TUGAS AKHIR – TM141585

PEMODELAN DAN ANALISA ENERGI LISTRIK YANG DIHASILKAN MEKANISME PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GELOMBANG AIR TIPE *SINGLE* PENDULUM VERTIKAL – PONTON PERAHU MENGGUNAKAN METODE *CANTILEVER PIEZOELECTRIC*

RIFQIAH SABRINA YUSUF
NRP. 2112100065

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

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

FINAL PROJECT – TM141585

MODELING AND ANALYSIS OF ELECTRIC ENERGY PRODUCED BY WATER WAVE ELECTRIC POWER GENERATION MECHANISM TYPE SINGLE VERTICAL PENDULUM – PONTOON BOAT USING CANTILEVER PIEZOELECTRIC METHOD

RIFQIAH SABRINA YUSUF
NRP. 2112100065

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 MEKANISME PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GELOMBANG AIR TIPE *SINGLE* PENDULUM VERTIKAL - PONTON PERAHU MENGGUNAKAN METODE *CANTILEVER PIEZOELECTRIC*

TUGAS AKHIR

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

Oleh :

RIFQIAH SABRINA YUSUF
NRP. 2112 100 065

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

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

SURABAYA
JUNI, 2016

PEMODELAN DAN ANALISA ENERGI LISTRIK YANG DIHASILKAN MEKANISME PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GELOMBANG AIR TIPE *SINGLE* PENDULUM VERTIKAL – PONTON PERAHU MENGGUNAKAN METODE *CANTILEVER PIEZOELECTRIC*

Nama : **Rifqiah Sabrina Yusuf**
NRP : **2112100065**
Jurusan : **TeknikMesin ITS**
DosenPebimbing : **Dr. WiwiekHendrowati, ST., MT.**

Abstrak

Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Air (PLTGA) merupakan salah satu sistem pembangkit listrik yang menggunakan gelombang air sebagai sumber energinya. Pada penelitian ini akan dilakukan pemodelan dari PLTGA sistem single pendulum vertikal - ponton perahu dengan menggunakan metode piezoelectric. Mekanisme dari alat ini sebagai berikut gelombang air akan menggerakan ponton perahu sehingga ponton akan miring membentuk sudut sebesar α terhadap kondisi statisnya, kondisi ini akan dibagi menjadi 8 diskrit dalam satu gelombang. Kemiringan ponton perahu mengakibatkan pendulum akan berayun bolak-balik. Gerak berayun pendulum akan diteruskan dan disearahkan oleh roda gigi pembalik yang kemudian diteruskan ke blade dan diubah menjadi energi listrik oleh material piezoelectric yang mendapat pukulan dari blade. Variasi yang digunakan dalam penelitian ini berupa frekuensi gelombang laut (0.3, 0.4 & 0.5 Hz), panjang lengan pendulum (10, 11 &12 cm), dan massa pendulum (175, 200 & 225 gr). Dari simulasi yang telah dilakukan didapat hasil bahwa energi listrik dan frekunsi pukulan yang diterima oleh material blade berbanding lurus dengan massa pendulum dan panjang lengan pendulum sedangkan untuk variasi frekuensi energi listrik tertinggi dan frekuensi pukul

terbanyak pada saat 0.5 Hz. Energi maksimal berupa daya listrik sebesar 4.2754 x 10^{-5} W dan frekuensi pukul sebanyak 100 kali dalam satu gelombang dengan menggunakan frekuensi gelombang air 0.5 Hz, panjang lengan pendulum 12 cm dan massa pendulum 225 gr.

Kata kunci : PLTGA, single pendulum, piezoelectric, panjanglengan, massa pendulum, frekuensi gelombang air

MODELING AND ANALYSIS OF ELECTRIC ENERGY PRODUCED BY WATER WAVE ELECTRIC POWER GENERATION MECHANISM TYPE SINGLE VERTICAL PENDULUM – PONTOON BOAT USING CANTILEVER PIEZOELECTRIC METHOD

Name : **Rifqiah Sabrina Yusuf**
NRP : **2112100065**
Department : **TeknikMesin ITS**
Advisory Lecturer : **Dr. WiwiekHendrowati, ST., MT.**

Abstract

Water Wave Electric Power Generation (PLTGA) is a power generation system that uses water wave as a source of energy. This research will be carried out modeling of PLTGA singlevertical pendulum - pontoon boat system using a piezoelectric method. The mechanism of the tool is as follows waves of water will move a pontoon boat so the pontoon will be at an angle of α to its static condition, this condition will be divided into eight discrete in one wave. The slope of the pontoon boat resulted in the pendulum will swing back and forth. Pendulum swinging motion will be passed and rectified by the reversing gear which is then forwarded to the blade and is converted into electrical energy by piezoelectric material that received animpact from the blade. Variations used in this study is waterwave frequencies (0.3, 0.4 & 0.5 Hz), length of the pendulum arm (10, 11 & 12 cm), and pendulum mass (175, 200 & 225 gr). From the simulation has been performed the result is that the electrical energy and the frequency of impacts received by the blade material is directly proportional to the mass of the pendulum and the pendulum arm's length while the highest frequency variation of electrical energy and at the highest frequency at the time of 0.5 Hz. Maximum energy in the form of electric power amounted to 4.2754 x 10-5 W and at a frequency 100 times in one wave using

water wave frequency of 0.5 Hz, pendulum arm length of 12 cm and a pendulum mass of 225 g.

Keywords : PLTGA, single pendulum, piezoelectric, panjangarm length, pendulum mass, water wave frequency

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL
LEMBAR PENGESAHAN
ABSTRAK…… i
ABSTRACT…….... iii
KATA PENGANTAR…… v
DAFTAR ISI……. vii
DAFTAR GAMBAR…… xi
DAFTAR TABEL…… xv
BAB 1 PENDAHULUAN…… 1
1.1 LatarBelakang…… 1
1.2 PerumusanMasalah…… 2
1.3 BatasanMasalah……. 3
1.4 TujuanPenelitian…… 3
1.5 ManfaatHasilPenelitian…… 4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA…….. 5
2.1 TinjauanPustaka……. 5
2.1.1 Pemodelan PLTGL Sistem Pendulum - PontonDatarolehArdiNoerpamoengkasdkk …… 5
2.1.2 AnalisaPerbandinganEnergiListrik yang Dihasilkan PLTGL SistemPontonPerahu - *Single* Pendulum dan*Triple* Pendulum VertikalolehEfraimRombe…… 6
2.1.3 Pemodelan PLTGL Tipe*Single* Pendulum Vertikal - PontonPerahuolehSaifudinNur…… …… 8
2.1.4 StudiKarakteristikVoltaseBangkitan yang DihasilkanMekanisme*Vibration Energy Harvesting* - Metode*Cantilever* 12

*Piezoelectric*olehGustiFajar Romano…

2.2 DasarTeori…… 15

2.2.1 Gelombang Air …….…… 15

2.2.2 Pendulum…… 16

2.2.3 SistemDiskrit Multi-DOF…….. 18

2.2.4 *Gearbox*…….. 19

2.2.5 SistemRotasiMekanis……... 21

2.2.6 MomenInersiaGabungan…….. 23

2.2.7 Material *Piezoelectric*…… 25

BAB III METODE PENELITIAN……... 31

3.1 TahapPenelitian…….. 31

3.1.1 *Flowchart*Penelitian…….. 31

3.1.2 Penjelasan*Flowchart* Penelitian…… 32

3.2 RancanganPemodelan…… 34

3.2.1 Pemodelan Pendulum……. 36

3.2.2 PemodelanRangkaianRoda Gigi Penyearah 38

3.2.3 PemodelanMekanisme*Blade* dan*Piezoelectric*……. . 44

3.2.4 PemodelanElektris*Piezoelectric*…….. 46

BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN…… 49

4.1 PemodelanMekanisme……... 49

4.2 Parameter…… 50

4.3 ContohPerhitungan……. 52

4.4 *Input*Pemodelan……. 55

4.5 AnalisaPemodelan……. 55

4.5.1 PemodelanPerpindahanSudut Pendulum…… 56

4.5.2 PemodelanDefleksi*Piezoelectric*…….. 60

4.5.3 PemodelanEnergiListrik yang DihasilkanolehMekanismePembangkitListrikGelombang Air……..... 65
4.6 Pembahasan……. 79
4.6.1 PengaruhVariasi Massa Pendulum terhadapPerpindahanSudut Pendulum (θ_p)…… 79
4.6.2 PengaruhVariasiPanjangLengan Pendulum terhadapPerpindahanSudut Pendulum (θ_p).. 81
4.6.3 PengaruhVariasiFrekuensiGelombang Air terhadapPerpindahanSudut Pendulum (θ_p).. 82
4.6.4 PengaruhVariasi Massa Pendulum terhadapDefleksi Material *Piezoelectric* (X_{pzt})…… 84
4.6.5 PengaruhVariasiPanjangLengan Pendulum terhadapDefleksi Material *Piezoelectric* (X_{pzt})…….. 87
4.6.6 PengaruhVariasiFrekuensiGelombang Air terhadapDefleksi Material *Piezoelectric* (X_{pzt})…… 89
4.6.7 PengaruhVariasi Massa Pendulum terhadapEnergiBangkitan Material *Piezoelectric* (Vp, I, dan P)…….. 91
4.6.8 PengaruhVariasiPanjangLengan Pendulum terhadapEnergiBangkitan Material *Piezoelectric*(Vp, I, dan P)…… 95
4.6.9 PengaruhVariasiFrekuensiGelombang Air terhadapEnergiBangkitan Material *Piezoelectric*(Vp, I, dan P)……. 99
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN……... 105
5.1 Kesimpulan……. 105
5.2 Saran…… 106
DAFTAR PUSTAKA……...… 107

"Halaman ini sengaja dikosongkan"

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Data Hasil Percobaan PLTGL *Single* dan *Triple* Pendulum……	7
Tabel 2.2	Sifat Mekanik Beberapa Material *Piezoelectric*	27
Tabel 4.1	Momen Inersia pada Roda Gigi……	50
Tabel 4.2	Konstanta Kekakuan pada Poros……..	50
Tabel 4.3	Parameter Ponton Perahu…….	51
Tabel 4.4	Parameter Material *Blade*……...	51
Tabel 4.5	Parameter Material *Piezoelectric*……...	51
Tabel 4.6	Spesifikasi Gelombang yang Dihasilkan Simulator Gelombang Air…….	52
Tabel 4.7	Nilai SudutPonton (θ_p) terhadap Perubahan Frekuensi Gelombang (f)	55
Tabel 4.8	NilaiPerpindahanSudut Pendulum untukVariasi Massa Pendulum……	79
Tabel 4.9	Nilai Perpindahan Sudut Pendulum untuk Variasi Panjang Lengan Pendulum…	81
Tabel 4.10	Nilai Perpindahan Sudut Pendulum untuk Variasi Frekuensi Gelombang Air…	83
Tabel 4.11	Nilai Defleksi Material *Piezoelectric* untuk Variasi Massa Pendulum	85
Tabel 4.12	Nilai Defleksi Material *Piezoelectric* untuk Variasi Panjang Lengan Pendulum……	87
Tabel 4.13	Nilai Defleksi Material *Piezoelectric* untuk Variasi Frekuensi Gelombang Air	89
Tabel 4.14	Nilai Energi Listrik denganVariasi Massa Pendulum……...	92
Tabel 4.15	Nilai Energi Listrik dengan Variasi Panjang Lengan Pendulum…….	96
Tabel 4.16	Nilai Energi Listrik dengan Variasi Frekuensi Gelombang Air……..	100

"Halaman ini sengaja dikosongkan"

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Penyederhanaan dari PLTGL sistem pendulum – ponton datar…….....	5
Gambar 2.2	Grafik perbandingan hasil simulasi nonlinear dan linierisasi pendulum datar..	6
Gambar 2.3	PLTGL sistem ponton perahu – *single* dan *triple* pendulum…….	6
Gambar 2.4	Model PLTGL tipe *single* pendulum vertikal – ponton perahu…….....	8
Gambar 2.5	Posisi variasi sudut ponton kapal…….....	9
Gambar 2.6	Grafik voltase bangkitan hasil simulasi..	10
Gambar 2.7	Grafik *output* voltase hasil simulasi….....	12
Gambar 2.8	*Prototype* mekanisme *vibration energy harvesting*…….....	12
Gambar 2.9	Hasil pengujian mekanisme *vibration energy harvesting*…….	14
Gambar 2.10	Karakteristik gelombang air laut……..	15
Gambar 2.11	*Compound* pendulum……...	17
Gambar 2.12	Sistem getaran multi derajat kebebasan..	18
Gambar 2.13	*Free body* diagrammulti derajat kebebasan…….	18
Gambar 2.14	Transmisi rantai……	19
Gambar 2.15	Transmisi roda gigi……..	20
Gambar 2.16	Perbandingan roda gigi…….	21
Gambar 2.17	Momen inersia batang dan poros……..	22
Gambar 2.18	Kopling langsung…….	24
Gambar 2.19	Kopling melalui roda gigi……	24
Gambar 2.20	Elemen material *piezoelectric*……..	25
Gambar 2.21	Macam bentuk *piezoelectric*…….	27
Gambar 2.22	*Free body* diagram dari *cantilever piezoelectric*…….....	29

Gambar 2.23	Rangkaian listrik material *cantilever piezoelectric*……..	29
Gambar 3.1	*Flowchart* penelitian……	32
Gambar 3.2	Subsistem pemodelan……	33
Gambar 3.3	PLTGL sistem pendulum vertikal–ponton perahu…….....	34
Gambar 3.4	Pemodelan sederhana PLTGL sistem *single* pendulum vertikal – ponton perahu dengan material *piezoelectric*…...	35
Gambar 3.5	Analisa gaya pada pendulum – ponton perahu……	36
Gambar 3.6	Model mekanisme PLTGL……	38
Gambar 3.7	Model dinamis PLTGL……	39
Gambar 3.8	Gerakan roda gigi saat berputar CW……	39
Gambar 3.9	*Free-body* diagram dari *gearbox*……..	41
Gambar 3.10	Gerakan roda gigi saat berputar CCW…	42
Gambar 3.11	*Free-body* diagram *gearbox*……	44
Gambar 3.12	Sistem dinamis mekanisme *blade* dan *piezoelectric*…….....	44
Gambar 3.13	*Free-body* diagram *blade*……	45
Gambar 3.14	*Free-body* diagram *piezoelectric*……	45
Gambar 3.15	Susunan dari material *piezoelectric*……	46
Gambar 3.16	Diagram sirkuit elektromagnetik *cantilever piezoelectric*…….	46
Gambar 4.1	Mekanisme pembangkit listrik tenaga gelombang air sistem *single* pendulum vertikal – ponton perahu dengan material *piezoelectric*……	49
Gambar 4.2	*Free-body* diagram saat ponton terkena gelombang…….	52
Gambar 4.3	Delapan posisi ponton dalam satu gelombang……	53

Gambar 4.4	Resultan gaya pada ponton……	54
Gambar 4.5	Alur pemodelan……	56
Gambar 4.6	Grafik perpindahan sudut pendulum (θ_p) untuk variasi massa pendulum…….	57
Gambar 4.7	Grafik perpindahan sudut pendulum (θ_p) untuk variasi panjang lengan pendulum..	58
Gambar 4.8	Grafik perpindahan dudut pendulum (θ_p) untuk variasi frekuensi gelombang air…	59
Gambar 4.9	Grafik defleksi *piezoelectric* untuk variasi massa pendulum…….	61
Gambar 4.10	Grafik defleksi *piezoelectric* untuk variasi panjang lengan pendulum……	62
Gambar 4.11	Grafik defleksi p*iezoelectric* untuk variasi frekuensi gelombang air……...	64
Gambar 4.12	Grafik arus untuk variasi massa pendulum….....	66
Gambar 4.13	Grafik voltase untuk variasi massa pendulum……..	67
Gambar 4.14	Grafik daya untuk variasi massa pendulum.....	68
Gambar 4.15	Grafik arus untuk variasi panjang lengan pendulum…….....	71
Gambar 4.16	Grafik voltase untuk variasi panjang lengan pendulum……..	72
Gambar 4.17	Grafik daya untuk variasi panjang lengan pendulum……..	73
Gambar 4.18	Grafik arus untuk variasi frekuensi gelombang air……...	75
Gambar 4.19	Grafik voltase untuk variasi frekuensi gelombang air……...	76
Gambar 4.20	Grafik daya untuk variasi frekuensi gelombang air……...	77
Gambar 4.21	Respon perpindahan sudut pendulum (θ_p) untuk variasi massa pendulum…….	80
Gambar 4.22	Respon perpindahan sudut pendulum (θ_p)	81

	untuk variasi panjang lengan pendulum..	
Gambar 4.23	Respon perpindahan sudut pendulum (θ_p) untuk variasi frekuensi gelombang air…	83
Gambar 4.24	Grafik defleksi material *piezoelectric* (x_{pzt}) untuk variasi massa pendulum……	85
Gambar 4.25	Grafik defleksi material *piezoelectric* (x_{pzt}) untuk variasi panjang lengan pendulum….....	87
Gambar 4.26	Grafik defleksi material *piezoelectric* (x_{pzt}) untuk variasi frekuensi gelombang air…….....	90
Gambar 4.27	Grafik voltase, arus dan daya untuk variasi massa pendulum……	93
Gambar 4.28	Grafik voltase, arus dan daya untuk variasi panjang lengan pendulum……	97
Gambar 4.29	Grafik voltase, arus dan daya untuk variasi frekuensi gelombang air……	101

BAB I
PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang Masalah

Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Air merupakan salah satu sistem pembangkit listrik yang menggunakan gelombang air sebagai sumber energinya. Pada dasarnya prinsip kerja teknologi yang mengkonversi energi gelombang air menjadi energi listrik adalah mengakumulasi energi gelombang air untuk memutar turbin generator. Di beberapa Negara Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Air telah dibangun dan terus dikembangkan. Di Indonesia sendiri pemanfaatan energi gelombang air sebagai sumber listrik belum sepenuhnya terlaksana. Karena untuk merealisasikannya perlu dilakukan penelitian yang lebih mendalam. Penelitian untuk mendapatkan teknologi yang optimal dalam mengkonversi energi gelombang air masih terus dilakukan.

Pada tahun 2011 Ardi Noerpamoengkas, Harus Laksana Guntur dan Zamrisyaf SY [1] melakukan penelitian secara pemodelan mengenai pembangkit listrik tenaga gelombang air (PLTGL), dimana sistem yang dimodelkan yaitu Sistem Pendulum Horizontal – Ponton Datar. Kemudian pada tahun 2013 penelitian tersebut dikembangkan melalui kerja sama antara Badan Penelitian dan Pengembangan Kelistrikan PLN dengan Jurusan Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS). Pada tahun 2015, Efraim Rombe [2] melakukan penelitian secara eksperimen PLTGL dengan mekanisme *Single* dan *Triple* Pendulum Vertikal – Ponton Perahu skala laboratorium. Dan pada tahun yang sama, Saifudin Nur [3] melakukan penelitian secara pemodelan PLTGL Sistem Ponton Perahu – *Single* Pendulum serta menganalisa energi listrik yang dihasilkan sistem tersebut. Saifudin menggunakan generator dalam mengubah energi mekanis dari sistem menjadi energi listrik.

Teknologi mengubah energi gelombang air menjadi energi listrik merupakan salah satu contoh *energy harvesting*. *Energy*

harvesting merupakan proses memanfaatkan kejadian alam sebagai sumber energi eksternal, ditangkap dan dikonversikan ke dalam suatu bentuk energi tertentu. Dalam mengkonversi energi getaran menjadi energi listrik terdapat suatu metode yaitu *piezoelectric*. *Piezoelectric* merupakan suatu material yang memiliki kemampuan untuk membangkitkan potensial listrik sebagai respon dari tegangan mekanik yang diberikan pada material tersebut. Sehingga dalam penelitian ini akan digunakan *cantilever piezoelectric* sebagai pengganti dari *rotary generator*. Untuk tegangan mekanik yang dibutuhkan oleh *piezoelectric* didapat dari pukulan blade yang dipasang seporos dengan poros keluaran *gearbox*. Penelitian yang dilakukan merupakan simulasi dengan menggunakan Simulink *software* Matlab.

1.2. Perumusan Masalah

Dari latar belakang yang telah dijelaskan, maka pada penelitian ini akan disimulasikan mekanisme Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Air dengan menggunakan pendulum sebagai inputan energi mekanik yang akan diteruskan ke *gearbox* dan *blade*. *Blade* yang kemudian akan memukul *piezoelectric* sehingga menghasilkan energi listrik.

Dari uraian di atas, perumusan masalah dari tugas akhir ini yaitu:

1. Pemodelan sistem dinamis dari mekanisme Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Air Sistem *Single* Pendulum Vertikal – Ponton Perahu menggunakan metode *piezoelectric* skala laboratorium.
2. Bagaimana mensimulasikan dan menganalisa energi listrik yang dihasilkan mekanisme Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Air Sistem *Single* Pendulum Vertikal – Ponton Perahu menggunakan metode *piezoelectric*.
3. Bagaimana respon perpindahan *piezoelectric*,voltase, arus dan daya yang dihasilkan metode *piezoelectric*

dengan variasi massa pendulum, panjang lengan pendulum, dan frekuensi gelombang air.

1.3. Batasan Masalah

Batasan masalah yang diterapkan pada penelitian ini, yaitu:

1. Pendulum dianggap partikel bermassa dan massa lengan pendulum dianggap terpusat di tengah-tengah.
2. Poros dianggap kaku, sehingga tidak ada perbedaan untuk besar perpindahan sudut dalam satu poros yang sama.
3. Pengaruh gesekan torsional pada roda gigi dan blade diabaikan.
4. Gerakan gelombang air sebagai input pada sistem diasumsikan sinusoidal dalam satu arah.
5. Nilai sudut alfa (α) yang dibentuk antara ponton perahu dengan garis horizontal diasumsikan kecil sehingga sin $\alpha = \alpha$.

   (Catatan: $\alpha_{kecil} = 0^o\text{-}5^o$, pada Tugas Akhir ini $\alpha = 15^o$ juga diasumsikan kecil)

1.4. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Merancang mekanisme Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Air Sistem *Single* Pendulum Vertikal – Ponton Perahu dengan menggunakan metode *piezoelectric.*
2. Memodelkan dan menganalisa energi listrik yang dihasilkan Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Air Sistem Ponton Perahu - *Single* Pendulum dengan menggunakan metode *piezoelectric*.

1.5. Manfaat Hasil Penelitian

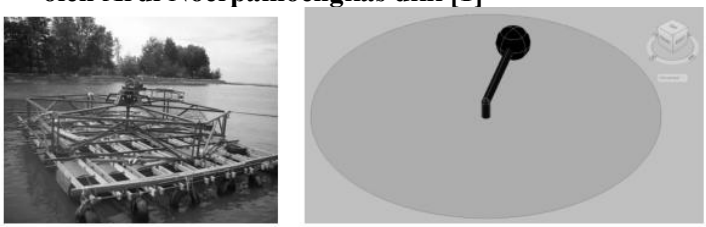
Manfaat dari penelitian ini antara lain:

1. Sebagai referensi untuk merancang bangun Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Air Sistem *Single* Pendulum Vertikal – Ponton Perahu.
2. Memberikan data berupa jumlah energi listrik yang dapat dihasilkan oleh Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Air Sistem *Single* Pendulum – Ponton Perahu dengan menggunakan metode *piezoelectric* secara pemodelan.
3. Mengetahui parameter-parameter yang dapat meningkatkan keluaran energi listrik pada alat Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Air Sistem *Single* Pendulum – Ponton Perahu.

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Tinjauan Pustaka

2.1.1. Pemodelan PLTGL Sistem Pendulum – Ponton Datar oleh Ardi Noerpamoengkas dkk [1]

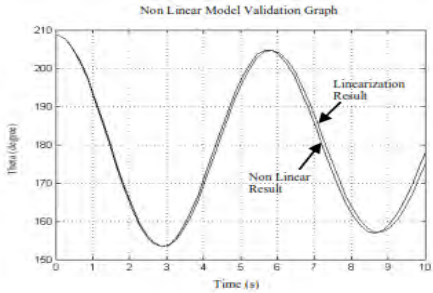


Gambar 2.1 Penyederhanaan dari PLTGL sistem pendulum – ponton datar [1]

Penelitian yang dilakukan oleh Ardi Noerpamoengkas, Harus Laksana Guntur dan Zamrisyaf menggunakan sistem pendulum – ponton datar. Gelombang air akan mengakibatkan ponton miring sehingga dapat memutar pendulum. Putaran pendulum ini yang kemudian akan dikonversikan menjadi energi listrik. Sistem pendulum datar ini merupakan penyederhanaan dari pembangkit listrik tenaga gelombang air (PLTGL) sistem pendulum – ponton datar. Model simulasi respon pendulum datar non linear yang telah dibuat akan divalidasi dengan model simulasi numerik hasil linearisasi. Validasi memperhatikan *error* periode respon pendulum antara kedua model pada sudut simpangan yang kecil. Penyelesaian numerik non linear dan hasil linearisasi dari respon perputaran pendulum dilakukan dengan metode numerik.

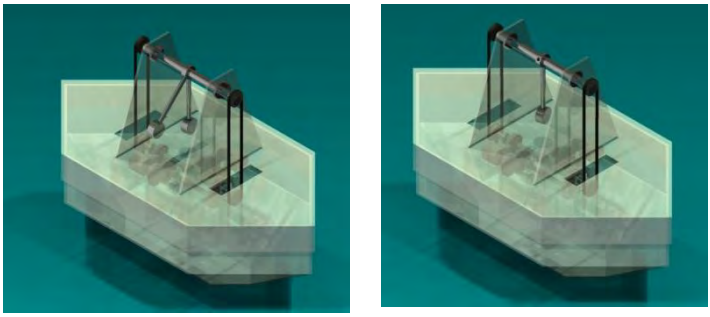
Respon diamati pada 2 kondisi yaitu pada kondisi *undamped* dan *underdamped* (Ct = 0,05 Nms/rad) dengan *properties* massa pendulum (M = 1 kg), panjang pendulum (L = 1 m) dan gravitasi (g = 9.8 m/s^2). Yang divariasikan pada pemodelan ini yaitu, sudut α (7°) , posisi keseimbangan pendulum (0°, 180°) dan sudut simpangan awal (1°, 28.6^o).

Hasil dari simulasi ini yaitu sudut deviasi awal pendulum akan mempengaruhi *error* dari periode pendulum. Semakin kecil sudut deviasi awal pendulum maka *error* periode pendulum juga semakin kecil. Kondisi nonlinier dan linier mempunyai penurunan amplitudo dan sudut simpangan yang sama pada nilai *damping torsional* yang sama. Namun, simulasi nonlinear hanya valid pada waktu yang pendek setelah pendulum mulai berputar.



