pada gambar 3.6 yang kemudian disederhanakan menjadi model dinamis seperti gambar 3.7, yang terdiri dari sebuah

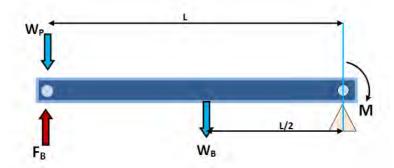
pelampung dengan massa (Mp), massa lengan (Mb), gearbox dan mekanisme *cantilever piezoelectric*.

- 1) Pemodelan Pelampung
- a) Analisa Terhadap Kesetimbangan Statis

Kesimbangan statis hanya dipengaruhi oleh mekanisme dari benda itu sendiri. Kesetimbangan statis pada mekanisme yang ditunjukkan pada gambar 3.8 hanya diakibatkan oleh berat pelampung, berat batang silinder, dan gaya *buoyance* yang bekerja pada pelampung. Free body diagram dari kesetimbangan statis tersebut dapat dilihat pada gambar 3.9



Gambar 3.8 Mekanisme Kesetimbangan Statis Posisi Titik Tumpu Pada Sebuah Poros



Gambar 3.9 Free Body Diagram Pada Kesetimbangan Statis

Dimana:

 W_p = Berat pelampung (N).

 $W_b = Berat batang silinder (N).$

 $F_B = Gaya buoyancy (N).$

L = Panjang lengan (m).

Pada kondisi statis pelampung dianggap sebagai benda yang menjadi satu dengan *cantilever*, sehingga diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$J_p = m_p.L^2 \tag{3.1}$$

$$J_{b} = \frac{1}{3} m_{b} \cdot L^{2} \tag{3.2}$$

$$J_0 = J_b + J_p = \frac{1}{3}m_b L^2 + m_p L^2 \tag{3.3}$$

Sesuai dengan hukum newton 2 yang mengatakan bahwa

 $\sum M = 0$, sehingga:

$$F_b. l - w_b. \frac{l}{2} - w_p. l = 0 (3.4)$$

Pada keseimbangan statis didapatkan rumusan hubungan antara gaya *buoyancy* dan massa pelampung sebagai berikut:

$$F_{b} \cdot l = w_{b} \cdot \frac{l}{2} + w_{p} \cdot l$$

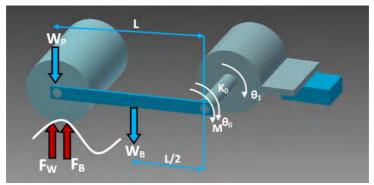
$$F_{b} \cdot l = m_{b} \cdot g \cdot \frac{l}{2} + m_{p} \cdot g \cdot l$$

$$F_{b} = \frac{1}{l} \left(m_{b} \cdot g \cdot \frac{l}{2} + m_{p} \cdot g \cdot l \right)$$

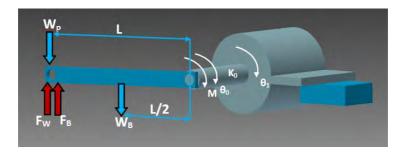
$$F_{b} = \frac{m_{b}}{2} \cdot g + m_{p} \cdot g = \left(\frac{m_{b}}{2} + m_{p} \right) g$$
(3.5)

b) Analisa Terhadap Kesetimbangan Dinamis

Kesetimbangan dinamis terjadi saat ada gelombang yang datang mengenai pelampung sehingga jumlah gaya atau gaya berat yang bekerja pada sistem sama dengan nol. Kesetimbangan dinamis bisa terjadi karena adanya pengaruh gaya-gaya luar yang bekerja pada arah vertikal dan arah horizontal yang disebabkan oleh gelombang air.



Gambar 3.10 Mekanisme Sistem Dinamis Pada Lengan



Gambar 3.11 Free Body Diagram Kesetimbangan Dinamis Pada Lengan Dan Pelampung

Dimana:

$$\begin{split} F_{W} &= \text{Gaya wave (N)}. \\ &\sum M = J_{0}\ddot{\theta} \\ &F_{b}.l + F_{w}.l - W_{p}(l + l\sin\theta) - W_{b}\left(\frac{l}{2} + \frac{l}{2}\sin\theta\right) - \\ &k_{0}(\theta_{0} - \theta_{1}) = J_{0}\ddot{\theta} \\ &F_{b}.l + F_{w}.l - W_{p}.l - W_{p}l\sin\theta - W_{b}.\frac{l}{2} - W_{b}.\frac{l}{2}\sin\theta - \\ &k_{0}(\theta_{0} - \theta_{1}) = J_{0}\ddot{\theta}_{0} \end{split}$$

Karena terdapat kesetimbangan statis pada persamaan (3.4), sehingga persamaan (3.7) menjadi :

$$F_{w}.l - W_{p}l\sin\theta - W_{b}.\frac{l}{2}\sin\theta - k_{0}(\theta_{0} - \theta_{1}) = J_{0}\ddot{\theta}_{0}$$
 (3.8)
$$J_{0}\ddot{\theta}_{0} + (Wp.l + Wb.l/2)\sin\theta + k_{0}(\theta_{0} - \theta_{1}) = F_{w}.l$$

Dimana $\sin \theta = \theta$, sehingga:

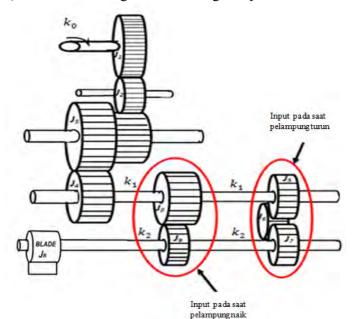
$$J_0\ddot{\theta}_0 + \left(Wp.l + Wb.\frac{l}{2}\right)\theta + k_0(\theta_0 - \theta_1) = F_w.l$$

$$J_0 \ddot{\theta}_0 + \left(Wp. l + Wb. \frac{l}{2} \right) \theta + k_0 (\theta_0 - \theta_1) - F_w. l = 0 \quad (3.9)$$

$$J_0 = \frac{1}{3}m_b L^2 + m_p L^2 \tag{3.10}$$

$$F_{W} = \frac{\rho g^{2} H^{2} T^{2}}{64\pi\lambda} \left(\cos\frac{2\pi t}{T}\right)^{2} \tag{3.11}$$

2) Pemodelan Rangkaian Roda Gigi Penyearah



Gambar 3.12 Mekanisme Gearbox

Untuk menyederhanakan persamaan matematis dalam mekanisme PLTG-Air metode pelampung silinder dengan *cantilever piezoelectric* maka digunakan momen inersia gabungan untuk gear-gear yang digunakan dalam gearbox.

• J_{eq} Saat Pelampung Silinder Turun

$$W_{TOTAL} = W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5 + W_6 + W_7 + W_B \quad (3.12)$$

$$W_{TOTAL} = \frac{1}{2}J_1\dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2}J_2\dot{\theta}_2^2 + \frac{1}{2}J_3\dot{\theta}_3^2 + \frac{1}{2}J_4\dot{\theta}_4^2 + \frac{1}{2}J_5\dot{\theta}_5^2 + \frac{1}{2}J_6\dot{\theta}_6^2 + \frac{1}{2}J_7\dot{\theta}_7^2 + \frac{1}{2}J_B\dot{\theta}_B^2$$

$$\frac{1}{2}J_{eq}\dot{\theta}_B^2 = \frac{1}{2}J_1\dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2}J_2\dot{\theta}_2^2 + \frac{1}{2}J_3\dot{\theta}_3^2 + \frac{1}{2}J_4\dot{\theta}_4^2 + \frac{1}{2}J_5\dot{\theta}_5^2 + \frac{1}{2}J_6\dot{\theta}_6^2 + \frac{1}{2}J_7\dot{\theta}_7^2 + \frac{1}{2}J_B\dot{\theta}_B^2$$

$$J_{eq}\dot{\theta}_{B}^{2} = J_{1}\dot{\theta}_{1}^{2} + J_{2}\dot{\theta}_{2}^{2} + J_{3}\dot{\theta}_{3}^{2} + J_{4}\dot{\theta}_{4}^{2} + J_{5}\dot{\theta}_{5}^{2} + J_{6}\dot{\theta}_{6}^{2} + J_{7}\dot{\theta}_{7}^{2} + J_{B}\dot{\theta}_{B}^{2}$$
(3.13)

