



TESIS - TM142501

**STUDI KARAKTERISTIK MODEL PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA
GELOMBANG LAUT (PLTGL) TIPE PENGUNGKIT- GENERATOR
LINIER DAN GENERATOR ROTARY DENGAN VARIASI VOLUME
PELAMPUNG**

**Yoga Ahdiat Fakhrudi
NRP. 2113 205 004**

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

**PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN DESAIN SISTEM MEKANIKAL
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2015**



THESIS - TM142501

**STUDY CHARACTERISTICS MODEL SEA WAVE POWER PLANT
(PLTGL) TYPE LEVERAGE AND GENERATOR ROTARY LINEAR
GENERATOR WITH BUOY VARIATION VOLUME**

**Yoga Ahdiat Fakhrudi
NRP. 2113 205 004**

**Supervisor:
Dr. Wiwiek Hendrowati, ST. MT.**

**MASTER PROGRAMME FIELD STUDY OF DESIGN OF
MECHANICAL SYSTEM DEPARTEMENT OF
MECHANICAL ENGINEERING FACULTY OF
INDUSTRIAL TECHNOLOGY SEPULUH NOPEMBER
INSTITUTE OF TECHNOLOGY SURABAYA
2016**

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (MT)

di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

oleh:

YOGA AHDIAT FAKHRUDI

Nrp. 211 320 5004

Tanggal Ujian: 31 Desember 2015

Periode Wisuda: Maret 2016

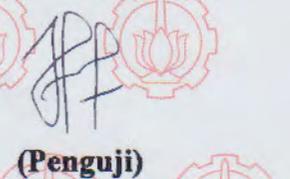
Disetujui oleh:

1. Dr. Wiwiek Hendrowati, ST., MT.
NIP. 19700412 199703 2 003



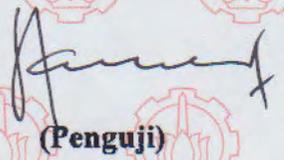
(Pembimbing)

2. Alief Wikarta, ST., MSc., Ph.D.
NIP. 19820210 200604 1 002



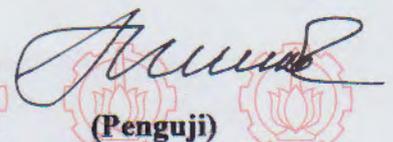
(Penguji)

3. Dr.Eng. Harus Laksana Guntur, ST., M.Eng.
NIP. 19750511 199903 1 001



(Penguji)

4. Prof. Ir. I Nyoman Sutantra, MSc., Ph.D.
NIP. 19510605 197803 1 002



(Penguji)

Direktur Program Pascasarjana,



Prof. Ir. Djauhar Manfaat, M.Sc., Ph.D

NIP. 19601202 1987011001

STUDI KARAKTERISTIK MODEL PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GELOMBANG LAUT (PLTGL) TIPE PENGUNGKIT- GENERATOR LINIER DAN GENERATOR ROTARY DENGAN VARIASI VOLUME PELAMPUNG

Nama Mahasiswa

: Yoga Ahdiat Fakhrudi

NRP

: 2113205004

Pembimbing

: Dr. Wiwiek Hendrowati, S.T., M.T.

ABSTRAK

Sumber daya energi yang sampai sekarang masih menjadi tumpuan adalah sumber daya fosil. Sumber daya fosil memiliki sifat tidak terbarukan sehingga sewaktu-waktu dapat habis. Gelombang air laut merupakan sumber daya yang ketersediaannya melimpah sehingga perlu dilakukan penelitian mengenai karakteristik pembangkit listrik tenaga gelombang laut (PLTGL) yang dilakukan pada skala laboratorium.

Metode penelitian yang digunakan adalah eksperimen dan simulasi pada mekanisme PLTGL tipe pengungkit generator linier dengan variasi titik tumpu dan volume pelampung. Prinsip kerja mekanisme adalah memanfaatkan gerak naik turun pelampung yang disebabkan gerakan gelombang air laut. Pelampung yang bergerak naik turun akan menggerakkan lengan pengungkit sehingga lengan pengungkit dapat menggerakkan magnet linier. Langkah pertama dalam penelitian ini adalah melakukan pemodelan mekanisme PLTGL tipe pengungkit generator linier. Tahap selanjutnya adalah melakukan eksperimen terhadap mekanisme PLTGL tipe pengungkit generator linier. Untuk mendapatkan hasil pemodelan yang valid maka dilakukan validasi pemodelan terhadap hasil eksperimen yang telah didapat. Tahap terakhir adalah mengembangkan model mekanisme PLTGL dengan penambahan *gearbox* dan penggantian generator linier menjadi generator rotary. Pengembangan dilakukan menggunakan metode simulasi dengan variasi titik tumpu dan volume pelampung.

Hasil simulasi mekanisme PLTGL tipe pengungkit generator linier didapat tegangan maksimum sebesar 5.338 volt dengan daya sebesar 0.0303 watt pada variasi titik tumpu T2, volume pelampung P3, dan frekuensi f3. Hasil eksperimen mekanisme PLTGL tipe pengungkit generator linier didapat tegangan maksimum sebesar 2.057 volt dengan daya sebesar 0.014 watt pada variasi yang sama dengan simulasi. Error rata-rata yang terjadi antara simulasi terhadap eksperimen sebesar 38.522%, dengan efisiensi mekanisme sebesar 29.668% sedangkan. Untuk pemodelan generator rotary tegangan listrik maksimum yang dapat dibangkitkan sebesar 10.38676 volt dengan daya maksimum sebesar 0.02227 watt pada variasi titik tumpu T2, volume pelampung P3, dan frekuensi f3.

Kata kunci : simulasi, eksperimen, titik tumpu, pelampung, desain, energi, gelombang laut, *gearbox*, generator linier, generator rotary

STUDY CHARACTERISTICS MODEL SEA WAVE POWER PLANT (PLTGL) TYPE LEVER- LINEAR GENERATOR AND GENERATOR WITH ROTARY VOLUME VARIATION BUOY

Nama : Yoga Ahdiat Fakhruddin
NRP : 2113205004
Supervisor : Dr. Wiwiek Hendrowati, S.T., M.T.

ABSTRACT

Energy resources is still a pedestal is a fossil resources. Resource non-renewable fossil has properties that can be discharged at any time. Waves of sea water is a resource that is abundant ketersediaanya so necessary to study the characteristics of the sea wave power plant (PLTGL) were performed on a laboratory scale.

The method used was experimental and simulation at PLTGL mechanism lever-type linear generator with variations fulcrum and volume buoys. The working principle is the mechanism for utilizing the up and down movement of the buoy caused sea waves. A float that moves up and down will move the arm lever so that the lever arm can move the linear magnet. The first step is to perform modeling PLTGL mechanism lever-type linear generator. The next step is to experiment with the type of lever mechanism PLTGL linear generator. To obtain a valid modeling results then validated modeling of the experimental results that have been obtained. The last stage is to develop a model PLTGL mechanism with the addition of gearbox and generator replacement linear into rotary generator. Development is done using simulation methods with variations fulcrum and volume buoys.

The simulation results PLTGL mechanism lever-type linear generator obtained maximum voltage of 5338 volts with 0.0303 watts of power on the variation fulcrum T2, P3 buoys volume, and frequency f3. The experimental results PLTGL mechanism lever-type linear generator obtained maximum voltage of 2,057 volts with a power of 0014 watts at the same variation with the simulation. Average error that occurs between a simulation of the experiments by 38.522%, with 29.668% efficiency of the mechanism. For modeling rotary generator maximum voltage electricity can be generated at 10.38676 volts with a maximum power of 0.02227 watts to variations fulcrum T2, P3 buoys volume, and frequency f3.

Keywords: simulation, experiment, fulcrum, buoys, design, energy, ocean wave, gearbox, generator linear, rotary generator

KATA PENGANTAR

Dengan menyebut nama Allah SWT yang Maha Pengasih lagi Maha Panyayang, segala puja dan puji syukur atas kehadirat-Nya, yang telah melimpahkan rahmat, hidayah, dan inayah-Nya. Sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini dengan baik dan sesuai dengan apa yang diharapkan. Penulisan laporan tesis ini dimaksudkan sebagai syarat kelulusan untuk memperoleh gelar Magister Teknik bidang studi desain jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan laporan tesis ini telah banyak pihak yang membantu. Oleh karena itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah SWT dan Rosulnya Nabi Muhammad SAW
2. Bapak Djumain dan Ibu Siti Romziati selaku orang tua kandung yang selalu memberikan kasih sayang, mendoakan, menyemangati dan memberikan dukungan baik moral maupun spiritual kepada penulis yang tak ternilai harganya.
3. Istri penulis Yuli Astuti dan si kecil dalam kandunganya yang memberikan kekuatan dan semangat luar biasa agar penulis sesegera mungkin menyelesaikan tesis ini.
4. Gufran Hilmi aziz dan Maulida Ahyana Laily selaku adik-adik penulis yang selalu mendoakan penulis untuk tetap semangat dalam menyelesaikan tesis ini.
5. Ibu Dr. Wiwiek Hendrowati ST.MT selaku dosen pembimbing tesis yang telah memberi arahan dan petunjuk dalam penyusunan tesis ini.
6. Bapak Prof. I.N Sutantra, Bapak Dr.Eng, Bapak Dr.Eng Harus Laksana Guntur, ST., M.Eng, dan Bapak Alief Wikarta, ST., MSc., Ph.D. selaku dosen penguji.
7. Segenap dosen dan staff Teknik Mesin ITS yang telah memberikan bekal ilmu di masa perkuliahan.
8. Skriptyan Noor Hidayat, ST., MT. selaku sahabat penulis yang banyak memberikan bantuan, masukan, dan arahan kepada penulis.

9. I Made Susanto, ST., MT. selaku rekan satu tim dengan penulis yang banyak membantu penulis dalam menyelesaikan tesis ini.
10. Tim “PLTGL” baik S1 maupun S2, yang telah berjuang bersama-sama di laboratorium vibrasi dan sistem dinamis.
11. Seluruh teman seperjuangan S2 Teknik Mesin ITS.
12. Dan pihak-pihak lain yang telah membantu dan tidak dapat saya sebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan tesis ini masih jauh dari sempurna, oleh karena itu penulis dengan sangat terbuka menerima saran dan kritik yang konstruktif dari para pembaca guna meningkatkan kualitas penelitian selanjutnya dan semoga tesis ini bermanfaat.

Surabaya, Januari 2016

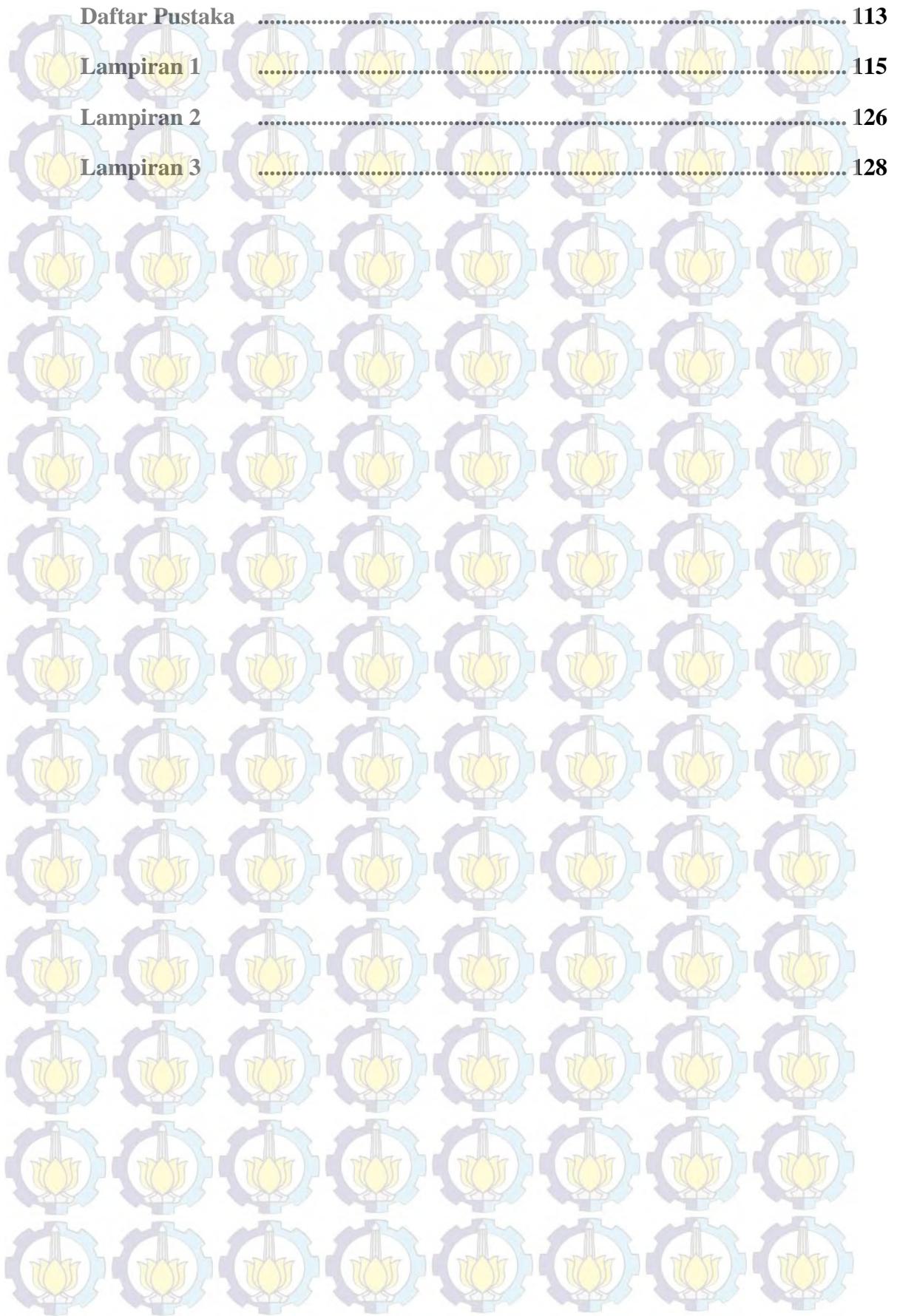
Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xvii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Manfaat Penelitian	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Kajian Pustaka	5
2.2 Teori Penunjang	15
2.2.1 Teori Gelombang Air Laut	15
2.2.2 Teori Gaya Gelombang Air Laut	17
2.2.3 Teori Dinamika Gerak	21
2.2.4 Teori Elektromagnetik	24
2.2.5 Analisa Gaya Pada Mekanisme	29
2.2.6 Analisa Daya yang Dihasilkan oleh Mekanisme	33
2.2.7 Analisa Daya yang Dihasilkan oleh Mekanisme	33
2.2.8 Efisiensi sistem PLTGL	34
BAB 3 METODE PENELITIAN	35
3.1 Studi Literatur	36

3.2	Identifikasi Masalah	36
3.3	Pemodelan Matematis	37
3.4	Uji Eksperimental Eksitasi Gelombang Air Laut	37
3.5	Simulasi Dengan <i>Mathlab Simulink</i>	38
3.6	Pengembangan Mekanisme	43
3.7	Analisa Hasil dan Pengolahan Data	47
BAB 4 ANALISA DAN PEMBAHASAN		49
4.1	PLTGL tipe pengungkit Generator linier	49
4.1.1	Pemodelan matematis PLTGL tipe pengungkit generator linier	49
4.1.2	Hasil Eksperimen mekanisme PLTGL tipe pengungkit generator linier	67
4.1.3	Error tegangan hasil simulasi dan tegangan hasil eksperimen	84
4.1.4	Efisiensi Mekanisme PLTGL tipe pengungkit generator linier	89
4.1.5	Validasi mekanisme PLTGL tipe pengungkit generator linier	91
4.1.6	Skala Mekanisme PLTGL tipe pengungkit generator linier	95
4.1.7	Penentuan titik tumpu dan volume pelampung maksimum	95
4.2	PLTGL tipe pengungkit generator rotary	96
4.2.1	Pemodelan matematis PLTGL tipe pengungkit generator rotary	98
4.2.2	Simulink PLTGL tipe pengungkit generator rotary	100
4.2.3	Hasil dan analisa	101
4.3	Perbandingan PLTGL tipe pengungkit Linier Generator dan rotary generator	106
BAB 5 KESIMPULAN		111
5.1.	Kesimpulan	111
5.2.	Saran	112