Gambar 2.2 Grafik perbandingan hasil simulasi nonlinear dan linearisasi pendulum datar [1]

2.1.2. Analisa Perbandingan Energi Listrik yang Dihasilkan PLTGL Sistem Ponton Perahu – *Single* Pendulum dan *Triple* Pendulum Vertikal oleh Efraim Rombe [2]



Gambar 2.3 PLTGL sistem ponton perahu – *single* dan *triple* pendulum [2]

Penelitian yang dilakukan oleh Efraim Rombe yaitu eksperimen PLTGL Sistem Ponton Perahu – *Single* dan *Triple* Pendulum dalam skala laboratorium. Gelombang air yang datang akan menggerakkan ponton perahu sehingga miring. Kemiringan dari perahu akan menyebabkan massa pendulum bergerak. Gerakan bolak-balik pendulum akan disearahkan oleh roda gigi pembalik dan diubah menjadi energi listrik.

Variasi yang diberikan untuk penelitian ini yaitu massa pendulum dengan frekuensi *inverter* 4 Hz dan panjang lengan pendulum 80 mm. Dimana variasi massa pendulum sebesar 175 gr, 200 gr, dan 225 gr untuk *single* pendulum. Sedangkan untuk *triple* pendulum memiliki variasi massa pendulum sebesar 125 gr, 150 gr dan 175 gr dengan massa penyeimbang 25 gr serta variasi massa pendulum sebesar 75 gr, 100 gr, dan 125 gr dengan massa penyeimbang sebesar 50 gr.

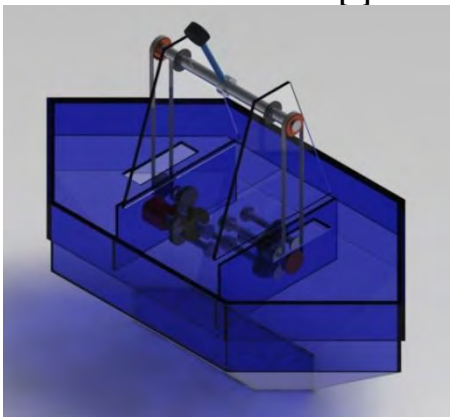
Tabel 2.1 Data Hasil Percobaan PLTGL *Single* dan *Triple* Pendulum [2]

F inv [hz]	Amplitudo [m]	Jumlah Pendulum		Panjang Lengan [cm]	Massa [gr]	Vrms (V)
4	0.012	1		8	175	0.0119
					200	0.0149
					225	0.0178
4		3	massa penyeimbang 25 gram		125	0.0113
					150	0.0121
					175	0.0156
4		3	massa penyeimbang 50 gram		75	0.0081
					100	0.0095
					125	0.014

Dari tabel di atas dapat dilihat bahwa listrik yang dihasilkan oleh *single* pendulum selalu lebih besar dari pada *triple*

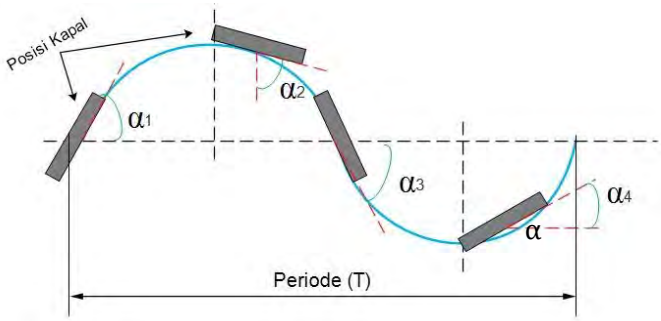
pendulum, pada setiap variasi massa. Semakin besar nilai massanya, maka listrik yang dihasilkan pun akan semakin besar.

2.1.3. Pemodelan PLTGL Tipe *Single* Pendulum Vertikal – Ponton Perahu oleh Saifudin Nur [3]



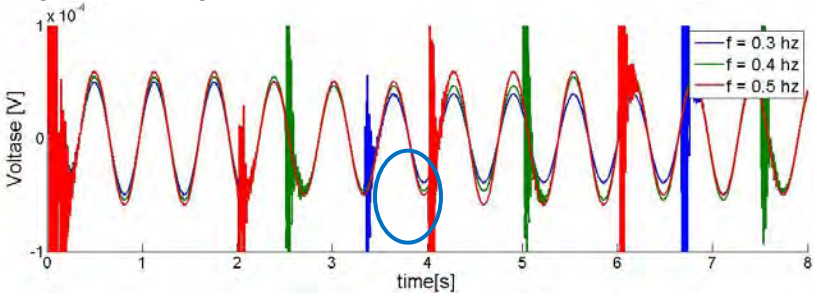
Gambar 2.4 PLTGL tipe *single* pendulum vertikal – ponton perahu [3]

Penelitian yang dilakukan oleh Saifudin Nur adalah pemodelan PLTGL tipe *single* pendulum vertikal – ponton perahu menggunakan simulink matlab. Gelombang air akan mengakibatkan ponton perahu miring dan membentuk sudut sebesar α terhadap kondisi statis. Kemudian pendulum yang berfungsi untuk menyeimbangkan akan bergerak bolak-balik, gerakan pendulum ini kemudian akan diarahkan oleh roda gigi yang kemudian dikonversi menjadi energi listrik oleh generator.

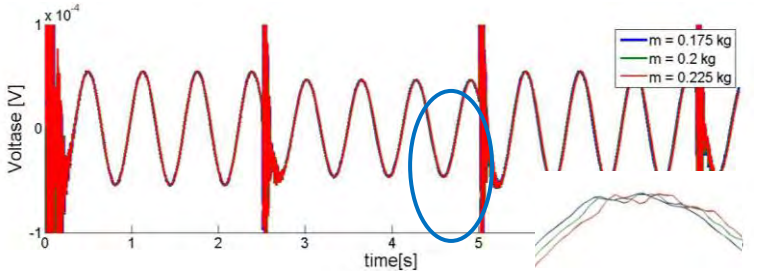


Gambar 2.5 Posisi variasi sudut ponton kapal (α) [3]

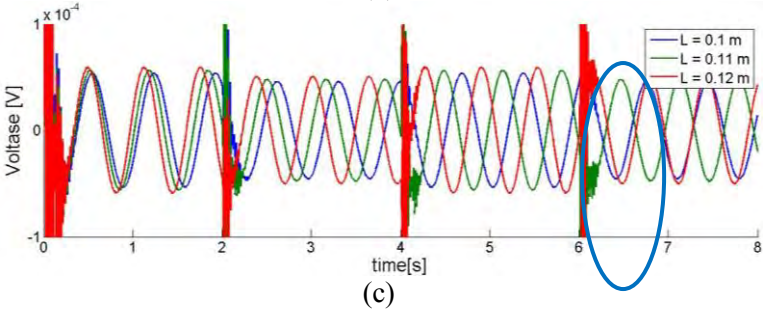
Dalam satu gelombang, ponton kapal mengalami perubahan sudut (α) secara kontinyu. Namun dalam simulasi ini input untuk sudut α dibagi menjadi 4 posisi terhadap gelombang air, dapat dilihat pada gambar di atas. Pemodelan ini menggunakan variasi dari frekuensi gelombang air (0.3, 0.4, dan 0.5 Hz), panjang lengan (10, 11, dan 12 cm) dan massa pendulum (175, 200, dan 225 gr). Pemodelan yang dilakukan menggunakan program simulink matlab, dimana *output* yang dihasilkan adalah energi listrik dari generator DC dalam bentuk voltase.



(a)



(b)

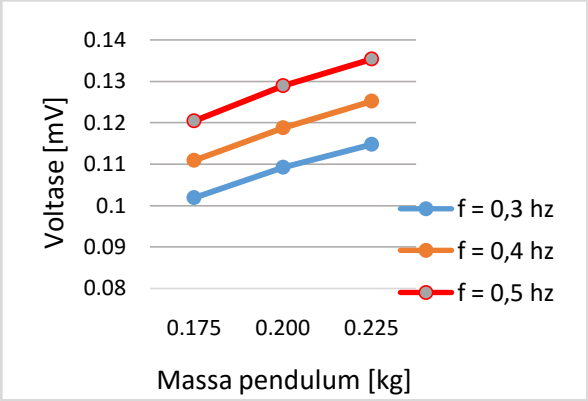


(c)

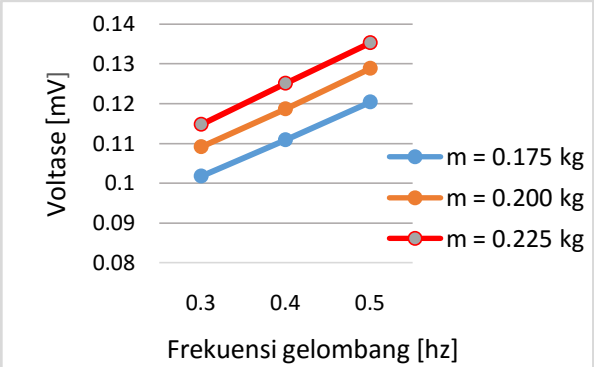
Gambar 2.6 Grafik voltase bangkitan hasil simulasi, untuk variasi (a) frekuensi, (b) massa pendulum, dan (c) panjang lengan [3]

Gambar 2.6 merupakan grafik voltase bangkitan hasil simulasi menggunakan *software* simulink. Dari gambar di atas dapat dilihat bahwa energi listrik berbanding lurus dengan massa pendulum, frekuensi gelombang dan panjang lengan pendulum. Dimana untuk gambar 2.6 (a) memperlihatkan dengan meningkatnya frekuensi gelombang air maka energi listrik dalam voltase yang dihasilkan meningkat. Pada gambar 2.6 (b) memperlihatkan dengan semakin besar massa pendulum maka energi listrik juga semakin besar. Dan untuk gambar 2.6 (c) memperlihatkan dengan semakin panjang lengan pendulum maka energi listrik yang dihasilkan pun semakin besar. Pada gambar yang ditandai lingkaran biru, terdapat garis-garis tebal di antara gelombang, ini dikarenakan pada saat tersebut, sudut input berganti dari sudut α_n ke α_{n+1}. Kemudian gambar di bawah ini

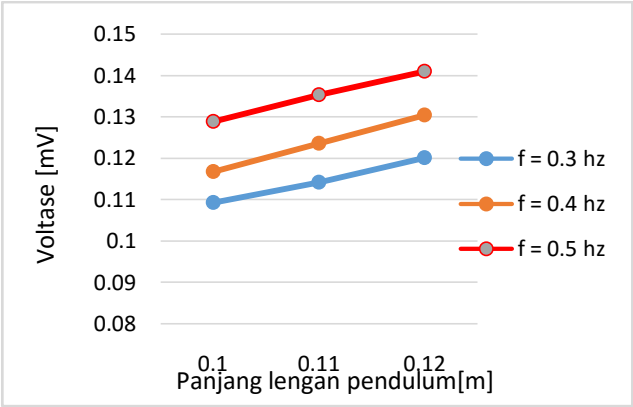
merupakan voltase dalam bentuk grafik excel dari nilai Vrms masing-masing variasi.



(a)



(b)



(c)

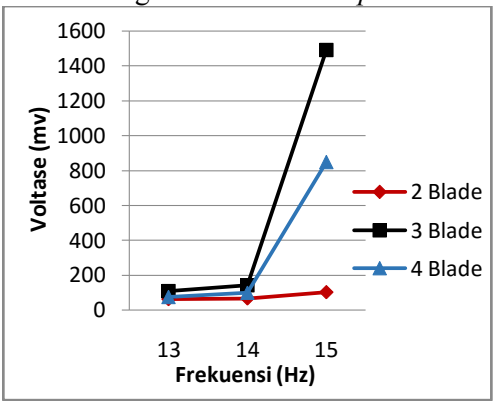
Gambar 2.7 Grafik *output* voltase hasil simulasi dengan variasi (a) massa pendulum, (b) frekuensi gelombang, dan (c) panjang lengan pendulum [3]

2.1.4. Studi Karakteristik Voltase Bangkitan yang Dihasilkan Mekanisme *Vibration Energy Harvesting* - Metode *Cantilever Piezoelectric* oleh Gusti Fajar Romano [4]

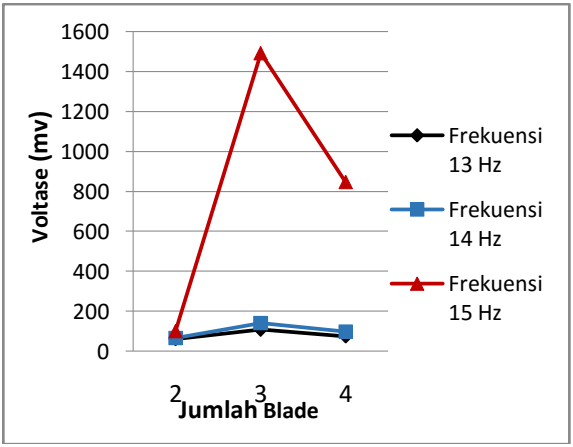
Gambar 2.8 *Prototype* mekanisme *vibration energy harvesting* [4]

Penelitian yang dilakukan oleh Gusti Fajar Romano merupakan eksperimen dari mekanisme *vibration energy harvesting* menggunakan metode *cantilever piezoelectric*. Cara kerja dari mekanisme tersebut adalah dengan memberikan gaya eksitasi ke mekanisme. Gaya eksitasi tersebut akan menggerakkan massa yang tersambung dengan pegas. Massa yang di salah satu sisi permukaannya terdapat *rack* ini menggerakkan susunan *gear* yang lain, sehingga *blade* yang terhubung dengan *one way gear* akan memukul *piezoelectric*. *Piezoelectric* yang mengalami defleksi akan menimbulkan beda potensial yang nantinya akan diukur.

Dari pemodelan pengujian yang dilakukan, sumber eksitasi berasal dari *dynamic vibration absorber*. Pengujian menggunakan variasi dalam 3 tingkatan *blade* dan 3 tingkatan frekuensi sumber yang berbeda. Masing-masing tingkatan *blade* memiliki jumlah *blade* sebanyak 2, 3, dan 4 buah. Sedangkan variasi frekuensi sumber getar divariasikan pada 13 Hz, 14 Hz, dan 15 Hz. Kemudian untuk mendapatkan voltase bangkitan dan daya yang dihasilkan digunakan *oscilloscope*.



(a)



(b)

Gambar 2.9 Hasil pengujian mekanisme *vibration energy harvesting* untuk variasi (a) frekuensi dan (b) jumlah *blade* [4]

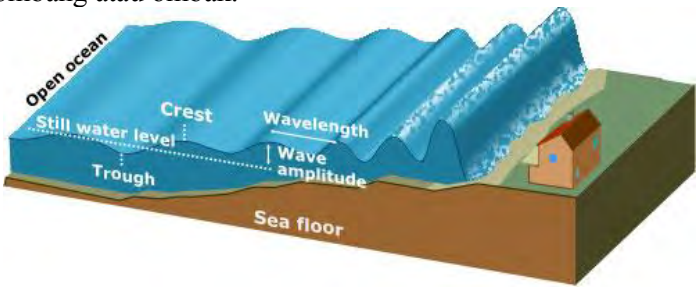
Dari hasil pengujian yang telah dilakukan dapat dilihat dari gambar di atas, dimana untuk variasi frekuensi nilai voltase bangkitan rata-rata yang dihasilkan oleh mekanisme selalu meningkat seiring dengan peningkatan frekuensi eksitasi yang diterima dan memiliki nilai tertinggi pada saat frekuensi eksitasi 15 Hz. Sedangkan untuk variasi jumlah *blade*nilai voltase bangkitan rata-rata yang dihasilkan oleh mekanisme memiliki nilai tertinggi saat jumlah *blade* 3 buah.

2.2. Dasar Teori

2.2.1. Gelombang Air

Gelombang merupakan gerakan naik turun dari permukaan air air, pergerakan dari gelombang ini membentuk grafik sinusoidal. Gelombang air dapat disebabkan oleh beberapa hal, yaitu angin, daya tarik bumi-bulan-matahari, gempa ataupun karena gerakan kapal. Angin di atas airan memindahkan tenaganya ke permukaan perairan, menyebabkan riak-riak, alunan

/ bukit, dan merubah menjadi apa yang disebut sebagai gelombang atau ombak.



Gambar 2.10 Karakteristik gelombang air air
[http://www.ew.govt.nz]

Untuk mengetahui gaya ombak atau *wave force* (F_w) yang terdapat pada gelombang, maka pertama harus mengetahui energi gelombang yang tersedia. Energi gelombang total adalah jumlah dari energi kinetik dan energi potensial. Total energi potensial dan energi kinetik dapat dirumuskan [5].

$$E = \frac{1}{2}\rho_{air} . g . A^2 \tag{2.1}$$

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

$$v_g = \frac{L}{2T} \tag{2.2}$$

Dengan keterangan T adalah periode gelombang (s) dan L adalah panjang gelombang (m).

$$P_w = \frac{1}{2}\rho . g . A^2 . \frac{L}{2T} \tag{2.3}$$

Jika periode gelombang dan panjang dihubungkan menjadi persamaan sebagai berikut.

$$\mathrm{L} = \frac{\mathrm{g.T}^2}{2\pi} \tag{2.4}$$

Sehingga didapatkan untuk energi gelombang dengan persamaan sebagai berikut:

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

Dengan menggunakan amplitudo gelombang, daya ombak dapat juga dituliskan sebagai fungsi tinggi gelombang (H) sehingga persamaannya menjadi.

$$P_w = \frac{\rho.g^2.H^2.T.b}{32\pi} \quad (2.6)$$

Dari persamaan 2.6 dapat diketahui gaya ombak yang dengan rumusan sebagai berikut.

$$F_w = \frac{P_w}{c} \quad (2.7)$$

Dengan kecepatan rambat suatu gelombang (c) dituliskan dengan persamaan sebagai berikut:

$$c = \frac{\lambda}{T} \quad (2.8)$$

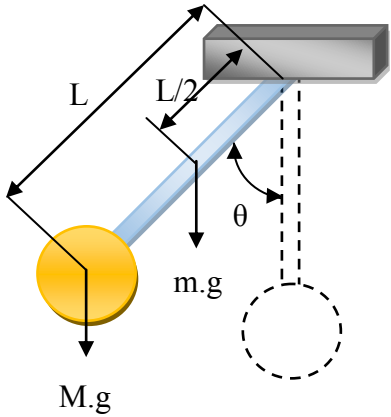
Sehingga persamaan yang didapat untuk gaya gelombang air air adalah

$$F_w = \frac{\rho.g^2.H^2.T^2.b}{32\pi\lambda} \quad (2.9)$$

Dimana : g = percepatan grafitasi (9.8 m/s^2)
ρ = densitas air (1000 kg/m^3)
A = amplitudo gelombang (m)
λ = panjang gelombang (m)
T = periode gelombang (s)
b = lebar alat yang terkena gelombang (m)

2.2.2. Pendulum

Pergerakan pendulum dapat dikategorikan sebagai getaran bebas teredam. Hal ini dikarenakan gaya pemulih pada pendulum hanya diperoleh akibat pengaruh gravitasi sedangkan tidak ada gaya luar yang mengganggu pendulum. Gambar di bawah adalah *compound* pendulum yaitu bandul berbentuk batang yang memiliki massa *m* dan panjang *L*.



Gambar 2.11 *Compound* pendulum

Persamaan gerak *compound* pendulum

$$\sum Mo = I\ddot{\theta}$$

$$-M.g.L\sin\theta - m.g.\frac{l}{2}L\sin\theta = (I_m + I_M)\ddot{\theta} \qquad (2.10)$$

Dimana inersia untuk batang dan bandul yaitu

$$I_m = \frac{1}{3}mL^2 \qquad (2.11)$$

$$I_M = ML^2 \qquad (2.12)$$

Subtitusi persamaan 2.11 dan 2.12 ke persamaan 2.10

$$\left(\frac{1}{3}m.L^2 + M.L^2\right).\ddot{\theta} + \left(\frac{1}{2}m.g.L + M.g.L\right).\theta = 0$$

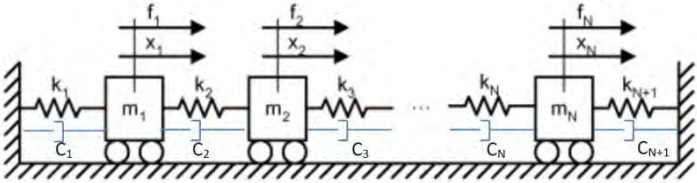
Sehingga didapatkan persamaan frekuensi natural *compound* pendulum.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{\left(M+\frac{m}{2}\right).\ g.\ L}{\left(M+\frac{m}{3}\right).L^2}} \qquad (2.13)$$

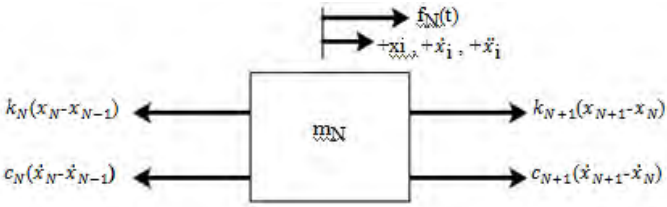
Dimana : ω_n = frekuensi natural (rad/s)
M = berat bandul (kg)
m = berat lengan bandul (kg)
g = gaya gravitasi (9.8 m/s^2)
L = panjang lengan bandul (m)

2.2.3. Sistem Diskrit Multi-DOF [10]

Sistem getaran 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 seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.12 berikut ini.



Gambar 2.12 Sistem getaran multi derajat kebebasan [6]



Gambar 2.13 *Free body* diagram multi derajat kebebasan [6]

Untuk analisa multi derajat kebebasan dapat dilihat pada gambar 2.13. Persamaan gerak dari sistem diatas untuk massa m_N dapat disederhanakan menjadi:

$$m_N\ddot{x}_N - c_N\dot{x}_{N-1} + (c_N + c_{N+1})\dot{x}_N - C_{N+1}\dot{x}_{N+1} - k_N x_{n-1} + (k_N + k_{N+1})x_N - k_{N+1}x_{N+1} = F_N(t) \quad (2.14)$$

Persamaan (2.14) dapat digambarkan dengan metode matriks sehingga didapatkan

$$[M]\ddot{x} + [C]\dot{x} + [K]x = \{F\} \quad (2.15)$$

dengan M mewakili matriks massa, K matriks kekakuan dan C matriks redaman yang mempunyai jumlah baris dan kolom yang sama yaitu n.

$$[m] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & & 0 & 0 \\ & \vdots & & \ddots & \vdots & \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & m_N \end{bmatrix} \tag{2.16}$$

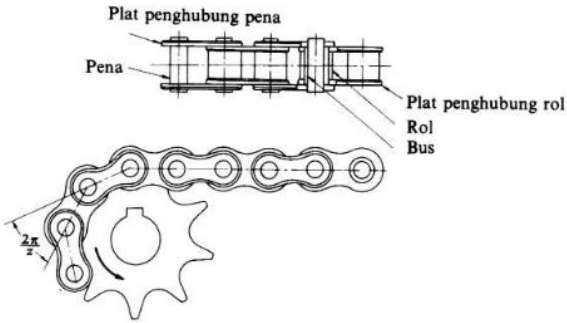
$$[c] = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & 0 & & 0 & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & -c_3 & c_3 + c_4 & & 0 & 0 \\ & \vdots & & \ddots & \vdots & \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & -c_N & (c_N + c_{N+1}) \end{bmatrix} \tag{2.17}$$

$$[k] = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 & & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & -k_3 & k_3 + k_4 & & 0 & 0 \\ & \vdots & & \ddots & \vdots & \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & -k_N & (k_N + k_{N+1}) \end{bmatrix} \tag{2.18}$$

2.2.4. *Gearbox*

a. Transmisi Rantai – *Sprocket* [7]

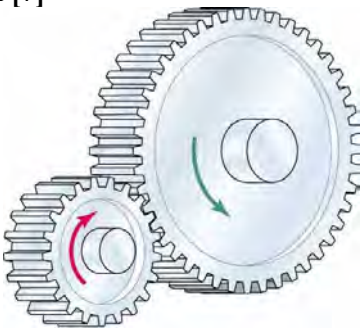
Transmisi daya dengan rantai dan *sprocket* digunakan ketika jarak antar poros lebih lebar dari transmisi roda gigi namun lebih pendek dari transmisi sabuk. Rantai yang terkait pada gigi *sprocket* dapat meneruskan daya tanpa *slip* sehingga perbandingan putaran tetap.



Gambar 2.14 Transmisi rantai [7]

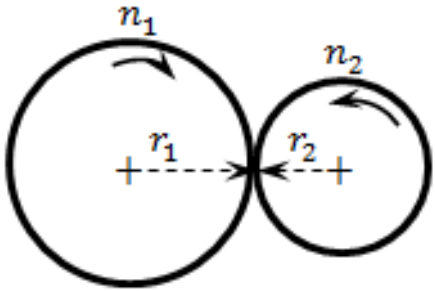
Kelebihan dari penggunaan transmisi rantai antara lain; transmisi tanpa *slip* sehingga perbandingan putaran tetap, dapat meneruskan daya besar, keausan kecil pada bantalan dan jarak poros menengah (antara transmisi sabuk dengan transmisi roda gigi). Sedangkan beberapa kekurangan dari penggunaannya antara lain; tidak dapat digunakan untuk kecepatan tinggi, suara dan getaran tinggi, dan perpanjangan rantai karena keausan pada pena dan bus.

b. Roda Gigi [7]



Gambar 2.15 Transmisi roda gigi
(*http://www.yourdictionary.com*)

Roda gigi digunakan untuk mentransmisikan daya besar dan putaran yang tepat serta jarak yang relatif pendek. Roda gigi dapat berbentuk silinder atau kerucut. Transmisi roda gigi mempunyai keunggulan dibandingkan dengan sabuk atau rantai karena lebih ringkas, putaran lebih tinggi dan tepat, dan daya lebih besar. Selain itu roda gigi juga berfungsi untuk mengubah jumlah putaran dan momen putar mesin, daya mesin serta mengatur keduanya untuk kebutuhan kerja mesin.