Dimana:

$$\theta_{1} = \frac{r_{2}}{r_{1}} \theta_{2} = N_{1} \theta_{2}$$

$$\theta_{2} = \frac{r_{3}}{r_{2}} \theta_{3} = N_{2} \theta_{3}$$

$$\theta_{3} = \frac{r_{5}}{r_{3}} \theta_{4} = N_{3} \theta_{4}$$

$$\theta_{4} = \theta_{5}$$

$$\theta_{5} = \frac{r_{7}}{r_{6}} \theta_{6} = N_{4} \theta_{6}$$

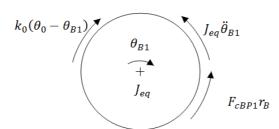
$$\theta_{6} = \frac{r_{8}}{r_{7}} \theta_{7} = N_{5} \theta_{7}$$

$$\theta_{7} = \theta_{B1}$$

Subtitusi nilai θ ke dalam pada persamaan (3.13):

$$\begin{split} J_{eq}\dot{\theta}_{B1}^{2} &= J_{1}\big(N_{1}N_{2}N_{3}N_{4}N_{5}\dot{\theta}_{B1}\big)^{2} + J_{2}\big(N_{2}N_{3}\dot{N}_{4}N_{5}\theta_{B1}\big)^{2} + \\ J_{3}\big(N_{3}N_{4}N_{5}\dot{\theta}_{B1}\big)^{2} &+ J_{4}\big(N_{4}N_{5}\dot{\theta}_{B1}\big)^{2} + J_{5}\big(N_{4}N_{5}\dot{\theta}_{B1}\big)^{2} + \\ J_{6}\big(N_{5}\dot{\theta}_{B1}\big)^{2} &+ J_{7}\big(\dot{\theta}_{B1}\big)^{2} + J_{B}\big(\dot{\theta}_{B1}\big)^{2} \end{split}$$

$$J_{eq} = J_1(N_1N_2N_3N_4N_5)^2 + J_2(N_2N_3N_4N_5)^2 + J_3(N_3N_4N_5)^2 + J_4(N_4N_5)^2 + J_5(N_4N_5)^2 + J_6(N_5)^2 + J_7 + J_B$$
(3.14)



Gambar 3.13 Free Body Diagram Jeq Saat Pelampung Turun Persamaan matematis :

$$J_{eq}\ddot{\theta}_{B1} - k_0(\theta_0 - \theta_{B1}) + F_{cBP1}r_B = 0$$
 (3.15)

• J_{eq} Saat Pelampung Silinder Naik

$$W_{TOTAL} = W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_8 + W_9 + W_{B2}$$
 (3.16)

$$W_{TOTAL} = \frac{1}{2}J_1\dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2}J_2\dot{\theta}_2^2 + \frac{1}{2}J_3\dot{\theta}_3^2 + \frac{1}{2}J_4\dot{\theta}_4^2 + \frac{1}{2}J_8\dot{\theta}_8^2 + \frac{1}{2}J_9\dot{\theta}_9^2 + \frac{1}{2}J_B\dot{\theta}_{B2}^2$$

$$\frac{1}{2}J_{eq}\dot{\theta}_{B2}^{2} = \frac{1}{2}J_{1}\dot{\theta}_{1}^{2} + \frac{1}{2}J_{2}\dot{\theta}_{2}^{2} + \frac{1}{2}J_{3}\dot{\theta}_{3}^{2} + \frac{1}{2}J_{4}\dot{\theta}_{4}^{2} + \frac{1}{2}J_{8}\dot{\theta}_{8}^{2} + \frac{1}{2}J_{9}\dot{\theta}_{9}^{2} + \frac{1}{2}J_{B}\dot{\theta}_{B2}^{2}$$

$$J_{eq}\dot{\theta}_{B2}^{2} = J_{1}\dot{\theta}_{1}^{2} + J_{2}\dot{\theta}_{2}^{2} + J_{3}\dot{\theta}_{3}^{2} + J_{4}\dot{\theta}_{4}^{2} + J_{8}\dot{\theta}_{8}^{2} + J_{9}\dot{\theta}_{9}^{2} + J_{8}\dot{\theta}_{B2}^{2}$$
(3.17)

Dimana:

$$\theta_{1} = \frac{r_{2}}{r_{1}} \theta_{2} = N_{1} \theta_{2}$$

$$\theta_{2} = \frac{r_{3}}{r_{2}} \theta_{3} = N_{2} \theta_{3}$$

$$\theta_{3} = \frac{r_{5}}{r_{3}} \theta_{4} = N_{3} \theta_{4}$$

$$\theta_{4} = \theta_{8}$$

$$\theta_{8} = \frac{r_{9}}{r_{8}} \theta_{9} = N_{6} \theta_{9}$$

$$\theta_{9} = \theta_{B2}$$

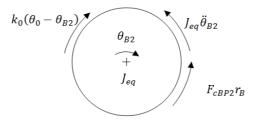
Subtitusi nilai θ ke dalam pada persamaan (3.17):

$$J_{eq}\dot{\theta}_{B2}^{2} = J_{1}N_{1}N_{2}N_{3}N_{6}\dot{\theta}_{B2}^{2} + J_{2}N_{2}N_{3}N_{6}\dot{\theta}_{B2}^{2} + J_{3}N_{3}N_{6}\dot{\theta}_{B2}^{2} + J_{4}N_{6}\dot{\theta}_{B2}^{2} + J_{8}N_{6}\dot{\theta}_{B2}^{2} + J_{9}\dot{\theta}_{B2}^{2} + J_{B}\dot{\theta}_{B2}^{2}$$

$$J_{eq}\dot{\theta}_{B2}^{2} = J_{1}(N_{1}N_{2}N_{3}N_{6}\dot{\theta}_{B2})^{2} + J_{2}(N_{2}N_{3}N_{6}\dot{\theta}_{B2})^{2} + J_{3}(N_{3}N_{6}\dot{\theta}_{B2})^{2} + J_{4}(N_{6}\dot{\theta}_{B2})^{2} + J_{8}(N_{6}\dot{\theta}_{B2})^{2} + J_{9}(\dot{\theta}_{B2})^{2} + J_{9}(\dot{\theta}_{B2})^{2}$$

$$J_{B}(\dot{\theta}_{B2})^{2}$$

$$J_{eq} = J_1 (N_1 N_2 N_3 N_6)^2 + J_2 (N_2 N_3 N_6)^2 + J_3 (N_3 N_6)^2 + J_4 (N_6)^2 + J_8 (N_6)^2 + J_9 + J_B$$
(3.18)

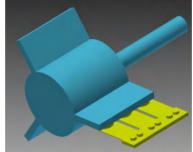


Gambar 3.14 Free Body Diagram Jeq Saat Pelampung Naik

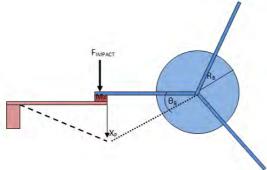
Persamaan matematis:

$$J_{eq}\ddot{\theta}_{B2} - k_0(\theta_0 - \theta_{B2}) + F_{cBP2}r_B = 0$$
 (3.19)

3) Pemodelan Blade Dengan Cantiever Piezoelectric

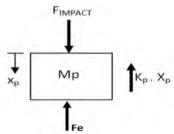


Gambar 3.15 Pemodelan blade dengan cantilever piezoelectric



Gambar 3.16 Free Body Diagram Pada Blade dan Piezoelectric

Kontak antara blade dengan *piezoelectric* ditunjukkan pada gambar 3.15. Gaya *impact* akibat blade mengenai *piezoelectric* ditunjukan pada gambar 3.16. Free body diagram untuk memodelkan gerak *piezoelectric* akibat adanya gaya *impact* dari putaran blade seperti ditunjukkan gambar 3.17 sebagai berikut:

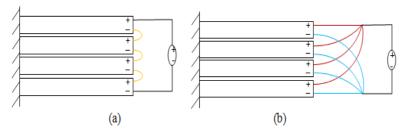


Gambar 3.17 Free Body Diagram Massa Piezoelectric

Persamaan untuk *free body diagram* pada gambar 3.17 tersebut adalah

$$M_p.\ddot{x}_p + K_p.x_p + Fe = F_{impact}$$
 (3.20)

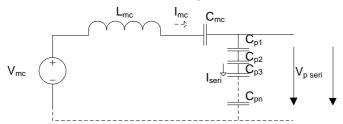
Susunan elektris dari material *piezoelectric* divariasikan menjadi dua kondisi yaitu seri dan paralel. Untuk susunan seri dapat dilihat pada gambar 3.18 (a), dimana kutub negatif dari satu material *piezoelectric* akan dihubungkan dengan kutub positif dengan *piezoelectric* yang ada di sebelahnya. Sedangkan untuk susunan paralel dapat dilihat pada gambar 3.18 (b), dimana semua kutub positif akan dihubungkan menjadi satu dan begitu pula dengan kutub negatif.