Daftar Pustaka	113
Lampiran 1	115
Lampiran 2	126
Lampiran 3	128



DAFTAR GAMBAR

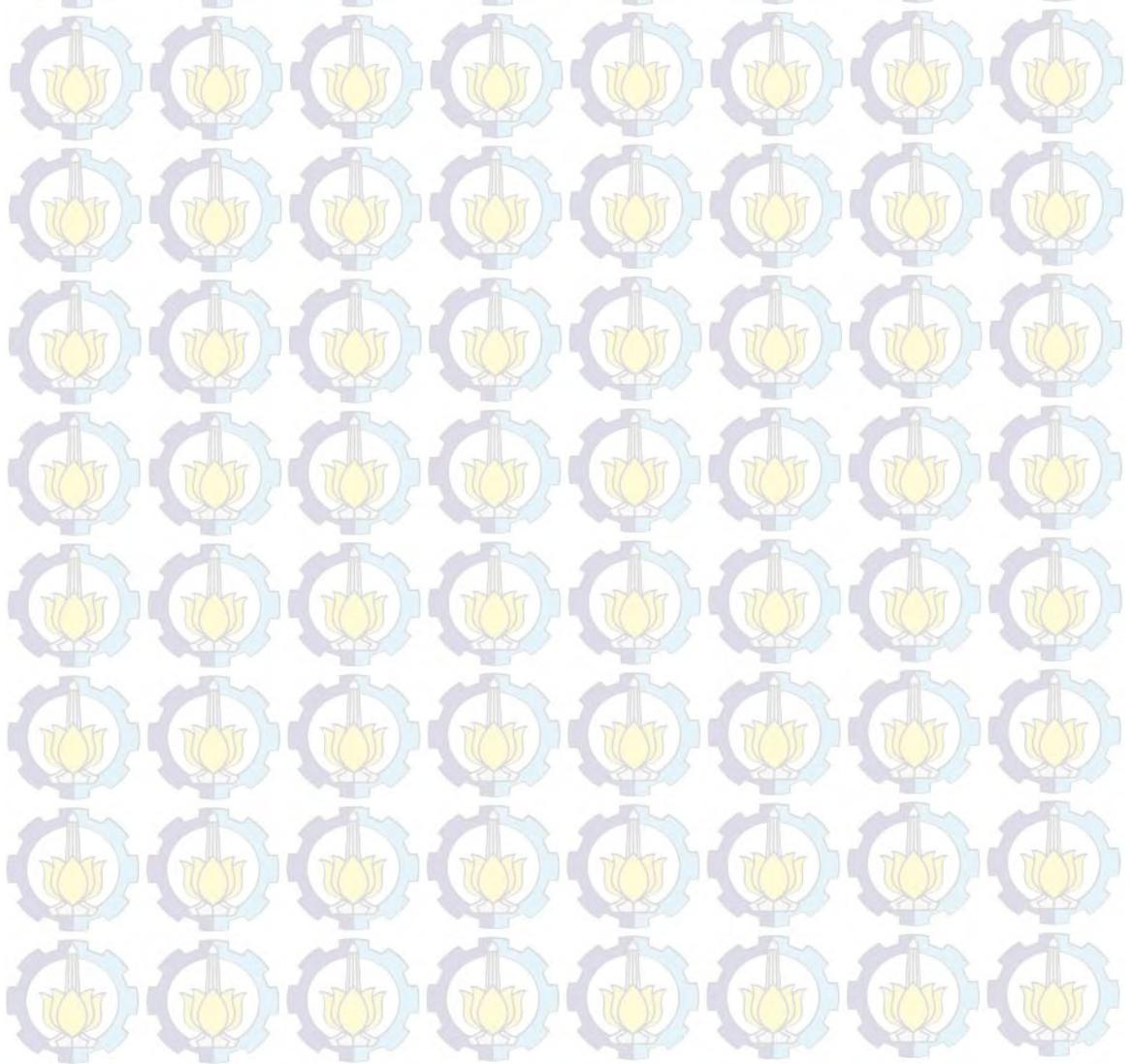
Gambar 2.1 Pembangkit listrik tenaga gelombang air laut oleh Wave Star Energy.....	6
Gambar 2.2 Skema pergerakan gelombang air laut pada <i>Oscillating Water Column</i> [6].....	7
Gambar 2.3 Skema pergerakan gelombang air laut pada <i>Oscillating Water Column</i> [7].....	7
Gambar 2.4 Rancang konfigurasi model pembangkit energi tenaga air laut dengan pneumatis [1].....	9
Gambar 2.5 AWS (Archimedes Wave Swing) oleh AWS Ocean Energy, Ltd [9]..	10
Gambar 2.6 Sketsa generator linier AWS dengan magnet permanen [8].....	10
Gambar 2.7 Desain generator linier [10].....	11
Gambar 2.8 Sketsa buoy, tali, dan linier generator untuk pembangkit tenaga air laut secara langsung [11].....	12
Gambar 2.9 Linear Magnetic Gears for Pseudo-Direct-Drive Oceanic Wave Energy [12].....	13
Gambar 2.10 <i>External Tubular Linear Permanent Magnet Generator</i> (ETLPMG) [13].....	14
Gambar 2.11 Karakteristik gelombang air laut linear [7].....	15
Gambar 2.12 Karakteristik gelombang laut nonlinier [15].....	16
Gambar 2.13 Analisa gaya yang dihasilkan pelampung [17].....	20
Gambar 2.14 Permukaan melintang pelampung yang terkena air [15].....	21
Gambar 2.15 Gaya-gaya yang bekerja pada pelampung.....	21
Gambar 2.16 Perbandingan rasio roda gigi [18].....	22
Gambar 2.17 torsi yang bekerja pada poros utama [19].....	23
Gambar 2.18 Gerak magnet dalam kumparan [20].....	25
Gambar 2.19 kuat medan magnet generator linier penampang melintang.....	26
Gambar 2.20 Susunan kawat pada kumparan generator linier.....	27
Gambar 2.21 Mekanisme kesetimbangan statis.....	30
Gambar 2.22 <i>Free Body Diagram</i> (FBD) mekanisme kesetimbangan statis.....	30
Gambar 2.23 Mekanisme kesetimbangan dinamis.....	32

Gambar 2.24 <i>Free Body Diagram</i> (FBD) mekanisme kesetimbangan dinamis.....	32
Gambar 3.1 Diagram alir metode penelitian PLTGL tipe pengungkit.....	35
Gambar 3.2 Diagram alir simulasi mekanisme PLTGL tipe pengungkit.....	38
Gambar 3.3 Diagram alir pengujian mekanisme PLTGL tipe pengungkit.....	39
Gambar 3.4 Kolam pengujian.....	40
Gambar 3.5 PLTGL tipe pengungkit.....	40
Gambar 3.6 Pelampung bola.....	41
Gambar 3.7 Batang pengungkit.....	42
Gambar 3.8 Magnet linier.....	42
Gambar 3.9 Kawat kumparan.....	43
Gambar 3.10 <i>Digital Storage Oscilloscope</i>	43
Gambar 3.11 Bagan pengembangan PLTGL tipe pengungkit.....	44
Gambar 3.12 Grafik voltase bangkitan yang dihasilkan pada penelitian sebelumnya [3].....	44
Gambar 3.13 Mekanisme pengembangan gearbox.....	45
Gambar 3.14 Aliran tenaga pada <i>gearbox</i> saat pelampung naik.....	45
Gambar 3.15 Aliran tenaga pada <i>gearbox</i> saat pelampung turun.....	46
Gambar 3.16 Mekanisme PLTGL beserta pengembangannya.....	46
Gambar 4.1 Simulator PLTGL tipe pengungkit generator linier.....	49
Gambar 4.2 Mekanisme Batang Pengungkit PLTGL.....	50
Gambar 4.3 <i>Free Body Diagram</i> (FBD) mekanisme batang PLTGL.....	50
Gambar 4.4 kuat medan magnet linier penampang melintang.....	51
Gambar 4.5 Susunan kawat pada kumparan generator linier.....	51
Gambar 4.6 Blok diagram PLTGL dengan linier generator.....	55
Gambar 4.7 Daya input pemodelan gelombang air laut.....	55
Gambar 4.8 Grafik respon energi yang dihasilkan pada titik tumpu 1 (T1) dengan variasi pelampung P1, P2, P3.....	56
Gambar 4.9 Grafik respon energi yang dihasilkan pada titik tumpu 1 (T2) dengan variasi pelampung P1, P2, P3.....	57
Gambar 4.10 Grafik respon energi yang dihasilkan pada titik tumpu 1 (T3) dengan variasi pelampung P1, P2, P3.....	57

Gambar 4.11 Grafik respon energi yang dihasilkan pada titik tumpu 1 (T1) dengan variasi pelampung P1, P2, P3.....	59
Gambar 4.12 Grafik respon energi yang dihasilkan pada titik tumpu 2 (T2) dengan variasi pelampung P1, P2, P3.....	59
Gambar 4.13 Grafik respon energi yang dihasilkan pada titik tumpu 3 (T3) dengan variasi pelampung P1, P2, P3.....	59
Gambar 4.14 Grafik respon energi yang dihasilkan pada titik tumpu 3 (T3) dengan variasi pelampung	61
Gambar 4.15 Grafik respon energi yang dihasilkan pada titik tumpu 2 (T2) dengan variasi pelampung	61
Gambar 4.16 Grafik respon energi yang dihasilkan pada titik tumpu 2 (T2) dengan variasi pelampung	62
Gambar 4.17 Hubungan frekuensi dan volume pelampung terhadap daya yang dihasilkan pada pada titik tumpu 1 (T1).....	64
Gambar 4.18 Hubungan frekuensi dan volume pelampung terhadap daya yang dihasilkan pada pada titik tumpu 2 (T2).....	65
Gambar 4.19 Hubungan frekuensi dan volume pelampung terhadap daya yang dihasilkan pada pada titik tumpu 3 (T3).....	66
Gambar 4.20 Eksperimen Mekanisme PLTGL tipe pengungkit generator linier	67
Gambar 4.21 Respon energi yang dihasilkan PLTGL pada frekuensi 1 Hz, T1, untuk P1, P2, dan P3.....	70
Gambar 4.22 Respon energi yang dihasilkan PLTGL pada frekuensi 1 Hz, T2, untuk P1, P2, dan P3.....	71
Gambar 4.23 Respon energi yang dihasilkan PLTGL pada frekuensi 1 Hz, T3, untuk P1, P2 dan P3.....	72
Gambar 4.24 Respon energi yang dihasilkan PLTGL pada frekuensi 2 Hz, T1, untuk P1, P2 dan P3.....	73
Gambar 4.25 Respon energi yang dihasilkan PLTGL pada frekuensi 2 Hz, T2, untuk P1, P2 dan P3.....	74
Gambar 4.26 Respon energi yang dihasilkan PLTGL pada frekuensi 3 Hz, T3, untuk P1, P2 dan P3.....	75

Gambar 4.27 Respon energi yang dihasilkan PLTGL pada frekuensi 3 Hz, T1, untuk P1, P2 dan P3	76
Gambar 4.28 Respon energi yang dihasilkan PLTGL pada frekuensi 3 Hz, T2, untuk P1, P2 dan P3	77
Gambar 4.29 Respon energi yang dihasilkan PLTGL pada frekuensi 3 Hz, T3, untuk P1, P2 dan P3	78
Gambar 4.30 Pengaruh variasi volume pelampung P1, P2, P3 pada titik tumpu pertama (T1).....	79
Gambar 4.31 Pengaruh variasi volume pelampung P1, P2, dan P3 pada titik tumpu pertama (T2).....	80
Gambar 4.32 Pengaruh variasi volume pelampung P1, P2, dan P3 pada titik tumpu pertama (T3).....	82
Gambar 4.33 Diagram alir untuk mendapatkan error tegangan	85
Gambar 4.34 Grafik validasi pada frekuensi 1 titik tumpu 1 (T1) pada volume pelampung 2 (P2).....	85
Gambar 4.35 Grafik validasi pada frekuensi 2 titik tumpu 1 (T1) pada volume pelampung 2 (P2).....	86
Gambar 4.36 Grafik validasi pada frekuensi 3 titik tumpu 1 (T1) pada volume pelampung 2 (P2).....	87
Gambar 4.37 Grafik validasi pada frekuensi 1 titik tumpu 1 (T1) pada volume pelampung 2 (P2).....	91
Gambar 4.38 Grafik validasi pada frekuensi 2 titik tumpu 1 (T1) pada volume pelampung 2 (P2).....	92
Gambar 4.39 Grafik validasi pada frekuensi 3 titik tumpu 1 (T1) pada volume pelampung 2 (P2).....	93
Gambar 4.40 Titik tumpu dan volume pelampung optimum yang dapat menghasilkan daya maksimum pada frekuensi 3	96
Gambar 4.41 PLTGL tipe pengungkit rotary generator beserta <i>gear box</i>	98
Gambar 4.42 Blok diagram PLTGL dengan generator rotary	100
Gambar 4.43 Bangkitan voltase PLTGL rotary generator pada pada frekuensi 3, titik tumpu dua T1 dengan variasi pelampung	102

Gambar 4.44 Bangkitan voltase PLTGL rotary generator pada pada frekuensi 3, titik tumpu dua T2 dengan variasi pelampung	102
Gambar 4.45 Bangkitan voltase PLTGL rotary generator pada pada frekuensi 3, titik tumpu dua T3 dengan variasi pelampung	102
Gambar 4.46 Bangkitan daya PLTGL rotary generator pada pada frekuensi 3, titik tumpu dua T1 dengan variasi pelampung	104
Gambar 4.47 Bangkitan daya PLTGL rotary generator pada pada frekuensi 3, titik tumpu dua T2 dengan variasi pelampung	104
Gambar 4.48 Bangkitan daya PLTGL rotary generator pada pada frekuensi 3, titik tumpu dua T3 dengan variasi pelampung	105
Gambar 4.49 perbandingan tegangan generator linier dan generator rotary.....	108
Gambar 4.50 perbandingan tegangan generator linier dan generator rotary.....	108



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Hasil berbagai penelitian tentang pemanfaatan gelombang air laut	14
Tabel 3.1 Identifikasi variabel variasi dan pengembangan.....	36
Tabel 4.1 Nilai parameter generator linier.....	52
Tabel 4.2 parameter gelombang simulator.....	54
Tabel 4.3 Parameter mekanisme PLTGL tipe pengungkit generator linier.....	54
Tabel 4.4 Hasil simulasi pada frekuensi 1	57
Tabel 4.5 Hasil simulasi pada frekuensi 2	60
Tabel 4.6 Hasil simulasi pada frekuensi 3	62
Tabel 4.7 RMS daya hasil simulasi pada titik tumpu T1	64
Tabel 4.8 RMS daya hasil simulasi pada titik tumpu T2	65
Tabel 4.9 RMS daya hasil simulasi pada titik tumpu T3	66
Tabel 4.10 RMS tegangan hasil eksperimen.....	68
Tabel 4.11 Hasil eksperimen pada titik tumpu T1	79
Tabel 4.12 Hasil eksperimen pada titik tumpu T2	81
Tabel 4.13 Hasil eksperimen pada titik tumpu T3	82
Tabel 4.14 Error yang terjadi pada PLTGL tipe pengungkit generator linier.....	88
Tabel 4.15 Efisiensi daya mekanisme PLTGL tipe pengungkit generator linier ..	90
Tabel 4.16 Tabel skala Mekanisme PLTGL tipe pengungkit generator linier.....	95
Tabel 4.17 Daya input sistem PLTGL tipe pengungkit generator rotary.....	97
Tabel 4.18 Parameter mekanisme PLTGL tipe pengungkit generator rotary	99
Tabel 4.19 Nilai percepatan mekanisme PLTGL tipe pengungkit generator rotary .	100
Tabel 4.20 Hasil tegangan pada pemodelan generator rotary	103
Tabel 4.21 RMS daya yang dihasilkan pada pemodelan generator rotary.....	105
Tabel 4.22 Perbandingan hasil generator linier dan generator rotary	106

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Eksistensi energi bagi kehidupan manusia adalah suatu hal yang sangat penting. Segala sesuatu yang menunjang hajat hidup kehidupan tergantung pada jumlah ketersediaan energi. Seiring kemajuan zaman, manusia lebih banyak membutuhkan energi yang dapat dimanfaatkan untuk memenuhi kebutuhan hidup. Berbagai macam cara pemanfaatan energi telah dilakukan mulai dari cara tradisional hingga modern. Prinsip dari pemanfaatan energi adalah dengan mengubah energi tersebut kedalam bentuk energi lain. Terdapat dua buah energi yaitu energi terbarukan dan energi tidak terbarukan. Untuk energi terbarukan tidak menemui banyak kendala dalam hal ketersediaanya, namun untuk energi tidak terbarukan memiliki masalah terkait ketersediannya. Energi tak terbarukan seperti yang dihasilkan dari material di bawah bumi semakin lama semakin menipis, sehingga harus ada pemanfaatan energi lain untuk menggantikan energi bumi yang semakin lama semakin berkurang. Salah satu energi yang tersedia cukup melimpah di Indonesia adalah energi gelombang air laut.