Gambar 2.16 Perbandingan roda gigi [7]

Untuk memenuhi kebutuhan tersebut diperlukannya transmisi yang terdiri dari berbagai tingkat perbandingan roda gigi (*Gear Ratio*). Perbandingan roda gigi merupakan hasil bagi antara jari-jari *output* dengan jari *input*. Untuk mencari rasio roda gigi dapat digunakan persamaan sebagai berikut:

$$\frac{\theta_1}{\theta_2} = \frac{r_2}{r_1} = N \qquad (2.19)$$

Dimana:

$$r_1 . \theta_1 = r_2 . \theta_2$$

$$\frac{r_2}{r_1} = \frac{n_2}{n_1} = N$$

Keterangan:

r_1 = jari-jari roda gigi *input* (m)

r_2 = jari-jari roda gigi *output* (m)

N = *gear ratio*

2.2.5. Sistem Rotasi Mekanis [8]

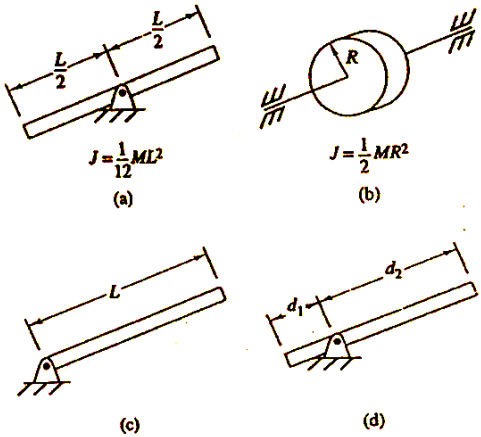
Untuk sistem rotasi, simbol yang digunakan sebagai parameter yaitu

θ, perpindahan sudut [rad]

ω, kecepatan sudut [rad/s], dimana $\omega = \dot{\theta}$

α, percepatan sudut [rad/s^2], dimana $\alpha = \ddot{\theta}$

a. Momen Inersia



Gambar 2.17 Momen inersia batang dan poros [8]

Momen inersia adalah hasil kali massa sebuah partikel (m) dengan kuadrat jarak partikel dari titik rotasinya (r). Jarak setiap partikel yang menyusun benda tegar berbeda – beda jika diukur dari sumbu rotasi. Ada yang berada di tepi ada yang dekat dengan sumbu rotasinya dan lain- lainnya. Berikut ini adalah beberapa persamaan momen inersia untuk benda tegar. Jika benda berupa batang dan poros maka momen inersianya adalah:

$$J_{poros} = \frac{1}{2} m.L^2 \quad (2.20)$$

$$J_{batang} = \frac{1}{12} m.L^2 \quad (2.21)$$

Jika titik putarnya ada di ujung batang seperti pada gambar 2.17 (c), maka persamaan momen inersianya menjadi

$$J_p = J_o + m.a^2 \quad (2.22)$$

$$J_p = \frac{1}{12} m.L^2 + m.\left(\frac{L}{2}\right)^2 \quad (2.23)$$

$$J_p = \frac{1}{3} m.L^2 \quad (2.24)$$

b. Konstanta Kekakuan Torsi Poros

Konstanta kekakuan torsi poros merupakan perkalian modulus elastisitas bahan dengan diameter poros dibagi panjang poros. Sehingga persamaan yang digunakan untuk mecari besar dari konstanta kekakuan poros sebagai berikut.

$$K = \frac{\pi \ x \ G}{32 \ x \ l} x d^4 \qquad (2.25)$$

Keterangan:
K = kekakuan torsi poros (Nm/rad)
G = modulus elastisitas bahan (N/m^2), bahan yang digunakan adalah aluminium, sehingga nilai G = 68.9 GPa = 68.9 x 10^9 $N.m^2$
l = panjang poros (m)
d = diameter poros (m)

c. Konstanta *Damping* Torsi

Konstanta *damping* torsi adalah gaya gesek yang diterima dari benda yang diputar. Besar dari konstanta *damping* torsi adalah perkalian dari *viscosity* dengan luas permukaan kontak dibagi ketebalan viskositas fluida, atau dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$C = \frac{\mu . A}{h} \qquad (2.26)$$

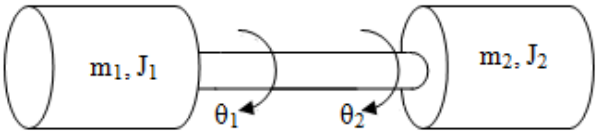
Keterangan:
C = konstanta *damping torsi bearing* [Nm/rad^2]
μ = viskositas oli [Pa.s], oli SAE 20, μ= 4500 [cP] = 4,5 [Pa.s]
A = luas area kontak [m^2]
h = ketebalan oli [m] , 3.3 [mm]

2.2.6. Momen Inersia Gabungan [7]

Untuk dapat menghitung total momen inersia gabungan antar massa, maka perlu diketahui terlebih dahulu *kopling* antar

massa yang digunakan. Macam *kopling* antar massa antara lain adalah *kopling* langsung dan *kopling* melalui roda gigi.

a. *Kopling* langsung

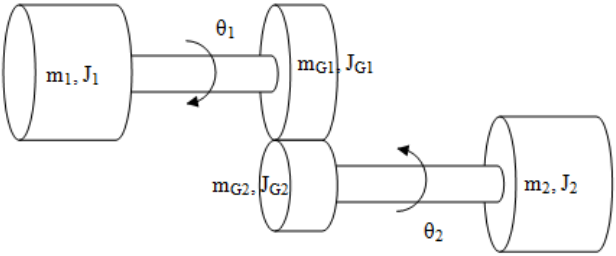


Gambar 2.18 *Kopling* langsung

Total momen inersia dari dua massa dengang *kopling* secara langsung adalah penjumlahan dari momen inersia massa 1 (J_1) dengan momen inersia massa 2 (J_2).

$$J_{Total} = J_1 + J_2 \tag{2.27}$$

b. *Kopling* melalui roda gigi



Gambar 2.19 *Kopling* melalui roda gigi

Gear 1 (G_1) terhubung ke sumbu massa 1, sedangkan gear 2 (G_2) terhubung ke sumbu massa 2. Perbandingan gigi *output* terhadap *input* merupakan *gear ratio* (N). Maka momen inersia total dari sistem seperti pada gambar 2.19 dapat dihitung menggunakan hukum kekekalan energi, dimana energi kinetik di sisi massa 1 sama dengan penjumlahan energi kinetik pada masing-masing elemen dari transmisi.

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

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*:

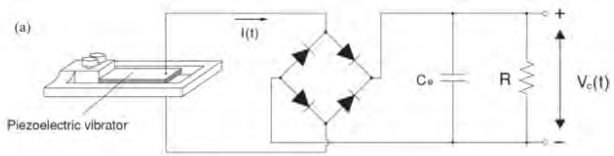
$$\frac{\theta_1}{\theta_2} = \frac{\dot{\theta}_1}{\dot{\theta}_2} = \frac{r_2}{r_1} = N$$

Maka persamaan menjadi

$$J_{Total} = \left[J_1 + J_{G1} + (J_{G2} + J_2)\left(\frac{1}{N}\right)^2\right] \qquad (2.28)$$

2.2.7. Material *Piezoelectric* [9]

2.2.7.1. Gambaran Umum Material *Piezoelectric*



Gambar 2.20 Elemen material *piezoelectric* [9]

Piezoelectric merupakan material yang memiliki kemampuan untuk membangkitkan potensial listrik sebagai respon dari tegangan mekanik yang didapat oleh material tersebut. Material *piezoelectriccantilever beam* tersusun dari beberapa elemen yaitu *piezoelectric*, *beam*, dan sistem penyimpanan energi seperti yang ditunjukkan pada gambar

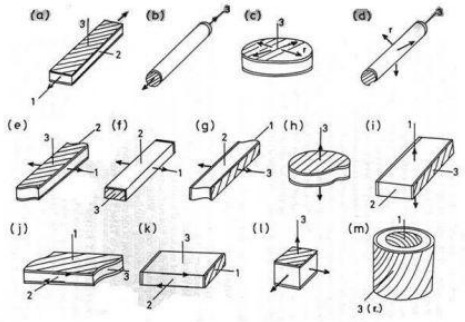
2.20. Efek *piezoelectric* ditemukan oleh Jacques dan Pierre Curie bersaudara pada tahun 1880. Mereka menemukan bahwa jika sebuah tegangan mekanik diaplikasikan pada suatu kristal tertentu seperti tourmaline, quartz, topaz, garam rochelle dan gula tebu akan muncul suatu muatan listrik dan tegangan listrik tersebut proporsional dengan tegangan mekanik yang diberikan. Material *piezoelectric* dapat dibagi menjadi 3 jenis yaitu:

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

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

2.2.7.2. Karakteristik Material *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 2.21. Bentuk – bentuk tersebut disesuaikan untuk aplikasi–aplikasi tertentu.



Gambar 2.21 Macam bentuk *piezoelectric* [9]

Energi bangkitan akan berbeda tergantung dari bentuk *piezoelectric*, besarnya energi bangkitan tersebut dipengaruhi oleh sifat mekanik dari *piezoelectric* yang dipilih. Energi bangkitan juga dipengaruhi oleh energi atau usaha mekanik yang diterima oleh material *piezoelectric*. Berikut merupakan tabel yang menunjukkan sifat mekanik untuk beberapa material *piezoelectric*.

Tabel 2.2 Sifat Mekanik Beberapa Material *Piezoelectric* [9]

Property	**Units**	**PVDF Film**	**PZT**	**$BaTiO_3$**
Density	10^3 kg/m^3	1.78	7.5	5.7
Relative Permittivity	$\varepsilon/\varepsilon_0$	12	1200	1700
d_{31} Constant	(10^{-12}) C/N	23	110	78
g_{31} Constant	(10^{-3}) Vm/N	216	10	5
k_{31} Constant	% at 1 KHz	12	30	21
Acoustic Impedance	(10^6) kg/m^3.sec	2.7	30	30

2.2.7.3. *Piezoelectric Voltage Constant*

Piezoelectric voltage constant, g, merupakan 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.

2.2.7.4. *Electromechanical Coupling Factor*

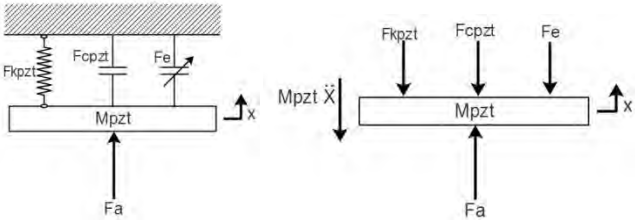
Electromechanical coupling factor, k, merupakan indikator efektifitas material *piezoelectric* dalam mengubah energi listrik ke energi mekanik atau mengubah energi mekanik ke energi listrik. *Electromechanical coupling factor,*k, disertai dua buah *subscript*, dimana dalam hal *direct effect subscript* pertama menunjukkan arah energi listrik yang dihasilkan dan *subscript* kedua menunjukkan arah dari energi mekanik yang diberikan.

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

2.2.7.5. Analisa Material *Piezoelectric*

Ketika suatu gaya luar diberikan pada material *piezoelectric* maka material *piezoelectric* tersebut akan mengalami defleksi. Untuk mendapatkan persamaan gerak

dari material *piezoelectric* maka perlu dianalisa *free body* diagramseperti ditunjukkan pada gambar 2.22.



Gambar 2.22 *Free body* diagram dari *cantilever piezoelectric* [9]

Keseimbangan gaya:

$$Fa = Mpzt.\ddot{x} + Fcpzt + Fkpzt + Fe$$

$$Fa(t) = M_{pzt}\ddot{x}(t) + C_{pzt}\dot{x}(t) + k_{pzt}\,x(t) + Vp(t) \quad (2.29)$$

keterangan:

F_a = gaya eksitasi (N)

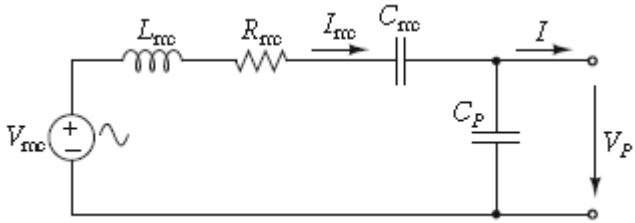
M_{pzt} = massa *piezoelectric* (kg)

C_{pzt} = *damping* dari *cantilever beam* (N.s/m)

k_{pzt} = konstanta pegas *piezoelectric* (N/m)

Θ = *coupling factor*

2.2.7.6. Voltase Bangkitan dan Arus pada Material *Piezoelectric*



Gambar 2.23 Rangkaian listrik material *cantileverpiezoelectric* [9]

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

$$V_p = \frac{3\, d_{31}\, E\, w\, t\, x_p}{4\, C} \qquad (2.30)$$

Dimana :

V_p = Tegangan bangkitan (V)
d_{31} = Konstanta Regangan *Piezoelectric* (C/N)
E = Modulus Young (N/m^2)
w = Lebar Material *Piezoelectric* (m)
t = Tebal Material *Piezoelectric* (m)
x_p = Defleksi Material *Piezoelectric* (m)
C = Kapasitansi Material *Piezoelectric* (F)

Dari gambar 2.23 dapat dituliskan persamaan elektris dari rangkaian listrik pada material *piezoelectric*.

$$V_{mc} = L_{mc}\dot{I}_{mc} + R_{mc} I_{mc} + \frac{1}{C_{mc}} \int I_{mc}\, dt + V_p \qquad (2.31)$$

dimana:

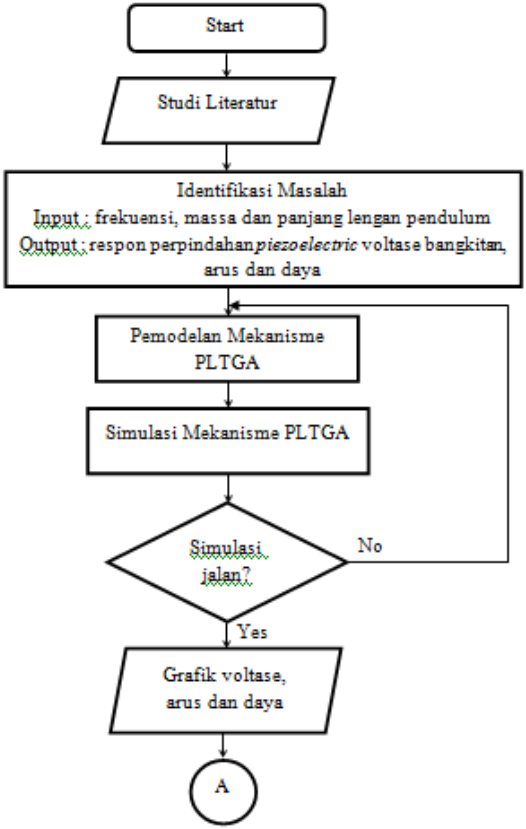
V_{mc} = sumber tegangan / gaya input (V)
L_{mc} = induktansi (H)
R_{mc} = resistansi (ohm)
C_{mc} = kapasitansi (F)
I_{mc} = arus (A)

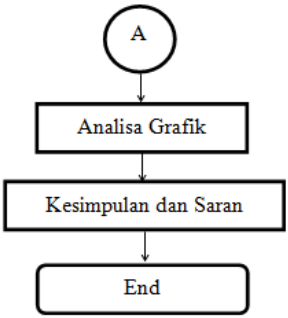
BAB III
METODE PENELITIAN

3.1. Tahap Penelitian

Penelitian yang akan dilakukan adalah pemodelan dari alat yang sudah namun dengan mengganti komponen generator dengan material *piezoelectric*. Berikut akan dijelaskan tahapan dalam melakukan penelitian.

3.1.1. *Flowchart* Penelitian





Gambar 3.1 *Flowchart* penelitian

3.1.2. Penjelasan *Flowchart* Penelitian

1. Studi Literatur

   Sebelum melakukan penelitian, langkah pertama yang dilakukan adalah melakukan studi literatur dan referensi yang terkait dengan getaran *single* dan *multi degree of freedom*, gerakan pendulum, energi gelombang air, pemodelan matematis dari sistem rotasi, gaya pada roda gigi, penggunaan simulink dan material *piezoelectric*. Sumber literatur adalah buku, tugas akhir sebelumnya, jurnal dan artikel internet.

2. Identifikasi Masalah

   Pada penelitian, masalah diidentifikasi menjadi dua hal yaitu input dan output. *Input* yang diberikan berupa variasi frekuensi gelombang air (0.3, 0.4, dan 0.5 Hz), panjang lengan pendulum (10, 11, dan 12 cm) dan massa pendulum (175, 200, dan 225 gr). Sedangkan *output* dari penelitian ini adalah respon perpindahan sudut, voltase bangkitan, arus dan daya yang dihasilkan oleh material *piezoelectric*.

3. Pemodelan Mekanisme PLTGA

   Pemodelan mekanisme Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Air Sistem *Single* Pendulum Vertikal – Ponton Perahu yang disederhanakan dengan menganggap *gearbox*

sebagai satu massa serta mengganti komponen generator DC dengan material *piezoelectric*. Pemodelan dimulai dengan memodelkan pendulum, *gearbox* yang berputar CW dan CCW lalu dihubungkan ke *blade* dan *piezoelectric*.

4. Simulasi Mekanisme PLTGA
   Dari pemodelan mekanisme Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Air yang telah dibuat, maka didapat persamaan matematis. Dari persamaan matematis tersebut maka akan dibuat blok diagramnya pada *software* simulink. Simulasi ini terdiri dari 3 subsistem, yaitu pendulum, rangkaian roda gigi dan mekanisme *piezoelectric*. *Input* pada subsistem pendulum berupa amplitudo gelombang sinusoidal kemudian *output*-nya adalah sudut kemiringan pendulum (θ_p) yang akan menjadi *input* pada rangkaian roda gigi. Pada subsistem rangkaian roda gigi *output*-nya menghasilkan theta (θ_8) saat berputar CW dan (θ_9) saat berputar CCW. θ_8 dan θ_9 sebagai *input* ke *blade* dan dilanjutkan ke *piezoelectric* yang akan mengeluarkan *output* berupa, perpindahan (x), voltase (V), arus (i) dan daya (P).

Gambar 3.2 Subsistem pemodelan

5. Simulasi Jalan
   Setelah menyelesaikan blok diagram dan parameter sistem pada *simulink*, simulasi dijalankan. Bila simulasi bisa berjalan tanpa kesalahan, dilanjutkan dengan memasukan variasi amplitudo, panjang lengan dan massa pendulum. Bila simulasi tidak berjalan maka dilakukan pengecekan dari langkah "pemodelan mekanisme PLTGA" sampai langkah "simulasi Mekanisme PLTGA".

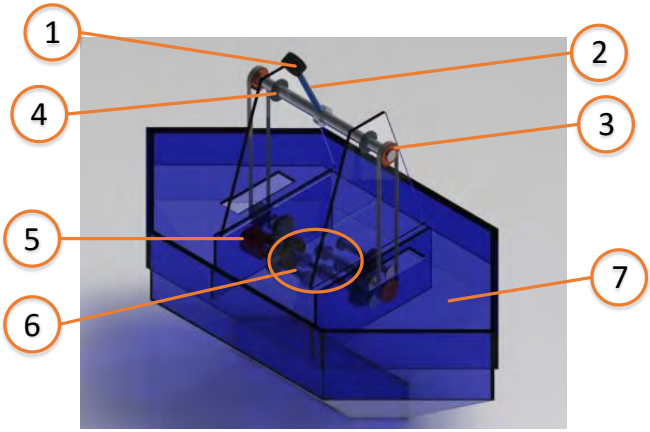
6. Grafik Respon Perpindahan *Piezoelectric,* Voltase Bangkitan, Arus dan Daya
   Setelah simulasi dapat dijalankan, maka akan didapatkan respon perpindahan *piezoelectric*, voltase bangkitan, arus dan daya. Respon yang didapat ini kemudian akan diolah menjadi grafik respon terhadap variasi. Total ada 12 grafik yang akan dibuat, yaitu grafik respon perpindahan *piezoelectric,* voltase bangkitan, arus dan daya terhadap variasi frekuensi gelombang air, massa pendulum dan panjang lengan pendulum.

7. Analisa Grafik
   Dari grafik yang didapatkan maka akan dianalisa bagaimana respon perpindahan *piezoelectric* serta akan dibandingkan respon voltase, arus dan daya yang dihasilkan menggunakan metode *piezoelectric* dengan penelitian terdahulu menggunakan *rotary generator*.
8. Kesimpulan dan Saran
   Dari hasil analisa yang telah dilakukan maka akan dibuat kesimpulannya dan saran agar penelitian yang selanjutnya lebih baik.

3.2. Rancangan Pemodelan

Gambar 3.3 PLTGA sistem pendulum vertikal–ponton perahu

Gambar 3.3 adalah alat PLTGA sistem pendulum vertikal–ponton perahu skala laboratorium dalam bentuk aslinya. Secara umum, alat yang asli miliki dimensi panjang 600 [mm], lebar 250 [mm] dan tinggi 400 [mm]. Terdiri dari komponen utama yaitu ponton perahu sebagai penerima gelombang air. Pendulum yang akan berosilasi jika ponton miring. Rangkaian roda gigi sebagai penerus putaran pendulum ke generator. Namun dalam pemodelan ini fungsi generator akan digantikan oleh material *piezoelectric*..



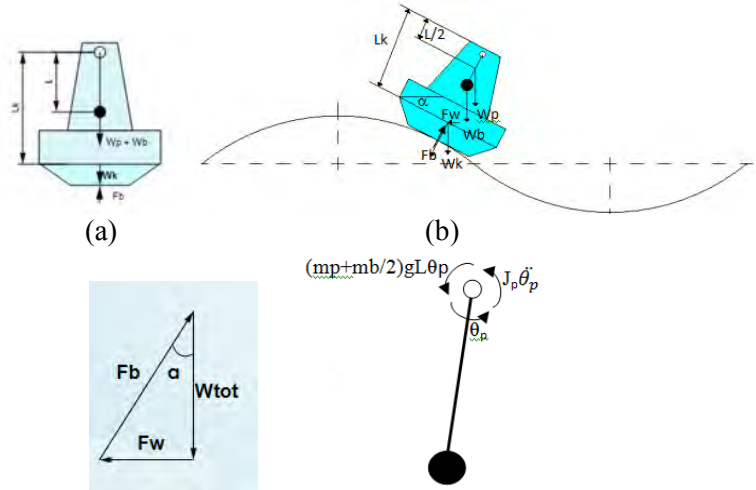
Gambar 3.4 Pemodelan sederhana PLTGA sistem *single* pendulum vertikal – ponton perahu dengan material *piezoelectric*

Keterangan Gambar :
1. Pendulum
2. Lengan Pendulum
3. Transmisi *Sprocket* – Rantai
4. *Bearing*
5. Mekanisme *piezoelectric*
6. Rangkaian Roda Gigi
7. Ponton Perahu

Gambar 3.4 adalah gambar 3D dari alat PLTGA Sistem *Single* Pendulum Vertikal – Ponton Perahu. Alat yang asli mempunyai bentuk yang lebih komplek dan menggunakan

generator sebagai alat *energy harvesting*. Namun pada penelitian ini, alat dimodelkan lebih sederhana, bagian yang difokuskan untuk pemodelan adalah pendulum, rantai-*sprocket*, roda gigi dan mekanisme *piezoelectric*. Karena variasi yang akan dilakukan yaitu pada massa, panjang lengan pendulum dan frekuensi gelombang air.

3.2.1. Pemodelan Pendulum



(a) (b)

(c) (d)

Gambar 3.5 Analisa gaya pada pendulum – ponton perahu
(a) Pendulum – ponton kondisi statis, (b) Pendulum – ponton kondisi dinamis
(c) vektor gaya-gaya dan (d) *Free-body* diagram pendulum

Keterangan :

Wp = berat pendulum (N)
Wb = berat lengan pendulum (N)
Wk = berat ponton kapal (N)
Wtot = Wp+Wb+Wk
L = panjang lengan pendulum (m)
Lk = tinggi titik rotasi pendulum (m)

Fb = *buoyancy force* (N)
Fw = *wave force* (N)
α = sudut kemiringan kapal (rad)
θp = sudut kemiringan pendulum (rad)
Jp = momen inersia pendulum (kg.m^2)

Dari analisa gaya di atas maka dapat dibuat persamaan matematis sebagai berikut

$$\sum Mo = J\ddot{\theta}$$

$$Wp.L\sin\theta + Wb.\frac{l}{2}L\sin\theta = J\ddot{\theta} \quad (3.1)$$

Dimana

- $J = \frac{1}{3}Mb.L^2 + Mp.L^2$ (3.2)
- $\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{Fw}{Wtotal}\right)$
- $Fw = \frac{\rho.g^2.H^2.T^2.b}{32\pi.\lambda}$
- $W_{total} = Wp + Wb + Wk$

Masukan persamaan (3.2) ke persamaan (3.1)

$$Mp.g.L\sin\theta + Mb.g.\frac{l}{2}L\sin\theta = \left(\frac{1}{3}Mb.L^2 + Mp.L^2\right).\ddot{\theta}$$

Maka persamaan matematis pendulum menjadi

$$(Mp + \frac{l}{2}Mb)g\,L.\theta = \left(\frac{1}{3}Mb + Mp\right)L^2.\ddot{\theta} \quad (3.3)$$

Persamaan matematis pendulum yang terhubung ke rangkaian roda gigi

saat berputar CW

$$(Mp + \frac{1}{2}Mb)g\,L.\theta_P - \left(\frac{1}{3}Mb + Mp\right)L^2.\ddot{\theta_P} = 2C_p(\dot{\theta}_P - \dot{\theta}_9) + K_P(\theta_P - \theta_9) \quad (3.4)$$

saat berputar CCW

$$(Mp + \frac{1}{2}Mb)g\,L.\theta_P - \left(\frac{1}{3}Mb + Mp\right)L^2.\ddot{\theta_P} = 2C_p(\dot{\theta}_P + \dot{\theta}_8) + K_P(\theta_P + \theta_8) \quad (3.5)$$

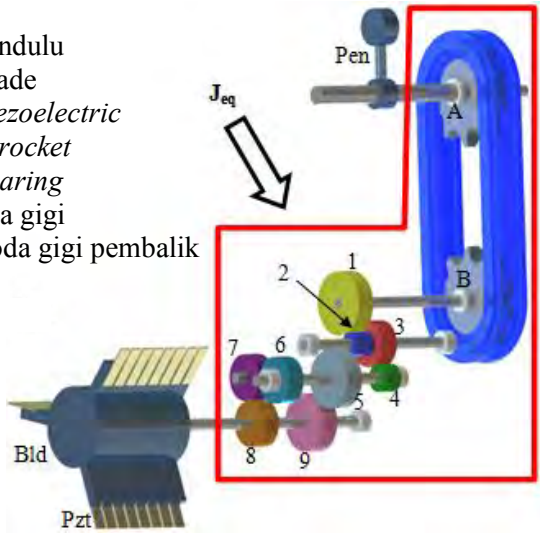
3.2.2. Pemodelan Rangkaian Roda Gigi Penyearah

Pemodelan rangkaian roda gigi dapat dilihat pada gambar 3.6 dimana mekanisme dimulai dari *Sprocket* A sampai ke roda gigi (8) dan roda gigi (9). Prinsip kerjanya yaitu, putaran *Sprocket* A akan diteruskan searah ke *Sprocket* B, lalu putaran diteruskan ke roda gigi 1, 2, 3 dst sampai roda gigi 8 & 9. Kemudian dari poros keluaran *gearbox* akan dihubungkan dengan *blade*, dan dari putaran *blade* ini akan memukul material *piezoelectric*. Jika putaran CW maka yang meneruskan putaran ke *blade* adalah roda gigi 8, sedangkan roda gigi 9 bebas. Jika putaran CCW maka yang meneruskan putaran ke *blade* adalah roda gigi 9, sedangkan roda gigi 8 bebas.