Gambar 3.18 Susunan dari material *piezoelectric*

a. Rangkaian Seri

Persamaan elektris untuk mekanisme *piezoelectric* yang disusun secara seri adalah sebagai berikut:



Gambar 3.19 Diagram sirkuit elektromagnetik cantilever piezoelectric susunan seri

Persamaan elektris dari rangkaian listrik pada gambar 3.19 adalah sebagai berikut:

$$V_{mc} = L_{mc} \frac{d I_{mc}}{dt} + \frac{1}{C_{mc}} \int I_{mc} dt + V_{p \, seri}$$
 (3.21)

dimana:

 V_{mc} = sumber tegangan / gaya input (V)

 L_{mc} = induktansi (H) R_{mc} = resistansi (ohm) C_{mc} = kapasitansi (F)

 $I_{mc} = arus(A)$

 $V_{p \text{ seri}}$ = tegangan bangkitan (V)

Dengan besarnya tegangan bangkitan susunan seri merupakan penjumlahan dari $V_{p1},\,V_{p2},\,$ hingga V_{pn}

$$V_{p \text{ seri}} = V_{p1} + V_{p2} + \ldots + V_{pn}$$

Dimana besar dari tegangan bangkitan untuk satu unit material *piezoelectric* didapatkan dari rumusan sebagai berikut:

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

Dimana:

 V_p = Tegangan bangkitan (V)

W = Piezoelectric width (m)

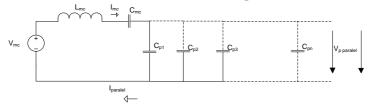
 F_{impact} = Gaya *impact* yang bekerja pada *piezoelectric*

(N)

 g_{31} = Konstanta tegangan *piezoelectric* (Vm/N)

b. Rangkaian Paralel

Persamaan elektris untuk mekanisme piezoelectric



Gambar 3.20 Diagram sirkuit elektromagnetik *cantilever piezoelectric* susunan paralel

Persamaan elektris dari rangkaian listrik pada gambar 3.20 adalah sebagai berikut:

$$V_{mc} = L_{mc} \frac{d I_{mc}}{dt} + \frac{1}{C_{mc}} \int I_{mc} dt + V_{p paralel}$$
 (3.24)

dimana:

 V_{mc} = sumber tegangan / gaya input (V)

 L_{mc} = induktansi (H) R_{mc} = resistansi (ohm)

 C_{mc} = kapasitansi (F)

 I_{mc} = arus (A)

 $V_{p \text{ paralel}}$ = tegangan bangkitan (V)

Dengan besarnya tegangan bangkitan susunan paralel sama dengan besarnya tegangan bangkitan untuk satu unit material *piezoelectric*.

$$V_{p \text{ paralel}} = V_{p1} = V_{p2} = \dots = V_{pn}$$
 (3.25)

Dimana besar dari tegangan bangkitan untuk satu unit material *piezoelectric* didapatkan dari rumusan sebagai berikut:

$$V_p = \frac{g_{31}}{W} F_{impact} \tag{3.26}$$

Dimana:

V_p = Tegangan bangkitan (V) W = Piezoelectric width (m)

F_{impact} = Gaya *impact* yang bekerja pada *piezoelectric*

(N)

 g_{31} = Konstanta tegangan *piezoelectric* (Vm/N)

♣ Pembuatan *block diagram* simulasi

Dari hasil persamaan gerak dan *state-variabel* yang sudah dibuat maka akan dibuat *block simulink* pada *mathlab simulink*. Simulasi ini dilakukan untuk mendapatkan penyelesaian persamaan matematis dari PLTG-Air melalui metode *state space*. Ketika proses eksekusi simulasi, input yang digunakan berupa sinusoidal (harmonik) yang dihasilkan gelombang air.

Berikut beberapa hal yang harus dilakukan:

- 1. Menggambar dengan komputer, didapatkan variabel-variabel pendukung simulasi seperti inersia lengan pengungkit, inersia roda gigi dan lain sebagainya.
- 2. Tahap pemodelan Matematis PLTG-Air, dilakukan penyusunan *state variabel* untuk sistem lengan 1 derajat kebebasan ditambah sistem gearbox dan *cantilever piezoelectric*.
- 3. Menyusun blok diagram dalam software *simulink*.
- 4. Simulasi sistem untuk input gelombang harmonik, dari tahap ini didapatkan grafik respon sistem.
- 5. Tahap Analisis.
- 6. Penarikan Kesimpulan.

3.1.2.5 Variasi Pengujian

Pengujian mekanisme dengan variasi frekuensi gelombang air dan jumlah *cantilever piezoelectric* untuk mengetahui energi bangkitan optimum yang akan dihasilkan oleh mekanisme ini. Variasi frekuensi yang digunakan adalah 1Hz, 2Hz dan 3Hz. Variasi jumlah *cantilever piezoelectric* yang digunakan adalah 1, 3, dan 5 buah.

3.1.2.6 Analisa Hasil Dan Kesimpulan

Dari data yang diperoleh pada hasil pengujian PLTG-Air tipe pelampung silinder dengan *cantilever piezoelectric* akan diolah sehingga hasil pegujian akan ditampilkan dalam bentuk grafik 2D. Grafik yang ditampilkan berupa grafik displacement, voltase, arus dan daya bangkitan. Setelah itu grafik akan dianalisa, dibahas dan disimpulkan.

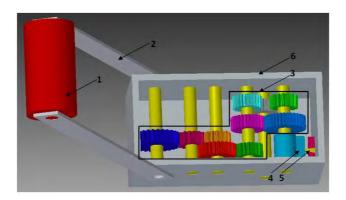
BAB IV

ANALISA DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dianalisa dan dibahas tentang energi listrik bangkitan yang dihasilkan oleh mekanisme Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Air (PLTG-Air) tipe pelampung silinder dengan *cantilever piezoelectric*. Analisa dan pembahasan ini dimulai dengan analisa gaya bangkitan yang dihasilkan oleh gelombang air, kemudian dilakukan analisa dan pembahasan terhadap variasi frekuensi gelombang air dan variasi jumlah elemen *cantilever piezoelectric*.

4.1 Mekanisme PLTG-Air Pelampung Silinder Metode Cantiever Piezoelectric

Pada subbab ini akan digambarkan tentang mekanisme PLTG-Air tipe pelampung silinder metode *cantilever piezoelectric* yang bisa dilihat pada gambar 4.1 beserta data dan spesifikasi yang nantinya digunakan dalam proses simulasi model.



Gambar 4.1 Mekanisme PLTG-Air Tipe Pelampung Silinder Metode *Cantilever Piezoelectric*

Keterangan:

- 1. Pelampung
- 2. Lengan pengungkit
- 3. Gearbox
- 4. Blade

- 5. Cantilever piezoelectric
- 6. Housing

4.1.1 Parameter Yang Digunakan

Data parameter gelombang air pada kolam simulator ditampilkan pada tabel 4.1 dan hasil perhitugan momen inersia ditampilkan pada tabel 4.2.

Tabel 4.1 Parameter gelombang

Model Parameter	Simbol (Unit)	Nilai Parameter	
Tinggi gelombang	H (m)	0.02	
Periode gelombang	T (s)	1	
Frekuensi	F (Hz)	1, 2, dan 3	
Massa jenis	$\rho (kg/m^3)$	1000	
Percepatan grafitasi	$g (kg.m/s^2)$	9.8	

Tabel 4. 2 Perhitungan Momen Inersia

Roda Gigi	Jari – jari (m)	Massa (kg)	Momen Inersia (kg/m²)
Gear 1	0.035	0.0312	1.9110e-05
Gear 2	0.02	0.0056	1.1200e-06
Gear 3	0.009	0.0083	3.3615e-07
Gear 4	0.02	0.0111	2.2200e-06
Gear 5	0.025	0.011	3.4375e-06
Gear 6	0.025	0.01	3.1250e-06
Gear 7	0.027	0.01	3.6450e-06
Gear 8	0.025	0.01	3.1250e-06
Gear 9	0.032	0.01	5.1200e-06
Gear B	0.035	0.015	2.9707e-04

Pada tabel 4.3 menyajikan parameter keseluruhan dari kommponen mekanisme PLTG-Air pelampung silinder metode *cantilever piezoelectric*.

Tabel 4.3 Parameter Sistem Mekanisme PLTG-Air Tipe Pelampung Silinder

Model Parameter	Simbol (Unit)	Nilai Parameter	
Massa pelampung	Mp (kg)	0.3333	
Massa lengan	Mb (kg)	0.1658	
pengungkit			
Panjang pelampung	Pp (m)	0.3	
Panjang lengan	Pl (m)	0.5	
pengungkit			
Momen Inersia batang	J_0 (N.m s ² /rad)	0.0491	
Momen Inersia gear 1	J_1 (N.m s ² /rad)	1.9110e-05	
Momen Inersia gear 2	J_2 (N.m s ² /rad)	1.1200e-06	
Momen Inersia gear 3	J_3 (N.m s ² /rad)	3.3615e-07	
Momen Inersia gear 4	J_4 (N.m s ² /rad)	2.2200e-06	
Momen Inersia gear 5	J_5 (N.m s ² /rad)	3.4375e-06	
Momen Inersia gear 6	J_6 (N.m s ² /rad)	3.1250e-06	
Momen Inersia gear 7	J_7 (N.m s ² /rad)	3.6450e-06	
Momen Inersia gear 8	J_8 (N.m s ² /rad)	3.1250e-06	
Momen Inersia gear 9	J_9 (N.m s ² /rad)	5.1200e-06	
Momen Inersia blade	J_B (N.m s ² /rad)	2.9707e-04	

4.1.2 Contoh Perhitungan

Berikut ini adalah contoh perhitungan yang berguna untuk menunjang analisa secara teoritis. Diketahui data yang tersedia sebagai berikut:

Massa Pelampung (m_p)	= 0.333 kg
Massa lengan (mb)	= 0.1658 kg
Frekuensi gelombang	= 1 Hz
Periode Gelombang (T)	= 1,25 second
Tinggi Gelombang (H)	= 0.04 m

Massa Jenis (ρ) = 1000 kg/ m^3

Percepatan gravitasi (g) = 9.81 kg m/s^2

Data dan spesifikasi cantilever piezoelectric (MiniSense 100):