Laut adalah bagian terbesar di bumi ini, mencapai sekitar 75% luasnya dari total luas bumi. Tentunya dengan laut yang sedemikian luas menyimpan banyak potensi sumber energi, dan banyak sekali yang belum tergarap secara optimal. Gelombang laut memiliki potensi besar dalam menghasilkan energi karena gelombang dapat dikonversi dengan memanfaatkan simpangan dari gelombang tersebut serta dari arus yang bekerja. Banyak penelitian yang dilakukan untuk membuat konversi energi dari gelombang, salah satunya adalah Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut [1].

Indonesia memiliki arus dan gelombang laut yang sangat potensial untuk menghasilkan energi listrik, potensi ini tersebar diberbagai daerah, untuk energi gelombang, bagian selatan Jawa dan bagian barat Sumatera merupakan tempat potensi dengan gelombang yang cukup besar. Potensi energi yang dihasilkan

dipantai Indonesia memiliki nilai rapat daya yang cukup besar, yaitu berkisar antara 0.06 kW per meter kubik sampai 64 kW per meter kubik [2].

Energi laut terbentuk oleh angin yang berhembus diatas permukaan laut, dan menyebabkan laut bergerak mengikuti arah angin tersebut. Secara geografi, Indonesia yang terletak diantara 2 samudera yaitu samudera pasifik dan samudera hindia, mempunyai potensi sangat besar untuk mengembangkan energi ini. Untuk memanfaatkan energi gelombang laut tersebut dibutuhkan suatu alat yang bisa bergerak diatas pergerakan gelombang ombak laut dan kuat menahan hantaman dari gelombang tersebut. Idennya adalah membuat pelampung kedap air, menggerakkan engsel pada batang dan menggerakkan pipa berisi kumparan kawat, magnet dan kapasitor yang berfungsi untuk menghasilkan arus listrik [3].

Pemanfaatan energi gelombang air laut sebagai pembangkit tenaga listrik memang belum banyak dilakukan. Dari penjelasan yang telah diuraikan sebelumnya, maka penulis termotivasi untuk mengembangkan energi yang dihasilkan dari laut berupa gelombang air laut. Pada penelitian ini akan dicoba untuk mengkaji tentang pemanfaatan gelombang air dalam skala prototipe sebagai pembangkit listrik dengan memanfaatkan prinsip GGL induksi. Besar GGL induksi dipengaruhi oleh tiga faktor yaitu jumlah lilitan, kuat medan magnet, dan kecepatan gerak magnet. Sedangkan untuk sistem pembangkit listrik yang mempengaruhi besar GGL induksi diantaranya terletak pada panjang lengan tumpuan dan masa pelampung.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah disebutkan, maka penelitian ini akan menganalisa secara simulasi tentang perubahan GGL induksi yang dihasilkan oleh generator liner dengan memvariasikan titik tumpu lengan pengungkit, dan volume pelampung. Sehingga dapat disimpulkan rumusan masalah sebagai berikut.

1. Bagaimana bentuk pemodelan dan simulasi dari mekanisme PLTGL tipe pengungkit?

2. Bagaimana mendapatkan nilai tegangan tertinggi dari variasi panjang lengan pengungkit dan volume pelampung?

3. Bagaimana melakukan pengembangan terhadap mekanisme PLTGL tipe pengungkit agar mendapatkan nilai tegangan yang bersifat konstan?

4. Bagaimana membandingkan hasil bangkitan tegangan dan daya antara PLTGL tipe pengungkit generator linier dan generator rotary ?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Mendapatkan bentuk pemodelan dan simulasi dari mekanisme PLTGL tipe pengungkit.

2. Mendapatkan nilai tegangan tertinggi dari variasi panjang lengan pengungkit dan volume pelampung.

3. Melakukan pengembangan terhadap mekanisme PLTGL tipe pengungkit generator linier menjadi generator rotary agar mendapatkan nilai bangkitan tegangan dan daya yang lebih besar dan konstan.

4. Membandingkan hasil bangkitan tegangan dan daya antara PLTGL tipe pengungkit generator linier dan generator rotary

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Mekanisme PLTGL pada penelitian ini dibuat untuk skala prototipe.

2. Gelombang air yang dibuat dianggap konstan pada setiap variasi amplitudo dan frekuensi.

3. Nilai damping yang diakibatkan gaya gesek pada bearing diabaikan.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Penelitian ini bermanfaat untuk mendapatkan energi listrik dari gelombang air laut untuk skala laboratorium.
2. Penelitian ini dapat digunakan sebagai acuan dalam penelitian selanjutnya untuk skala yang sebenarnya.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

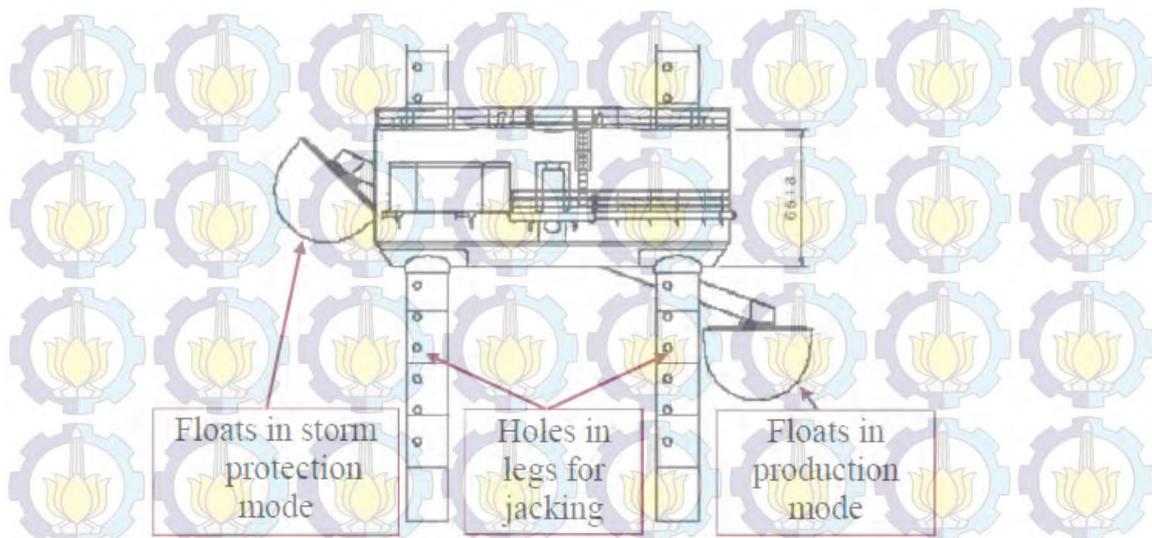
2.1 Kajian Pustaka

Telah banyak peneliti yang melakukan kajian terkait pembangkit listrik tenaga gelombang air laut (PLTGL). Berbagai macam bentuk-bentuk PLTGL telah dirancang mulai skala laboratorium sampai skala terapan. Hal tersebut terjadi karena manusia mulai menyadari bahwa pasokan energi yang bersumber dari minyak bumi dan mineral makin lama makin menipis, serta ditunjang dengan kadar emisi yang cukup tinggi sehingga dapat menimbulkan masalah masalah kesehatan. Pada intinya penelitian-penelitian yang berhubungan dengan *Ocean Harvesting Energy* dilakukan guna mencari energi alternatif yang ramah lingkungan dan dapat diperbaharui (*renewable energy*).

Dari beberapa pembangkit listrik terbarukan yang ramah lingkungan, pembangkit listrik tenaga gelombang air laut diduga lebih ramah lingkungan dibandingkan pembangkit listrik tenaga angin. Dimana pembangkit listrik ini tidak membawa pengaruh yang signifikan pada kehidupan biota laut, sedangkan pembangkit listrik tenaga angin ditemukan telah mengakibatkan perubahan jalur migrasi burung, kelelawar dan, dan beberapa hewan lain di dikawasan Eropa.

Dibalik kelebihan tersebut, terdapat beberapa kelemahan energi gelombang air laut yaitu energi yang dihasilkan selalu bervariasi sebagai akibat gelombang dibangkitkan oleh angin (sebagian besar acak) yang selalu bervariasi dari bulan ke bulan, dan investasi awal untuk membangun pembangkit listrik tenaga air laut ini cukup mahal.

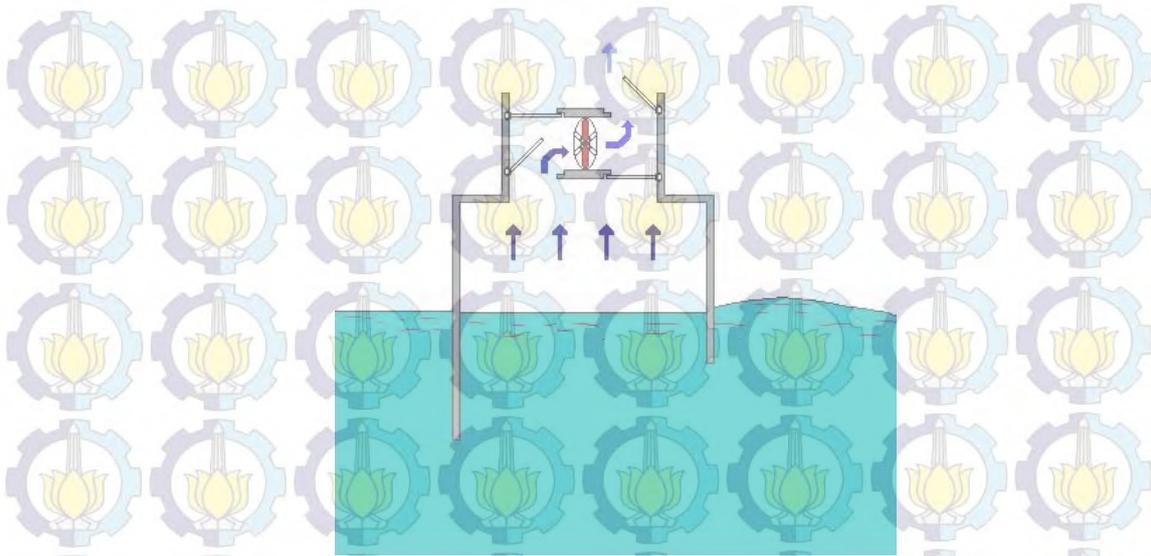
Kramer et al [4] melakukan kajian yang bersifat eksperimental tentang pembangkit listrik yang dikembangkan menggunakan pelampung (*heavy buoy*) dengan sistem mekanisme *Pneumatic Hydrolic*. Generator yang digunakan adalah generator tipe rotary. Pengembangan dilakukan secara bertahap dimulai dengan skala model yang dilakukan di laboratorium Aalborg University Denmark hingga skala aplikasi yang dilakukan di laut Roshage Denmark. Desain pembangkit yang dikembangkan oleh Kremer adalah sebagai berikut:



Gambar 2.1 Pembangkit listrik tenaga gelombang air laut oleh Wave Star Energy [5]

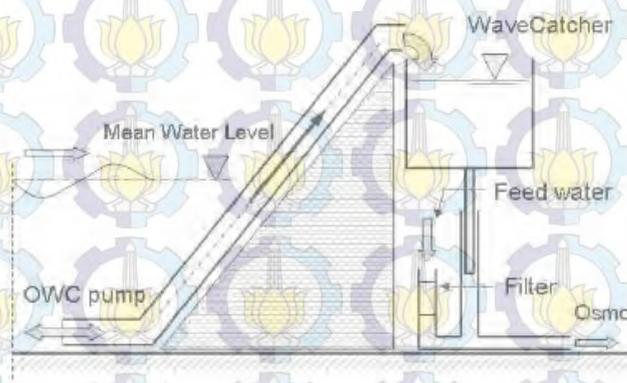
Penelitian yang dilakukan oleh Kremer pengembangan penelitiannya secara berulang ulang dari tahun ke tahun dari model skala dari yang terkecil sampai yang terbesar, hingga penelitian yang terakhir diberi nama *Wave Star C5-1000 kW*. Penelitian yang terakhir mampu menghasilkan energi listrik sebesar 1000 kW, dengan jumlah pelampung sebanyak 20 buah.

Wijaya [6] melakukan penelitian pemanfaatan gelombang air laut dengan menggunakan teknologi *Oscillating Water Column* (OWC) yang berlokasi di laut kawasan Jimbaran. Sistem pembangkit listrik ini terdiri dari *chamber* berisi udara yang berfungsi untuk menggerakkan turbin. Agar turbin dapat bergerak karena mendapatkan pengaruh tekanan, maka dibuat kolom tempat air laut bergerak naik turun melalui saluran yang berada di bawah ponton dan turbin yang terhubung dengan generator. Skema pergerakan gelombang air laut dengan *oscillating water column* (OWC) adalah sebagai berikut.



Gambar 2.2 Skema pergerakan gelombang air laut pada *Oscillating Water Column* [6]

Pada tahun 2011 Magagna [7] dari Southampton University juga melakukan penelitian yang lebih mendalam tentang sistem pembangkit listrik tipe OWC. Mekanisme OWC yang dirancang oleh David Magagna berbeda dan lebih kompleks dimana terdapat pompa OWC sebagai penangkap gelombang air laut dan *wave catcher* sebagai penampung air laut. Selain itu pada penelitian ini pipa diagonal sebagai media transfer gelombang juga divariasikan sudutnya. Mekanisme yang dikembangkan adalah sebagai berikut.