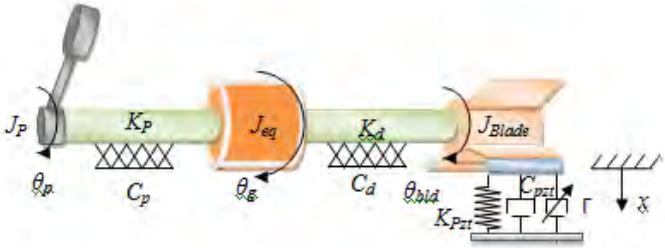
Untuk menyederhanakan simulasi maka *gearbox* dianggap satu massa sehingga perlu dihitung momen inersia ekivalen (J_{eq}). Perhitungan J ekivalen menggunakan hukum kekekalan energi, dimana energi kinetik total besarnya sama dengan penjumlahan dari energi kinetik tiap massa. Penyederhaan dari sistem PLTGA ditunjukkan pada gambar 3.7.

Keterangan

Pen	: Pendulu
Bld	: Blade
Pzt	: *Piezoelectric*
A&B	: *Sprocket*
C	: *Bearing*
1, 2, 3, 4, 6, 7, 9	: Roda gigi
5 & 8	: Roda gigi pembalik

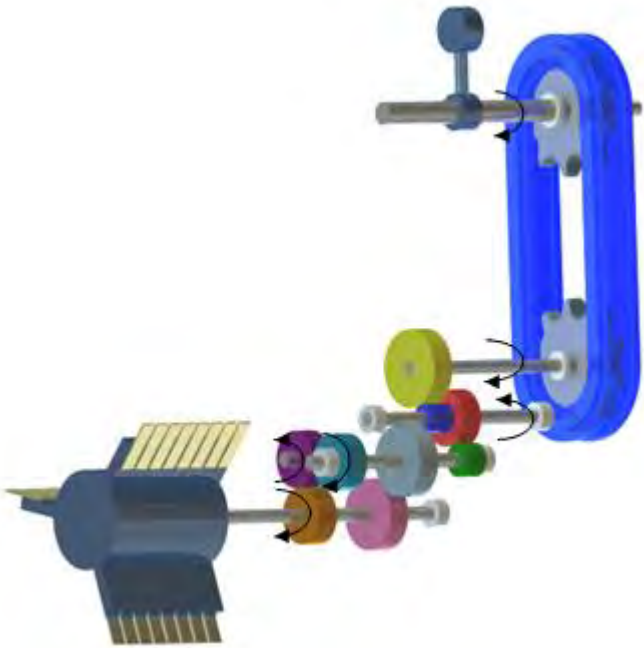


Gambar 3.6 Model mekanis PLTGA



Gambar 3.7 Model dinamis PLTGA

a. Putaran Searah Jarum Jam (CW)



Gambar 3.8 Gerakan roda gigi saat berputar CW

Saat pendulum bergerak CW, maka putaran akan diteruskan ke *sprocket* A, B dan ke roda gigi 1 yang berputar CW. Roda gigi 1 meneruskan putaran ke roda gigi 23 yang berputar CCW. Kemudian diteruskan ke roda gigi 4 yang berputar CW. Roda gigi 5 dan 6 akan berputar CW karena berada pada poros yang sama dengan roda gigi 4. Dari roda gigi 6, putaran akan diteruskan ke roda gigi 7 secara CCW lalu ke roda gigi 8 secara CW. Dari roda gigi 8, putaran akan diteruskan ke *blade* yang juga berputar CW karena berada pada poros yang sama. *Blade* kemudian akan memukul material *piezoelectric* untuk kemudian energi mekanis yang diterima oleh *piezoelectric* dikonversi menjadi energi listrik.

Untuk menghitung J_{eq} menggunakan hukum kekekalan energi, dimana energi kinetik total besarnya sama dengan penjumlahan dari energi kinetik tiap massa dari komponen *gearbox*. Semua elemen dari *gearbox* direfleksikan ke sumbu *gear* 8 atau *sumbu* keluaran *gearbox*.

$$W_{eq} = W_A + W_B + W_1 + W_{23} + W_4 + W_6 + W_7 + W_8$$

$$\frac{1}{2}J_{eq}\dot{\theta}_8{}^2 = \frac{1}{2}J_A\dot{\theta}_A{}^2 + \frac{1}{2}J_B\dot{\theta}_{B1}{}^2 + \frac{1}{2}J_1\dot{\theta}_{B1}{}^2 + \frac{1}{2}J_{23}\dot{\theta}_{23}{}^2 + \frac{1}{2}J_4\dot{\theta}_{46}{}^2 + \frac{1}{2}J_6\dot{\theta}_{46}{}^2 + \frac{1}{2}J_7\dot{\theta}_7{}^2 + \frac{1}{2}J_8\dot{\theta}_8{}^2$$

$$J_{eq}\dot{\theta}_8{}^2 = J_A\dot{\theta}_A{}^2 + J_B\dot{\theta}_{B1}{}^2 + J_{B1}\dot{\theta}_{B1}{}^2 + J_{23}\dot{\theta}_{23}{}^2 + J_4\dot{\theta}_{46}{}^2 + J_6\dot{\theta}_{46}{}^2 + J_7\dot{\theta}_7{}^2 + J_8\dot{\theta}_8{}^2$$

$$J_{eq} = \frac{1}{\dot{\theta}_8{}^2}\left(J_A\dot{\theta}_A{}^2 + J_B\dot{\theta}_{B1}{}^2 + J_1\dot{\theta}_{B1}{}^2 + J_{23}\dot{\theta}_{23}{}^2 + J_4\dot{\theta}_{46}{}^2 + J_6\dot{\theta}_{46}{}^2 + J_7\dot{\theta}_7{}^2 + J_8\dot{\theta}_8{}^2\right)$$

dimana $R_A = R_B$ maka $\theta_A = \theta_{B1}$

$\theta_{B1} = \frac{R_2}{R_1}\theta_{23}$, $\frac{R_2}{R_1} = N_1$

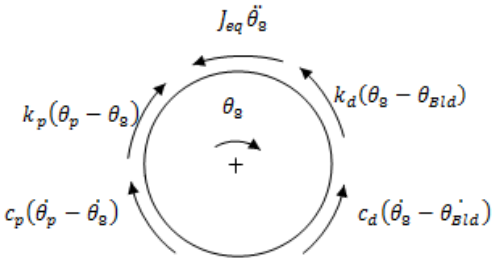
$$\theta_{23} = \frac{R_4}{R_3}\theta_{46}, \qquad \frac{R_4}{R_3} = N_2$$
$$\theta_{46} = \frac{R_7}{R_6}\theta_7\ , \qquad \frac{R_7}{R_6} = N_3$$
$$\theta_7 = \frac{R_8}{R_7}\theta_8\ , \qquad \frac{R_8}{R_7} = N_4$$

Maka persamaan menjadi

$$J_{eq} = \frac{1}{\dot{\theta}_8^{\,2}}\Big[J_A\left(N_1N_2N_3N_4\dot{\theta}_8\right)^2 + J_B\left(N_1N_2N_3N_4\dot{\theta}_8\right)^2 + J_1\left(N_1N_2N_3N_4\dot{\theta}_8\right)^2 + J_{23}\left(N_2N_3N_4\dot{\theta}_8\right)^2 + J_4\left(N_3N_4\dot{\theta}_8\right)^2 + J_6\left(N_3N_4\dot{\theta}_8\right)^2 + J_7\left(N_4\dot{\theta}_8\right)^2 + J_8\left(\dot{\theta}_8\right)^2\Big]$$

$$J_{eq} = J_A(N_1N_2N_3N_4)^2 + J_B(N_1N_2N_3N_4)^2 + J_1(N_1N_2N_3N_4)^2 + J_{23}(N_2N_3N_4)^2 + J_4(N_3N_4)^2 + J_6(N_3N_4)^2 + J_7{N_4}^2 + J_8$$

Dari perhitungan J_{eq} yang di atas maka dibuat *free body diagram* untuk *gearbox*.



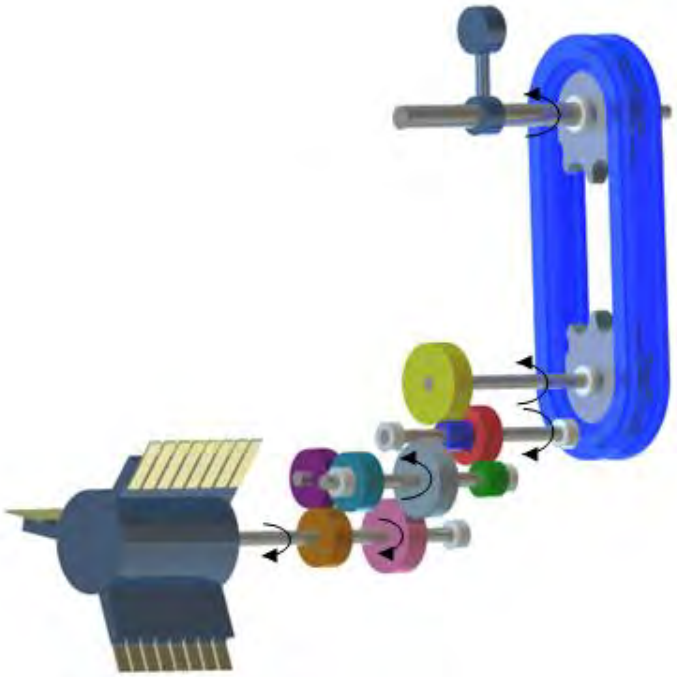
Gambar 3.9 *Free body* diagram *gearbox*

Persamaan *gearbox* sebagai berikut

$$J_{eq}\ddot{\theta}_8 + c_d\left(\dot{\theta}_8 - \dot{\theta}_{Bld}\right) + k_d(\theta_8 - \theta_{Bld}) - c_p\left(\dot{\theta}_p - \dot{\theta}_8\right) - k_p\left(\theta_p - \theta_8\right) = 0$$

$$J_{eq}\ddot{\theta}_8 + (c_d + c_p)\dot{\theta}_8 + (k_d + k_p)\theta_8 - c_p\dot{\theta}_p - c_d\dot{\theta}_{Bld} - k_p\theta_p - k_d\theta_{Bld} = 0 \quad (3.6)$$

b. Putaran Berlawanan Arah Jarum Jam (CCW)



Gambar 3.10 Gerakan roda gigi saat berputar CCW

Saat pendulum bergerak CCW, maka putaran akan diteruskan ke *sprocket* A, B dan ke roda gigi 1 yang berputar CCW. Roda gigi 1 meneruskan putaran ke roda gigi 23 yang berputar CW. Kemudian diteruskan ke roda gigi 4 yang berputar CCW. Roda gigi 5 dan 6 akan berputar CCW karena berada pada poros yang sama dengan roda gigi 4. Dari roda gigi 5, putaran akan diteruskan ke roda gigi 9 secara CW. Dari roda gigi 9, putaran akan diteruskan ke *blade* yang juga berputar CW karena berada pada poros yang sama. *Blade* kemudian akan memukul material *piezoelectric*

untuk kemudian energi mekanis yang diterima oleh *piezoelectric* dikonversi menjadi energi listrik.

Untuk menghitung J_{eq} menggunakan hukum kekekalan energi, dimana energi kinetik total besarnya sama dengan penjumlahan dari energi kinetik tiap massa dari komponen *gearbox*. Semua elemen dari *gearbox* direfleksikan ke sumbu *gear* 9 atau sumbu keluaran *gearbox*.

$$W_{eq} = W_A + W_B + W_1 + W_{23} + W_4 + W_5 + W_9$$

$$\frac{1}{2}J_{eq}\dot{\theta}_9{}^2 = \frac{1}{2}J_A\dot{\theta}_A{}^2 + \frac{1}{2}J_B\dot{\theta}_{B1}{}^2 + \frac{1}{2}J_1\dot{\theta}_{B1}{}^2 + \frac{1}{2}J_{23}\dot{\theta}_{23}{}^2 + \frac{1}{2}J_4\dot{\theta}_{45}{}^2 + \frac{1}{2}J_5\dot{\theta}_{45}{}^2 + \frac{1}{2}J_9\dot{\theta}_9{}^2$$

$$J_{eq}\dot{\theta}_9{}^2 = J_A\dot{\theta}_A{}^2 + J_B\dot{\theta}_{B1}{}^2 + J_{B1}\dot{\theta}_{B1}{}^2 + J_{23}\dot{\theta}_{23}{}^2 + J_4\dot{\theta}_{45}{}^2 + J_5\dot{\theta}_{45}{}^2 + J_9\dot{\theta}_9{}^2$$

$$J_{eq} = \frac{1}{\dot{\theta}_9{}^2}\left(J_A\dot{\theta}_A{}^2 + J_B\dot{\theta}_{B1}{}^2 + J_1\dot{\theta}_{B1}{}^2 + J_{23}\dot{\theta}_{23}{}^2 + J_4\dot{\theta}_{45}{}^2 + J_5\dot{\theta}_{45}{}^2 + J_9\dot{\theta}_9{}^2\right)$$

dimana $R_A = R_B$ maka $\theta_A = \theta_{B1}$

$\theta_{B1} = \frac{R_2}{R_1}\theta_{23}$, $\frac{R_2}{R_1} = N_1$

$\theta_{23} = \frac{R_4}{R_3}\theta_{46}$, $\frac{R_4}{R_3} = N_2$

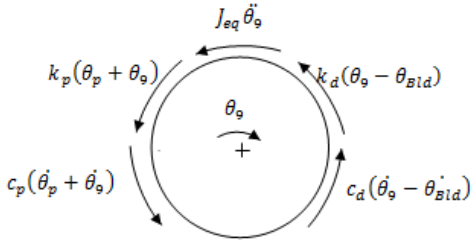
$\theta_{45} = \frac{R_9}{R_5}\theta_9$, $\frac{R_7}{R_6} = N_5$

Maka persamaan menjadi

$$J_{eq} = \frac{1}{\dot{\theta}_9{}^2}\left[J_A\left(N_1N_2N_5\dot{\theta}_9\right)^2 + J_B\left(N_1N_2N_5\dot{\theta}_9\right)^2 + J_1\left(N_1N_2N_5\dot{\theta}_9\right)^2 + J_{23}\left(N_2N_5\dot{\theta}_9\right)^2 + J_4\left(N_5\dot{\theta}_9\right)^2 + J_5\left(N_5\dot{\theta}_9\right)^2 + J_9\left(\dot{\theta}_9\right)^2\right]$$

$$J_{eq} = J_A(N_1N_2N_5)^2 + J_B(N_1N_2N_5)^2 + J_1(N_1N_2N_5)^2 + J_{23}(N_2N_5)^2 + J_4{N_5}^2 + J_5{N_5}^2 + J_9$$

Dari perhitungan J_{eq} yang di atas maka dibuat *free body* diagramuntuk *gearbox*.



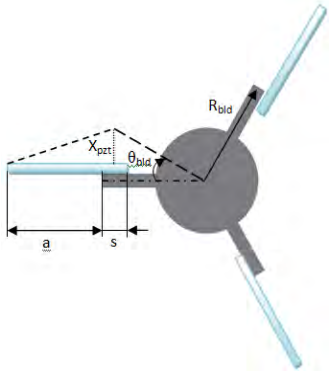
Gambar 3.11 *Free body* diagram *gearbox*

Persamaan gerak gearbox sebagai berikut

$$J_{eq}\ddot{\theta}_9 + c_d(\dot{\theta}_9 - \dot{\theta}_{Bld}) + k_d(\theta_9 - \theta_{Bld}) + c_p(\dot{\theta}_p + \dot{\theta}_9) + k_p(\theta_p + \theta_9) = 0$$

$$J_{eq}\ddot{\theta}_9 + (c_d + c_p)\dot{\theta}_9 + (k_d + k_p)\theta_9 + c_p\dot{\theta}_p - c_d\dot{\theta}_{Bld} + k_p\theta_p - k_d\theta_{Bld} = 0 \quad (3.7)$$

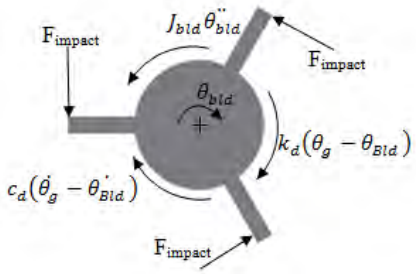
3.2.3. Pemodelan Mekanisme *Blade* dan *Piezoelectric*



Gambar 3.12 Sistem dinamis mekanisme *blade* dan *piezoelectric*

Dari mekanisme di atas dianalisa *free body* diagramuntuk elemen *blade* dan *piezoelectric.*

a. *Free body* diagram *blade*



Gambar 3.13 *Free body* diagram *blade*

Persamaan mekanis *blade* adalah sebagai berikut saat berputar CW

$$J_{bld}\ddot{\theta}_{bld} - c_d(\dot{\theta}_9 - \dot{\theta}_{Bld}) - k_d(\theta_9 - \theta_{Bld}) + 3nF_{impact}\, R_{blade} = 0 \quad (3.8)$$

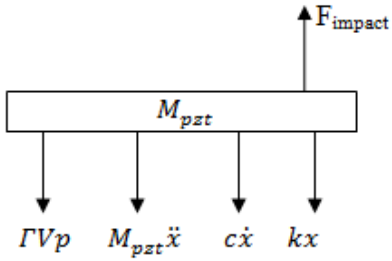
saat berputar CCW

$$J_{bld}\ddot{\theta}_{bld} - c_d(\dot{\theta}_8 - \dot{\theta}_{Bld}) - k_d(\theta_8 - \theta_{Bld}) + 3nF_{impact}\, R_{blade} = 0 \quad (3.9)$$

Dimana:
n = jumlah *piezoelectric* dalam sebaris

b. *Free body* diagram *piezoelectric*

Mekanisme untuk satu unit *piezoelectric* dapat digambarkan seperti berikut:



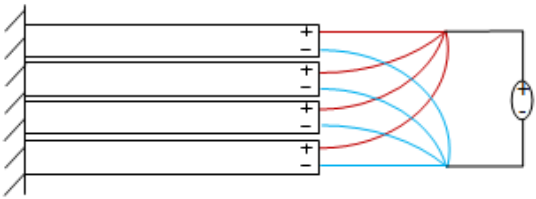
Gambar 3.14 *Free body* diagram *piezoelectric*

Dari *free body* diagram *piezoelectric* di atas maka didapat persamaan gerak sebagai berikut:

$$F_{impact} = M_{pzt}\ddot{x} + c\dot{x} + kx + \Gamma Vp \qquad (3.10)$$

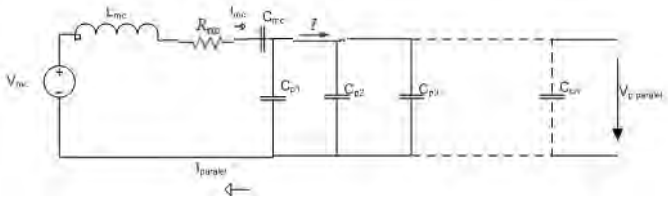
3.2.4. Pemodelan Elektris *Piezoelectric*

Pemodelan material *piezoelectric* dimulai dengan material *piezoelectric* yang mendapat gaya pukul dari *blade*. Karena adanya regangan mekanis yang diterima oleh material *piezoelectric*, maka akan timbul beda potensial dari material *piezoelectric* tersebut. Material *piezoelectric* yang digunakan dalam penelitian ini adalah sejumlah n untuk tiap barisnya. Susunan elektris dari material *piezoelectric* yang digunakan dalam penelitian ini adalah susunan parallel. Susunan paralel dapat dilihat pada gambar 3.15, dimana semua kutub positif akan dihubungkan menjadi satu dan begitu pula dengan kutub negatif.



Gambar 3.15 Susunan dari material *piezoelectric*

Persamaan elektris untuk mekanisme *piezoelectric*



Gambar 3.16 Diagram sirkuit elektromagnetik *cantileverpiezoelectric* susunan paralel

Persamaan elektris dari rangkaian listrik di atas adalah sebagai berikut:

$$V_{mc} = L_{mc}\frac{d\,I_{mc}}{dt} + \frac{1}{C_{mc}}\int I_{mc}\,dt + V_{p\ paralel} \qquad (3.11)$$

dimana:

V_{mc} = sumber tegangan / gaya input (V)
L_{mc} = induktansi (H)
R_{mc} = resistansi (ohm)
C_{mc} = kapasitansi (F)
I_{mc} = arus (A)
$V_{p\ paralel}$ = tegangan bangkitan (V)

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

$$V_{p\ paralel} = V_{p1} = V_{p2} = \ldots = V_{pn} \qquad (3.12)$$

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

$$V_p = \frac{3\,d_{31}\,E\,w\,t\,x_p}{4\,C} \qquad (3.13)$$

Dimana :

V_p = Tegangan bangkitan (V)
d_{31} = Konstanta Regangan *Piezoelectric* (C/N)
E = Modulus Young (N/m^2)
w = Lebar Material *Piezoelectric* (m)
t = Tebal Material *Piezoelectric* (m)
x_p = Defleksi Material *Piezoelectric* (m)

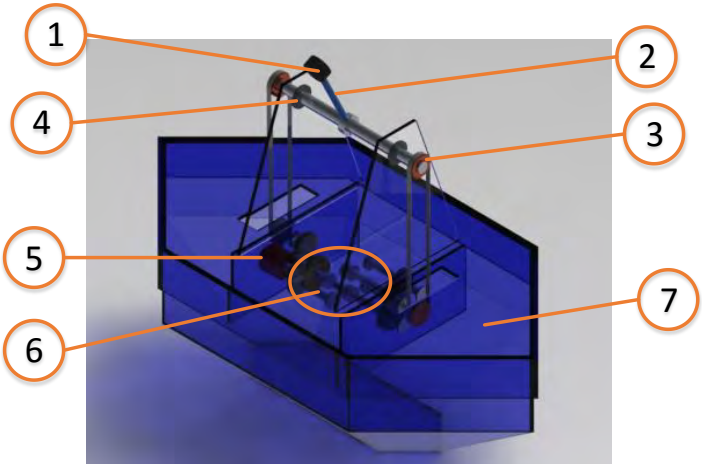
C = Kapasitansi Material *Piezoelectric* (F)

“ Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB IV
ANALISA DAN PEMBAHASAN

4.1. Pemodelan Mekanisme

Dalam penelitian ini akan digunakan Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Air tipe *single* pendulum vertikal – ponton perahu menggunakan metode *cantilever piezoelectric* yang memiliki mekanisme seperti pada gambar berikut.



Gambar 4.1 Mekanisme pembangkit listrik tenaga gelombang air sistem *single* pendulum vertikal – ponton perahu dengan material *piezoelectric*

Keterangan Gambar :
1. Pendulum
2. Lengan Pendulum
3. Transmisi *Sprocket* – Rantai
4. *Bearing*
5. Mekanisme *piezoelectric*
6. Rangkaian Roda Gigi
7. Ponton Perahu

4.2. Parameter

Dalam pemodelan ini telah ditentukan parameter dari alat pembangkit listrik tenaga gelombang air tipe *single* pendulum vertikal – ponton perahu yang akan digunakan. Tabel 4.1 menunjukkan nilai momen inersia dari tiap roda gigi yang digunakan.

Tabel 4.1 Momen Inersia pada Roda Gigi[3]

Komponen	Simbol	Inersia roda Gigi (J) [kg.m$_2$]	Massa gear (m) [kg]	Jari^2 gear (R)[m]
Sprocket A	J_A	3,1387 x 10^{-6}	0,0124	0,0225
Sprocket B	J_B	3,1387 x 10^{-6}	0,0124	0,0225
Roda Gigi 1	J_1	4,3106 x 10^{-6}	0,0114	0,0275
Roda Gigi 2	J_2	3,4425 x 10^{-7}	0,0085	0,0090
Roda Gigi 3	J_3	1,8742 x 10^{-6}	0,0085	0,0210
Roda Gigi 4	J_4	2,6562 x 10^{-7}	0,0034	0,0125
Roda Gigi 5	J_5	1,7812 x 10^{-6}	0,0057	0,0250
Roda Gigi 6	J_6	1,3230 x 10^{-6}	0,0060	0,0210
Roda Gigi 7	J_7	1,3230 x 10^{-6}	0,0060	0,0210
Roda Gigi 8	J_8	4,1233 x 10^{-6}	0,0187	0,0210
Roda Gigi 9	J_9	5,7500 x 10^{-6}	0,0184	0,0250

Kemudian untuk tabel 4.2 di bawah ini menunjukkan nilai konstanta kekakuan pada poros yang digunakan dalam mekanisme pembangkit listrik tenaga gelombang air.

Tabel 4.2 Konstanta Kekakuan pada Poros[3]

Komponen	Simbol	kekakuan poros (K) [Nm/rad]	modulus young, (G) [N/m^2]	diameter poros (d) [m]	panjang poros (L) [m]
Poros p	Kp_1	8905,8298	6,89 x 10^{10}	0,0173	0,068
Poros p	Kp_2	602,0062		0,0080	0,046
Poros d	Kd_1	791,2082		0,0080	0,035
Poros d	Kd_2	359,6401		0,0080	0,077

Tabel yang selanjutnya menunjukkan parameter-parameter dari ponton perahu, seperti massa pendulum, massa ponton perahu, massa bandul dan panjang lengan pendulum.

Tabel 4.3 Parameter Ponton Perahu[3]

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Massa pendulum	Mp	0.175;0.2;0.225	Kg
Massa ponton perahu	Mk	6	Kg
Massa bandul	Mb	0.0169	Kg
Panjang lengan pendulum	L	0.1;0.11;0.12	m
Tinggi titik rotasi pendulum	Lk	0.26	m

Tabel 4.4 berikut menunjukkan parameter dari material *blade* yang digunakan dalam pembangkit listrik tenaga gelombang air.

Tabel 4.4 Parameter Material *Blade*[4]

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Momen Inersia	J_{bld}	2.45×10^{-6}	$Kg.m^2$
Jari-jari *Blade*	R_{bld}	1.75×10^{-2}	m
Massa *Blade*	M_{bld}	0.016	kg

Untuk tabel 4.5 menunjukkan parameter dari material *piezoelectric* yang akan digunakan sebagai alat konversi energi.