- \sim Electromechanical coupling factor (k_{31}) = 12%
- Kapasitansi *Piezoelectric* (C) = 244 pF
- o Perpindahan *Piezoelectric* (Xp) = 0.006 m
- o Rangkaian *Piezoelectric* mekanik dan elektris=Paralel
- o Dimensi *Piezoelectric* =17,8x6x1 mm
- o Massa Elemen *Piezoelectric* (m_{pzt}) = 0,0003 kg
- a. Percepatan sudut, kecepatan sudut dan perpindahan sudut Nilai dari percepatan sudut, kecepatan sudut dan perpindahan sudut dapat dihitung pada saat pelampung silinder bergerak naik maupun turun. Persamaan Matematis Gearbox Saat Pelampung Naik:

$$\begin{array}{l} (J_0N_1N_2N_3N_4N_5+J_{eq})\ddot{\theta}_{B1} + \\ \left(Wp.\ l + Wb.\frac{l}{2}\right)N_1N_2N_3N_4N_5\theta_{B1} + F_{CBPR1}.R_B - \\ F_w.\ l = 0 \\ 0.035421603\ddot{\theta}_{B1} + 1.4864583\theta_{B1} + 0.035F_{CBPR1} - \\ F_w.\ l = 0 \\ \text{Persamaan Matematis Gearbox Saat Pelampung Turun} : \end{array}$$

$$(J_0 N_1 N_2 N_3 N_6 + J_{eq}) \ddot{\theta}_{B2} + (Wp. l + Wb. \frac{l}{2}) N_1 N_2 N_3 N_6 \theta_{B2} + F_{CBPR2} R_B - F_w. l = 0$$

$$0.0454\ddot{\theta}_{B2} + 1.9026\theta_{B2} + 0.035F_{CBPR2} - F_w. l = 0$$

Gaya kontak antara blade dengan cantilever piezoelectric
 Gaya kontak yang terjadi antara blade dengan cantilever piezoelectric dapat didekati dengan persamaan sebagai berikut:

$$F_{CBP} = \frac{m_B R_B \theta_B}{\Delta t}$$

$$F_{CBP} = 0.00751389 \dot{\theta}_B$$

c. Voltase bangkitan cantilever piezoelectric

$$V_p = \frac{g_{31} F_{CBP}}{w_p}$$

$$V_p = \frac{0.216 \times 0.00751389 \dot{\theta}_B}{0.006}$$
$$V_p = 0.2705 \dot{\theta}_B$$

d. Konstanta pegas cantilever piezoelectric

$$I = \frac{w_p h_p^3}{12} = 5x10^{-16}$$

$$Kp = \frac{3EI}{l_p^3} = 2.6042 \frac{N}{m}$$

e. Arus bangkitan cantilever piezoelectric

Persamaan electrik cantilever piezoelectric mencari besarnya arus sesuai persamaan (3.21) adalah

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

Dimana:

$$\Gamma = \sqrt{{K_{31}}^2 K_P C} = 3.0249x10^{-6}$$

$$V_{mc} = \frac{F_{CBP}}{\Gamma} = 2484.0127 \dot{\theta}_B$$

$$L_{mc} = \frac{m_p}{\Gamma^2} = \frac{0.0003}{(3.0249x10^{-6})^2} = 3.2787x10^7$$

$$C_{mc} = \frac{\Gamma^2}{K_p} = \frac{(3.0249x10^{-6})^2}{2.6042} = 3.5136x10^{-12}$$

Sehingga untuk mencari besarnya arus bangkitan digunakan persamaan berikut:

$$2484.0127\dot{\theta}_{B} = 3.2787x10^{7} \frac{d\dot{t}_{mc}}{dt} + \frac{1}{3.5136x10^{-12}} \int I_{mc} dt + 0.2705\dot{\theta}_{B}$$

f. Daya Bangkitan Untuk mendapatkan daya bangkitan, rumus yang digunakan adalah P = VxI dimana nilai V dan I didapatkan dari hasil rms.

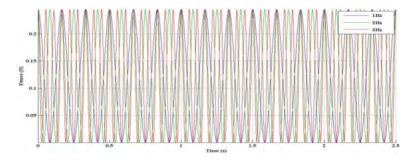
Dari persamaan gerak pada pelampung, persamaan gerak pada gearbox, persamaan gerak cantilever piezoelectric dan persamaan elektrik cantilever piezoelectric diatas dibuat block diagram pada MATLAB Simulink. Dari simulasi tersebut didapatkanlah displacement, voltase, arus, serta daya bangkitan dalam bentuk grafik. Untuk mendapatkan nilai rata-rata displacement, voltase, arus, serta daya bangkitan dilakukan root mean square (RMS), dengan metode plot pada MATLAB terhadap waktu. Hasil yang didapatkan kemudian dianalisa dan dibahas.

4.2 Pemodelan Pada Simulink Matlab

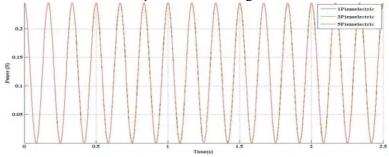
Persamaan gerak yang didapatkan dari pemodelan matematis akan diterjemahkan pada block simulink, dengan inputan yang digunakan berupa gaya gelombang air yang divariaskan pada frekuensi. Pemodelan ini ditujukan untuk mengetahui besarnya energi yang dihasilkan mekanisme.

4.2.1 Pemodelan Gaya Gelombang Air

Pada gambar 4.2 dan gambar 4.3 menunjukkan grafik pergerakan gelombang air yang akan digunakan sebagai gaya inputan dari mekanisme PLTG-Air tipe pelampung silinder metode *cantilever piezoelectric*. Variasi yang digunakan pada pemodelan gaya gelombang air tersebut adalah variasi frekuensi, yaitu menggunakan frekuensi 1Hz, 2Hz dan 3Hz. Tinggi gelombang yang digunakan adalah 0.04m.



Gambar 4.2 Grafik pergerakan gelombang air menggunakan satu buah *cantilever piezoelectric* dengan variasi frekuensi

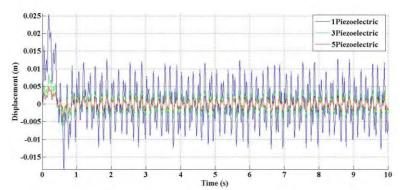


Gambar 4.3 Grafik pergerakan gelombang air saat frekuensi 1Hz dengan variasi jumlah *cantilever piezoelectric*

4.2.2 Displacement Cantilever Piezoelectric Dengan Variasi Frekuensi Dan Jumlah Cantilever Piezoelectric

Pada gambar 4.4 dapat dilihat grafik displacement pada saat frekuensi 1Hz dengan variasi jumlah cantilever piezoelectric sebanyak 1, 3, dan 5 buah. Pada saat dipasang 1 buah cantilever piezoelectric didapatkan nilai displacement terbesar sebesar 0.0126m, pada saat dipasang 3 buah cantilever piezoelectric didapatkan nilai displacement terbesar sebesar 0.004033m, dan pada saat dipasang 5 buah cantilever piezoelectric didapatkan nilai displacement terbesar sebesar 0.002632m. Pada grafik

tersebut dapat dilihat bahwa sistem mencapai titik stabil pada waktu 1.655s. Diantara ketiga variasi tersebut diketahui bahwa *displacement* terbesar terjadi pada saat dipasang jumlah *cantilever piezoelectric* sebanyak 1 buah. Untuk grafik *displacement* pada saat mekanisme diberi input frekuensi sebesar 2 Hz dan 3 Hz memiliki grafik seperti pada gambar 4.4.

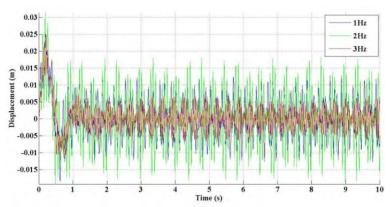


Gambar 4.4 Grafik *Displacement Cantiever Piezoelectric*Frekuensi 1Hz Terhadap Waktu Dengan Variasi Jumlah

Cantiever Piezoelectric

Pada gambar 4.5 dapat dilihat grafik displacement satu buah cantilever piezoelectric terhadap waktu dengan variasi frekuensi sebesar 1Hz, 2Hz dan 3Hz. Nilai displacement tertingggi saat frekuensi 1Hz adalah 0.01286m, saat frekuensi 2Hz 0.01866m dan saat frekuensi 3Hz 0.006599m. Pada grafik tersebut dapat dilihat bahwa sistem mencapai titik stabil pada waktu 0.8348s. Dari data tersebut dapat diketahui bahwa displacement tertinggi terjadi saat diberikan input frekuensi sebesar 2Hz. Untuk variasi jumlah cantilever piezoelectric sebanyak 3 dan 5 buah, hasil grafik yang didapatkan hampir sama dengan grafik pada gambar 4.5.

Untuk grafik pada gambar 4.4 dan 4.5, grafik mencapai stabil dan membentuk grafik sinusoidal setelah detik ke 1.655s dan 0.8348s. Bentuk grafik pada 0s sampai ke kedua detik tersebut terjadi akibat nilai inputan yang diberikan gaya gelombang (*Fwave*) bernilai positif sehingga untuk mencapai stabil atau kondisi sinusoidal dibutuhkan waktu.