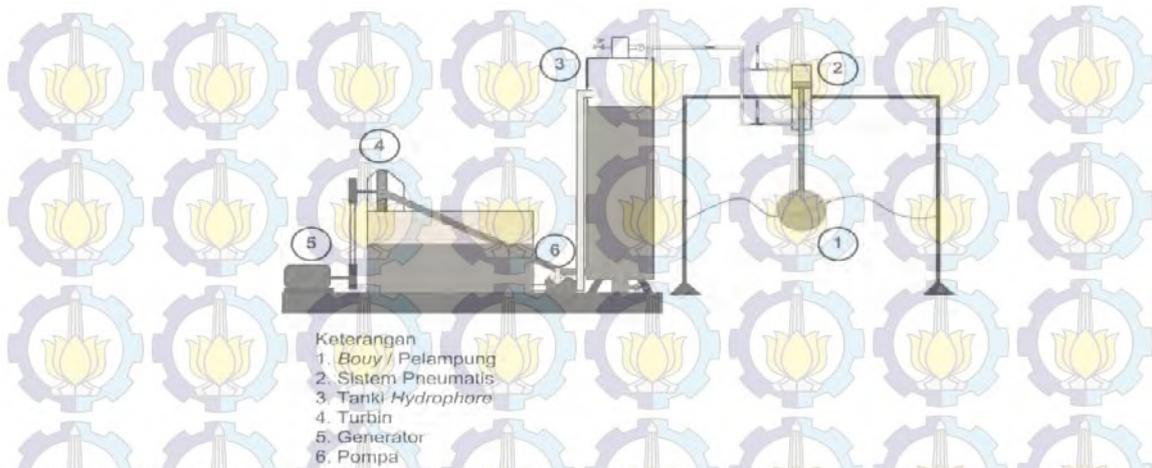
Gambar 2.3 Skema pergerakan gelombang air laut pada *Oscillating Water Column* [7]

Kelebihan dari sistem OWC ini adalah konstruksi OWC yang dapat dibangun di pesisir pantai sehingga dalam proses pembangunannya tidak harus

berada di tengah-tengah samudra seperti halnya tipe pembangkit listrik yang lain. Namun dibalik kelebihan tersebut mengandung beberapa kekurangan yaitu pada sistem OWC pergerakan osilasi gelombang dengan frekuensi tinggi justru akan memperlambat gerak putar dari turbin, karena mekanisme katub *one-way* yang diterapkan pada OWC mensyaratkan tekanan yang besar bukan frekuensi osilasi yang tinggi. Hal ini berbanding terbalik dengan sistem pembangkit energi gelombang laut yang menggunakan motor linier, yang justru menganggap bahwa frekuensi osilasi yang tinggi dari aktuator adalah hal yang sangat dibutuhkan. Sehingga dapat disimpulkan bahwa efisiensi optimal bisa didapat dari sistem OWC adalah ketika gelombang air laut dalam kondisi normal.

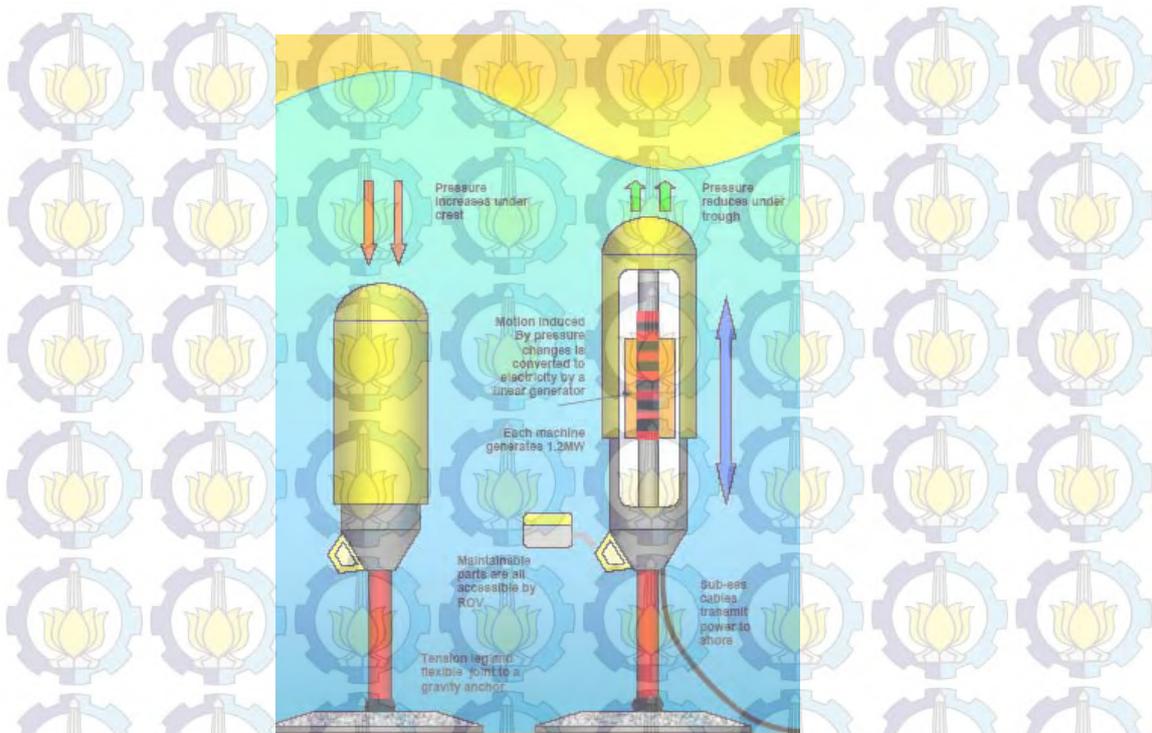
Kemiripan model OWC yang diteliti oleh Wijaya [6] juga dikembangkan oleh Subagio dkk [1] yang mengkaji tentang pembangkit listrik tenaga air laut dengan sistem pneumatis dalam skala model. Untuk mengetahui perubahan gaya dilakukan metode simulasi dengan variasi beberapa variabel. Diantaranya variasi volume pelampung, variasi tinggi gelombang, dan variasi amplitudo gelombang. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa volume pelampung akan berbanding lurus dengan gaya dan tekanan *outward*, serta tinggi gelombang berbanding lurus dengan gaya dan tekanan *inward*.

Turbin pada sistem pneumatis digerakkan oleh tekanan udara dari tangki *hydrophore* yang bersumber pada osilasi pelampung akibat gerakan air laut, sedangkan turbin pada OWC digerakkan oleh tekanan osilasi air laut. Kesamaan dari tipe OWC dan tipe pneumatis adalah penggunaan generator rotary sebagai converter energi gerak menjadi energi listrik. Tipe pneumatis juga memiliki kestabilan yang lebih bagus dalam menggerakkan generator apabila dibandingkan dengan tipe OWC. Hal ini dipengaruhi oleh penggunaan tangki *reservoir/hydrophore* pada tipe pneumatis sebagai kontrol untuk kecepatan generator rotary. Sehingga tegangan listrik yang dihasilkan lebih stabil. Namun demikian pada tipe pneumatik terdapat kelemahan berupa rancang desain yang terlalu kompleks jika dibandingkan dengan tipe OWC, sehingga berimbas pada biaya produksi tipe pneumatik yang lebih tinggi.



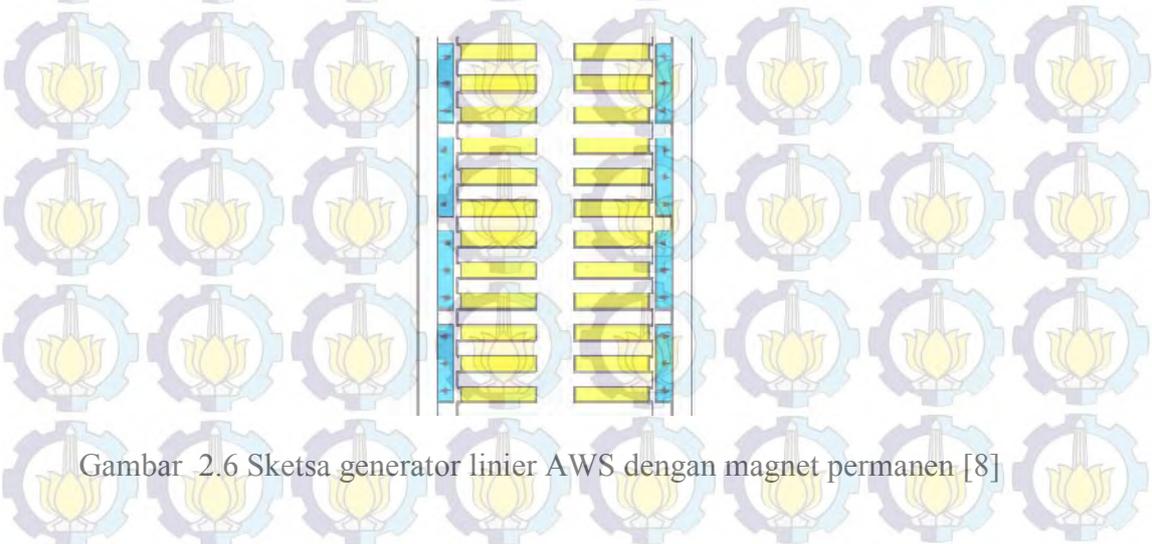
Gambar 2.4 Rancang konfigurasi model pembangkit energi tenaga air laut dengan pneumatis [1]

Polinder et al [8] menitikberatkan penelitian tentang pembangkit listrik tenaga gelombang air laut pada sistem pengubah konversi daya yaitu linier generator. Linier generator digunakan untuk mengubah energi gerak mekanis menjadi energi listrik, karena hampir semua generator menggunakan pergerakan rotary. Dalam penelitiannya sistem generator linier yang digunakan adalah sistem AWS (*Archimedes Wave Swing*) dengan magnet permanen. Mekanisme dengan sistem AWS juga dikembangkan oleh perusahaan bernama AWS Ocean Energy, Ltd pada tahun 2006 dimana desain AWS telah diterapkan di laut portugal.



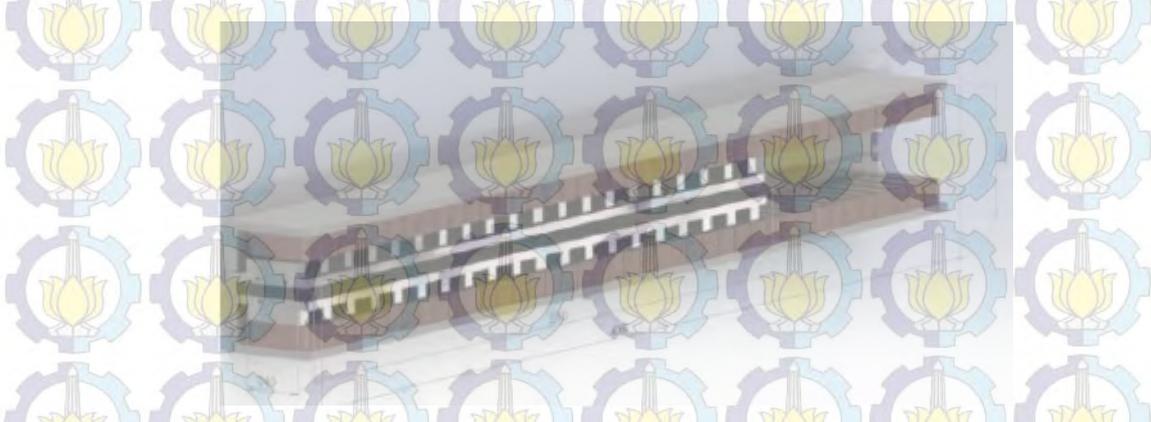
Gambar 2.5 AWS (Archimedes Wave Swing) oleh AWS Ocean Energy, Ltd [9]

Generator linier yang dikembangkan oleh Polinder memiliki kelemahan antara lain seperti gaya tarik diantara stator dan motor terlalu besar sehingga membutuhkan desain manufaktur yang cukup rumit, hal ini berlaku untuk desain bearingnya juga, gap udara antara stator dan rotor relatif lebih besar sehingga berakibat pada nilai tahanan udara (R_i) yang cukup tinggi, untuk membuat konstruksi linier generator perlu diperhatikan nilai toleransinya karena pergerakan yang tidak teratur yang disebabkan oleh kecepatan yang bervariasi.



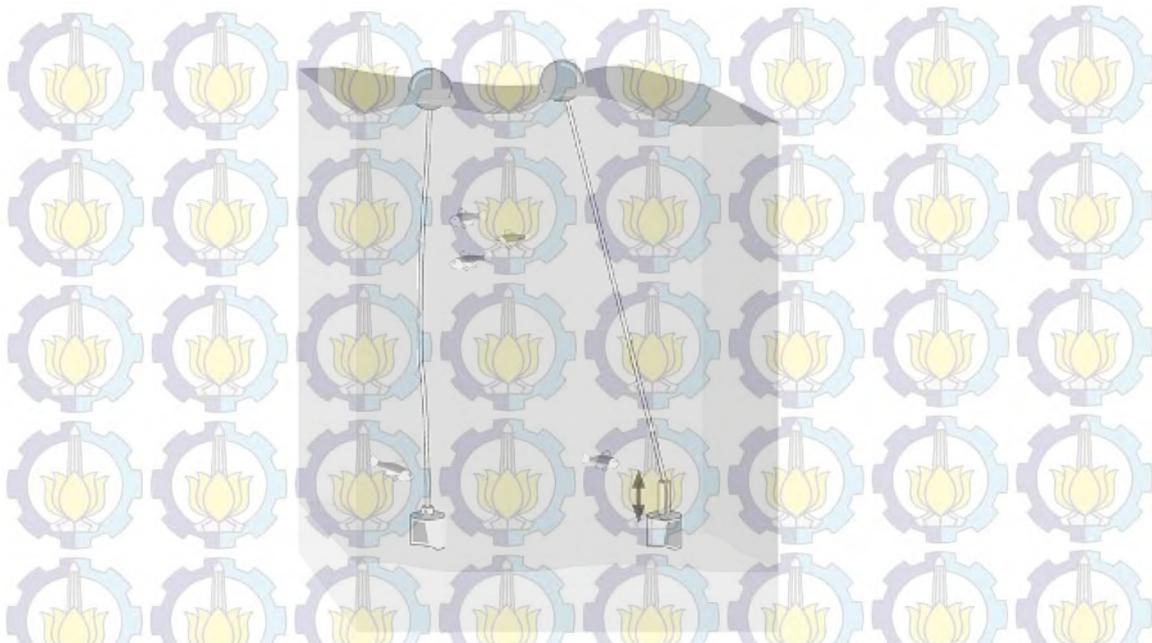
Gambar 2.6 Sketsa generator linier AWS dengan magnet permanen [8]

Penelitian tentang linier generator juga dilakukan oleh Godinho et al [10] yang diaplikasikan untuk pembangkit listrik tenaga gelombang air laut. Desain generator yang dibuat oleh Godinho et al [10] mensyaratkan beberapa aspek yaitu dapat memproduksi listrik walaupun dengan pergerakan gelombang air laut yang tidak stabil, mudah dalam proses produksinya, serta konstruksi yang sederhana. Analisa dan optimasi yang digunakan menggunakan metode FEM. Akan tetapi generator ini masih terlalu kecil untuk diaplikasikan pada PLTGL, dimana generator tersebut hanya mampu membangkitkan daya sebesar 24 kW.



Gambar 2.7 Desain generator linier [10]

Leijon et al [11] menjelaskan tentang penggunaan magnet permanen tiga fasa pada generator linier yang diaplikasikan pada pemanfaatan energi gelombang air laut dengan menggunakan simulasi multifisik. Linier generator dipasang langsung pada pembangkit dan diletakkan pada dasar laut. Pada bagian atas linier generator diberi pelampung yang berfungsi untuk menangkap osilasi gelombang air laut, untuk mempermudah dalam pengambilan hasil digunakan metode FEM sebagai alat untuk menyimulasikannya.