Tabel 4.5 Parameter Material *Piezoelectric*

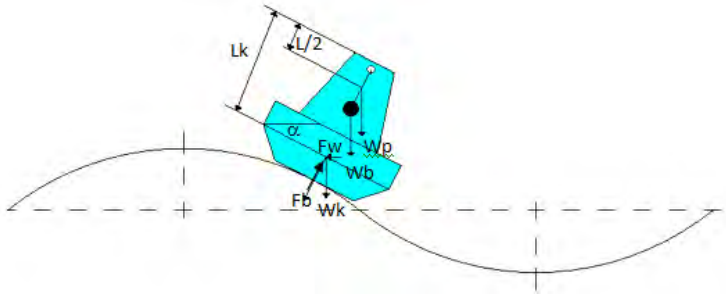
Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Massa *piezoelectric*	M_{pzt}	6×10^{-4}	Kg
Ketebalan	t	110×10^{-6}	m
Lebar *piezoelectric*	w_{pzt}	6×10^{-4}	m
Panjang *piezzoelectric*	Lpzt	17.8×10^{-3}	m
Kapasitansi	C_{pzt}	244×10^{-12}	F
Konstanta regangan *piezoelectric*	d_{31}	23×10^{-12}	C/N
Electromechanical coupling factor	k_{31}	12	%
Kontanta pegas *piezoelectric*	k_{pzt}	$1,75 \text{ X } 10^{-1}$	N/m
Modulus Young	E	4×10^{9}	N/m^2

Sedangkan tabel 4.6 berikut menunjukkan nilai dari frekuensi, amplitudo, dan periode dari gelombang yang dihasilkan oleh simulator gelombang.

Tabel 4.6 Spesifikasi Gelombang yang Dihasilkan Simulator Gelombang Air [3]

Stroke [cm]	f inverter [hz]	Gelombang		
		f [hz]	A [m]	Periode [s]
10	3	0.3	0.0098	3.33
	4	0.4	0.0120	2.50
	5	0.5	0.0136	2.00

4.3. Contoh Perhitungan

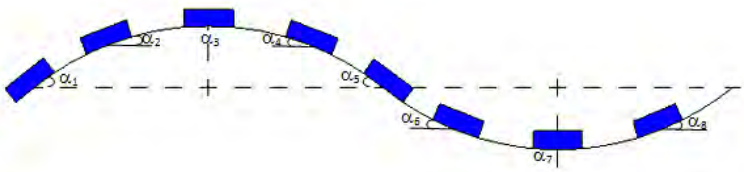


Gambar 4.2 *Free-body* diagram saat ponton terkena gelombang

Keterangan :

Wp = berat pendulum [N]
Wb = berat lengan pendulum [N]
Wk = berat ponton kapal [N]
Wtot = Wp+Wb+Wk
L = panjang lengan pendulum [m]
Lk = tinggi titik rotasi pendulum [m]
Fb = *buoyancy force* [N]
Fw = *wave force* [N]
α = sudut kemiringan kapal [rad]
θp = sudut kemiringan pendulum [rad]

Dari gambar 4.2 dapat dilihat ketika gelombang mengenai ponton perahu, maka ponton akan miring karena adanya pengaruh gaya gelombang (Fw) dan gaya berat total dari sistem (Wtotal). Kemiringan dari ponton perahu membentuk sudut α, sudut ini yang kemudian menjadi *input* awal dari gerak osilasi pendulum (θp). Sudut alfa dalam satu gelombang akan mengalami perubahan sesuai dengan posisinya. Dalam simulasi ini sudut alfa akan dibagi menjadi 8 posisi seperti tampak pada gambar.



Gambar 4.3 Delapan posisi ponton dalam satu gelombang

Sudut pendulum (θ_p) yang merupakan respon dari sudut alfa (α) digunakan sebagai input pada sistem yang akan disimulasikan. Berikut akan dijelaskan langkah dalam menghitung input yang digunakan dalam simulasi.

a. Menghitung Gaya Gelombang (Fw)

Untuk menghitung gaya gelombang laut menggunakan persamaan 2.9, yaitu

$$F_w = \frac{\rho . g^2 . H^2 . T^2}{32\pi\lambda}$$

Dimana

$$\lambda = \frac{g . T^2}{2\pi}$$

Sehingga persamaan menjadi

$$F_w = \frac{\rho . g^2 . H^2 . T^2 . b . 2\pi}{32\pi \text{ g } T^2} = \frac{\rho . g . H^2 . b}{16} \qquad (4.1)$$

Diketahui:

$\rho = 1000$ kg/m^3

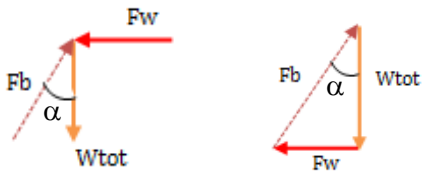
$g = 9.8$ m/s^2

H = 2 x Amplitudo = 0. 024 m
Perhitungan:

$$F_w = \frac{\rho . g . H^2 . b}{16} = \frac{1000\ x\ 9.8\ x\ (0.024)^2}{16} = 0.3528\ N$$

b. Menghitung Gaya Berat Total Sistem (Wtotal)
Diketahui:
g = 9.8 m/s^2
mp = 0.2 kg
mb = 0.0169 kg
mk = 6 kg
Perhitungan:
Wp = mp x g = 0.2 x 9.8 = 1.96 N
Wb = mb x g = 0.0169 x 9.8 = 0.16562 N
Wk = mp x g = 6 x 9.8 = 58.808 N
Wtotal = Wp + Wb + Wk
Wtotal = 1.96 + 0.16562 + 58.808 = 60.933

c. Mencari Sudut Kemiringan Ponton Perahu (α)
Sudut alfa (α) dibentuk oleh resultan gaya dari gaya gelombang (Fw) dan berat total sistem (Wtotal) terhadap garis vertikal, seperti tampak pada gambar berikut.



Gambar 4.4 Resultan gaya pada ponton

Dari gambar 4.4 di atas maka besar sudut alfa (α) didapatkan berdasar persamaan berikut:

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{Fw}{Wtotal}\right) \qquad (4.2)$$

Diketahui:
Fw = 0.3528 N
Wtotal = 60.933 N
Perhitungan:

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{Fw}{Wtotal}\right) = tan^{-1}\left(\frac{0.3528}{60.933}\right) = 0.267\ rad$$

4.4. *Input* Pemodelan

Dalam pemodelan yang dilakukan, *input* yang diberikan kepada sistem adalah sudut alfa (α) dalam delapan kondisi ponton perahu terhadap permukaan air. Sudut alfa berdasarkan frekuensi dari gelombang air, sehingga variasi frekuensi juga merupakan variasi sudut alfa. Dari perhitungan yang telah dilakukan didapat data nilai sudut alfa untuk tiap variasi frekuensi gelombang air sebagai berikut.

Tabel 4.7 Nilai Sudut Ponton (α) terhadap Perubahan Frekuensi Gelombang (f)

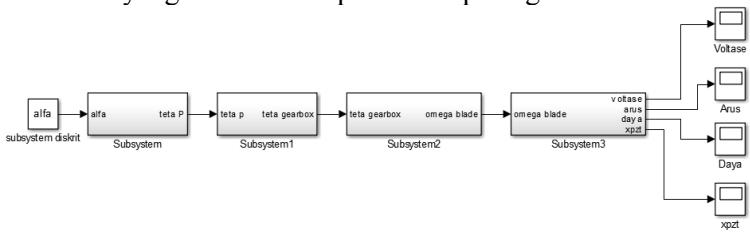
Gelombang												
f [hz]	A [cm]	T [s]	ρ air [kg/m³]	g [m/s²]	Sudut Alfa [rad]							
					α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	α_8
0.3	0.98	3.33	1000	9,8	0.267	0.133	0	0.133	0.267	0.133	0	0.133
0.4	1.20	2.50			0.293	0.146	0	0.146	0.293	0.146	0	0.146
0.5	1.36	2.00			0.317	0.158	0	0.158	0.317	0.158	0	0.158

Variasi *input* lain yang diberikan untuk sistem dalam pemodelan ini adalah massa pendulum dan panjang lengan pendulum.

4.5. Analisa Pemodelan

Pemodelan yang dijalankan menggunakan program Simulink dalam bentuk blok diagram, dimana sistem dibagi menjadi tiga subsistem, yaitu subsistem pendulum, subsistem *gear box*, subsistem mekanisme *blade* dan *piezoelectric*. *Input* yang diberikan adalah sudut alfa (α) dan *output* dari simulasi adalah

voltase, arus dan daya keluaran dari *piezoelectric*. Alur untuk pemodelan yang dilakukan dapat dilihat pada gambar berikut.

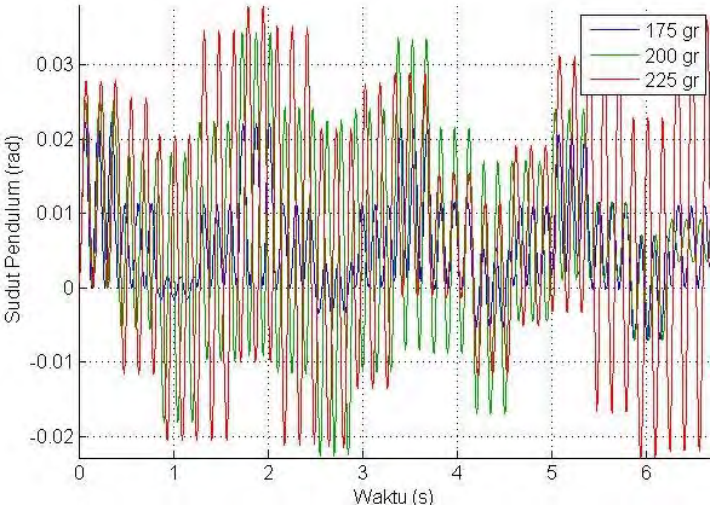


Gambar 4.5 Alur pemodelan

Dapat dilihat pada gambar di atas, pemodelan dimulai dengan *input* sudut alfa dalam bentuk diskrit, dimana dalam satu gelombang dibagi menjadi delapan sudut. Sudut alfa ini kemudian menjadi input untuk subsistem selanjutnya yaitu subsistem pendulum. Dari subsistem pendulum ini didapatkan *output* teta pendulum. Subsistem selanjutnya yaitu *gearbox*, *output* dari subsistem ini adalah teta *gearbox* dimana terdapat dua teta yaitu teta 8 untuk gerak pendulum dengan arah searah jarum jam (CW) dan teta 9 untuk arah gerak pendulum berlawanan arah jarum jam (CCW). Dari subsistem *gearbox* ini kemudian dilanjutkan ke subsistem *piezoelectric*, subsistem *piezoelectric* merupakan subsistem tarakhir yang keluarannya adalah defleksi dari material *piezoelectric*, arus, voltase dan daya yang dibangkitkan oleh material *piezoelectric*.

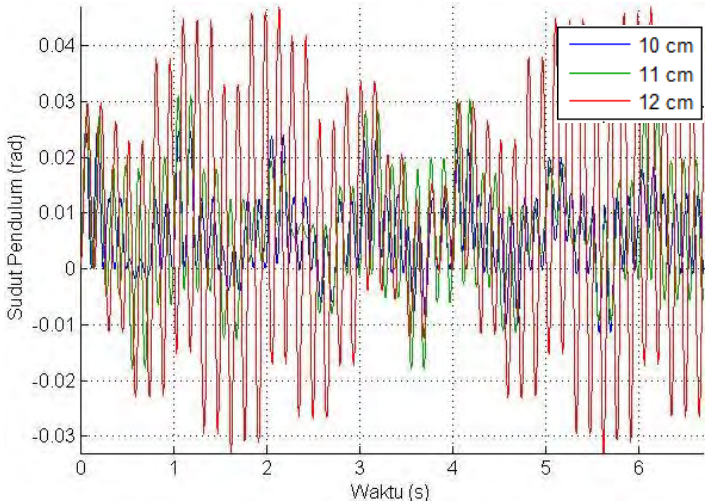
4.5.1. Pemodelan Perpindahan Sudut Pendulum

Pemodelan yang dilakukan menggunakan tiga macam variasi yaitu variasi panjang lengan pendulum, variasi massa pendulum dan variasi frekuensi gelombang air. Simulasi yang dilakukan selama dua periode gelombang air. Gambar-gambar berikut merupakan hasil dari simulasi tiap variasi.



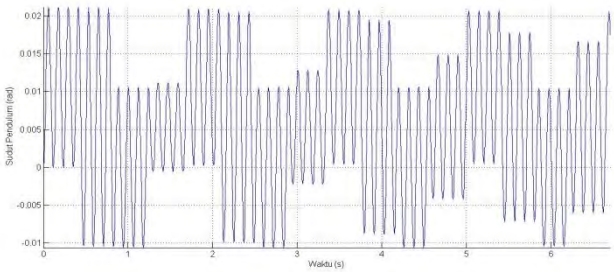
Gambar 4.6 Grafik perpindahan sudut pendulum (θ_p) untuk variasi massa pendulum

Gambar 4.6 di atas merupakan respon perpindahan sudut dari pendulum variasi massa pendulum. Garis biru menunjukkan respon untuk massa pendulum 175 gr, garis hijau untuk massa pendulum 200 gr dan garis merah untuk massa pendulum 225 gr. Dari grafik di atas juga dapat dilihat bahwa karakteristik dari respon perpindahan sudut pendulum berubah-ubah setiap 0.417 detik, hal tersebut karena input sudut alfa (α) dalam bentuk diskrit yang dibagi menjadi 8 posisi. Dapat dilihat bahwa dengan semakin besarnya massa pendulum yang digunakan maka perpindahan sudut dari pendulum (θ_p) juga semakin besar.

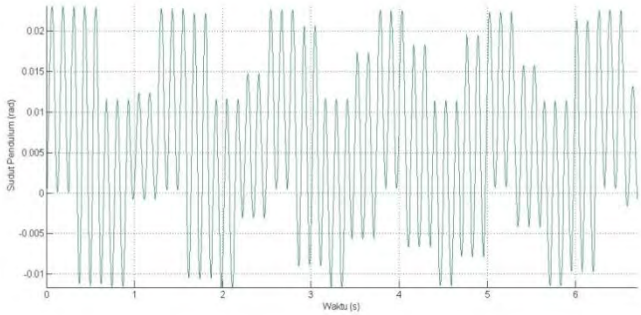


Gambar 4.7 Grafik perpindahan sudut pendulum (θ_p) untuk variasi panjang lengan pendulum

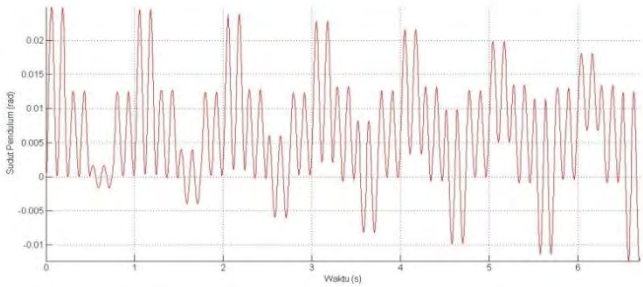
Gambar 4.7 merupakan respon perpindahan sudut dari pendulum variasi panjang lengan pendulum. Garis biru menunjukkan respon untuk panjang lengan pendulum 10 cm, garis hijau untuk panjang lengan pendulum 11 cm dan garis merah untuk panjang lengan pendulum 12 cm. Dari grafik di atas juga dapat dilihat bahwa karakteristik dari respon perpindahan sudut pendulum berubah-ubah setiap 0.25 detik, hal tersebut karena input sudut alfa (α) dalam bentuk diskrit yang dibagi menjadi 8 posisi. Dapat dilihat bahwa dengan semakin panjang lengan pendulum yang digunakan maka perpindahan sudut dari pendulum (θ_p) juga semakin besar.



(a)



(b)



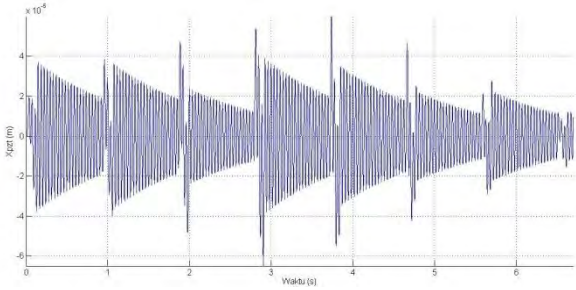
(c)

Gambar 4.8 Grafik perpindahan dudut pendulum (θ_p) untuk variasi frekuensi gelombang air (a) 0.3 Hz, (b) 0.4 Hz dan (c) 0.5 Hz

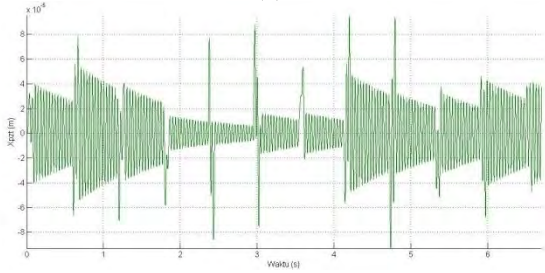
Gambar 4.8 merupakan respon perpindahan sudut dari pendulum variasi frekuensi gelombang air. Garis biru menunjukkan respon untuk frekuensi 0.3 Hz, garis hijau untuk frekuensi 0.4 Hz dan garis merah untuk frekuensi 0.5 Hz. Dari grafik di atas juga dapat dilihat bahwa karakteristik dari respon perpindahan sudut pendulum berubah-ubah setiap 0.417 detik untuk frekuensi 0.3 Hz, 0.3125 detik untuk frekuensi 0.4 Hz dan 0.25 detik untuk frekuensi 0.5 Hz, hal tersebut karena input sudut alfa (α) dalam bentuk diskrit yang dibagi menjadi 8 posisi. Dapat dilihat bahwa dengan semakin besar frekuensi gelombang air maka perpindahan sudut dari pendulum (θ_p) juga semakin besar.

4.5.2. Pemodelan Defleksi *Piezoelectric*

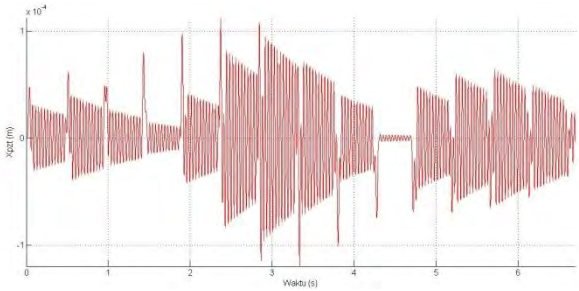
Defleksi yang dialami oleh material *piezoelectric* diakibatkan oleh gaya pukul dari *blade*, sehingga respon defleksi seperti ditunjukkan pada gambar-gambar berikut.



(a)



(b)

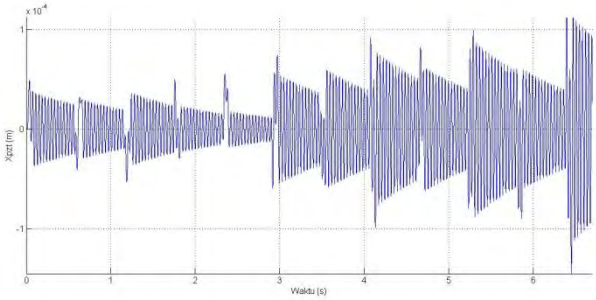


(c)

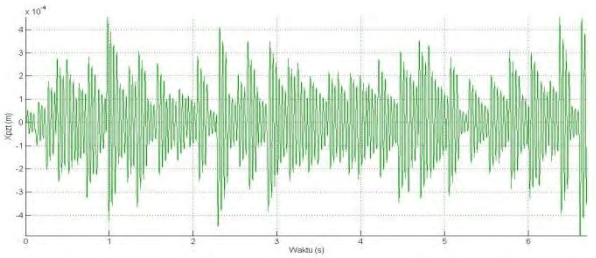
Gambar 4.9 Grafik defleksi *piezoelectric* untuk variasi massa pendulum (a) 175 gr, (b) 200 gr dan (c) 225 gr

Gambar 4.9 merupakan respon dari material *piezoelectric* ketika dikenai pukulan oleh *blade* dengan variasi massa pendulum. Dengan massa pendulum yang bervariasi menentukan frekuensi pukulan yang diterima oleh material *piezoelectric*. Seperti tampak pada gambar di atas, untuk massa pendulum 175 gr defleksi yang dialami paling rendah dan frekuensi pukulan yang diterima oleh material *piezoelectric* dalam dua gelombang air sebanyak 7 kali. Untuk variasi massa pendulum 200 gr, material *piezoelectric* mendapat 12 kali pukulan dalam dua gelombang air. Sedangkan untuk massa pendulum 225 gr, material *piezoelectric* memiliki frekuensi pukul paling banyak yaitu 14 kali. Dari gambar di atas dapat dilihat bahwa respon awal untuk defleksi *piezoelectric* tinggi kemudian mengecil secara bertahap, dan beberapa detik kemudian respon tinggi kembali, hal tersebut menunjukkan pukulan yang diterima oleh material *piezoelectric* memiliki jeda waktu atau tidak terus menerus sehingga material *piezoelectric* memiliki waktu untuk bergetar secara harmonis. Respon dari material *piezoelectric* untuk tiap kali pukulan memiliki karakter yang berbeda, hal tersebut dikarenakan putaran dari *blade* yang tidak konstan sehingga ketika *blade* memukul material *piezoelectric*gaya yang mengenainya tidak selalu dalam

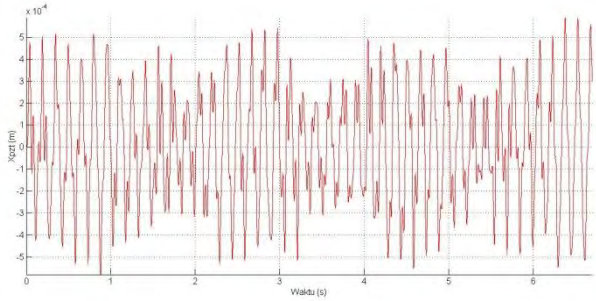
kondisi optimal. Dengan semakin besarnya massa pendulum maka frekuensi pukulan yang diterima oleh material *piezoelectric* juga semakin banyak.



(a)



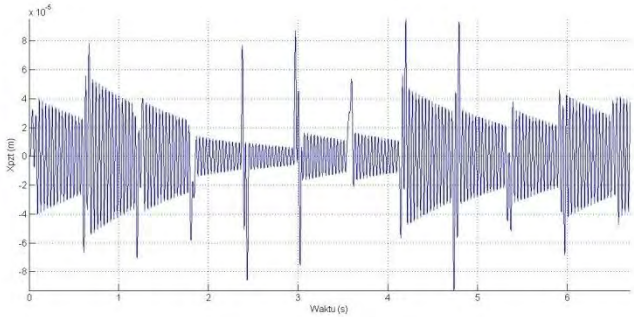
(b)



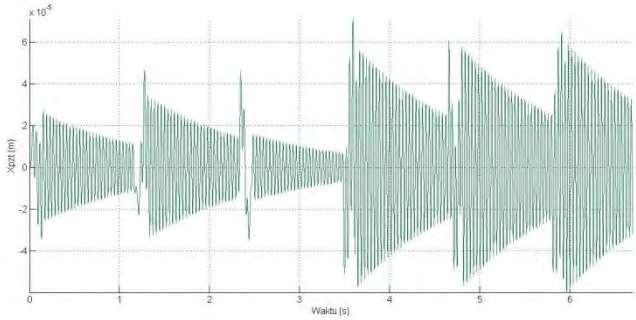
(c)

Gambar 4.10 Grafik defleksi *piezoelectric* untuk variasi panjang lengan pendulum (a) 10 cm, (b) 11 cm dan (c) 12 cm

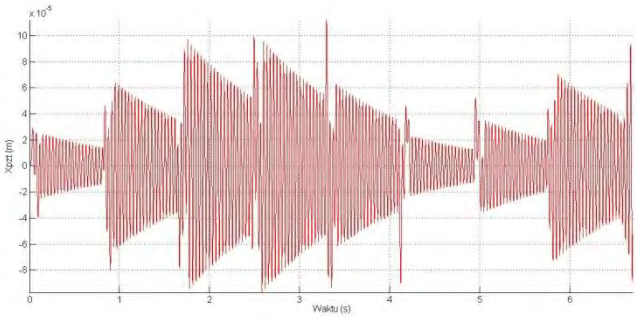
Gambar 4.10 merupakan respon dari material *piezoelectric* ketika dikenai pukulan oleh *blade* dengan variasi panjang lengan pendulum. Dengan panjang lengan pendulum yang bervariasi menentukan frekuensi pukulan yang diterima oleh material *piezoelectric*. Seperti tampak pada gambar di atas, untuk panjang lengan pendulum 10 cm defleksi yang dialami paling rendah dan frekuensi pukulan yang diterima oleh material *piezoelectric* dalam dua gelombang air sebanyak 12 kali. Untuk variasi panjang lengan pendulum 11 cm, material *piezoelectric* mendapat 102 kali pukulan dalam dua gelombang air. Sedangkan untuk panjang lengan pendulum 12 cm, material *piezoelectric* memiliki frekuensi pukul paling banyak yaitu 199 kali. Dari gambar di atas dapat dilihat bahwa respon awal untuk defleksi *piezoelectric* tinggi kemudian mengecil secara bertahap, dan beberapa detik kemudian respon tinggi kembali, hal tersebut menunjukkan pukulan yang diterima oleh material *piezoelectric* memiliki jeda waktu atau tidak terus menerus sehingga material *piezoelectric* memiliki waktu untuk bergetar secara harmonis. Respon dari material *piezoelectric* untuk tiap kali pukulan memiliki karakter yang berbeda, hal tersebut dikarenakan putaran dari *blade* yang tidak konstan sehingga ketika *blade* memukul material *piezoelectric*gaya yang mengenainya tidak selalu dalam kondisi optimal. Namun untuk grafik ketika panjang lengan pendulum 12 cm, memiliki karakter yang tidak teratur berbeda dengan panjang lengan 10 cm dan 11 cm, hal tersebut karena putaran dari *blade* yang sangat besar sehingga material *piezoelectric* terpukul terus menerus atau memiliki jeda waktu yang sangat kecil. Dengan semakin panjang lengan pendulum maka frekuensi pukul yang diterima oleh material *piezoelectric*.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.11 Grafik defleksi p*iezoelectric* untuk variasi frekuensi gelombang air (a) 0.3 Hz, (b) 0.4 Hz dan (c) 0.5 Hz

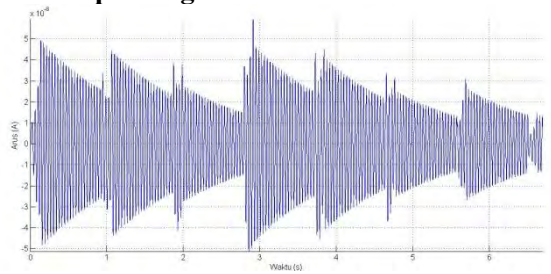
Gambar 4.11 merupakan respon dari material *piezoelectric* ketika dikenai pukulan oleh *blade* dengan variasi frekuensi gelombang air. Dengan frekuensi gelombang air yang bervariasi menentukan frekuensi pukulan yang diterima oleh material *piezoelectric*. Seperti tampak pada gambar di atas, untuk frekuensi 0.3 Hz frekuensi pukulan yang diterima oleh material *piezoelectric* dalam dua gelombang air sebanyak 12 kali. Untuk frekuensi gelombang air 0.4 Hz, material *piezoelectric* mendapat 6 kali pukulan dalam dua gelombang air. Sedangkan untuk frekuensi gelombang air 0.5 Hz, material *piezoelectric* mendapat 8 kali pukulan dalam dua gelombang. Dari gambar di atas dapat dilihat bahwa respon awal untuk defleksi *piezoelectric* tinggi kemudian mengecil secara bertahap, dan beberapa detik kemudian respon tinggi kembali, hal tersebut menunjukkan pukulan yang diterima oleh material *piezoelectric* memiliki jeda waktu atau tidak terus menerus sehingga material *piezoelectric* memiliki waktu untuk bergetar secara harmonis. Respon dari material *piezoelectric* untuk tiap kali pukulan memiliki karakter yang berbeda, hal tersebut dikarenakan putaran dari *blade* yang tidak konstan sehingga ketika *blade* memukul material *piezoelectric*gaya yang mengenainya tidak selalu dalam kondisi optimal. Dengan semakin panjang lengan pendulum maka defleksi yang dialami oleh material *piezoelectric* juga semakin besar. Frekuensi pukul paling banyak pada saat frekuensi gelombang air 0.3 Hz kemudian frekuensi pukul terbanyak kedua pada saat 0.5 Hz dan yang terakhir pada frekuensi 0.4 Hz.