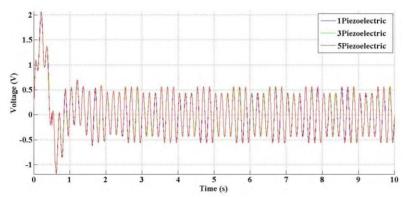


Gambar 4.5 Grafik *Displacement* Satu Buah *Cantiever Piezoelectric* Terhadap Waktu Dengan Variasi Frekuensi

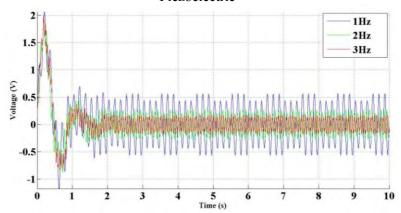
4.2.3 Voltase Bangkitan *Cantilever Piezoelectric* Dengan Variasi Frekuensi Dan Jumlah *Cantilever Piezoelectric*

Pada subbab ini akan dianalisa pengaruh dari variasi frekuensi dan juga variasi jumlah *cantilever piezoelectric*. Gambar 4.6 menunjukkan grafik voltase yang dihasilkan saat diberikan input frekuensi sebesar 1 Hz. Pada gambar dapat dilihat bahwa grafik yang dihasilkan saat menggunakan 1, 3 dan 5 buah *cantilever piezoelectric* memiliki garis yang hampir sama. Dimana nilai tertinggi dari grafik yang dihasilkan saat dipasang *cantilever piezoelectric* sebanyak 1 buah adalah 0.5649V. Nilai tertinggi saat dipasang 3 *cantilever piezoelectric* adalah 0.5682. Dan nilai tertinggi saat dipasang 5 *cantilever piezoelectric* adalah 0.5658V. Sistem pada grafik tersebut mencapai stabil pada waktu

1.499s. Untuk grafik arus pada saat mekanisme diberi input frekuensi sebesar 2 Hz dan 3 Hz memiliki grafik seperti pada gambar 4.6.



Gambar 4.6 Grafik Voltase Cantiever Piezoelectric Frekuensi 1Hz Terhadap Waktu Dengan Variasi Jumlah Cantiever Piezoelectric

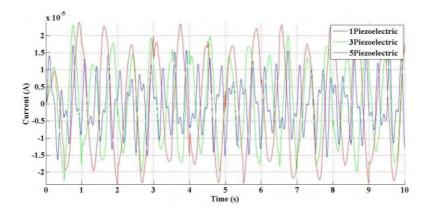


Gambar 4.7 Grafik Voltase Satu Buah Cantilever Piezoelectric Dengan Variasi Frekuensi

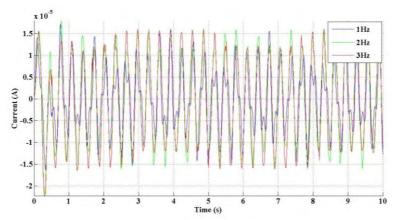
Dapat dilihat pada gambar 4.7 menunjukkan grafik voltase yang dihasilkan dari satu buah *cantilever piezoelectric* dengan variasi frekuensi. Pada saat frekuensi 1Hz nilai voltase terbesar 0.5682V, pada saat 2Hz nilai voltase terbesar 0.2792V dan saat frekuensi 3Hz nilai voltase terbesar 0.1842V. pada gambar 4.6 dapat dillihat pula bahwa sistem stabil pada waktu 1.5s. Dari ketiga variasi frekuensi tersebut nilai voltase terbesar terjadi saat frekuensi 1Hz. Grafik voltase bangkitan yang dihasilkan dari 3 dan 5 buah *cantilever piezoelectric* memiliki bentuk yang hampir sama dengan grafik pada gambar 4.7.

Untuk grafik pada gambar 4.6 dan 4.7, grafik mencapai stabil dan membentuk grafik sinusoidal setelah detik ke 1.499s dan 1.5s. Bentuk grafik pada 0s sampai ke kedua detik tersebut terjadi akibat nilai inputan yang diberikan gaya gelombang (*Fwave*) bernilai positif sehingga untuk mencapai stabil atau kondisi sinusoidal dibutuhkan waktu

4.2.4 Arus Bangkitan *Cantilever Piezoelectric* Dengan Variasi Frekuensi Dan Jumlah *Cantilever Piezoelectric*



Gambar 4.8 Grafik Arus *Cantiever Piezoelectric* Frekuensi 1Hz Terhadap Waktu Dengan Variasi Jumlah *Cantiever Piezoelectric*



Gambar 4.9 Grafik Arus Satu Buah Cantilever Piezoelectric Dengan Variasi Frekuensi

Pada gambar 4.8 dapat dilihat grafik arus yang dihasilkan pada saat diberikan input frekuensi sebesar 1Hz. Pada saat menggunakan 1 buah *cantilever piezoelectric* didapatkan nilai arus terbesar adalah 1.719E-05A. Pada saat menggunakan 3 buah *cantilever piezoelectric* didapatkan nilai arus terbesar adalah 2.309E-05A. Dan pada saat menggunakan 5 buah *cantilever piezoelectric* didapatkan nilai arus terbesar adalah 2.388E-05A. Dari data tersebut diketahui nilai arus terbesar terjadi saat menggunakan *cantilever piezoelectric* sebanyak 5 buah dan sistem stabil setelah mencapai waktu 0.5954s. Untuk grafik arus pada saat mekanisme diberi input frekuensi sebesar 2 Hz dan 3 Hz memiliki grafik seperti pada gambar 4.8.

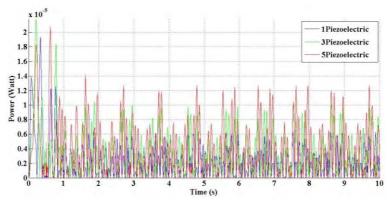
Gambar 4.9 menunjukkan grafik arus yang dihasilkan satu buah *cantilever piezoelectric*. Arus yang dihasilkan dipengaruhi oleh adanya variasi frekuensi yang digunakan. Dimana secara berturut-turut didapatkan nilai arus terbesar pada frekuensi 1Hz adalah 1.719E-05A, pada frekuensi 2Hz adalah 1.803E-05A dan pada frekuensi 3Hz adalah 1.612E-05A. Pada waktu 0.3892s menunjukkan bahwa sistem mulai stabil. Dari data

yang didapatkan tersebut, nilai arus terbesar terjadi pada frekuensi 2Hz. Untuk grafik arus pada saat mekanisme dipasang jumlah *cantilever piezoelectric* sebanyak 3 dan 5 buah memiliki bentuk grafik seperti pada gambar 4.9.

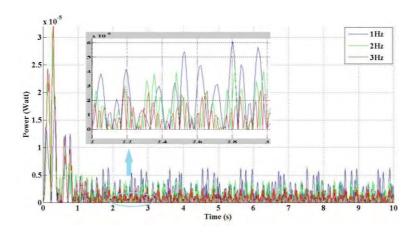
Untuk grafik pada gambar 4.8 dan 4.9, grafik mencapai stabil dan membentuk grafik sinusoidal setelah detik ke 0.5954s dan 0.3892s. Bentuk grafik pada 0s sampai ke kedua detik tersebut terjadi akibat nilai inputan yang diberikan gaya gelombang (*Fwave*) bernilai positif sehingga untuk mencapai stabil atau kondisi sinusoidal dibutuhkan waktu.

4.2.5 Daya Bangkitan *Cantilever Piezoelectric* Dengan Variasi Frekuensi Dan Jumlah *Cantilever Piezoelectric*

Pada gambar 4.10 dapat dilihat grafik daya yang dihasilkan pada saat diberikan input frekuensi sebesar 1Hz. Pada saat menggunakan 1 buah cantilever piezoelectric didapatkan adalah 6.301E-06Watt. nilai terbesar Pada menggunakan 3 buah cantilever piezoelectric didapatkan nilai daya terbesar adalah 1.047E-05Watt. Dan pada saat menggunakan 5 buah cantilever piezoelectric didapatkan nilai daya terbesar adalah 1.417E-05Watt. Pada waktu 0.8371s menunjukkan bahwa sistem mulai stabil. Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa daya terbesar dihasilkan saat menggunakan cantilever piezoelectric sebanyak 5 buah. Untuk grafik daya pada saat mekanisme diberi input frekuensi sebesar 2 Hz dan 3 Hz memiliki grafik seperti pada gambar 4.10.



Gambar 4.10 Grafik Daya *Cantiever Piezoelectric* Frekuensi 1Hz Terhadap Waktu Dengan Variasi Jumlah *Cantiever Piezoelectric*



Gambar 4.11 Grafik Daya Satu Buah *Cantilever Piezoelectric* Dengan Variasi Frekuensi

Pada gambar 4.11 menunjukkan grafik daya yang dihasilkan oleh satu buah *cantilever piezoelectric* dengan variasi frekuensi. Didapatkan nilai daya terbesar saat diberikan input frekuensi 1Hz adalah 6.372E-06Watt. Pada saat diberikan input frekuensi 2Hz

nilai daya terbesar adalah 4.13E-06Watt dan pada saat frekuensi 3Hz, nlai dayanya 2.757E-06Watt. Dari data tersebut dapat diketahui bahwa pada frekuensi 1Hz diperoleh daya terbesar. Pada grafik juga dapat diketahui bahwa sistem mulai stabil pada saat 1.675s. Untuk grafik arus pada saat mekanisme dipasang jumlah *cantilever piezoelectric* sebanyak 3 dan 5 buah memiliki bentuk grafik seperti pada gambar 4.11.