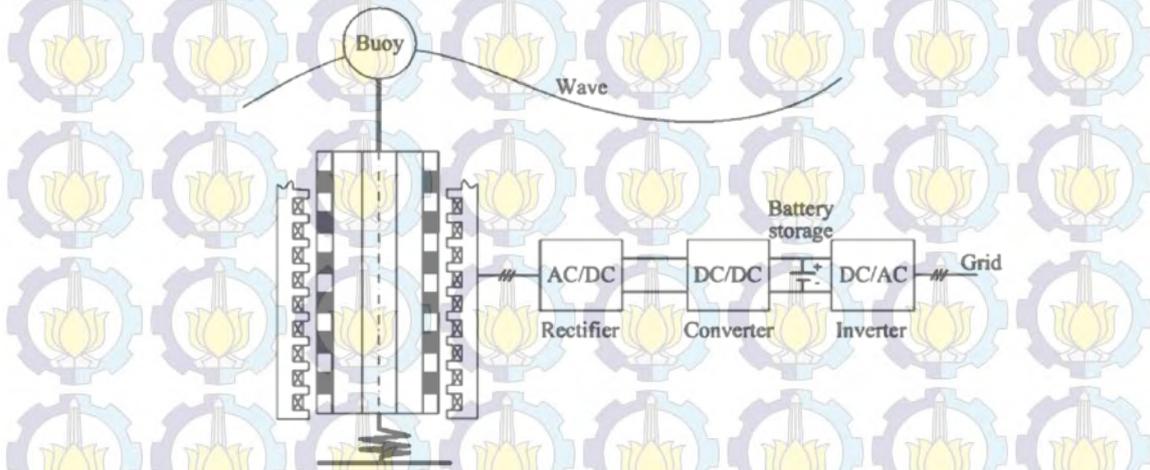


Gambar 2.8 Sketsa buoy, tali, dan linier generator untuk pembangkit tenaga air laut secara langsung [11]

Kelemahan desain yang dirancang oleh Leijon et al [11] terletak pada desain pembangkit listrik gelombang air laut yang cukup sederhana. Tidak adanya perbandingan roda gigi ataupun spring membuat sistem tersebut harus mengandalkan hanya pada gerak osilasi air laut yang ditangkap oleh pelampung. Hal ini mengakibatkan getaran osilasi rotor pada linier generator mempunyai frekuensi yang kecil sehingga daya listrik yang dibangkitkan pun sangatlah kecil. Untuk tali rope yang digunakan untuk mentransmisikan daya yang ditangkap oleh gelombang air laut adalah tali rope tipe solid, dimana tali rope jenis ini sangat rawan (tidak begitu kuat) oleh tekanan arus maupun gelombang air laut. Peletakan linier generator berada di dasar laut, sehingga diperlukan konstruksi yang cukup kompleks untuk mendisain agar generator ini menjadi kedap dan tahan air.

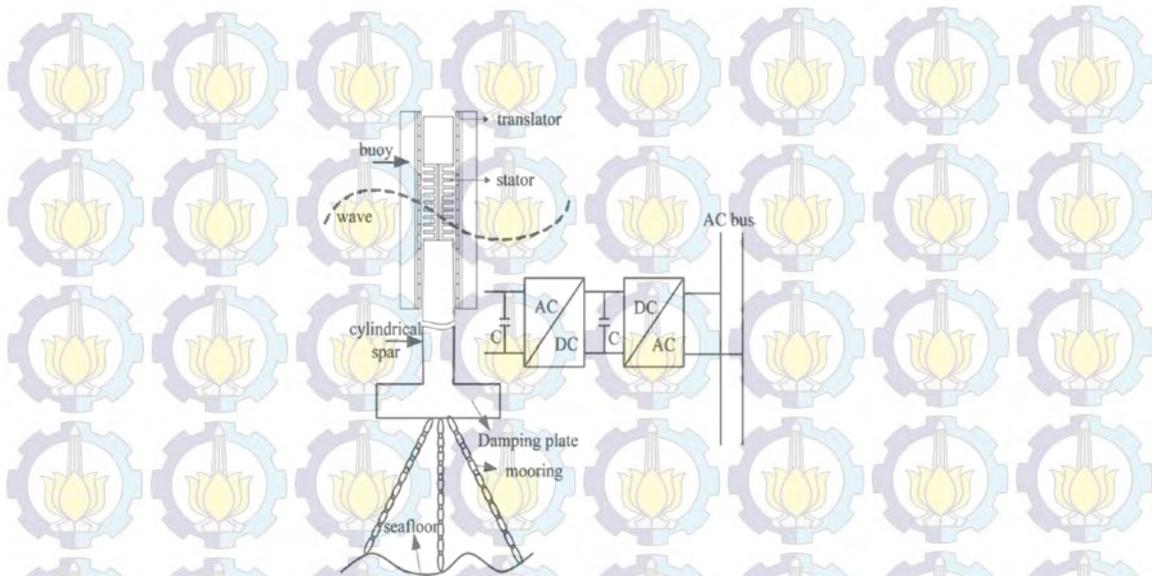
Li et al [12] pada tahun 2010 melakukan penyempurnaan penelitian tentang pemanfaatan gelombang air laut dengan mengaplikasikan roda gigi magnetic yang bersifat linier ke dalam linier generator. Selain ia juga menambahkan spring pada *ground* generator linier. Hal ini dimaksudkan agar menambah getaran osilasi yang diakibatkan oleh gerakan pelampung. Sehingga

dihasilkan gerak osilasi dengan frekuensi yang lebih tinggi dari pada desain linier generator yang di desain oleh Godinho.



Gambar 2.9 Linear Magnetic Gears for Pseudo-Direct-Drive Oceanic Wave Energy [12]

Pengembangan tentang magnetic generator yang terbaru dikemukakan oleh Liu et al [13] pada tahun 2013. Fokus penelitian yang dilakukan oleh Chunyuan Liu terletak pada desain magnet generator liner untuk PLTGL. Magnet yang digunakan adalah magnet permanen dengan berbentuk tabung yang dipasang langsung pada penggerak/pelampung PLTGL. Teknologi ini selanjutnya disebut sebagai *External Tubular Linear Permanent Magnet Generator (ETLPMG)*. Skala penelitian yang di lakukan masih pada skala laboratorium berupa protoripe. Hasil yang didapat pada penelitian ini adalah 5 kW dengan skala model 1:100.



Gambar 2.10 *External Tubular Linear Permanent Magnet Generator (ETLPMG)* [13]

Dari beberapa tipe pembangkit yang telah disebutkan diatas, didapatkan kesimpulan yang digambarkan pada tabel 2.1 sebagai berikut.

Tabel 2.1 Hasil berbagai penelitian tentang pemanfaatan gelombang air laut

Jenis pembangkit listrik gelombang air laut	Daya yang dibangkitkan	η sistem
<i>Pneumatic hydraulic Wave Star C5-1000 kW</i>	1000 kW	-
<i>Oscilating Water Column (OWC)</i> - David Magagna - I wajan Arta	- 4.174.007,641 Watt	- -
PLTGL (pneumatis hydrophore (Mega Bagus Subagio))	232,31 watt	-
Buoy Roop w ith permanent magnet (Mats Leijon)	10 kW	50%
AWS technology (Luc Hamilton)	- 1.25MW	-
<i>External Tubular Linear Permanent Magnet Generator</i> (Chunyuan Liu)	33.9 W	90.03%

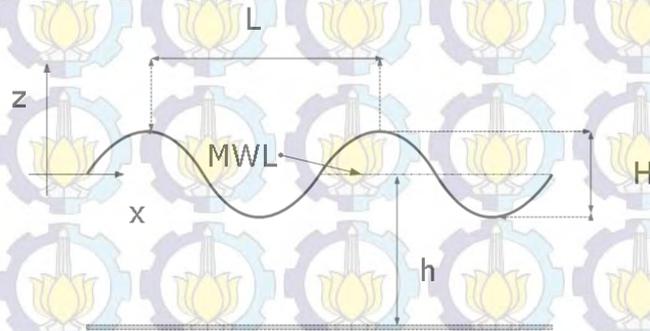
Dari kajian pustaka yang sudah diuraikan di atas, maka kelebihan dari penelitian ini terletak pada konstruksi mekanisme yang sederhana tetapi dengan hasil dan efisiensi yang dirancang semaksimal mungkin. Konstruksi mekanisme yang sederhana akan mengurangi kerugian energi (*losses*) yang diakibatkan oleh beban beban inersia yang pada setiap komponen.

2.2 Teori Penunjang

2.2.1 Teori Gelombang Air Laut

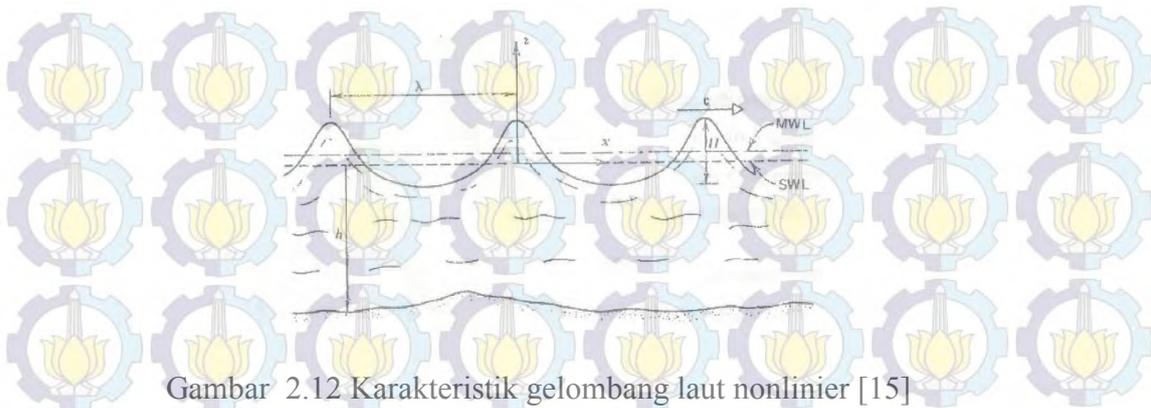
Gelombang ombak merupakan pergerakan naik dan turunnya air dengan arah tegak lurus permukaan air laut yang membentuk kurva/grafik sinusoidal. Angin di atas lautan memindahkan tenaganya ke permukaan perairan, menyebabkan riak-riak, alunan/bukit, dan merubah menjadi apa yang disebut sebagai gelombang atau ombak [14].

Pemahaman mengenai keadaan fisik gelombang air laut sangat penting dibutuhkan untuk mendalami sistem pembangkit listrik tenaga gelombang air laut. Hal ini dikarenakan pada sistem pembangkit listrik tenaga air laut menggunakan gelombang air laut sebagai gaya eksitasi yang bekerja pada sistem.



Gambar 2.11 Karakteristik gelombang air laut linear [7]

Gelombang linier mempunyai ciri khusus yaitu berbentuk sinusoida. Suatu gelombang di laut yang dalam dengan nilai H/λ kecil mengalir dengan profil sinusoida merupakan gelombang linier, tetapi bila alunannya mencapai kedangkalan tertentu maka profil gelombangnya akan berubah dengan puncak gelombang yang meruncing disertai dengan panjang gelombang yang mengecil.



Gambar 2.12 Karakteristik gelombang laut nonlinier [15]

Pada gelombang non-linier, permukaan air laut (SWL) dan muka air rata-rata (MWL) mempunyai selisih tertentu. Bila batas SWL dan MWL berhimpit maka gelombang non linier akan berubah kembali menjadi gelombang linier. Untuk gelombang non linier, kedudukan SWL selalu dibawah MWL. Menurut pengertian para ahli, kedudukan MWL adalah selalu berada pada setengah dari puncak gelombang dan dasar gelombang. Baik gelombang linier maupun nonlinier gelombang bergerak pada sumbu x. Beberapa notasi didalam pemodelan yang dikembangkan sebagai berikut:

MWL: *Mean Sea Water Level* (muka air tenang rata-rata)

SWL: *Surface Sea Water Level* (permukaan air laut)

λ : Wave Length [m]

h: *Depth below SWL* (kedalaman) [m]

T: Wave periode [s]

c: Kecepatan rambat gelombang (*wave front velocity*) [m/s]

H: Amplitudo gelombang

Gelombang mempunyai ukuran yang bervariasi mulai dari riak dengan ketinggian beberapa centimeter sampai pada gelombang badai yang dapat mencapai ketinggian 30 m. Selain oleh angin, gelombang dapat juga ditimbulkan oleh adanya gempa bumi, letusan gunung berapi, dan longsor bawah air yang menimbulkan gelombang yang bersifat merusak (Tsunami) serta oleh daya tarik bulan dan bumi yang menghasilkan gelombang tetap yang dikenal sebagai gelombang pasang surut [16]. Sebuah gelombang terdiri dari beberapa bagian antara lain:

- Puncak gelombang (Crest) adalah titik tertinggi dari sebuah gelombang
- Lembah gelombang (Trough) adalah titik terendah gelombang, diantara dua puncak gelombang
- Panjang gelombang (Wave length) adalah jarak mendatar antara dua puncak gelombang atau antara dua lembah gelombang
- Tinggi gelombang (Wave height) adalah jarak tegak antara puncak dan lembah gelombang
- Priode gelombang (Wave period) adalah waktu yang diperlukan oleh dua puncak gelombang yang berurutan untuk melalui satu titik
- Amplitudo gelombang (A) adalah jarak antara puncak gelombang dengan permukaan rata-rata air
- Frekuensi gelombang (f) adalah sejumlah besar gelombang yang melintasi suatu titik dalam suatu waktu tertentu (biasanya didefinisikan dalam satuan detik)
- Kecepatan gelombang (C) adalah jarak yang ditempuh gelombang dalam satu satuan waktu tertentu
- Kemiringan gelombang (H/L) adalah perbandingan antara tinggi gelombang dengan panjang gelombang.

2.2.2 Teori Gaya Gelombang Air Laut

- Gaya Ombak

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 kinetic dan energi potensial. Total energi potensial dan energi kinetic dapat dirumuskan oleh McCormick [20] dalam bukunya yang berjudul *Ocean Engineering Mechanics* adalah sebagai berikut.

$$E = \frac{1}{2} \rho_{water} \cdot g \cdot A^2 \quad (2.1)$$

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

$$v_g = \frac{L}{2T} \quad (2.2)$$

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

$$P_w = \frac{1}{2} \rho g A^2 \frac{L}{2T} \quad (2.3)$$

Jika periode gelombang dan panjang dihubungkan menjadi persamaan sebagai berikut.

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

Sehingga didapatkan untuk energi gelombang dengan persamaan sebagai berikut.