4.5.3. Pemodelan Energi Listrik yang Dihasilkan oleh Mekanisme Pembangkit Listrik Gelombang Air

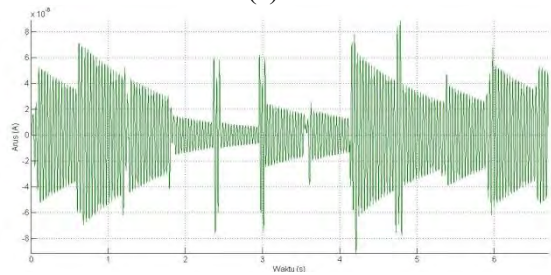
Energi listrik yang dihasilkan dari simulasi ini antara lain voltase bangkitan, arus dan daya. Dalam simulasi ini voltase dan arus didapatkan berdasarkan persamaan elektris

dengan input gaya pukul yang diterima oleh material *piezoelectric*. Berikut merupakan grafik yang didapatkan dari simulasi dengan variasi massa pendulum, panjang lengan pendulum dan frekuensi gelombang air.

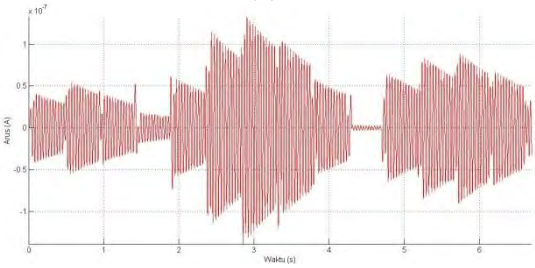
4.5.3.1. Pengaruh Variasi Massa Pendulum terhadap Energi Listrik



(a)

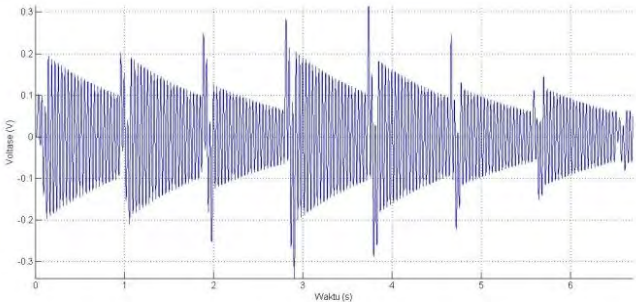


(b)

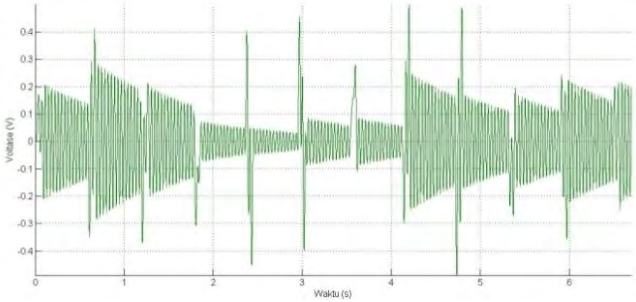


(c)

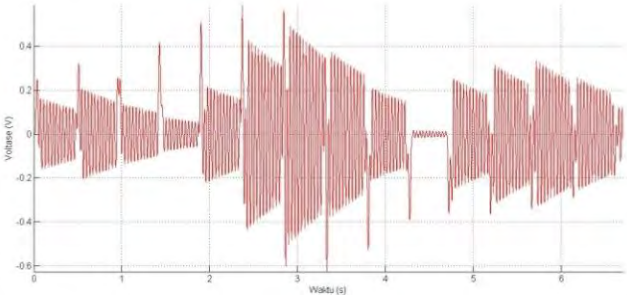
Gambar 4.12 Grafik arus untuk variasi massa pendulum (a) 175 gr, (b) 200 gr dan (c) 225 gr



(a)

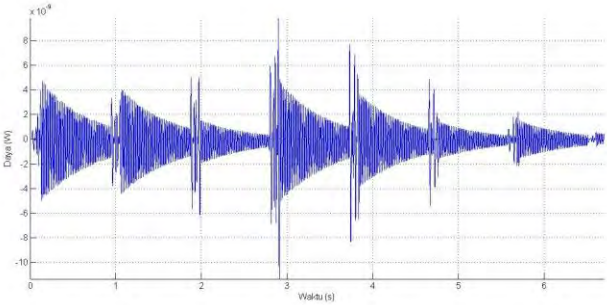


(b)

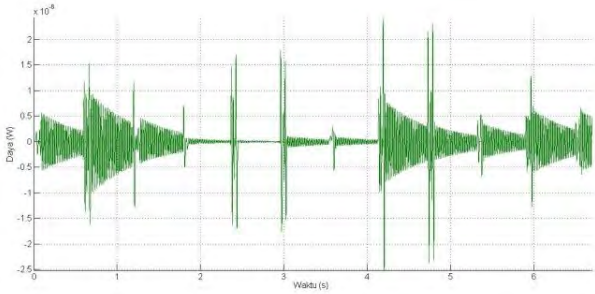


(c)

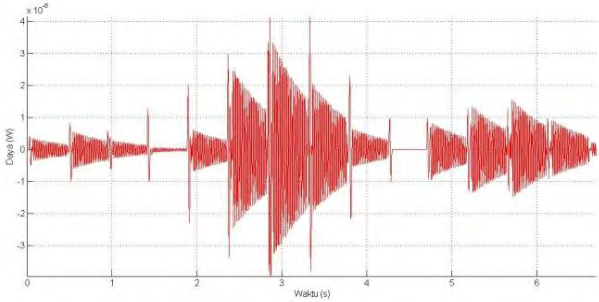
Gambar 4.13 Grafik voltase untuk variasi massa pendulum (a) 175 gr, (b) 200 gr dan (c) 225 gr



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.14 Grafik daya untuk variasi massa pendulum (a) 175 gr, (b) 200 gr dan (c) 225 gr

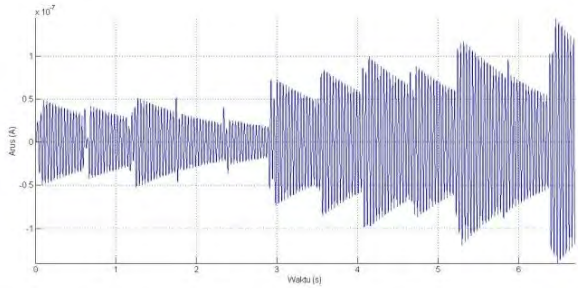
Dari gambar di atas dapat dilihat respon dari arus, voltase dan daya terhadap variasi massa pendulum. Dalam simulasi ini digunakan tiga massa pendulum yaitu 175 gr, 200 gr dan 225 gr. Pada gambar 4.12 menunjukkan grafik hasil simulasi untuk respon arus bangkitan dari material *piezoelectric* dengan variasi massa pendulum, dapat dilihat pada gambar bahwa dengan semakin besarnya massa pendulum maka arus yang dihasilkan oleh material *piezoelectric* juga semakin besar. Variasi massa pendulum juga berpengaruh terhadap frekuensi pukulan yang diterima oleh material *piezoelectric*, karena arus memiliki persamaan yang berhubungan dengan defleksi maka karakteristik dari arus bangkitan menyerupai karakteristik dari defleksi material *piezoelectric* pada gambar 4.9.

Untuk gambar 4.13 menunjukkan respon dari voltase bangkitan material *piezoelectric*. Dengan semakin besarnya massa pendulum yang digunakan maka voltase yang dihasilkan juga semakin besar. Variasi massa pendulum juga menentukan berapa banyak pukulan yang diterima oleh material *piezoelectric*, sehingga voltase bangkitan hanya terjadi ketika material *piezoelectric* mendapat pukulan dari *blade* dan karakter dari voltase bangkitan tersebut menyerupai dengan karakter defleksi material *piezoelectric* pada gambar 4.9.

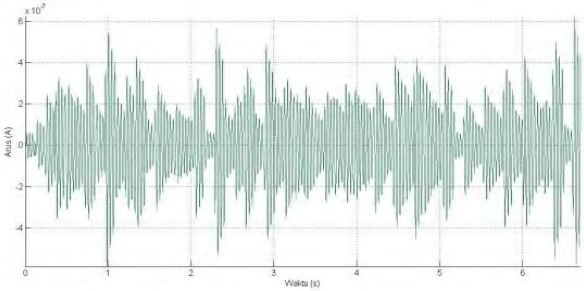
Gambar 4.14 merupakan respon daya yang dihasilkan dari simulasi dengan variasi massa. Dengan semakin besar massa pendulum maka daya yang dihasilkan juga semakin besar. Daya merupakan hasil dari perkalian antara voltase dan arus bangkitan sehingga karakter dari daya menyerupai karakter dari arus dan voltase bangkitan.

Dari semua gambar di atas dapat dilihat bahwa respon awal untuk energi listrik yang dihasilkan material *piezoelectric* meliputi arus, voltase dan daya memiliki awal yang tinggi kemudian mengecil secara bertahap, dan beberapa detik kemudian respon tinggi kembali, hal tersebut menunjukkan pukulan yang diterima oleh material *piezoelectric* memiliki jeda waktu atau tidak terus menerus sehingga material *piezoelectric* memiliki waktu untuk bergetar secara harmonis. Respon dari material *piezoelectric* untuk tiap kali pukulan memiliki karakter yang berbeda, hal tersebut dikarenakan putaran dari *blade* yang tidak konstan sehingga ketika *blade* memukul material *piezoelectric*gaya yang mengenainya tidak selalu dalam kondisi optimal.

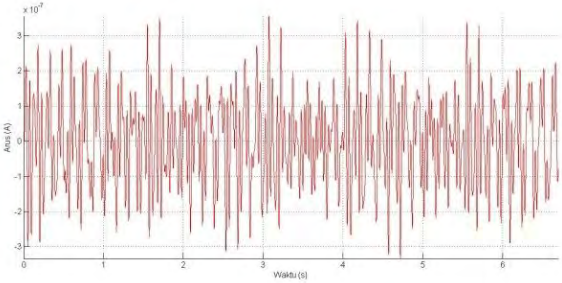
4.5.3.2. Pengaruh Variasi Panjang Lengan Pendulum terhadap Energi Listrik



(a)

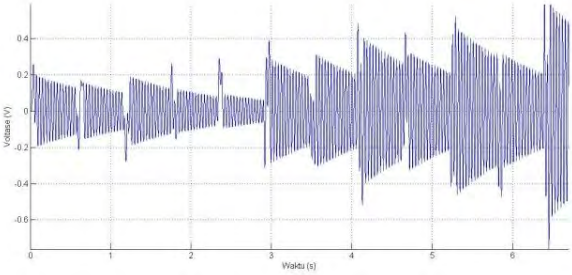


(b)

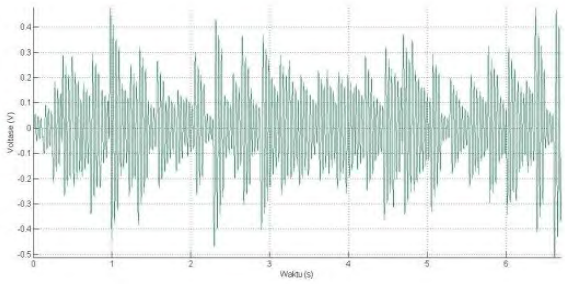


(c)

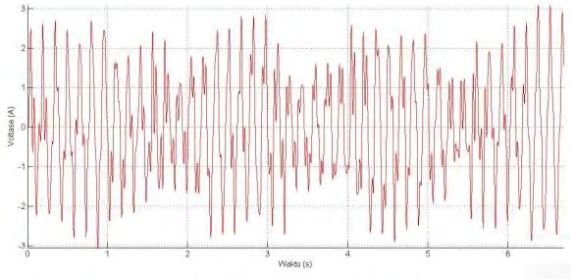
Gambar 4.15 Grafik arus untuk variasi panjang lengan pendulum (a) 10 cm, (b) 11 cm dan (c) 12 cm



(a)

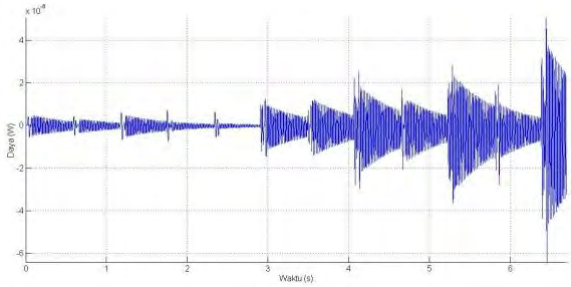


(b)

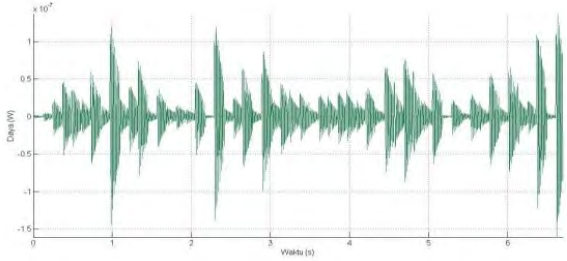


(c)

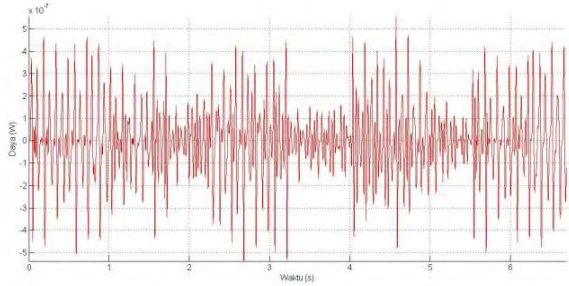
Gambar 4.16 Grafik voltase untuk variasi panjang lengan pendulum (a) 10 cm, (b) 11 cm dan (c) 12 cm



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.17 Grafik daya untuk variasi panjang lengan pendulum (a) 10 cm, (b) 11 cm dan (c) 12 cm

Dari gambar di atas dapat dilihat respon dari arus, voltase dan daya terhadap variasi panjang lengan pendulum. Dalam simulasi ini digunakan tiga panjang lengan pendulum yaitu 10 cm, 11 cm, dan 12 cm. Pada gambar 4.15 menunjukkan grafik hasil simulasi untuk respon arus bangkitan dari material *piezoelectric* dengan variasi panjang lengan pendulum, dapat dilihat pada gambar bahwa dengan semakin panjang lengan pendulum maka arus yang dihasilkan oleh material *piezoelectric* juga semakin besar. Variasi panjang lengan pendulum juga berpengaruh terhadap frekuensi pukulan yang diterima oleh material *piezoelectric*, karena arus memiliki persamaan yang berhubungan

dengan defleksi maka karakteristik dari arus bangkitan menyerupai karakteristik dari defleksi material *piezoelectric* pada gambar 4.10.

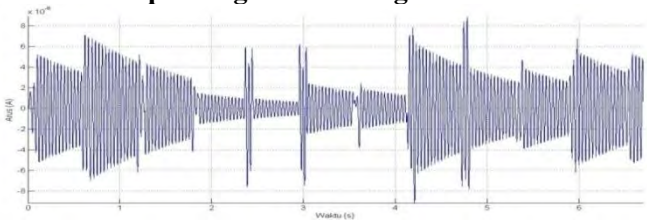
Untuk gambar 4.16 menunjukkan respon dari voltase bangkitan material *piezoelectric*. Dengan semakin panjang lengan pendulum yang digunakan maka voltase yang dihasilkan juga semakin besar. Variasi panjang lengan pendulum juga menentukan berapa banyak pukulan yang diterima oleh material *piezoelectric*, sehingga voltase bangkitan hanya terjadi ketika material *piezoelectric* mendapat pukulan dari *blade* dan karakter dari voltase bangkitan tersebut menyerupai dengan karakter defleksi material *piezoelectric* pada gambar 4.10.

Gambar 4.17 merupakan respon daya yang dihasilkan dari simulasi dengan variasi massa. Dengan semakin panjang lengan pendulum maka daya yang dihasilkan juga semakin besar. Daya merupakan hasil dari perkalian antara voltase dan arus bangkitan sehingga karakter dari daya menyerupai karakter dari arus dan voltase bangkitan.

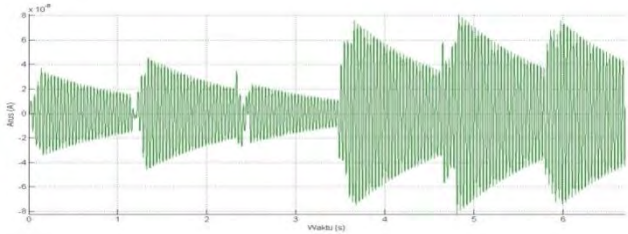
Dari semua gambar di atas dapat dilihat bahwa respon awal untuk energi listrik yang dihasilkan material *piezoelectric* meliputi arus, voltase dan daya memiliki awal yang tinggi kemudian mengecil secara bertahap, dan beberapa detik kemudian respon tinggi kembali, hal tersebut menunjukkan pukulan yang diterima oleh material *piezoelectric* memiliki jeda waktu atau tidak terus menerus sehingga material *piezoelectric* memiliki waktu untuk bergetar secara harmonis. Respon dari material *piezoelectric* untuk tiap kali pukulan memiliki karakter yang berbeda, hal tersebut dikarenakan putaran dari *blade* yang tidak konstan sehingga ketika *blade* memukul material *piezoelectric*gaya yang mengenainya tidak selalu

dalam kondisi optimal. Namun untuk grafik ketika panjang lengan pendulum 12 cm, memiliki karakter yang tidak teratur berbeda dengan panjang lengan 10 cm dan 11 cm, hal tersebut karena putaran dari *blade* yang sangat besar sehingga material *piezoelectric* terpukul terus menerus atau memiliki jeda waktu yang sangat kecil.

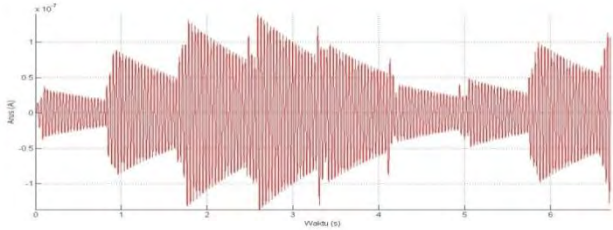
4.5.3.3. Pengaruh Frekuensi Gelombang Air terhadap Energi Gelombang Air



(a)

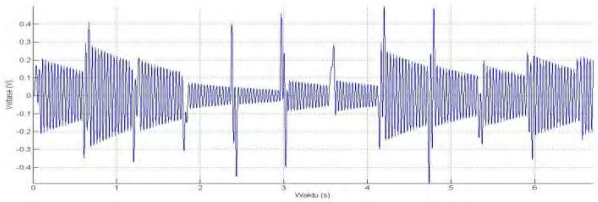


(b)

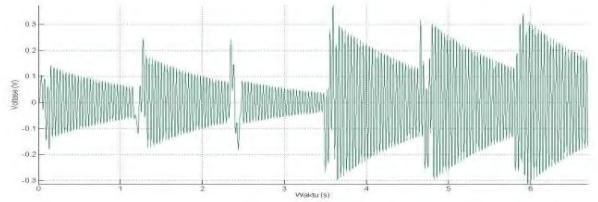


(c)

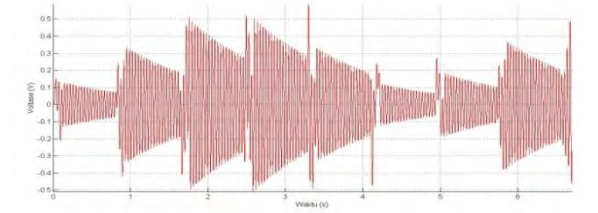
Gambar 4.18 Grafik arus untuk variasi frekuensi gelombang air (a) 0.3 Hz, (b) 0.4 Hz dan (c) 0.5 Hz



(a)

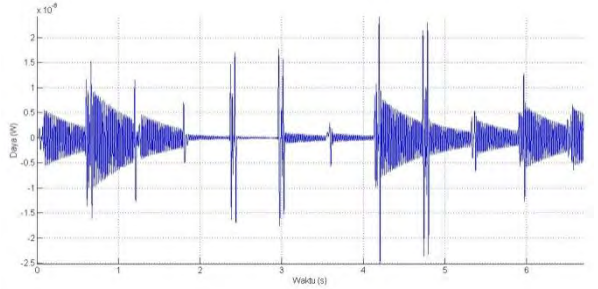


(b)

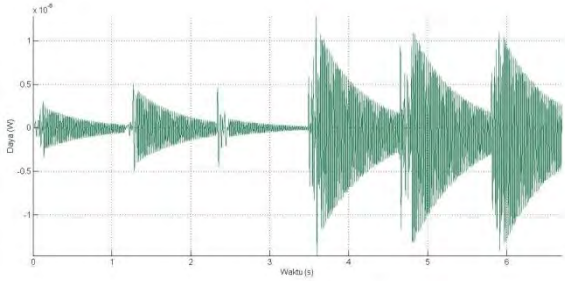


(c)

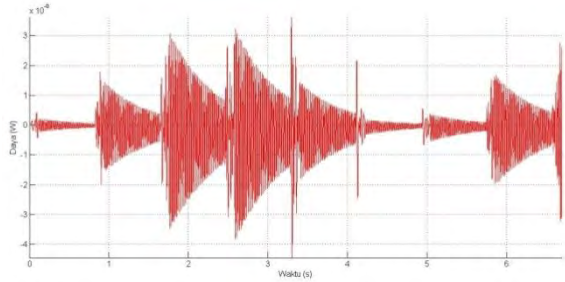
Gambar 4.19 Grafik voltase untuk variasi frekuensi gelombang air (a) 0.3 Hz, (b) 0.4 Hz dan (c) 0.5 Hz



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.20 Grafik daya untuk variasi frekuensi gelombang air (a) 0.3 Hz, (b) 0.4 Hz dan (c) 0.5 Hz

Dari gambar di atas dapat dilihat respon dari arus, voltase dan daya terhadap variasi frekuensi gelombang air. Dalam simulasi ini digunakan tiga frekuensi gelombang air yaitu 0.3 Hz, 0.4 Hz dan 0.5 Hz. Pada gambar 4.18 menunjukkan grafik hasil simulasi untuk respon arus bangkitan dari material *piezoelectric* dengan variasi massa pendulum, dapat dilihat pada gambar bahwa dengan semakin besarnya massa pendulum maka arus yang dihasilkan oleh material *piezoelectric* juga semakin besar. Variasi massa pendulum juga berpengaruh terhadap frekuensi pukulan yang diterima oleh material *piezoelectric*, karena arus memiliki persamaan yang berhubungan

dengan defleksi maka karakteristik dari arus bangkitan menyerupai karakteristik dari defleksi material *piezoelectric* pada gambar 4.11.

Untuk gambar 4.19 menunjukkan respon dari voltase bangkitan material *piezoelectric*. Dengan semakin besarnya massa pendulum yang digunakan maka voltase yang dihasilkan juga semakin besar. Variasi massa pendulum juga menentukan berapa banyak pukulan yang diterima oleh material *piezoelectric*, sehingga voltase bangkitan hanya terjadi ketika material *piezoelectric* mendapat pukulan dari *blade* dan karakter dari voltase bangkitan tersebut menyerupai dengan karakter defleksi material *piezoelectric* pada gambar 4.11.

Gambar 4.20 merupakan respon daya yang dihasilkan dari simulasi dengan variasi massa. Dengan semakin besar massa pendulum maka daya yang dihasilkan juga semakin besar. Daya merupakan hasil dari perkalian antara voltase dan arus bangkitan sehingga karakter dari daya menyerupai karakter dari arus dan voltase bangkitan.

Dari semua gambar di atas dapat dilihat bahwa respon awal untuk energi listrik yang dihasilkan material *piezoelectric* meliputi arus, voltase dan daya memiliki awal yang tinggi kemudian mengecil secara bertahap, dan beberapa detik kemudian respon tinggi kembali, hal tersebut menunjukkan pukulan yang diterima oleh material *piezoelectric* memiliki jeda waktu atau tidak terus menerus sehingga material *piezoelectric* memiliki waktu untuk bergetar secara harmonis. Respon dari material *piezoelectric* untuk tiap kali pukulan memiliki karakter yang berbeda, hal tersebut dikarenakan putaran dari *blade* yang tidak konstan sehingga ketika *blade* memukul material

*piezoelectric*gaya yang mengenainya tidak selalu dalam kondisi optimal.

4.6. Pembahasan

Dalam simulasi ini digunakan tiga macam variasi yaitu variasi frekuensi gelombang air, variasi massa pendulum dan variasi panjang lengan pendulum. Dalam tiga variasi tersebut yang akan diperhatikan adalah pengaruhnya terhadap perpindahan sudut pendulum (θ_p), defleksi material *piezoelectric* (x_{pzt}), voltase bangkitan (V_p), arus (I) dan daya (P) yang dihasilkan oleh material *piezoelectric*.

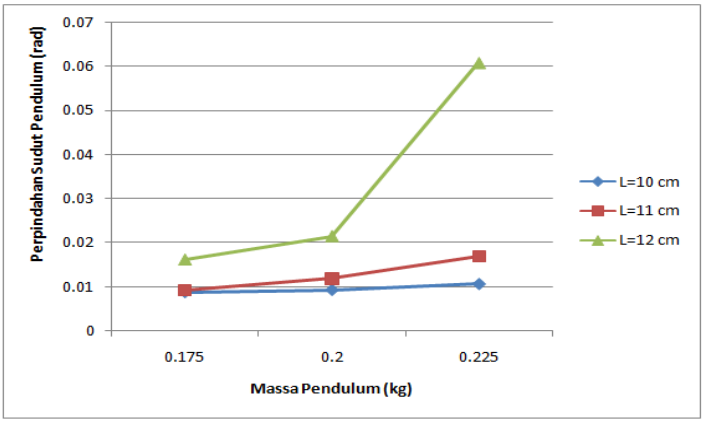
4.6.1. Pengaruh Variasi Massa Pendulum terhadap Perpindahan Sudut Pendulum (θ_p)

Tabel berikut merupakan data hasil simulasi untuk perpindahan sudut pendulum (θ_p) untuk variasi massa pendulum.