Untuk grafik pada gambar 4.10 dan 4.11, grafik mencapai stabil dan membentuk grafik sinusoidal setelah detik ke 0.8371s dan 1.675s. Bentuk grafik pada 0s sampai ke kedua detik tersebut terjadi akibat nilai inputan yang diberikan gaya gelombang (*Fwave*) bernilai positif sehingga untuk mencapai stabil atau kondisi sinusoidal dibutuhkan waktu.

Dari hasil analisis tersebut dapat dilihat pada tabel 4.4 data mengenai energi bangkitan dengan variasi frekuensi dan jumlah *cantilever piezoelectric*. Dalam tabel tersebut tersedia besarnya nilai hasil RMS voltase, arus dan daya yang dihasilkan *cantilever piezoelectric*.

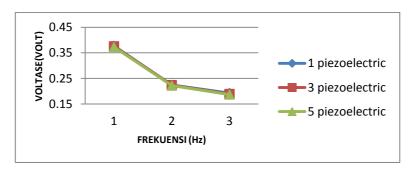
Tabel 4.4 Data Energi Bangkitan Dengan Variasi Frekuensi Dan Jumlah Cantilever Piezoelectric

FREKUENSI	JUMLAH	VOLTASE	ARUS	DAYA
	<i>PIEZOELECTRIC</i>	(V)	(A)	(Watt)
	1		7.18E-	2.61E-
		0.3774	06	06
1	3		1.13E-	4.06E-
1		0.3752	05	06
	5		1.39E-	4.92E-
		0.3731	05	06
	1		9.25E-	2.42E-
		0.2246	06	06
2	3		1.22E-	2.43E-
		0.2238	05	06
	5	0.2220	1.47E-	2.69E-

			05	06
3	1		9.77E-	2.24E-
		0.1929	06	06
	3		1.25E-	2.34E-
		0.1891	05	06
	5		1.48E-	2.45E-
		0.1871	05	06

4.3 Pembahasan

4.3.1 Pengaruh Frekuensi Dan Jumlah *Piezoelectric* Terhadap Voltase Bangkitan *Piezoelectric*



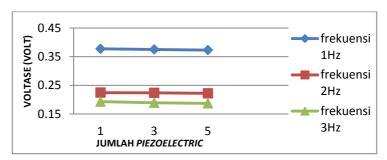
Gambar 4.12 Grafik pengaruh frekuensi gelombang air terhadap voltase bangkitan dari masing – masing jumlah cantilever piezoelectric.

Pada gambar 4.12 menunjukkan grafik pengaruh frekuensi gelombang air terhadap voltase bangkitan yang dihasilkan dari mekasisme PLTG-Air dengan variasi jumlah *cantilever piezoelectric*. Terdapat tiga buah grafik yang mewakili tiga variasi jumlah *cantilever piezoelectric* yaitu 1, 3,dan 5 buah *cantilever piezoelectric*. Dapat dilihat nilai RMS voltase untuk 1 buah *cantilever piezoelectric* pada saat frekuensi 1Hz, 2 Hz, dan 3Hz adalah 0.3774V, 0.2246V, dan 0.1929V, nilai RMS voltase untuk 3 buah *cantilever piezoelectric* pada saat frekuensi 1Hz, 2 Hz, dan 3Hz adalah 0.3752V, 0.2238V, dan 0.1891V, serta nilai

RMS voltase untuk 5 buah *cantilever piezoelectric* pada saat frekuensi 1Hz, 2 Hz, dan 3Hz adalah 0.3731V, 0.2220V, dan 0.1871V. Dari ketiga grafik tersebut dapat dilihat *trendine* setiap grafik menurun seiring bertambahnya frekuensi gelombang air.

Trendline grafik pada gambar 4.12 turun seiiring bertambahnya frekuensi gelombang air dikarenakan dengan bertambahnya frekuensi gelombang air maka gaya gelombang air juga semakin kecil. Sesuai rumusan dimana frekuensi berbanding terbalik dengan Fwave (gaya gelombang air). Gaya gelombang air berfungsi sebagai inputan dari mekanisme PLTG-Air, sehingga jika gaya gelombang air semakin kecil maka semakin kecil gaya impact (Fimpact) dari blade yang mengenai cantilever piezoelectric. Sehingga, semakin kecil gaya impact maka displacement pada cantilever piezoelectric semakin kecil pula. Displacement inilah yang mempengaruhi besarnya voltase yang dihasilkan

Berdasarkan uraian tersebut dapat ditarik kesimpulan bahwa semakin besar frekuensi gelombang air yang diberikan maka semakin kecil voltase yang dihasilkan. Nilai voltase terbesar terjadi saat diberikan input frekuensi sebesar 1Hz



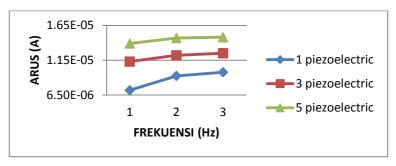
Gambar 4.13 Grafik pengaruh jumlah *cantilever piezoelectric* terhadap voltase bangkitan dari masing – masing frekuensi gelombang air.

Pada gambar 4.13 menunjukkan grafik pengaruh jumlah cantilever piezoelectric terhadap voltase bangkitan dari masing – masing frekuensi gelombang air yang dihasilkan dari mekasisme PLTG-Air. Terdapat tiga buah grafik yang mewakili tiga variasi frekuensi gelombang air yaitu 1Hz, 2Hz,dan 3Hz. Dari ketiga grafik tersebut dapat dilihat trendine setiap grafik cenderung tetap meskipun ada sedikit penurunan seiiring bertambahnya jumlah cantilever piezoelectric.

Trendline grafik pada gambar 4.13 menurun seiiring bertambahnya jumlah cantilever piezoelectric karena semakin bertambah jumlah cantilever piezoelectric maka gaya impact yang digunakan untuk menggerakkan cantilever piezoelectric semakin kecil. Semakin kecil gaya impact semakin kecil pula voltase yang dihasilkan. Untuk sistem rangkaian elektris, cantilever piezoelectric disusun secara paralel. Penyusunan secara paralel ini membuat nilai voltase bangkitan cantilever piezoelectric tetap pada masing – masing cantilever piezoelectric. Cantilever piezoelectric dianggap seperti sumber energi (baterai) yang dilalui arus listrik sehingga ketika rangkaian disusun secara paralel maka besarnya voltase akan tetap meskipun dengan penambahan jumlah cantilever piezoelectric.

Berdasarkan uraian tersebut dapat ditarik kesimpulan bahwa semakin bertambah jumlah *cantilever piezoelectric*, maka nilai voltase bangkitan *cantilever piezoelectric* yang disusun paralel akan tetap untuk masing – masing *cantilever piezoelectric* dan menurun dengan penambahan jumlah *cantilever piezoelectric* yang terpasang pada sistem. Dimana voltase terbesar dihasilkan oleh 1 buah *cantilever piezoelectric* dengan frekuensi 1 Hz.





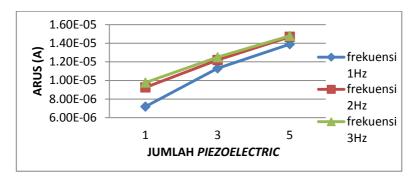
Gambar 4.14 Grafik pengaruh frekuensi gelombang air terhadap arus listrik bangkitan dari masing – masing jumlah *cantilever piezoelectric*.

gambar 4.14 menunjukkan grafik pengaruh frekuensi gelombang air terhadap arus listrik bangkitan yang dihasilkan dari mekasisme PLTG-Air dengan variasi jumlah cantilever piezoelectric. Terdapat tiga buah grafik yang mewakili tiga variasi jumlah cantilever piezoelectric yaitu 1, 3,dan 5 buah. Dapat dilihat nilai RMS arus untuk 1 buah cantilever piezoelectric pada saat frekuensi 1Hz, 2 Hz, dan 3Hz adalah 7.18E-06A, 9.25E-06A dan 9.77E-06A, nilai RMS arus untuk 3 buah cantilever piezoelectric pada saat frekuensi 1Hz, 2 Hz, dan 3Hz adalah 1.13E-05A, 1.22E-05A, dan 1.25E-05A, serta nilai RMS arus untuk 5 buah cantilever piezoelectric pada saat frekuensi 1Hz, 2 Hz, dan 3Hz adalah 1.39E-05A, 1.47E-05A, dan 1.48E-05A. Dari ketiga grafik tersebut dapat dilihat trendine setiap grafik meningkat seiring bertambahnya frekuensi gelombang air.

Trendline grafik yang semakin meningkat ini disebabkan karena semakin besar frekuensi gelombang air, maka semakin mendekati frekuensi natural dari *cantilever piezoelectric*. Sehingga semakin besar frekuensi gelombang air,

semakin besar pula kecepatan pergerakan *cantilever piezoelectric* dan semakin besar pula arus bangkitan yang dihasilkan. Hal ini didukung oleh persamaan (2.42 dan 2.44), dimana arus bangkitan yang dihasilkan *cantilever piezoelectric* dipengaruhi oleh kecepatan pergerakan *cantilever piezoelectric*.

Berdasarkan uraian tersebut maka dapat ditarik kesimpulan bahwa semakin besar frekuensi gelombang air yang diberikan maka semakin besar arus yang dihasilkan.