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

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

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

$$= \frac{\rho \cdot g^2 \cdot H^2 \cdot T (\cos(kx - \sigma t))^2}{32\pi} \quad (2.5)$$

Dimana:

$$k = \frac{2\pi}{L} \quad (2.6)$$

$$\sigma = \frac{2\pi}{T} \quad (2.7)$$

Dengan trigonometri maka persamaan (2.5) dapat diuraikan sebagai berikut:

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

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

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

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

$$\cos 0 = 1$$

$$\sin 0 = 0$$

Maka:

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

$$(\cos(kx - \sigma t))^2 = (1 \cdot \cos \sigma t)^2 \quad (2.9)$$

Substitusikan persamaan 2.7 ke persamaan 2.8, maka:

$$(\cos(kx - \sigma t))^2 = \left(1 \cdot \cos \frac{2\pi t}{T}\right)^2 \quad (2.10)$$

Substitusikan persamaan 2.10 ke persamaan 2.8, maka:

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

Dari persamaan 2.14 di atas, dapat diketahui gaya gelombang yang dikonversikan oleh mekanisme pelampung dengan rumusan sebagai berikut,

$$F_{wave} = \frac{P_{wave}}{c_g} \quad (2.11)$$

Sehingga

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

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

$$c = \frac{\lambda}{T} = \frac{1}{2} c_g$$

$$c_g = 2c$$

$$F_w = \frac{\rho g^2 H^2 T}{32\pi \cdot c_g} = \frac{\rho g^2 H^2 T^2}{64\pi \lambda} \left(\cos \frac{2\pi t}{T}\right)^2 \quad (2.12)$$

Keterangan:

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

ρ = Densitas air (1000 kg/m^3)

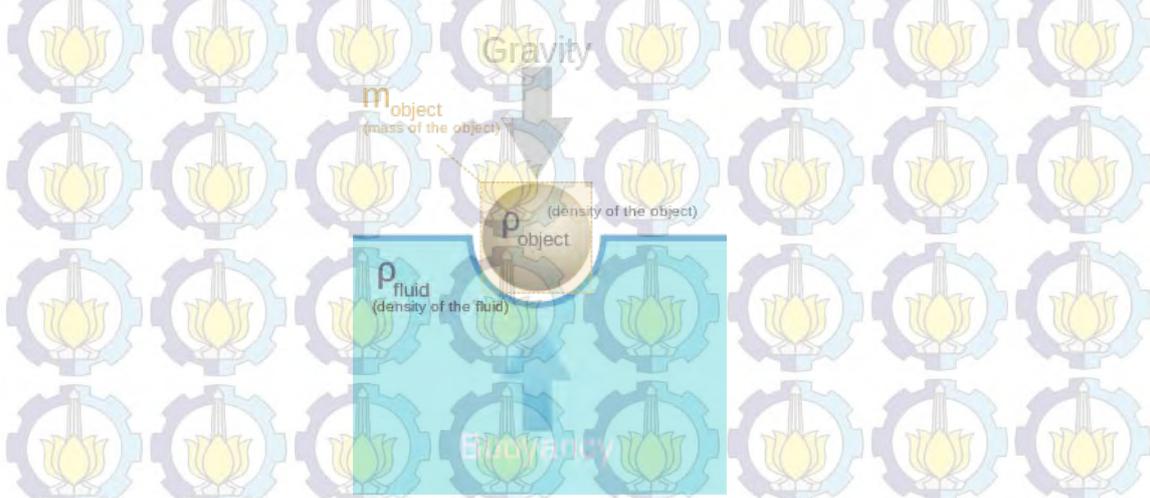
A = Amplitudo gelombang (m)

λ = Panjang gelombang (m)

T = Periode gelombang (s)

- **Gaya Apung**

Gaya apung atau *bouyancy force* (F_b) adalah gaya tekan keatas pada suatu benda yang mengapung sama dengan berat air yang dipindahkan (*Archimedes Principle*). Gaya buoyancy selalu sama dengan berat fluida yang dipindahkan.



Gambar 2.13 Analisa gaya yang dihasilkan pelampung [17]

$$V_{fluida} = \frac{\rho_{fluida} \cdot V_{fluida}}{\rho_{fluida}} \quad (2.13)$$

$$F_b = \rho_{fluida} \cdot V_{fluida} \cdot g \quad (2.14)$$

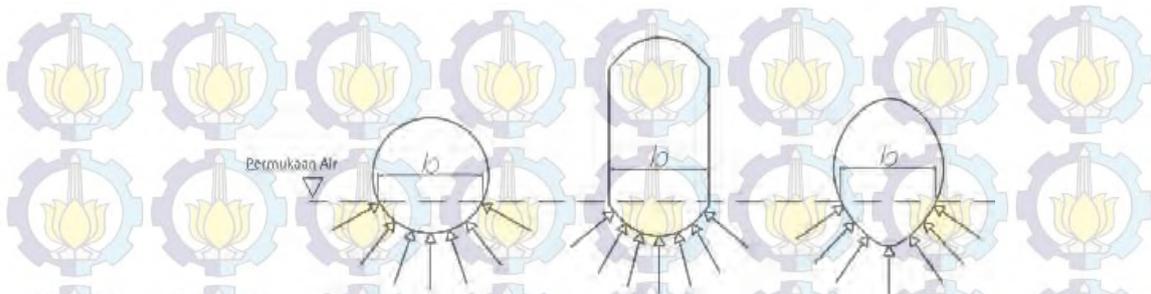
Keterangan

ρ = Berat jenis air

v = Volume benda tenggelam

g = Gaya gravitasi

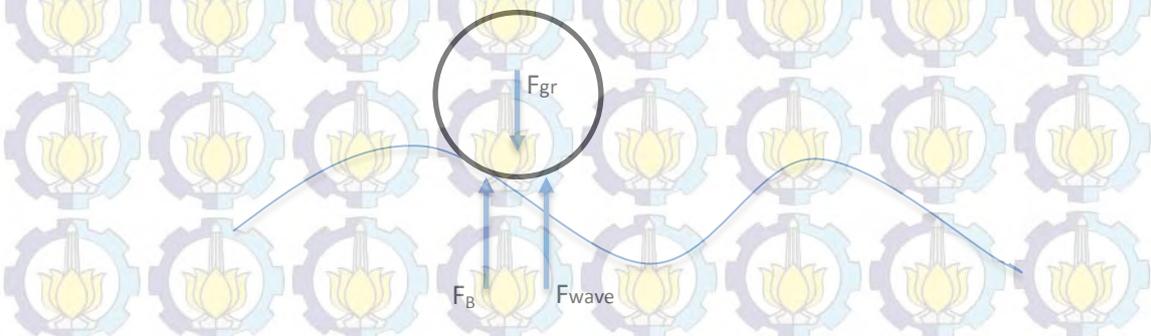
Gaya apung juga dipengaruhi oleh bentuk dari luasan pelampung yang mengenai air. Variasi dari bentuk penampang pelampung akan memberikan dampak pada gaya ombak yang diterima mekanisme PLTGL metode pelampung pada bagian panjang. Diketahui bahwa pelampung berbentuk bola memiliki luasan yang terkena air lebih besar dari pada pelampung silinder maupun oval [21].



Gambar 2.14 Permukaan melintang pelampung yang terkena air [15]

- **Gaya bangkitan ($F_{generated}$)**

$F_{generated}$ adalah gaya yang ditransferkan oleh gelombang air laut, F_w adalah gaya yang dihasilkan oleh gelombang, F_b adalah gaya apung pelampung, $F_{grafitasi}$ adalah gaya berat yang diterima sistem penangkap gelombang.



Gambar 2.15 Gaya-gaya yang bekerja pada pelampung

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

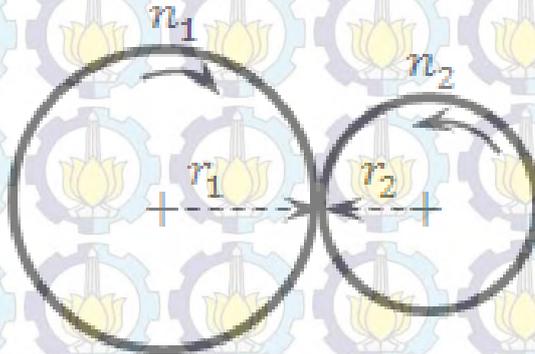
$$= [F_w + (\rho_{fluida} \cdot V_{fluida\ tercelup} \cdot g)] - (m \cdot g) \quad (2.15)$$

2.2.3 Teori Dinamika Gerak

- **Rasio Roda Gigi**

Untuk memenuhi kebutuhan tersebut diperlukannya transmisi yang terdiri dari berbagai tingkat perbandingan gigi (Gear Ratio). Perakitan/hubungan gear yang berada dalam kotak transmisi (*gear box*). Perubahan tersebut dikarenakan perbandingan rasio pada *gear* yang digunakan. Perbandingan rasio merupakan

hasil bagi antara jari-jari output dengan jari input, Close, 2002 [18]. Maka untuk mencari rasio roda gigi dapat digunakan persamaan sebagai berikut:



Gambar 2.16 Perbandingan rasio roda gigi [18]

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

Dimana:

$$r_1 \cdot \theta_1 = r_2 \cdot \theta_2$$

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

Keterangan:

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

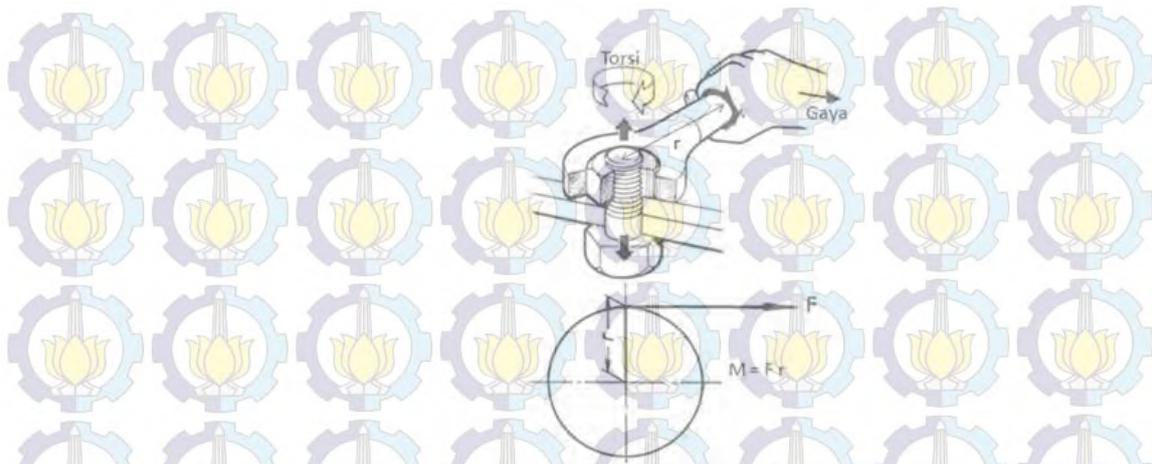
r_2 = Jari-jari roda gigi output (m).

N = Rasio gear (m).

- **Momen Torsi**

Momen adalah suatu vektor M yang tegak lurus terhadap bidang benda.

Arah M adalah tergantung pada arah berputarnya benda akibat gaya F .



Gambar 2.17 torsi yang bekerja pada poros utama [19]

Momen dapat dihitung dengan rumus berikut:

$$M_T = F \cdot r \quad (2.16)$$

Dimana M adalah momen, F adalah gaya yang bekerja, dan r adalah lengan gaya. Arah dari momen dapat ditentukan dengan menggunakan konvensi tanda misalnya tanda plus (+) untuk arah momen yang berlawanan arah jarum jam, dan tanda minus (-) untuk yang searah jarum jam. Penentuan tanda dari momen ini harus konsisten untuk semua persoalan.

- **Momen Inersia**

Momen inersia adalah hasil kali volume 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. Berikut ini adalah beberapa persamaan momen inersia untuk benda tegar. Jika benda berupa poros maka momen inersianya adalah:

$$J = \frac{1}{2} \times m \times r^2 \quad (2.17)$$

- **Konstanta Kekakuan Torsi Poros**

Konstanta kekakuan torsi poros merupakan perkalian modulus elastisitas bahan dengan diameter poros dan panjang poros, maka untuk mencari kekakuan torsi poros digunakan persamaan sebagai berikut:

$$K = \frac{\pi \times G}{32 \times l} \times d^4 \quad (2.18)$$

Keterangan

K = Kekakuan torsi poros (Nm/rad)

G = Modulus elastisitas bahan (N/m^2), bahan yang digunakan *gray cast iron*, sehingga besarnya $G = 6,6 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$

l = Panjang poros (m).

d = Diameter poros (m).

- **Konstanta Damping Torsi**

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

$$B_t = \frac{\mu \cdot A}{h} \quad (2.19)$$

Keterangan

B_t = Konstanta damping bearing

μ = Viscosity (Pa-s)

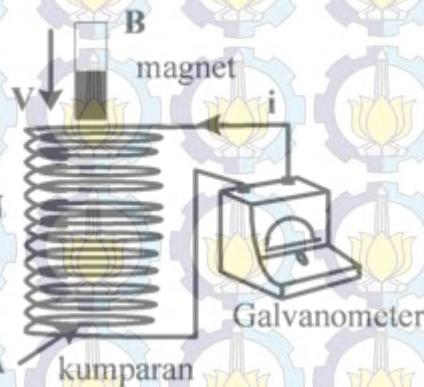
A = Luas area kontak (m^2)

h = Ketebalan viscous fluid (m)

2.2.4 Teori Elektromagnetik

Energi dapat dikategorikan menjadi banyak macam, namun terdapat dua bentuk energi mekanik yang dapat dikaitkan dengan pembahasan mekanisme pemanen energi getaran, khususnya getaran dari gelombang laut yaitu dengan menggunakan energi potensial gravitasi yang terkait dengan posisi dan energi kinetik yang terkait dengan gerak magnet.

- **Tegangan yang Dihasilkan oleh Linier Generator**



Gambar 2.18 Gerak magnet dalam kumparan [20]

Michael Faraday (1791-1867) membuat hipotesis bahwa medan magnet dapat menimbulkan arus listrik. Dengan medan magnet atau fluks yang dapat berubah ubah, maka pada kumparan akan timbul gaya gerak listrik (ggl) sebesar.

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} = \frac{-d\lambda}{dt} \quad (2.20)$$

karena $\lambda = N \cdot \Phi$, maka

$$e = -N \frac{d(B.A)}{dt} \quad (2.21)$$

$f = 1/\tau$ adalah frekuensi gerak magnet tertinggal 90° dari fluks Φ dan

kerapatan fluks dan luas penampang merupakan besaran konstan

$$e = -N \cdot B \cdot A \cdot f \quad (2.22)$$

- **Hubungan Antara Simpangan Magnet (x) terhadap perubahan titik tumpu lengan pengungkit**

Besarnya gaya gerak listrik yang dihasilkan tergantung pada jumlah lilitan (N), besarnya fluks magnet (Φ), luasan penampang yang memotong gaya gerak listrik (A), dan frekuensi gerak magnet (f). Bila kumparan N lilitan ditembus fluks magnetik, maka pada kumparan timbul GGL induksi yang disebut dengan ϵ_{ind} hukum faraday dinyatakan sebagai berikut:

$$\epsilon_{ind} = \frac{d\Phi}{dt}$$

$$\epsilon_{ind} = \frac{d(BA)}{dt}$$

Dengan fluk magnet (B) yang konstan maka

$$\varepsilon_{ind} = B \cdot \frac{dA}{dt}$$

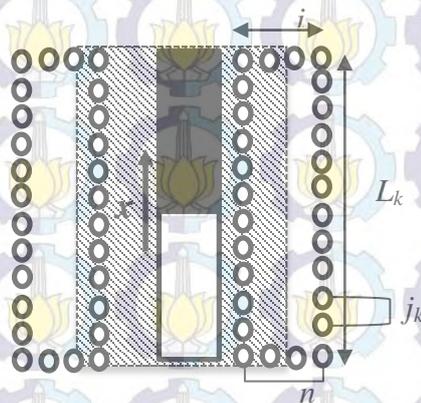
Dimana terdapat perubahan luasan kumparan yang dipotong oleh medan magnet, karena panjang kawat adalah konstan maka dapat dituliskan rumusan sebagai berikut.

$$\varepsilon_{ind} = B \cdot l_k \frac{dx}{dt} \quad (2.23)$$

$\frac{dx}{dt}$ adalah perubahan jarak simpangan magnet terhadap waktu yang merupakan fungsi kecepatan simpangan magnet, sehingga persamaannya dituliskan sebagai berikut.