Tabel 4.8 Nilai Perpindahan Sudut Pendulum untuk Variasi Massa Pendulum

Frekuensi Gelombang Air (Hz)	Panjang Lengan Pendulum (m)	Massa Pendulum (kg)	Perpindahan Sudut Pendulum (rad)
0.5	0.1	0.175	0.0096
		0.2	0.0105
		0.225	0.0121
	0.11	0.175	0.0106
		0.2	0.0125
		0.225	0.0183
	0.12	0.175	0.0147
		0.2	0.0175
		0.225	0.0317

Dari data di atas maka dapat dibuat grafik seperti tampak pada gambar berikut.



Gambar 4.21 Respon perpindahan sudut pendulum (θ_p) untuk variasi massa pendulum

Dari gambar 4.21 dapat kita lihat respon perpindahan sudut pendulum (θ_p) yang dipengaruhi oleh massa pendulum. Terlihat bahwa grafik memiliki trendline naik. Pada saat massa pendulum (mp) sebesar 0.175 kg dan panjang lengan pendulum (L) 10 cm, maka respon θ_p yang didapatkan sebesar 0.096 rad. Untuk besar massa pendulum yang sama namun dengan panjang lengan pendulum (L) sebesar 11 cm didapat θ_p sebesar 0.0106 rad, sedangkan untuk panjang lengan pendulum (L) sebesar 12 cm didapat nilai θ_p sebesar 0.0147 rad. Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa dengan semakin besarnya massa pendulum yang diberikan maka perpindahan sudut pendulum (θ_p) juga akan semakin besar.

Dengan semakin besarnya massa pendulum maka momen gaya yang didapat oleh pendulum juga semakin besar. Sehingga sudut perpindahan pendulum juga semakin besar. Maka dari itu grafik yang telah didapatkan di atas sudah sesuai dengan teori.

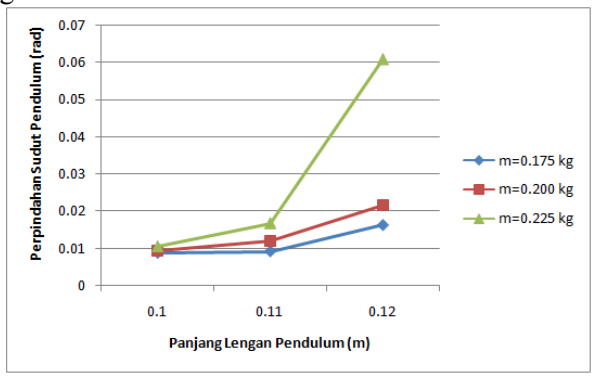
4.6.2. Pengaruh Variasi Panjang Lengan Pendulum terhadap Perpindahan Sudut Pendulum (θ_p)

Tabel berikut merupakan data hasil simulasi untuk perpindahan sudut pendulum (θ_p) untuk variasi panjang lengan pendulum.

Tabel 4.9 Nilai Perpindahan Sudut Pendulum untuk Variasi Panjang Lengan Pendulum

Frekuensi Gelombang Air (Hz)	Massa Pendulum (kg)	Panjang Lengan Pendulum (m)	Perpindahan Sudut Pendulum (rad)
0.5	0.175	0.1	0.0096
		0.11	0.0106
		0.12	0.0147
	0.2	0.1	0.0105
		0.11	0.0125
		0.12	0.0175
	0.225	0.1	0.0121
		0.11	0.0183
		0.12	0.0317

Dari data di atas maka dapat dibuat grafik seperti tampak pada gambar berikut.



Gambar 4.22 Respon perpindahan sudut pendulum (θ_p) untuk variasi panjang lengan pendulum

Dari gambar 4.22 dapat kita lihat respon perpindahan sudut pendulum (θ_p) yang dipengaruhi oleh panjang lengan pendulum. Terlihat bahwa grafik memiliki trendline naik. Pada saat panjang lengan pendulum (L) sebesar 0.1 m dengan massa pendulum (mp) 0.175 kg, maka respon θ_p yang didapatkan sebesar 0.0096 rad. Untuk panjang lengan pendulum yang sama namun dengan massa pendulum (mp) sebesar 0.200 kg didapat θ_p sebesar 0.0105 rad, sedangkan untuk massa pendulum (mp) sebesar 0.225 kg didapat nilai θ_p sebesar 0.0121 rad. Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa dengan semakin panjang lengan pendulum yang digunakan maka perpindahan sudut pendulum (θ_p) juga akan semakin besar.

Dengan semakin panjang lengan pendulum maka momen gaya yang didapat oleh pendulum juga semakin besar. Sehingga sudut perpindahan pendulum juga semakin besar. Maka dari itu grafik yang telah didapatkan di atas sudah sesuai dengan teori.

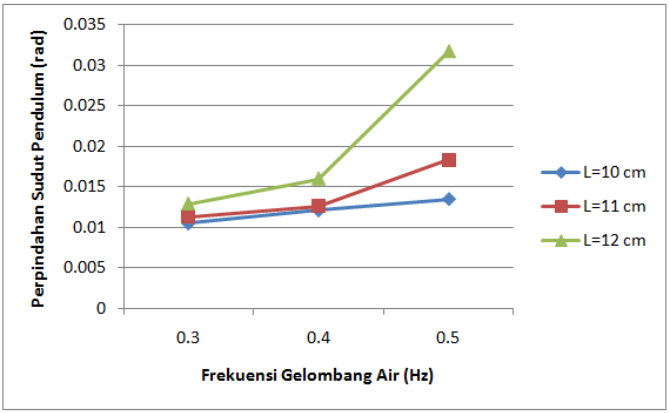
4.6.3. Pengaruh Variasi Frekuensi Gelombang Air terhadap Perpindahan Sudut Pendulum (θ_p)

Tabel berikut merupakan data hasil simulasi untuk perpindahan sudut pendulum (θ_p) untuk variasi frekuensi gelombang air.

Tabel 4.10 Nilai Perpindahan Sudut Pendulum untuk Variasi Frekuensi Gelombang Air

Massa Pendulum (kg)	Panjang Lengan Pendulum (m)	Frekuensi Gelombang Air (Hz)	Perpindahan Sudut Pendulum (rad)
0.225	0.1	0.3	0.0105
		0.4	0.0121
		0.5	0.0135
	0.11	0.3	0.0113
		0.4	0.0126
		0.5	0.0183
	0.12	0.3	0.0129
		0.4	0.016
		0.5	0.0317

Dari data di atas maka dapat dibuat grafik seperti tampak pada gambar berikut.



Gambar 4.23 Respon perpindahan sudut pendulum (θ_p) untuk variasi frekuensi gelombang air

Dari gambar 4.23 dapat kita lihat respon perpindahan sudut pendulum (θ_p) yang dipengaruhi oleh frekuensi gelombang air. Terlihat bahwa grafik memiliki trendline naik. Pada saat frekuensi gelombang air (f) sebesar 0.3 Hz dengan panjang lengan pendulum (L) 10 cm, maka respon θ_p yang didapatkan sebesar 0.0105 rad. Untuk besar frekuensi gelombang air yang sama namun dengan panjang lengan pendulum (L) sebesar 11 cm didapat θ_p sebesar 0.0113 rad, sedangkan untuk panjang lengan pendulum (L) sebesar 12 cm didapat nilai θ_p sebesar 0.0129 rad. Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa dengan semakin besarnya frekuensi gelombang air yang diberikan maka perpindahan sudut pendulum (θ_p) juga akan semakin besar.

Dengan semakin besarnya frekuensi maka sudut alfa (α) yang terbentuk antara kemiringan kapal dengan garis horizontal akan semakin besar. Nilai sudut alfa tersebut berpengaruh pada momen yang dialami oleh pendulum, dimana dengan semakin besar sudut alfa (α) maka momen akan semakin besar pula. Dengan momen yang semakin besar maka perpindahan sudut pendulum juga akan semakin besar pula. Dari grafik yang didapatkan sudah sesuai dengan teori.

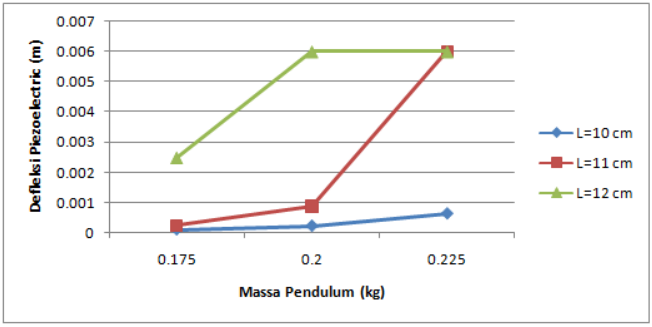
4.6.4. Pengaruh Variasi Massa Pendulum terhadap Defleksi Material *Piezoelectric* (x_{pzt})

Berikut merupakan tabel untuk data hasil simulasi defleksi yang dialami material *piezoelectric* dengan variasi massa pendulum.

Tabel 4.11 Nilai Defleksi Material *Piezoelectric* untuk Variasi Massa Pendulum

Frekuensi Gelombang Air (Hz)	Panjang Lengan Pendulum (m)	Massa Pendulum (kg)	Defleksi *Piezoelectric* (m x 10^{-3})
0.5	0.1	0.175	0.101
		0.2	0.223
		0.225	0.636
	0.11	0.175	0.254
		0.2	0.894
		0.225	6
	0.12	0.175	2.5
		0.2	6
		0.225	6

Dari data di atas, maka dapat dibuat dalam bentuk grafik excel seperti pada gambar berikut.



Gambar 4.24 Grafik defleksi material *piezoelectric* (x_{pzt}) untuk variasi massa pendulum

Dari gambar 4.24 dapat kita lihat respon defleksi material *piezoelectric* (x_{pzt}) yang dipengaruhi oleh massa pendulum. Terlihat bahwa grafik memiliki trendline naik. Pada saat massa pendulum (mp) sebesar 0.175 kg dan

panjang lengan pendulum (L) 10 cm, maka respon x_{pzt} yang didapatkan sebesar 0.101 x 10^{-3} m. Untuk besar massa pendulum yang sama namun dengan panjang lengan pendulum (L) sebesar 11 cm didapat x_{pzt} sebesar 0.254 x 10^{-3} rad, sedangkan untuk panjang lengan pendulum (L) sebesar 12 cm didapat nilai x_{pzt} sebesar 2.5 x 10^{-3} rad. Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa dengan semakin besarnya massa pendulum yang diberikan maka defleksi material *piezoelectric* (x_{pzt}) juga akan semakin besar. Besar defleksi yang dialami oleh material *piezoelectric* ini pun tidak melebihi dari 6 mm karena defleksi maksimal yang bisa diterima oleh material *piezoelectric* hanya sebesar 6 mm. Dari grafik di atas dapat dilihat bahwa nilai optimal dari material *piezoelectric* adalah ketika menggunakan massa pendulum 225 gr dengan panjang lengan 11 cm dan massa pendulum 200 gr dengan panjang lengan 12 cm. Jika diperbesar massa pendulum maka defleksi material *piezoelectric* yang dicapai tetap 6 mm karena batas kemampuan dari material *piezoelectric* sehingga energi dari putaran *blade* tidak bisa termanfaatkan sepenuhnya.

Semakin besarnya massa pendulum maka momen yang diterima oleh pendulum juga semakin besar. Energi gerak dari momen tersebut kemudian diteruskan oleh pendulum ke *gearbox* dan selanjutnya ke putaran *blade*. Dengan semakin besarnya energi yang diterima pendulum maka putaran dari *blade* yang akan memukul material *piezoelectric* juga semakin besar. Putaran *blade* ini dikonversi menjadi gaya *impact* ketika mengenai material *piezoelectric*. Sehingga defleksi yang dialami oleh material *piezoelectric* akan semakin besar dengan semakin besarnya massa pendulum yang digunakan. Dari grafik yang telah didapat maka sudah sesuai dengan teori.

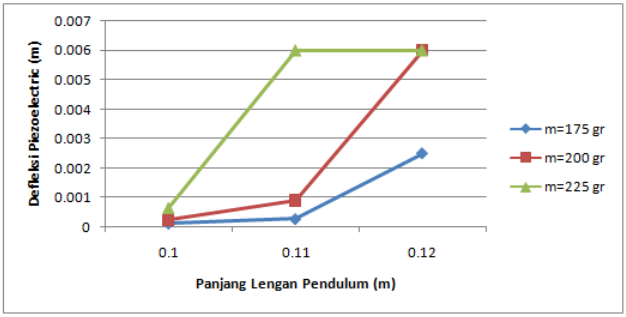
4.6.5. Pengaruh Variasi Panjang Lengan Pendulum terhadap Defleksi Material *Piezoelectric* (x_{pzt})

Berikut merupakan tabel untuk data hasil simulasi defleksi yang dialami material *piezoelectric* dengan variasi panjang lengan pendulum.

Tabel 4.12 Nilai Defleksi Material *Piezoelectric* untuk Variasi Panjang Lengan Pendulum

Frekuensi Gelombang Air (Hz)	Massa Pendulum (kg)	Panjang Lengan Pendulum (m)	Defleksi *Piezoelectric* (m x 10^{-3})
0.5	0.175	0.1	0.101
		0.11	0.254
		0.12	2.5
	0.2	0.1	0.223
		0.11	0.894
		0.12	6
	0.225	0.1	0.636
		0.11	6
		0.12	6

Dari data di atas, maka dapat dibuat dalam bentuk grafik excel seperti pada gambar berikut.



Gambar 4.25 Grafik defleksi material *piezoelectric* (x_{pzt}) untuk variasi panjang lengan pendulum

Dari gambar 4.25 dapat kita lihat respon defleksi material *piezoelectric* (x_{pzt}) yang dipengaruhi oleh panjang lengan pendulum. Terlihat bahwa grafik memiliki trendline naik. Pada saat panjang lengan pendulum (L) sebesar 0.1 m dengan massa pendulum (mp) 0.175 kg, maka respon x_{pzt} yang didapatkan sebesar 0.101 x 10^{-3} m. Untuk panjang lengan pendulum yang sama namun dengan massa pendulum (mp) sebesar 0.200 kg didapat x_{pzt} sebesar 0.223 x 10^{-3} m, sedangkan untuk massa pendulum (mp) sebesar 0.225 kg didapat nilai x_{pzt} sebesar 0.636 x 10^{-3} m. Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa dengan semakin panjang lengan pendulum yang diberikan maka defleksi material *piezoelectric* (x_{pzt}) juga akan semakin besar. Besar defleksi yang dialami oleh material *piezoelectric* ini pun tidak melebihi dari 6 mm karena defleksi maksimal yang bisa diterima oleh material *piezoelectric* hanya sebesar 6 mm. Dari grafik di atas dapat dilihat bahwa nilai optimal dari material *piezoelectric* adalah ketika menggunakan panjang lengan pendulum 12 cm dengan massa pendulum 200 gram dan panjang lengan pendulum 11 cm dengan massa pendulum 225 gram. Jika diperbesar panjang lengan pendulum maka defleksi material *piezoelectric* yang dicapai tetap 6 mm karena batas kemampuan dari material *piezoelectric* sehingga energi dari putaran *blade* tidak bisa termanfaatkan sepenuhnya.

Semakin panjang lengan pendulum maka momen yang diterima oleh pendulum juga semakin besar. Energi gerak dari momen tersebut kemudian diteruskan oleh pendulum ke *gearbox* dan selanjutnya ke putaran *blade*. Dengan semakin besarnya energi yang diterima pendulum maka putaran dari *blade* yang akan memukul material *piezoelectric* juga semakin besar. Putaran *blade* ini dikonversi menjadi gaya *impact* ketika mengenai material *piezoelectric*. Sehingga

defleksi yang dialami oleh material *piezoelectric* akan semakin besar dengan semakin panjang lengan pendulum yang digunakan. Dari grafik yang telah didapat maka sudah sesuai dengan teori.

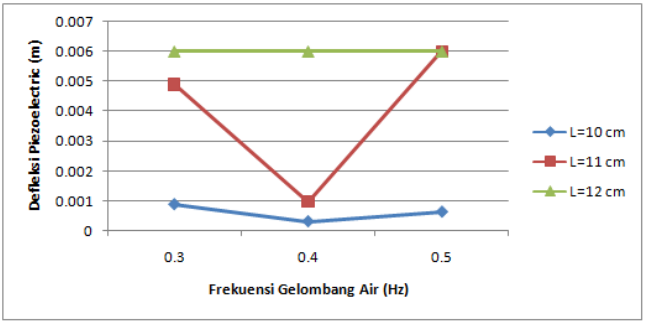
4.6.6. Pengaruh Variasi Frekuensi Gelombang Air terhadap Defleksi Material *Piezoelectric* (x_{pzt})

Berikut merupakan tabel untuk data hasil simulasi defleksi yang dialami material *piezoelectric* dengan variasi frekuensi gelombang air.

Tabel 4.13 Nilai Defleksi Material *Piezoelectric* untuk Variasi Frekuensi Gelombang Air

Massa Pendulum (kg)	Panjang Lengan Pendulum (m)	Frekuensi Gelombang Air (Hz)	Defleksi *Piezoelectric* (m x 10^{-3})
0.225	0.1	0.3	0.893
		0.4	0.307
		0.5	0.636
	0.11	0.3	4.9
		0.4	0.981
		0.5	6
	0.12	0.3	6
		0.4	6
		0.5	6

Dari data di atas, maka dapat dibuat dalam bentuk grafik excel seperti pada gambar berikut.



Gambar 4.26 Grafik defleksi material *piezoelectric* (x_{pzt}) untuk variasi frekuensi gelombang air

Dari gambar 4.26 dapat kita lihat respon defleksi material *piezoelecric* (x_{pzt}) yang dipengaruhi oleh frekuensi gelombang air. Trendline dari respon defleksi material *piezoelectric* untuk variasi frekuensi gelombang laut di tiap panjang lengan pendulum yang berbeda memiliki trendline menyerupai huruf 'V', dimana nilai defleksi dari material *piezoelectric* akan turun saat frekuensi meningkat dari 0.3 Hz ke 0.4 Hz, dan kemudian nilai defleksi ini akan naik saat frekuensi dinaikkan menjadi 0.5 Hz. Nilai tertinggi untuk defleksi material *piezoelectric* yaitu sebesar 6 mm yang terjadi pada tiap variasi massa untuk panjang lengan 12 cm dan frekuensi 0.5 Hz untuk panjang lengan 12 cm. Sedangkan nilai defleksi terendah pada saat frekuensi gelombang 0.4 Hz dengan panjang lengan pendulum 10 cm yaitu sebesar 0.307 mm. Besar defleksi yang dialami oleh material *piezoelectric* ini pun tidak melebihi dari 6 mm karena defleksi maksimal yang bisa diterima oleh material *piezoelectric* hanya sebesar 6 mm. Dari grafik di atas dapat dilihat bahwa nilai optimal dari material *piezoelectric* adalah ketika frekuensi gelombang air 0.5 Hz dengan panjang lengan 11 cm dan frekuensi 0.4 Hz dengan panjang lengan 12 cm. Jika diperbesar frekuensi gelombang air maka defleksi material *piezoelectric* yang dicapai tetap 6 mm karena batas kemampuan dari material *piezoelectric* sehingga

energi dari putaran *blade* tidak bisa termanfaatkan sepenuhnya.

Semakin besarnya frekuensi gelombang maka nilai sudut alfa akan meningkat yang ikut meningkatkan momen yang diterima oleh pendulum pula. Energi gerak dari momen tersebut kemudian diteruskan oleh pendulum ke *gearbox* dan selanjutnya ke putaran *blade*. Dengan semakin besarnya energi yang diterima pendulum maka putaran dari *blade* yang akan memukul material *piezoelectric* juga semakin besar. Putaran *blade* ini dikonversi menjadi gaya *impact* ketika mengenai material *piezoelectric*. Sehingga defleksi yang dialami oleh material *piezoelectric* akan semakin besar dengan semakin besarnya frekuensi gelombang air. Dari grafik yang telah didapatkan tidak sesuai dengan teori, ini dikarenakan dari input diskrit sudut alfa (α) yang mengakibatkan putaran *blade* menjadi tidak konstan, sehingga gaya *impact* yang diterima oleh material *piezoelectric* tidak selalu dalam kondisi optimalnya.

4.6.7. Pengaruh Variasi Massa Pendulum terhadap Energi Bangkitan Material *Piezoelectric* (V_p, I, dan P)

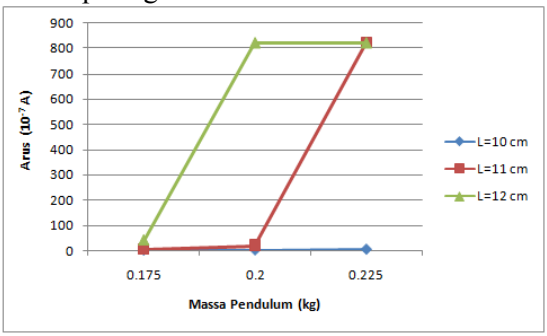
Berikut merupakan data dari simulasi untuk energi listrik yang dihasilkan dari mekanisme pembangkit listrik tenaga gelombang air *single* pendulum vertikal – ponton perahu menggunakan material *piezoelectric*.

Tabel 4.14 Nilai Energi Listrik dengan Variasi Massa Pendulum

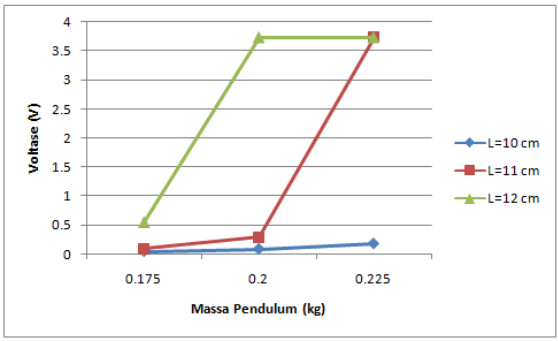
Frekuensi Gelombang Air (Hz)	Panjang Lengan Pendulum (m)	Massa Pendulum (kg)	Voltase (V)	Arus (A x 10^{-7})	Daya (W x 10^{-7})
0.5	0.1	0.175	0.0459	1.72	0.136
		0.2	0.0864	2.722	0.305
		0.225	0.1808	5.6144	1.645

	0.11	0.175	0.0997	5.0921	0.434
		0.2	0.2974	20.565	6.285
		0.225	3.7304	823.22	427.54
	0.12	0.175	0.554	41.801	22.541
		0.2	3.7304	823.22	427.54
		0.225	3.7304	823.22	427.54

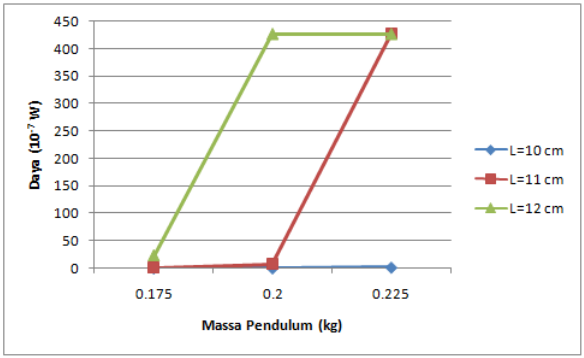
Dari data pada tabel di atas maka bisa kita buat dalam grafik excel seperti gambar berikut.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.27 Grafik (a) voltase, (b) arus dan (c) daya untuk variasi massa pendulum

Dari gambar di atas dapat kita lihat bahwa energi listrik meliputi tegangan bangkitan, arus dan daya meningkat seiring dengan semakin besarnya massa pendulum yang digunakan. Untuk grafik voltase, pada saat massa pendulum sebesar 0.175 gr dengan panjang lengan pendulum yaitu 10 cm, nilai tegangan yang dihasilkan sebesar 0.0459 V. nilai tegangan terbesar yang didapatkan sebesar 3.7304 V pada saat menggunakan massa pendulum sebesar 0.225 kg dengan panjang lengan pendulum sebesar 12 cm. Untuk grafik arus memiliki trendline yang naik, dimana nilai arus terendah yaitu 1.72 x 10^{-7} Ampere pada saat menggunakan pendulum dengan massa sebesar 0.175 kg dengan panjang sebesar 10 cm. Sedangkan nilai terbesar yaitu 8.23 x 10^{-5} Ampere pada saat menggunakan pendulum dengan massa 0.225 gr dan panjang 12 cm. Untuk nilai daya didapatkan dari perkalian antara voltase dengan arus. Dengan daya terendah sebesar 0.136 x 10^{-7} W dan nilai tertinggi sebesar 4.2754 x 10^{-5} W. Nilai optimum yang didapatkan dari simulasi ini lebih besar daripada hasil dari simulasi pada penelitian sebelumnya yang menggunakan *rotary generator*, dimana nilai energi listrik optimum yang dihasilkan yaitu 0.13 mV untuk voltase, 0.14 mA untuk arus, dan 1.86 x 10^{-4} mW untuk daya. Nilai

optimal energi listrik didapat ketika massa pendulum yang digunakan sebesar 225 gr dengan panjang lengan pendulum 11 cm dan massa pendulum 200 gr dengan panjang lengan pendulum 12 cm. Penambahan massa pendulum di atas titik optimal tidak akan mempengaruhi energi bangkitan yang dihasilkan dikarenakan kemampuan dari material *piezoelectric* yang terbatas. Untuk panjang lengan pendulum 11 cm dapat dilihat pada grafik di atas bahwa terdapat peningkatan yang drastis dari massa pendulum 200 gr dan massa pendulum 225 gr, hal tersebut dikarenakan putaran *blade* yang jauh lebih besar ketika massa pendulum 225 gr daripada ketika massa pendulum 200 gr.

Nilai tegangan bangkitan dari material *piezoelectric* didapatkan dari persamaan sebagai berikut.

$$V_p = \frac{3\, d_{31}\, E\, w\, t\, x_p}{4\, C} \qquad (2.30)$$

Dimana :

V_p = Tegangan bangkitan (V)
d_{31} = Konstanta Regangan *Piezoelectric* (C/N)
E = Modulus Young (N/m^2)
w = Lebar Material *Piezoelectric* (m)
t = Tebal Material *Piezoelectric* (m)
x_p = Defleksi Material *Piezoelectric* (m)
C = Kapasitansi Material *Piezoelectric* (F)

Dari persamaan tersebut dapat dilihat bahwa tegangan bangkitan berbanding lurus dengan defleksi material *piezoelectric* yang terjadi. Sehingga dengan semakin besarnya defleksi material *piezoelectric* maka energi listrik yang dihasilkan juga semakin besar pula. Defleksi material *piezoelectric* dipengaruhi oleh gaya*impact* yang mengenainya. Sedangkan gaya*impact* sendiri berbanding lurus dengan kecepatan putar dari *blade*. Dengan semakin besar massa pendulum maka putaran *blade* semakin besar pula karena momentum yang diterima oleh pendulum semakin besar. Untuk besar arus juga berbanding lurus dengan gaya*impact* sehingga semakin besar massa pendulum

maka akan semakin besar pula arus yang dihasilkan. Sementara besar daya didapatkan dari persamaan berikut.