Gambar 4.15 Grafik pengaruh jumlah *cantilever piezoelectric* terhadap arus listrik bangkitan dari masing – masing frekuensi gelombang air.

Pada gambar 4.15 menunjukkan grafik pengaruh jumlah cantilever piezoelectric terhadap arus listrik bangkitan dari masing – masing frekuensi gelombang air. Terdapat tiga buah grafik yang mewakili tiga variasi frekuensi gelombang air yaitu 1Hz, 2Hz,dan 3Hz. Dari ketiga grafik tersebut dapat dilihat trendine setiap grafik naik seiiring bertambahnya jumlah cantilever piezoelectric.

Trendline naik pada gambar 4.15 menunjukkan bahwa seiring bertambahnya jumlah cantilever piezoelectric maka arus yang dihasilkan juga semakin besar karena pada rangkaian elektris ini cantilever piezoelectric disusun secara paralel. Penyusunan cantilever piezoelectric secara paralel menyebabkan

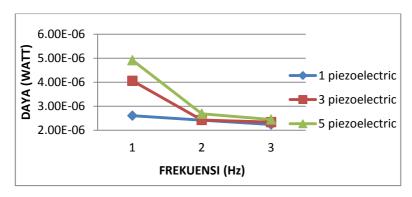
semakin banyak jumlah *cantilever piezoelectric* maka semakin banyak pula faktor pengkali pada nilai arus bangkitan per satu *cantilever piezoelectric*.

Berdasarkan uraian tersebut dapat disimpulkan bahwa semakin bertambah jumlah *cantilever piezoelectric* maka semakin besar arus yang dihasilkan. Dimana arus bangkitan terbesar terdapat pada saat frekuensi gelombang 3 Hz dengan jumlah *cantilever piezoelectric* sebanyak 5 buah.

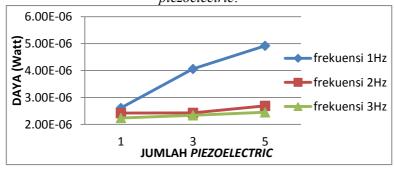
4.3.3 Pengaruh Frekuensi Dan Jumlah *Piezoelectric* Terhadap Daya Bangkitan *Piezoelectric*

Pada gambar 4.16 menunjukkan grafik pengaruh frekuensi gelombang air terhadap daya listrik bangkitan yang dihasilkan dari mekasisme PLTG-Air dengan variasi jumlah cantilever piezoelectric. Terdapat tiga buah grafik yang mewakili tiga variasi jumlah cantilever piezoelectric yaitu 1, 3,dan 5 buah. Dapat dilihat nilai RMS daya untuk 1 buah cantilever piezoelectric pada saat frekuensi 1Hz, 2 Hz, dan 3Hz adalah 2.61E-06Watt, 2.42E-06Watt dan 2.24E-06Watt, nilai RMS daya untuk 3 buah cantilever piezoelectric pada saat frekuensi 1Hz, 2 Hz, dan 3Hz adalah 4.06E-06Watt, 2.43E-06Watt, dan 2.34E-06Watt, serta nilai RMS daya untuk 5 buah cantilever piezoelectric pada saat frekuensi 1Hz, 2 Hz, dan 3Hz adalah 4.92E-06Watt, 2.69E-06Watt, dan 2.45E-06Watt. Dari ketiga grafik tersebut dapat dilihat trendine setiap grafik menurun dengan bertambahnya frekuensi.

Trendline grafik tersebut dipengaruhi oleh nilai arus dan voltase yang dihasilkan dari mekanisme PLTG-Air. Sesuai rumusan, dimana daya merupakan hasil kali voltase dengan arus. Dimana voltase menurun dengan bertambahnya frekuensi. Inilah yang menjadikan trendline daya mengalami penurunan.



Gambar 4.16 Grafik pengaruh frekuensi gelombang air terhadap daya listrik bangkitan dari masing – masing jumlah *cantilever* niezoelectric



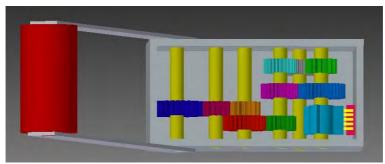
Gambar 4.17 Grafik pengaruh jumlah *cantilever piezoelectric* terhadap daya listrik bangkitan dari masing – masing frekuensi gelombang air.

Pada gambar 4.17 menunjukkan grafik pengaruh jumlah cantilever piezoelectric terhadap daya listrik bangkitan dari masing – masing frekuensi gelombang air. Terdapat tiga buah grafik yang mewakili tiga variasi frekuensi gelombang air yaitu 1Hz, 2Hz,dan 3Hz. Dari ketiga grafik tersebut dapat dilihat trendine setiap grafik naik seiiring bertambahnya jumlah cantilever piezoelectric.

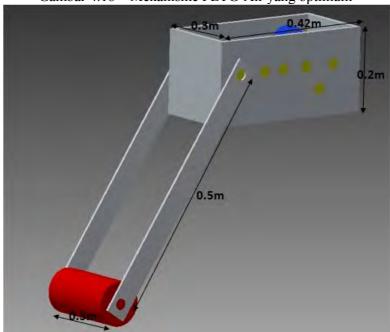
Trendline naik pada gambar 4.17 menunjukkan bahwa seiring bertambahnya jumlah cantilever piezoelectric maka daya yang dihasilkan juga semakin besar. Hal ini dikarenakan dengan bertambahnya jumlah cantilever piezoelectric yang dipasang secara paralel maka bertambah pula nilai arus setiap bertambahnya jumlah cantilever piezoelectric dengan nilai voltase yang cenderung tetap. Sesuai dengan rumusan bahwa daya merupakan hasil kali arus dengan voltase, sehingga nilai daya berbanding lurus dengan nilai arus. Jika nilai daya semakin besar maka nila arus juga akan semakin besar, dan sebaliknya. Berdasarkan uraian tersebut dapat disimpulkan bahwa nilai daya meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah cantilever piezoelectric.

Berdasarkan uraian tersebut dapat disimpulkan bahwa semakin bertambah jumlah *cantilever piezoelectric* semakin besar pula nilai daya bangkitan. Dari gambar 4.17 dapat diketahui bahwa daya terbesar terjadi pada frekuensi 1Hz dengan jumlah *cantilever piezoelectric* sebanyak 5 buah.

4.3.4 Rancangan PLTG-Air Yang Optimum

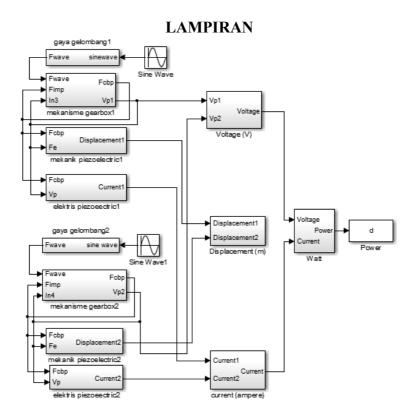


Gambar 4.18 Mekanisme PLTG-Air yang optimum



Gambar 4.19 Dimensi Mekanisme PLTG-Air

Dari pembahasan yang sudah dilakukan, didapatkan daya maksimal yang dihasilkan sesuai dengan gambar mekanisme PLTG-Air pada gambar 4.18. Mekanisme tersebut menghasilkan daya terbesar saat menggunakan 3 buah blade dan *cantiever piezoelectric* yang terpasang sejumlah 5 buah dengan inputan frekuensi sebesar 1Hz. Dan untuk dimensi PLTG-Air dapat dilihat pada gambar 4.19.



Gambar 1.1 Block simulasi secara global

Setelah didapatkan persamaan matematis maka hasil dari persamaan matematis dibuat ke dalam state variable, dari persamaan tersebut dibuat block simulasi pada Simulink matlab. Hasil dari pembuatan block simulasi dapat dilihat pada gambar 1. Berikut disajikan parameter yang digunakan pada editor:

clear; clc; %DATA PARAMETER %JARI-JARI GEAR dalam meter R1=0.035;

```
R2=0.02;
R3=0.009;
R4=0.02;
R5=0.025;
R6=0.025;
R7=0.027;
R8=0.025;
R9=0.032;
RB=0.035;
RP=0.03;
%MASSA GEAR dalam kg
M1=0.0312;
M2=0.0056;
M3=0.0083;
M4=0.0111;
M5=0.011;
M6=0.01;
M7=0.01;
M8=0.01;
M9=0.01;
MB=0.015;
%MOMEN INERSIA (kg/m^2)
J0 = 0.0491;
J1 = 0.5*M1*(R1^2);
J2 = 0.5*M2*(R2^2);
J3 = 0.5*M3*(R3^2);
J4 = 0.5*M4*(R4^2);
J5 = 0.5*M5*(R5^2);
J6 = 0.5*M6*(R6^2);
J7 = 0.5*M7*(R7^2);
J8 = 0.5*M8*(R8^2);
J9 = 0.5*M9*(R9^2);
JB = 0.5*MB*(RB^2);
Wp=3.333; %Wp=berat pelampung
Wb=1.658; %Wb=berat lengan
L=0.5; %L=panjang lengan
%PERBANDINGAN RODA GIGI
N1=R2/R1:
N2=R3/R2;
```

```
N3=R5/R3;
N4=R7/R6;
N5=R8/R7;
N6=R9/R8;
%MENGHITUNG NILAI K0
pi=3.14;
G=6.60e+10; %Nm/rad^2
D=0.02;
                            %meter
                          %meter
1=0.05;
K=(pi*G*(D^4))/(32*l);%Nm/rad hasil perhitungan
%PERHITUNGAN Jeq1, K1 saat pelampung turun
Jeq1 =
((J1*((N1*N2*N3*N4*N5)^2))+(J2*(N2*N3*N4*N5)^2)+(J3*(N3*N4
*N5)^2)+(J4*(N4*N5)^2)+(J5*(N4*N5)^2)+(J6*(N5^2))+J7+JB);
K1=((Wp*L)+(Wb*(L/2))*N1*N2*N3*N4*N5);
%PERHITUNGAN Jeq2 saat pelampung naik
Jeq2 =
((J1*(N1*N2*N3*N6)^2)+(J2*(N2*N3*N6)^2)+(J3*(N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N3*N6)^2)+(J4*(N2*N
N6^2)+(J8*(N6^2))+J9+JB);
K2=((Wp*L)+(Wb*L/2)*N1*N2*N3*N6);
%Gava angkat gelombang (Fw)
g = 9.81; %m/s^2
p = 1000; %kg/m<sup>3</sup>
A = 0.02;
H = 0.04; %2*A
Fw = p*g*(H^2)/32;
f=1; \%1,2,3
%PERHITUNGAN piezo sistem electrik
%Perhitungan K piezo
                                 % banyak piezo 1.3.5
n=5;
E=3e+9:
                                       % modulus young Pascal
                            % lebar meter
1=0.012;
                                   % panjang meter
b=0.006;
                               % tinggi meter
h=0.0001;
I=(1/12)*b*(h^3); \% I=inersia
KP = ((3*E*I)/(1^3))*n; \% KP = pegas piezo
deltat =0.0032; % waktu blade mengenai piezo
m=0.0003*n; % massa piezo kg
W=0.006;
                                         % W=lebar piezo
```

```
g31= 0.216;

K31= 0.12;

Cp=244e-12*n; % Kapasitansi piezo

V=g31/W; % untuk Vp

%MENCARI Vmc,Lmc,Rcm

tou=(((K31^2)*KP*Cp)^0.5);

Lmc= m/(tou^2);

Cmc=((tou^2)/K31);

%PERHITUNGAN Fimpact

Fimp=RB*MB/deltat;
```

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil analisa dan pembahasan yang telah dilakukan, dapat diambil kesimpulan:

- 1. Rangcangan PLTG-Air yang optimum dapat dillihat pada gambar 4.19.
- 2. Jumlah *cantilever piezoelectric* berpengaruh terhadap energi bangkitan yang dihasilkan. Semakin banyak *cantilever piezoelectric* yang digunakan, semakin besar pula energi listrik yang dihasilkan. Dengan jumlah *cantilever piezoelectric* sebanyak 5 buah didapatkan nilai daya bangkitan terbesar saat frekuensi 1Hz adalah 4.92E-06Watt, saat frekuensi 2Hz adalah 2.69E-06 Watt, dan saat frekuensi 3Hz adalah 2.45E-06Watt dengan jumlah *cantilever piezoelectric* sebanyak 5 buah.
- 3. Frekuensi berpengaruh terhadap energi bangkitan yang dihasilkan. Semakin besar frekuensi yang diberikan pada mekanisme PLTG-Air, semakin kecil energi bangkitan yang dihasilkan. Sehingga nilai daya terbesar terjadi saat frekuensi 1Hz dengan jumlah *cantilever piezoelectric* 1 buah adalah 2.61E-06 Watt, jumlah *cantilever piezoelectric* 3 buah adalah 4.06E-06 Watt dan saat jumlah *cantilever piezoelectric* 5 buah adalah 4.92E-06 Watt.
- 4. Daya listrik bangkitan terbesar yang dapatu dihasilkan oleh pemodelan mekanisme PLTG-Air tipe pelampung silinder dengan 3 variasi frekuensi gelombang laut (1 Hz, 2 Hz, 3 Hz) dan 3 variasi jumlah *cantilever piezoelectric* (1, 3, 5) terjadi ketika pemodelan mekanisme dikenakan frekuensi gelombang 1 Hz dengan menggunakan 5 buah

cantilever piezoelectric, yaitu dengan nilai daya 4.92E-06 Watt.

5.2 Saran

Beberapa saran yang dapat diberikan untuk memperbaiki laporan tugas akhir ini adalah

- 1. Penelitian ini dapat dilanjutkan dengan rancang bangun PLTG-Air tipe pelampung silinder denga metode *cantilever piezoelectric*.
- 2. Untuk eksperimen pembuatan alat, perlu dilakukan penyesuaian inputan frekuensi dengan frekuensi gelombang air yang tersedia pada kolam simulator

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Susanto, I Made, 2015. "Studi Karakteristik Energi Listrik Yang Dihasilkan Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut (PLTGL) Metode Pelampung Dengan Variasi Dimensi Pelampung Dan Panjang Lengan". Tugas Akhir pada Jurusan Teknik Mesin: ITS Press.
- [2] Akvianto, Jemy, 2015. "Studi Eksperimen Dan Analisa Energi Listrik Yang Dihasilkan Prototipe Mekanisme PLTGL Metode Pelampung Silinder Dengan Variasi Pembebanan Dan Panjang Lengan". Tugas Akhir pada Jurusan Teknik Mesin: ITS Press.
- [3] Losong, Yabes David, 2015. "Pemodelan Dan Analisa Energi Listrik Yang Dihasilkan Model Mekanisme Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut (PLTGL) Tipe Pelampung Piezoelectric". Tugas Akhir pada Jurusan Teknik Mesin: ITS Press.
- [4] A. Wijaya dan I. Wayan, "Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut Menggnakan Teknologi Oscilating Water Column di Perairan Bali," J. Teknol. Elektro, vol 9, no. 2, 2012.
- [5] M. A. Djabbar, dkk, "Ombak Sebagai Sumber Energi Listrik," *Pros. Has. Penelit. Fak. Tek*, vol. 5, no. 1, 2011.
- [6] A. Muetze dan J. Vining, "Ocean Wafe Energy Convesion," *Univ. Wis. Madison*, 2005.

- [7] D. Magagna, "Oscillating water column wave pump: a wave energy converter for water delivery," University of Southampton, 2011.
- [8] Deutschman, A. D., Michels, W. J., dan Wilson, C. E. 1975. "Machine Design". Macmillan Publishing Co. Inc., New York
- [9] Indraswara, Joenta, 2015. "Studi Karakteristik Voltase Bangkitan yang Dihasilkan Mekanisme Vibration Energy Harvesting Menggunakan etode Cantilever Piezoelectric-Pengungkit Dengan Variasi Jumlah Blade Pemukul dan Frekuensi Sumber Getar". Tugas Akhir pada Jurusan Teknik Mesin: ITS Press
- [10] Yusuf, Muh. Irvan, 2015. "Pemodelan Dan Analisa Energi Listrik Yang Dihasilkan Mekanisme Pembangkit Listrik Gelombang Laut Tipe Kayuh Dayung Piezoelectric". Tugas Akhir pada Jurusan Teknik Mesin: ITS Press.
- [11] S. S. Rao, "Mechanical Vibrations Fifth Edition," Prentice Hall, 2011.
- [12] Krisdianto, Andy Noven, 2011. "Studi Karakteristik Energi Yang Dihasilkan Mekanisme Vibration Energy Harvesting Dengan Metode Piezoelectric Untuk Pembebanan Frontal Dan Lateral". Tugas Akhir pada Jurusan Teknik Mesin: ITS Press.
- [13] M. E. McCormick, "Ocean Engineering Mechanic," Cambridge University Press, 2010.
- [14] 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". Tugas Akhir pada Jurusan Teknik Mesin: ITS Press.

BIODATA PENULIS



Sherly Octavia Saraswati dilahirkan di Blitar, 22 Oktober 1993 anak vang terlahir dari orang tua terbaik bernama Agus Yudianto dan Yuniarti. Riwayat pendidikan penulis diawali di SDN 1 Kalipang pada tahun 2000-2006 Penulis melanjutkan pendidikannya di SMPN 1 Sutojayan pada tahun 2006-2009 kemudian melanjutkan pendidikannya di SMAN 1Sutoiavan pada tahun 2009-2012. Selanjutnya

penulis melanjutkan pendidikan jenjang S-1 Jurusan Teknik Mesin di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya melalui jalur SNMPTN Tulis.

kegiatan akademik Penulis aktif dalam organisasi selama perkuliahan. Penulis juga pernah menjadi asisten Laboratorium Desain dan asisten Laboratorium Perpindahan Panas. Penulis juga mendapatkan beasiswa PPA dari tahun 2013-2016. Untuk organisasi penulis aktif menjadi staff Kesma Himpunan Mahasiswa Mesin tahun 2013-2014 dan Kabiro Kesma Himpunan Mahasiswa Mesin tahun 2014-2015. Apabila pembaca ingin berkorespondensi dengan penulis menghubungi melalui email : sherly.octaviasaraswati@gmail.com