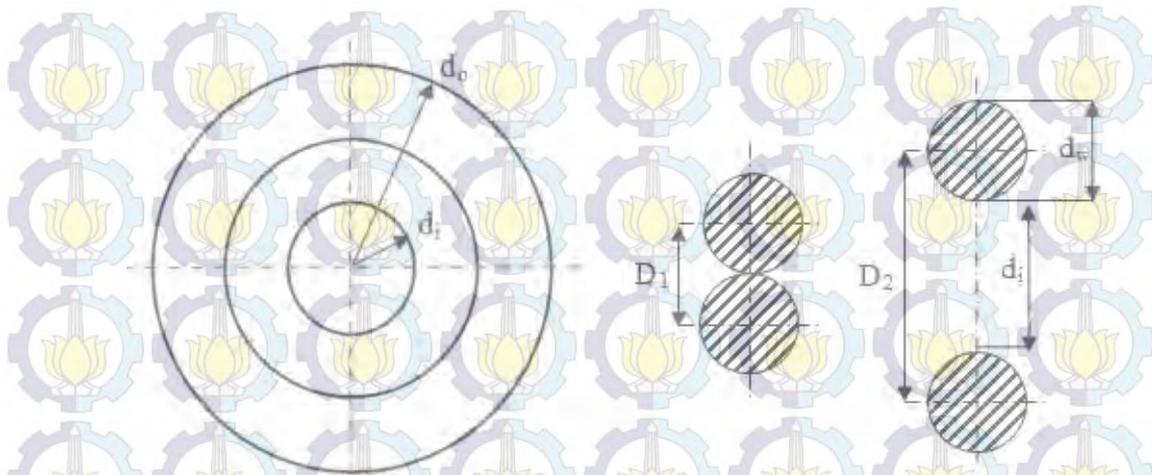
$$\varepsilon_{ind} = B \cdot l_k \cdot v \quad (2.24)$$

Untuk mendapatkan persamaan tegangan yang dihasilkan oleh generator linier, maka digambarkan pergerakan magnet dalam kumparan sebagai berikut



Gambar 2.19 kuat medan magnet generator linier penampang melintang

Pada gambar 2.19 terlihat susunan kumparan tampak melintang dimana kuat medan magnet yang dihasilkan dipengaruhi oleh jumlah lilitan (n), diameter kumparan (d_i), jumlah kumparan yang tersusun vertikal (j_k), dan panjang kumparan (L_k). Sedangkan susunan diameter dalam (d_i) dan diameter luar (d_o) pada kumparan magnet linier tampak atas seperti gambar 2.20 sebagai berikut.



Gambar 2.20 Susunan kawat pada kumparan generator linier

Panjang diameter terdalam (D_1) dan diameter terluar kumparan (D_2) dapat dituliskan dengan rumusan sebagai berikut.

$$D_1 = d_i + d_w \quad (2.25)$$

$$D_2 = d_i + n \cdot d_w \quad (2.26)$$

Untuk mencari keliling kumparan (k_k) dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut.

$$k_k = \pi \cdot D$$

$$d k_k = \pi \cdot D dD$$

$$\int dk_k = \int \pi \cdot D dD$$

$$k_k = \frac{1}{2} \pi \cdot D^2 \Big|_{D_1}^{D_2}$$

$$k_k = \frac{\pi \cdot D_2^2}{2} - \frac{\pi \cdot D_1^2}{2}$$

$$k_k = \frac{1}{2} (\pi \cdot D_2^2 - \pi \cdot D_1^2) \quad (2.27)$$

Substitusi persamaan dengan persamaan 2.17 dan 2.18

$$k_k = \frac{1}{2} (\pi \cdot (d_i + n \cdot d_w)^2 - \pi \cdot (d_i + d_w)^2)$$

$$k_k = \frac{\pi}{2} (d_i^2 + 2 \cdot n \cdot d_i \cdot d_w + n^2 \cdot d_w^2 - d_i^2 - 2 \cdot d_i \cdot d_w - d_w^2)$$

$$k_k = \frac{\pi}{2} (n^2 \cdot d_w^2 - d_w^2 + 2 \cdot n \cdot d_i \cdot d_w - 2 \cdot d_i \cdot d_w)$$

$$k_k = \frac{\pi}{2}(n^2 - 1) \cdot d_w^2 + 2 \cdot d_i \cdot d_w(n - 1) \quad (2.28)$$

Untuk mencari panjang kumparan (l_k) didapatkan dengan mengalikan jumlah susunan baris kawat kumparan (j_k) dengan keliling kumparan (k_k) sebagai berikut.

$$\begin{aligned} l_k &= j_k \cdot k_k \\ l_k &= \frac{x}{d_w} \cdot k_k \\ l_k &= \frac{x}{d_w} \cdot \left(\frac{\pi}{2}(n^2 - 1) \cdot d_w^2 + 2 \cdot d_i \cdot d_w(n - 1) \right) \\ l_k &= \frac{x}{d_w} \cdot \left(\frac{\pi}{2}(n^2 - 1) \cdot d_w^2 + 2 \cdot d_i \cdot d_w(n - 1) \right) \\ l_k &= x \cdot \left(\frac{\pi}{2}(n^2 - 1) \cdot d_w + 2 \cdot d_i \cdot (n - 1) \right) \\ l_k &= \left(\frac{\pi}{2}(n^2 - 1) \cdot d_w + 2 \cdot d_i \cdot (n - 1) \right) \cdot x \end{aligned} \quad (2.29)$$

Pada persamaan 2.21 disederhanakan untuk mempermudah perhitungan dengan simbol α

$$\alpha = \left(\frac{\pi}{2}(n^2 - 1) \cdot d_w + 2 \cdot d_i \cdot (n - 1) \right) \quad (2.30)$$

Persamaan 2.22 disubstitusikan kedalam persamaan 2.21 sehingga menjadi:

$$l_k = \alpha \cdot x \quad (2.31)$$

Untuk mencari tegangan (ϵ_{ind}) maka dilakukan substitusi persamaan 2.31 dan ke persamaan 2.24

$$\begin{aligned} \epsilon_{ind} &= B \cdot l_k \cdot v \\ \epsilon_{ind} &= B \cdot \alpha \cdot x \cdot v \end{aligned} \quad (2.32)$$

Didapatkan persamaan gaya hambat elektromagnetik dengan menyubstitusikan persamaan 2.32 dan 2.31 ke dalam persamaan gaya Lorentz sebagai berikut:

$$\begin{aligned} F_d &= B \cdot i \cdot l_k = B \cdot \frac{\epsilon_{ind}}{R} \cdot l_k \\ F_d &= B \cdot \frac{(B \cdot \alpha \cdot x \cdot v)}{R} \cdot \alpha \cdot x \\ F_d &= \frac{B^2 \cdot \alpha^2}{R} \cdot x^2 \cdot v \end{aligned} \quad (2.33)$$

Keterangan:

n = jumlah tumpukan lilitan pada kumparan

λ = panjang gelombang (m)

Φ = harga fluks yang berubah-ubah terhadap waktu (weber)

B = Gaya magnet (weber/m²)

A = luas penampang yang memotong gaya gerak listrik (m²)

f = frekuensi gerak magnet (Hz)

\mathcal{E}_{ind} = GGL induksi (V)

l_k = panjang kumparan (m)

v = kelajuan (m/s)

d_i = diameter dalam (m)

d_o = diameter luar (m)

d_w = diameter kawat (m)

$d_1 = d_i + d_w$

$d_1 = d_i + n \cdot d_w$

k_k = keliling kumparan (m)

i = tebal kawat dalam setelah dililit pada kumparan (m)

j_k = jumlah kawat melintang searah sumbu y dalam kumparan (m)

n = jumlah kawat melintang searah sumbu x dalam kumparan (m)

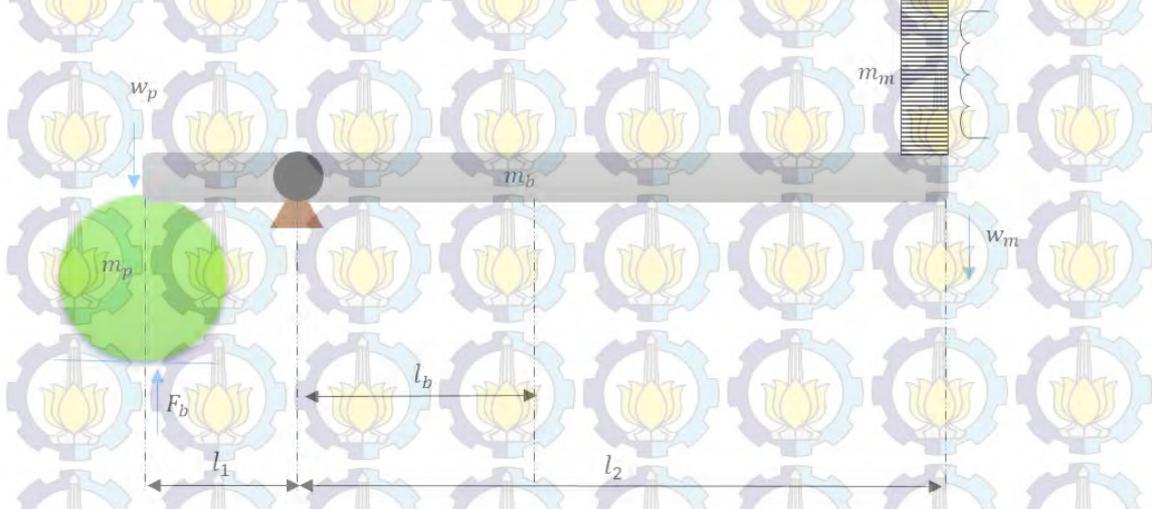
2.2.5 Analisa Gaya Pada Mekanisme

Gaya yang bekerja pada mekanisme pembangkit terbagi atas dua analisa yaitu keseimbangan statis dan keseimbangan dinamis. Terdapat gaya-gaya yang bekerja pada masing-masing analisa keseimbangan. Variasi yang digunakan pada mekanisme berupa variasi titik tumpu lengan dan variasi berdasarkan volume pelampung.

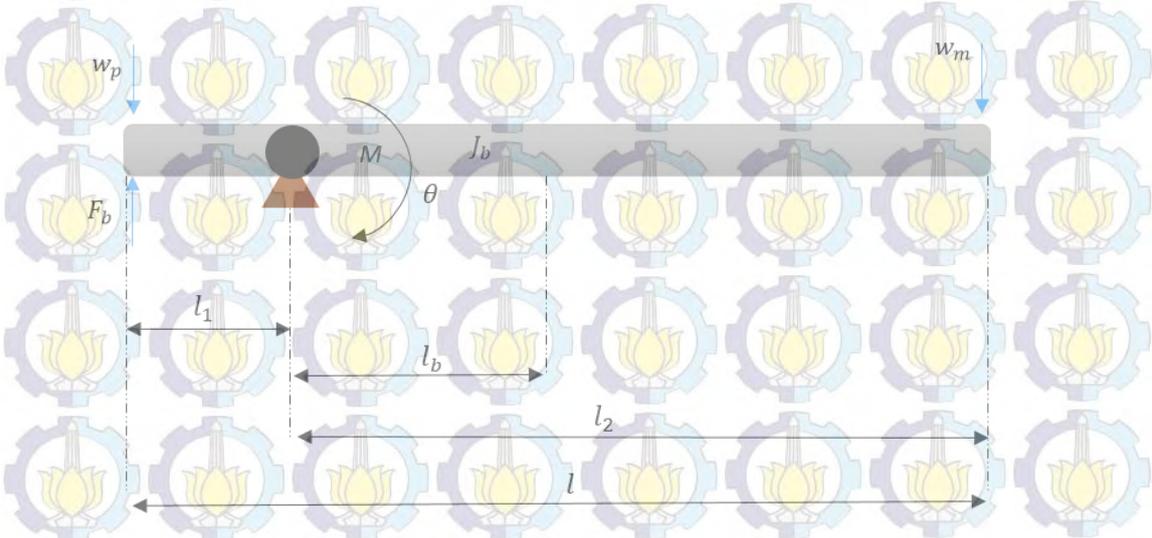
- **Keseimbangan Statis**

Keseimbangan statis terjadi ketika jumlah moment yang bekerja pada arah pada sistem itu sendiri sama dengan nol. Perhitungan keseimbangan statis diperlukan untuk perhitungan keseimbangan dinamis. Keseimbangan statis

hanya dipengaruhi oleh berat sistem itu sendiri, sehingga pada mekanisme ini gaya yang mempengaruhi kesetimbangan statis adalah gaya berat pelampung, gaya apung (*buoyance*), gaya berat batang pengungkit dan gaya berat pada magnet.



Gambar 2.21 Mekanisme kesetimbangan statis



Gambar 2.22 Free Body Diagram (FBD) mekanisme kesetimbangan statis

Jumlah inersia kesetimbangan statis

$$J_o = J_b + J_p + J_m$$

dimana

$$J_b = J_{b.eg} + J_{b.t}$$

Keterangan

$J_{b.eg} = \frac{1}{12} m_b \cdot l^2 =$ inersia keseluruhan volume batang pengungkit

$J_{b.t} = m_b \cdot (l_b)^2 =$ inersia centre of gravity (CG) volume batang terhadap titik tumpu

$J_p = m_p \cdot (l_1)^2 =$ inersia volume pelampung terhadap titik tumpu, dianggap titik yang mengumpul (lumped)

$J_m = m_m \cdot (l_2)^2 =$ inersia volume magnet terhadap titik tumpu, dianggap titik yang mengumpul (lumped)

Sehingga inersia total dari sistem adalah sebagai berikut

$$J_o = \frac{1}{12} m_b \cdot l^2 + m_b \cdot (l_b)^2 + m_p \cdot (l_1)^2 + m_m \cdot (l_2)^2 \quad (2.34)$$

hukum newton II, $\Sigma M = 0$

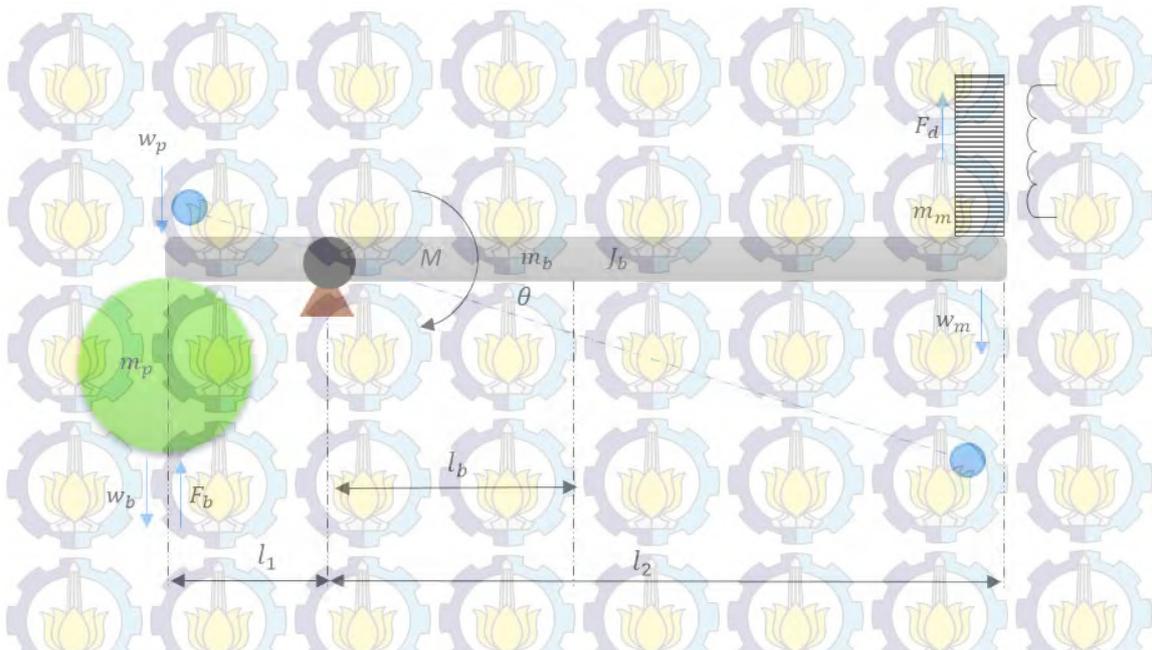
$$\sum M = J_o \cdot \ddot{\theta}$$

$$F_b \cdot l_1 - W_p \cdot l_1 + W_m \cdot l_2 = 0$$

$$F_b \cdot l_1 = W_p \cdot l_1 - W_m \cdot l_2 \quad (2.35)$$

- **Kesetimbangan dinamis**

Kesetimbangan dinamis terjadi ketika jumlah kelembaman atau gaya berat yang bekerja pada sistem sama dengan nol. Kesetimbangan dinamis terjadi karena pengaruh gaya-gaya luar yang bekerja pada arah vertikal dan horisontal. Pada mekanisme ini gaya dinamis dipengaruhi oleh gaya eksitasi gelombang air dan gaya *damping electromagnetic*.