$P = V . I$

Sehingga dengan semakin besar tegangan dan arus maka daya yang dihasilkan akan semakin besar pula. Dari grafik hasil simulasi yang telah dilakukan maka sudah sesuai dengan teori yang ada.

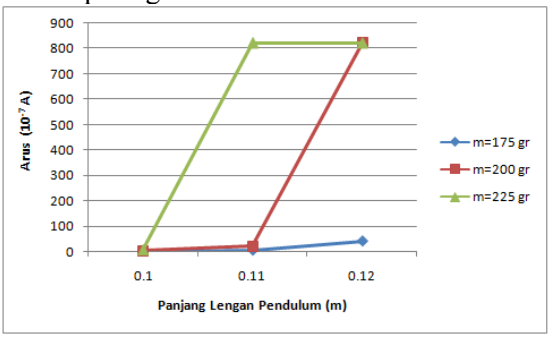
4.6.8. Pengaruh Variasi Panjang Lengan Pendulum terhadap Energi Bangkitan Material *Piezoelectric* (V_p, I, dan P)

Berikut merupakan data dari simulasi untuk energi listrik yang dihasilkan dari mekanisme pembangkit listrik tenaga gelombang air *single* pendulum vertikal – ponton perahu menggunakan material *piezoelectric*.

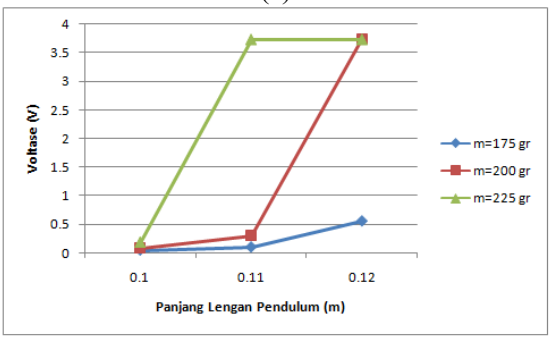
Tabel 4.15 Nilai Energi Listrik dengan Variasi Panjang Lengan Pendulum

Frekuensi Gelombang Air (Hz)	Massa Pendulum (kg)	Panjang Lengan Pendulum (m)	Voltase (V)	Arus (A x 10^{-7})	Daya (W x 10^{-7})
0.5	0.175	0.1	0.0459	1.72	0.136
		0.11	0.0997	5.0921	0.434
		0.12	0.554	41.801	22.541
	0.2	0.1	0.0864	2.722	0.305
		0.11	0.2974	20.565	6.285
		0.12	3.7304	823.22	427.54
	0.225	0.1	0.1808	5.6144	1.645
		0.11	3.7304	823.22	427.54
		0.12	3.7304	823.22	427.54

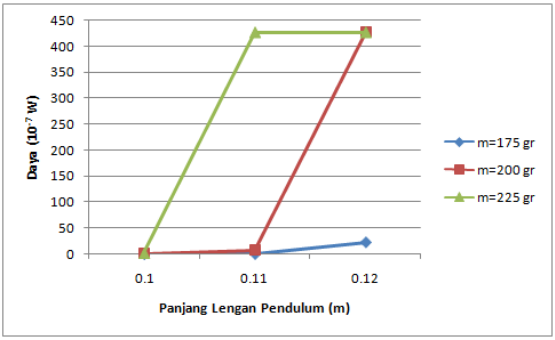
Dari data pada tabel di atas maka bisa kita buat dalam grafik excel seperti gambar berikut.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.28 Grafik (a) voltase, (b) arus dan (c) daya untuk variasi panjang lengan pendulum

Dari gambar di atas dapat kita lihat bahwa energi listrik meliputi tegangan bangkitan, arus dan daya meningkat seiring dengan semakin besarnya panjang lengan pendulum yang digunakan. Untuk grafik voltase, pada saat panjang lengan pendulum sebesar 10 cm dengan massa pendulum 0.175 gr, nilai tegangan yang dihasilkan sebesar 0.0459 V. nilai tegangan terbesar yang didapatkan sebesar 3.7304 V. Untuk grafik arus memiliki trendline yang naik, dimana nilai arus terendah yaitu 1.72 x 10^{-7} Ampere pada saat menggunakan panjang lengan pendulum sebesar 12 cm dengan massa pendulum sebesar 0.225 kg. Sedangkan nilai terbesar yaitu 8.23 x 10^{-5} Ampere. Untuk nilai daya didapatkan dari perkalian antara voltase dengan arus. Dengan daya terendah sebesar 0.136 x 10^{-7} W dan nilai tertinggi sebesar 4.2754 x 10^{-5} W. Nilai optimum yang didapatkan dari simulasi ini lebih besar daripada hasil dari simulasi pada penelitian sebelumnya yang menggunakan *rotary generator*, dimana nilai energi listrik optimum yang dihasilkan yaitu 0.14 mV untuk voltase, 0.15 mA untuk arus, dan 2.04 x 10^{-4} mW untuk daya. Nilai optimal energi listrik didapat ketika panjang lengan pendulum yang digunakan sebesar 12 cm dengan massa pendulum 200 gr dan panjang lengan pendulum 11 cm dengan massa pendulum 225 gr. Penambahan panjang lengan pendulum di atas titik optimal tidak akan mempengaruhi energi bangkitan yang dihasilkan dikarenakan kemampuan dari material *piezoelectric* yang terbatas. Untuk massa pendulum 200 gr dapat dilihat pada grafik di atas bahwa terdapat peningkatan yang drastis dari panjang lengan pendulum 11 cm dan panjang lengan pendulum 12 cm, hal tersebut dikarenakan putaran *blade* yang jauh lebih besar ketika panjang lengan pendulum 12 cm daripada ketika panjang lengan pendulum 11 cm.

Nilai tegangan bangkitan dari material *piezoelectric* didapatkan dari persamaan sebagai berikut.

$$V_p = \frac{3\, d_{31}\, E\, w\, t\, x_p}{4\, C} \qquad (2.30)$$

Dimana :

V_p = Tegangan bangkitan (V)
d_{31} = Konstanta Regangan *Piezoelectric* (C/N)
E = Modulus Young (N/m^2)
w = Lebar Material *Piezoelectric* (m)
t = Tebal Material *Piezoelectric* (m)
x_p = Defleksi Material *Piezoelectric* (m)
C = Kapasitansi Material *Piezoelectric* (F)

Dari persamaan tersebut dapat dilihat bahwa tegangan bangkitan berbanding lurus dengan defleksi material *piezoelectric* yang terjadi. Sehingga dengan semakin besarnya defleksi material *piezoelectric* maka energi listrik yang dihasilkan juga semakin besar pula. Defleksi material *piezoelectric* dipengaruhi oleh gaya*impact* yang mengenainya. Sedangkan gaya*impact* sendiri berbanding lurus dengan kecepatan putar dari *blade*. Dengan semakin besar panjang lengan pendulum maka putaran *blade* semakin besar pula karena momentum yang diterima oleh pendulum semakin besar. Untuk besar arus juga berbanding lurus dengan gaya*impact* sehingga semakin besar panjang lengan pendulum maka akan semakin besar pula arus yang dihasilkan. Sementara besar daya didapatkan dari persamaan berikut.

P = V . I

Sehingga dengan semakin besar tegangan dan arus maka daya yang dihasilkan akan semakin besar pula. Dari grafik hasil simulasi yang telah dilakukan maka sudah sesuai dengan teori yang ada.

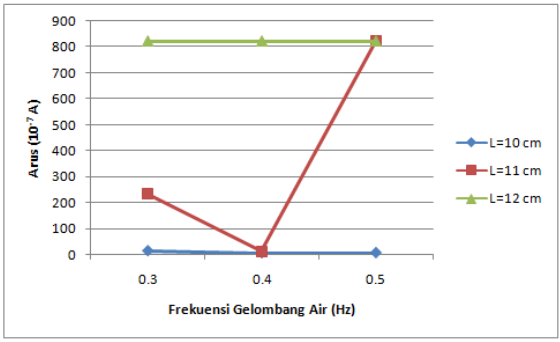
4.6.9. Pengaruh Variasi Frekuensi Gelombang Air Frekuensi Gelombang Air terhadap Energi Bangkitan Material *Piezoelectric* (V_p, I, dan P)

Berikut merupakan data dari simulasi untuk energi listrik yang dihasilkan dari mekanisme pembangkit listrik tenaga gelombang air *single* pendulum vertikal – ponton perahu menggunakan material *piezoelectric*.

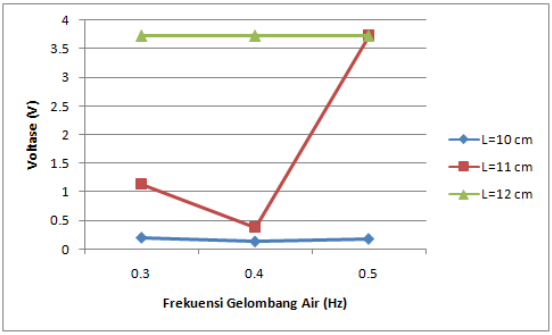
Tabel 4.15 Nilai Energi Listrik dengan Variasi Frekuensi Gelombang Air

Massa Pendulum (kg)	Panjang Lengan Pendulum (m)	Frekuensi Gelombang Air (Hz)	Voltase (V)	Arus (A x 10^{-7})	Daya (W x 10^{-7})
0.225	0.1	0.3	0.2009	13.395	3.2633
		0.4	0.1368	4.9626	1.266
		0.5	0.1808	5.6144	1.645
	0.11	0.3	1.1315	233.45	322.8
		0.4	0.3851	12.009	7.0461
		0.5	3.7304	823.22	427.54
	0.12	0.3	3.7304	823.22	427.54
		0.4	3.7304	823.22	427.54
		0.5	3.7304	823.22	427.54

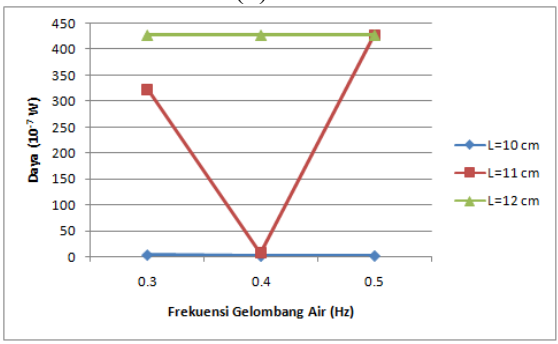
Dari data pada tabel di atas maka bisa kita buat dalam grafik excel seperti gambar berikut.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.29 Grafik (a) voltase, (b) arus dan (c) daya untuk variasi panjang lengan pendulum

Dari gambar 4.29 di atas dapat kita lihat bahwa energi listrik meliputi tegangan bangkitan, arus dan daya memiliki trendline seperti huruf 'V' dimana nilai voltase, arus dan daya yang dihasilkan oleh material *piezoelectric* akan turun saat frekuensi meningkat dari 0.3 Hz ke 0.4 Hz, dan kemudian nilai tersebut akan meningkat saat frekuensi dinaikkan menjadi 0.5 Hz. Namun untuk grafik saat menggunakan lengan pendulum dengan panjang 12 cm, trendline grafik terlihat datar hal tersebut dikarenakan material *piezoelectric* sudah berada dalam kondisi maksimal

dalam menghasilkan energi listrik. Untuk grafik energi diatas meliputi voltase, arus dan daya memiliki nilai terendah pada saat frekuensi gelombang air 0.4 Hz dengan panjang lengan pendulum 10 cm dan nilai tertinggi pada saat frekuensi 0.5 Hz. Nilai optimum yang didapatkan dari simulasi ini lebih besar daripada hasil dari simulasi pada penelitian sebelumnya yang menggunakan *rotary generator*, dimana nilai energi listrik optimum yang dihasilkan yaitu 0.135 mV untuk voltase, 0.14 mA untuk arus, dan 1.86 x 10^{-4} mW untuk daya. Nilai optimal energi listrik didapat ketika frekuensi gelombang air 0.5 Hz dengan panjang lengan pendulum 11 cm dan frekuensi 0.4 Hz dengan panjang lengan pendulum 12 cm. Penambahan frekuensi gelombang air di atas titik optimal tidak akan mempengaruhi energi bangkitan yang dihasilkan dikarenakan kemampuan dari material *piezoelectric* yang terbatas.

Nilai tegangan bangkitan dari material *piezoelectric* didapatkan dari persamaan sebagai berikut.

$$V_p = \frac{3\, d_{31}\, E\, w\, t\, x_p}{4\, C} \qquad (2.30)$$

Dimana :

V_p = Tegangan bangkitan (V)
d_{31} = Konstanta Regangan *Piezoelectric* (C/N)
E = Modulus Young (N/m^2)
W = Lebar Material *Piezoelectric* (m)
t = Tebal Material *Piezoelectric* (m)
x_p = Defleksi Material *Piezoelectric* (m)
C = Kapasitansi Material *Piezoelectric* (F)

Dari persamaan tersebut dapat dilihat bahwa tegangan bangkitan berbanding lurus dengan defleksi material *piezoelectric* yang terjadi. Sehingga dengan semakin besarnya defleksi material *piezoelectric* maka energi listrik yang dihasilkan juga semakin besar pula. Defleksi material *piezoelectric* dipengaruhi oleh gaya*impact* yang mengenainya. Sedangkan gaya*impact* sendiri berbanding lurus dengan kecepatan putar dari *blade*. Dengan semakin

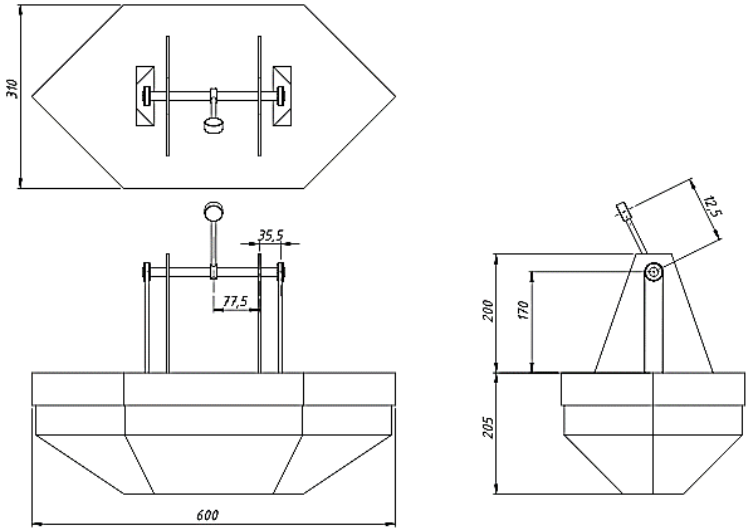
besar frekuensi gelombang air maka putaran *blade* semakin besar pula karena momentum yang diterima oleh pendulum semakin besar. Untuk besar arus juga berbanding lurus dengan gaya*impact* sehingga semakin besar frekuensi gelombang air maka akan semakin besar pula arus yang dihasilkan. Sementara besar daya didapatkan dari persamaan berikut.

$$P = V \cdot I$$

Sehingga dengan semakin besar tegangan dan arus maka daya yang dihasilkan akan semakin besar pula. Dari grafik yang telah didapatkan tidak sesuai dengan teori, ini dikarenakan dari input diskrit sudut alfa (α) yang mengakibatkan putaran *blade* menjadi tidak konstan, sehingga gaya *impact* yang diterima oleh material *piezoelectric* tidak selalu dalam kondisi optimalnya.

LAMPIRAN

Lampiran 1: Dimensi Alat PLTGA *Single* Pendulum – Ponton Perahu



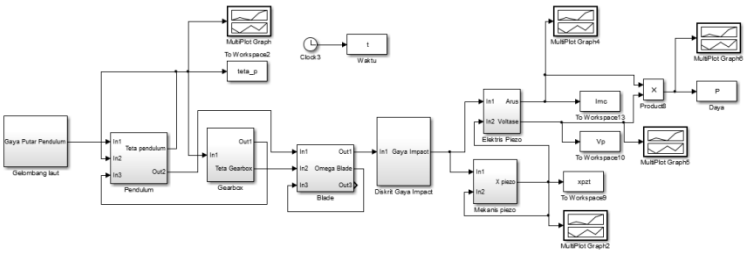
Satuan dalam [mm]

Lampiran 2: M-file untuk Simulasi Simulink Matlab

```
%% parameter pendulum
g=9.8;          % [m/s2] percepatan gravitasi
Mp=0.225;       % [kg] massa pendulum, variasi mp(0.175
0.2 0.225)kg
Mb=0.0169;      % [kg] massa batang pendulum
L=0.12;         % [m] panjang lengan, variasi (0.1 0.11
0.12)m
Kp=563.889;     % [Nm/rad] konstanta kekakuan poros p
(Kp equivalent)
Wk=5.8808;      % [N] gaya berat kapal, (TA sblmnya)
%% Besar sudut alfa
% sudut alfa frekuensi 0.3 Hz
alfa1=0.267;
alfa2=0.133;
alfa3=0;
alfa4=0.133;
% sudut alfa frekuensi 0.4 Hz
% alfa1=0.293;
% alfa2=0.146;
% alfa3=0;
% alfa4=0.146;
% sudut alfa frekuensi 0.5 Hz
% alfa1=0.317;
% alfa2=0.158;
% alfa3=0;
% alfa4=0.158;
%% time delay
% time delay frekuensi 0.3 Hz
t=0.416;
% time delay frekuensi 0.4 Hz
% t=0.3125;
% time delay frekuensi 0.5 Hz
% t=0.25;
%% parameter roda gigi
JA=3.13875*(10^-6);    % [kg.m2] inersia sprocket A
JB=3.13875*(10^-6);    % [kg.m2] inersia sprocket B
J1=4.31063*(10^-6);    % [kg.m2] inersia gear 1
J23=9.5625*(10^-7);    % [kg.m2] inersia gear 23
J4=2.65625*(10^-7);    % [kg.m2] inersia gear 4
J5=1.78125*(10^-6);    % [kg.m2] inersia gear 5
J6=1.323*(10^-6);      % [kg.m2] inersia gear 6
J7=1.323*(10^-6);      % [kg.m2] inersia gear 7
```

```
J8=4.12335*(10^-6);   % [kg.m2] inersia gear 8
J9=5.75*(10^-6);      % [kg.m2] inersia gear 9
Jbld=24.5*(10^-7);    % [kg.m2] inersia blade
Kd1=791.2082;         % [Nm/rad] Kekakuan poros d1
Kd2=359.6401;         % [Nm/rad] Kekakuan poros d
rA=0.0225;   % [m] jari2 sprocket A
rB=0.0225;   % [m] jari2 sprocket B
r1=0.0275;   % [m] jari2 gear 1
r2=0.01;     % [m] jari2 gear 2
r3=0.02;     % [m] jari2 gear 3
r4=0.012;    % [m] jari2 gear 4
r5=0.025;    % [m] jari2 gear 5
r6=0.02;     % [m] jari2 gear 6
r7=0.02;     % [m] jari2 gear 7
r8=0.02;     % [m] jari2 gear 8
r9=0.025;    % [m] jari2 gear 9
%% Parameter Piezoelectric dan Blade
mbld=0.016;             % [kg] massa blade
rbld=0.0175;            % [m] jari2 blade
mpzt=0.0006;            % [kg] massa piezoelectric
wpzt=0.0006;            % [m] lebar piezoelectric
Kpzt=17.5;              % [N/m] konstanta kekakuan
piezoelectric
d=0.005;                % [Ns/m] konstanta redaman
piezoelectric
Cpzt= 2.44*(10^-10);    % [F] kapasitansi
piezoelectric
k31=0.12;               % [%] electromechanical
coupling factor
d31=23*(10^-12);        % [C/N] konstanta regangan
piezoelectric
E=4*(10^9);             % [N/m2] modulus young
t=110*(10^-6);          % [m] tebal piezoelectric
lpzt=17.8*(10^-3);      % [m] panjang piezoelectric
%% Perhitungan
Wp=Mp*g;       % [N] gaya berat pendulum
Wb=Mb*g;       % [N] gaya berat batang
Wtot=Wk+Wp+Wb; % [N] gaya berat total
N1=r2/r1;      % rasio jari2 gear 2 & 1
N2=r4/r3;      % rasio jari2 gear 4 & 3
N3=r7/r6;      % rasio jari2 gear 4 & 1
N4=r8/r7;      % rasio jari2 gear 9 & 5
N5=r7/r6;      % rasio jari2 gear 7 & 6
```

Lampiran 3: Simulasi Block Diagram Mekanisme PLTGA *Single* Pendulum Vertikal Ponton – Perahu Menggunakan Metode *Cantielever Piezoelectric*



BAB V
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Rancangan untuk alat Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Air tipe *Single* Pendulum - Ponton Perahu seperti diperlihatkan pada gambar 4.1 dengan dimensi yang sudah ditentukan (di lampiran).
2. Besar dari perpindahan sudut pendulum (θ_p), defleksi material *piezoelectric* (x_{pzt}), frekuensi pukul yang diterima oleh material *piezoelectric* dan energi listrik meliputi voltase, arus serta daya berbanding lurus dengan massa pendulum yang digunakan. Besar defleksi terbesar yaitu 6 mm dengan frekuensi pukul yang diterima material sebanyak 100 dalam satu gelombang, energi listrik tertinggi meliput voltase sebesar 3.7304 V, arus 8.2322×10^{-5} A dan daya 4.2754×10^{-5} W pada saat massa pendulum 225 gr.
3. Besar dari perpindahan sudut pendulum (θ_p), defleksi material *piezoelectric* (x_{pzt}), frekuensi pukul yang diterima oleh material *piezoelectric* dan energi listrik meliputi voltase, arus serta daya berbanding lurus dengan panjang lengan pendulum yang digunakan. Besar defleksi terbesar yaitu 6 mm dengan frekuensi pukul yang diterima material sebanyak 100 dalam satu gelombang, energi listrik tertinggi meliput voltase sebesar 3.7304 V, arus 8.2322×10^{-5} A dan daya 4.2754×10^{-5} W pada saat panjang lengan pendulum 12 cm.
4. Besar dari perpindahan sudut pendulum (θ_p), defleksi material *piezoelectric* (x_{pzt}), frekuensi

pukul yang diterima oleh material *piezoelectric* dan energi listrik meliputi voltase, arus serta daya dipengaruhi oleh frekuensi gelombang air. Besar defleksi terbesar yaitu 6 mm dengan frekuensi pukul yang diterima material sebanyak 100 dalam satu gelombang, energi listrik tertinggi meliput voltase sebesar 3.7304 V, arus 8.2322 x 10^{-5} A dan daya 4.2754 x 10^{-5} W pada saat frekuensi gelombang air 0.5 Hz.

5.2. Saran

Saran untuk penelitian selanjutnya dengan topik yang sama antara lain:

1. Memperbanyak variasi jumlah sudut ponton (α) sebagai input ke sistem, agar gerak osilasi dari pendulum mendekati keadaan sebenarnya.
2. Menggunakan poros yang sangat kaku (rigid) sehingga perpindahan sudut dari input *gearbox* menuju putaran *blade* tetap besar.
3. Melakukan eksperimen untuk alat pembangkit listrik tenaga gelombang air *single* pendulum-ponton perahu menggunakan metode *cantilever piezoelectric* sehingga dapat dibandingkan antara simulasi dengan eksperimennya.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Noerpamungkas, A. 2013. "**Modeling Flat Pendulum and Simulating Its Validation at The Pendulum – Flat Pontoon Model Sea Wave Electric Generator Application**". Sepuluh Nopember Institute of Technology.

[2] Rombe, Efraim. 2015. **Analisa Perbandingan Energi Listrik yang Dihasilkan Mekanisme PLTGL Sistem Ponton Perahu *Single* dan *Triple* Pendulum Vertikal dengan Variasi Massa Pendulum**. Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

[3] Nur, Saifudin. 2016. **Pemodelan dan Analisa Karakteristik Energi Listrik yang Dihasilkan oleh Model Mekanisme Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Air Tipe *Single* Pendulum Vertikal – Ponton Perahu.** Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

[4] Romano, Gusti Fajar. 2015. **Studi Karakteristik Voltase Bangkitan yang Dihasilkan oleh Mekanisme Vibration Energy Harvesting Menggunakan Metode Cantilever Piezoelectric dengan Variasi Jumlah Blade dan Frekuensi Sumber Getar.** Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

[5] McCormick, E.M. 2010. **Ocean Engineering Mechanics with Applications**. New York: Camridge University Press.

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

[7] Sularso, Kiyokatsu Suga. 2004. **Dasar Perencanaan dan Pemilihan Elemen Mesin**. Jakarta: PT Pradnya Paramita.

[8] Close, M.C., Frederic, K,D., dan Newell, C.J. 2002. **Modelling and Analysis of Dynamic System (third ed.)**. Hoboken: Jhon Wiley & Sons , Inc.

[9] Krisdianto, Andy Noven. 2011. **Studi Karakteristik Energi yang Dihasilkan Mekanisme Vibration Energy Harvesting dengan Metode Piezoelectric untuk Pembebanan Frontal dan Lateral**. Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

BIODATA PENULIS

Rifqiah Sabrina Yusuf dilahirkan di Malang, 11 April 1993 anak yang terlahir dari orang tua terbaik bernama Yusuf dan Anik. Riwayat pendidikan penulis diawali di MI Al-Ma'arif 12 Ardimulyo pada tahun 1999-2005. Penulis melanjutkan pendidikannya di SMPN 1 Singosari pada tahun 2005-2008 kemudian melanjutkan pendidikannya di SMAN 3 Malang pada tahun 2008-2011. Selanjutnya penulis melanjutkan pendidikan jenjang S-1 Jurusan Teknik Mesin di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya melalui jalur SNMPTN Tulis.

Penulis aktif dalam kegiatan akademik maupun organisasi selama perkuliahan. Penulis juga pernah menjadi asisten Laboratorium Desain dan Perpindahan Panas. Penulis juga mendapatkan nominasi Mahasiswa Berprestasi pada tahun 2015. Untuk organisasi penulis aktif menjadi staff external Mesin Music Club tahun 2013-2014, kemudian menjadi kepala biro akademik Mesin Music Club pada tahun 2014-2015.

Motto hidup penulis "Be the Best of Yourself" menjadikan penulis lebih baik dalam mengerjakan semua hal. Untuk semua informasi dan masukan terkait tugas akhir ini dapat menghubungi penulis melalui email sabrina.rifqiah@gmail.com.

"Halaman ini sengaja dikosongkan"