Gambar 2.23 Mekanisme kesetimbangan dinamis



Gambar 2.24 Free Body Diagram (FBD) mekanisme kesetimbangan dinamis

$$\sum M = J_o \cdot \ddot{\theta}$$

$$F_w \cdot l_1 - W_p(l_1 + l_1 \sin \theta) + W_m(l_2 - l_2 \sin \theta) - F_d \cdot l_2 + F_b \cdot l_1 = J_o \cdot \ddot{\theta} \quad (2.36)$$

Karena nilai θ mendekati, maka $\sin \theta = \theta$, sehingga persamaan 2.30 menjadi

$$F_w \cdot l_1 - W_p \cdot l_1 - W_p \cdot l_1 \cdot \theta + W_m \cdot l_2 - W_m \cdot l_2 \cdot \theta - F_d \cdot l_2 + F_b \cdot l_1 = J_o \cdot \ddot{\theta}$$

$$F_w \cdot l_1 - W_p \cdot l_1 + W_m \cdot l_2 - F_d \cdot l_2 - (W_p \cdot l_1 + W_m \cdot l_2) \cdot \theta + F_b \cdot l_1 = J_o \cdot \ddot{\theta} \quad (2.37)$$

Karena pengaruh dari kesetimbangan statis maka persamaan 2.29 disubstitusikan ke dalam persamaan 2.30 menjadi

$$\begin{aligned} J_o \cdot \ddot{\theta} &= F_w \cdot l_1 - (W_p \cdot l_1 + W_m \cdot l_2) \theta - F_d \cdot l_2 \\ F_w \cdot l_1 &= J_o \cdot \ddot{\theta} + F_d \cdot l_2 + (W_p \cdot l_1 + W_m \cdot l_2) \cdot \theta \end{aligned} \quad (2.38)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{1}{J_o} [F_w \cdot l_1 - (W_p \cdot l_1 + W_m \cdot l_2) \theta - F_d \cdot l_2] \quad (2.39)$$

2.2.6 Analisa Daya yang Dihasilkan oleh Mekanisme

Dengan mensubstitusikan persamaan 2.40, 2.41, dan 2.42 kedalam persamaan 2.39 maka diperoleh persamaan percepatan sudut batang pengungkit sebagai berikut:

$$\ddot{\theta} = \frac{1}{\left[\frac{1}{12} m_b \cdot l^2 + m_b \cdot (l_b)^2 + m_p \cdot (l_1)^2 + m_m \cdot (l_2)^2 \right]} \left[(W_p \cdot l_1 + W_m \cdot l_2) \cdot \theta + \left(\frac{B^2 \cdot \alpha^2}{R} \cdot x^2 \cdot v \right) \cdot l_2 - \left(\frac{\rho g^2 H^2 T}{32\pi} \right) \cdot l_1 \right] \quad (2.43)$$

Karena

$$x = l_2 \cdot \theta$$

$$v = l_2 \cdot \dot{\theta}$$

$$\dot{v} = l_2 \cdot \ddot{\theta}$$

$$\ddot{\theta} =$$

$$\frac{1}{\left[\frac{1}{12} m_b \cdot l^2 + m_b \cdot (l_b)^2 + m_p \cdot (l_1)^2 + m_m \cdot (l_2)^2 \right]} \left[(W_p \cdot l_1 + W_m \cdot l_2) \cdot \theta + \left(\frac{B^2 \cdot \alpha^2}{R} \cdot l_2^2 \cdot \theta^2 \cdot l_2 \cdot \dot{\theta} \right) \cdot l_2 - \left(\frac{\rho g^2 H^2 T}{32\pi} \right) \cdot l_1 \right] \quad (2.44)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{1}{\left[\frac{1}{12} m_b \cdot l^2 + m_b \cdot (l_b)^2 + m_p \cdot (l_1)^2 + m_m \cdot (l_2)^2 \right]} \left[(W_p \cdot l_1 + W_m \cdot l_2) \cdot \theta + \left(\frac{B^2 \cdot \alpha^2 \cdot l_2^4}{R} \right) \cdot \theta^2 \cdot \dot{\theta} - \left(\frac{\rho g^2 H^2 T}{32\pi} \right) \cdot l_1 \right] \quad (2.45)$$

2.2.7 Analisa Daya yang Dihasilkan oleh Mekanisme

Dengan mensubstitusikan persamaan 2.46, 2.47, dan 2.48 kedalam persamaan 2.39 maka diperoleh persamaan percepatan sudut batang pengungkit sebagai berikut:

$$\ddot{\theta} = \frac{1}{\left[\frac{1}{12}m_b.l^2+m_b.(l_b)^2+m_p.(l_1)^2+m_m.(l_2)^2\right]} \left[(W_p.l_1 + W_m.l_2) . \theta + \left(\frac{B^2.\alpha^2}{R} . x^2 . v \right) . l_2 - \left(\frac{\rho g^2 H^2 T}{32\pi} \right) . l_1 \right] \quad (2.49)$$

Karena

$$x = l_2 . \theta$$

$$v = l_2 . \dot{\theta}$$

$$\dot{v} = l_2 . \ddot{\theta}$$

$$\ddot{\theta} = \frac{1}{\left[\frac{1}{12}m_b.l^2+m_b.(l_b)^2+m_p.(l_1)^2+m_m.(l_2)^2\right]} \left[(W_p.l_1 + W_m.l_2) . \theta + \left(\frac{B^2.\alpha^2}{R} . l_2^2 . \theta^2 . l_2 . \dot{\theta} \right) . l_2 - \left(\frac{\rho g^2 H^2 T}{32\pi} \right) . l_1 \right] \quad (2.50)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{1}{\left[\frac{1}{12}m_b.l^2+m_b.(l_b)^2+m_p.(l_1)^2+m_m.(l_2)^2\right]} \left[(W_p.l_1 + W_m.l_2) . \theta + \left(\frac{B^2.\alpha^2.l_2^4}{R} \right) . \theta^2 . \dot{\theta} - \left(\frac{\rho g^2 H^2 T}{32\pi} \right) . l_1 \right] \quad (2.51)$$

2.2.8 Efisiensi sistem PLTGL

Efisiensi sistem didefinisikan sebagai daya yang dihasilkan dari gelombang air kolam (P_{wave}) dibagi dengan daya yang dihasilkan oleh mekanisme PLTGL (P_{output}). Nilai efisiensi mekanisme PLTGL menjadi ukuran global dalam menentukan kualitas performansi sistem PLTGL. Efisiensi yang dihasilkan oleh mekanisme PLTGL dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\eta_{alat} = \frac{P_{wave}}{P_{output}} \times 100\%$$

Keterangan:

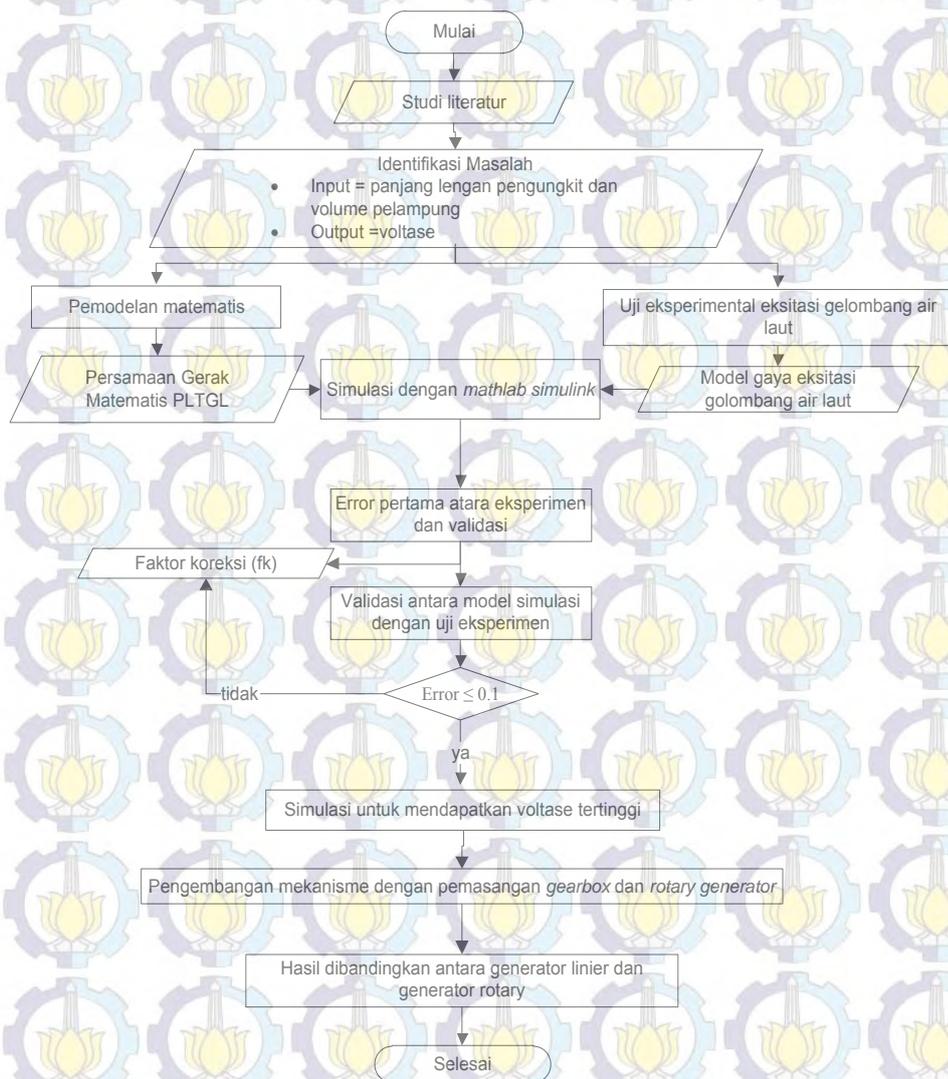
η_{alat} = Efisiensi dari sistem mekanisme (%).

P_{wave} = Daya yang dihasilkan oleh kolam (watt).

P_{output} = Daya yang dihasilkan sistem (watt).

BAB 3 METODE PENELITIAN

Untuk mencapai tujuan penelitian maka diperlukan langkah-langkah yang harus dilakukan. Langkah-langkah yang dilakukan dalam penelitian ini secara umum digambarkan dalam diagram alir sebagai berikut.



Gambar 3.1 Diagram alir metode penelitian PLTGL tipe pengungkit.

3.1 Studi Literatur

Langkah pertama yang dilakukan sebelum mendesain PLTGL tipe pengungkit, yaitu dengan mengumpulkan literatur penelitian sebelumnya kemudian merumuskan permasalahan yang ada dan mencari solusi dengan mengumpulkan literatur penelitian terbaru dan teori yang terkait dengan permasalahan yang ada.

Studi literatur dilakukan agar penulis dapat mengetahui posisi tema penelitian ini jika dibandingkan dengan penelitian-penelitian terdahulu baik yang berada di dalam kampus maupun di luar kampus peneliti, dan juga menambah wawasan pengetahuan penulis terhadap materi yang akan dibahas pada penelitian ini. Pada tahap studi literatur penulis melakukan kajian dan mengambil beberapa teori penunjang dari buku, artikel, jurnal ilmiah, dan penelitian terdahulu.

3.2 Identifikasi Masalah

Identifikasi masalah berguna untuk mengetahui kinerja dari mekanisme Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut (PLTGL) tipe pengungkit. Dengan variasi titik tumpu lengan dan volume pelampung, pengujian yang dilakukan bertujuan untuk memvalidasi hasil yang yang diperoleh antara metode eksperimen dan pemodelan. Hasil yang didapat berupa luasan voltase tertinggi yang diperoleh dari analisa simulasi untuk panjang lengan dan volume pelampung.

Tabel 3.1 Identifikasi variabel variasi dan pengembangan

No	Identifikasi variabel variasi dan pengembangan	Parameter
1.	Rasio Gearbox	1:4
2.	Panjang Lengan	0,5 m
3	Volume pelampung	
	v1	0.0019 m ³
	v2	0.0028 m ³
	v3	0.0042 m ³
4	Jumlah variasi titik lengan pengungkit	16 titik
5	Jumlah variasi titik lengan pengungkit	16 titik

Dari hasil penelitian Maris [3] diketahui bahwa daya pada yang dihasilkan oleh kolam uji sebesar 3,609 Watt. Dengan membandingkan antara perhitungan

gelombang air laut pada kondisi sebenarnya di lapangan yaitu sebesar 0,06 kW sampai 64 kW [2], maka disimpulkan bahwa penulis menggunakan perbandingan skala dengan aturan perhitungan sebagai berikut:

$$\text{skala model} = \frac{\text{daya pada kondisi laut sebenarnya}}{\text{daya kolam pengujian protitipe}} = \frac{60 \text{ W}}{3,609 \text{ W}} = 17$$

Sehingga skala yang akan dibuat adalah 1:17. Skala tersebut merupakan skala yang dapat dibangkitkan dengan asumsi daya yang akan diperoleh dari mekanisme asli adalah daya minimal gelombang laut. Dari skala model didapatkan rumusan untuk mengetahui energi yang dihasilkan oleh mekanisme PLTG pada saat 1:1 dengan kondisi laut yang sebenarnya.

$$P_{\text{real}} = \eta_{\text{alat}} \times \text{skala model} \times P_{\text{model}} \quad (3.1)$$

3.3 Pemodelan Matematis

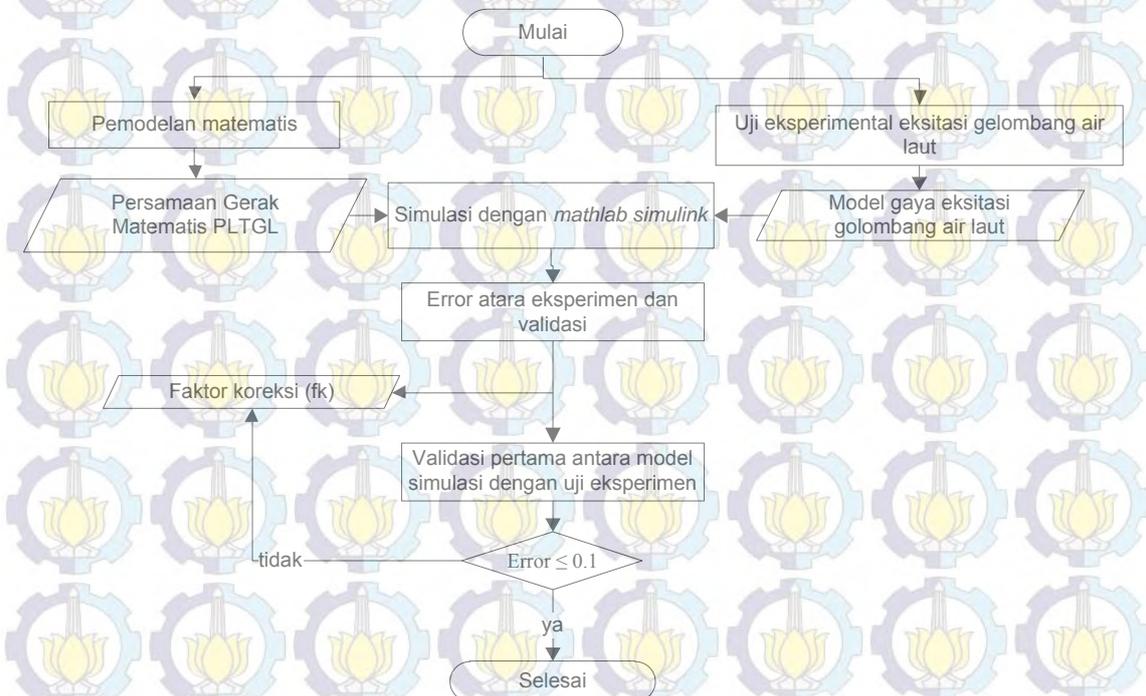
Pemodelan matematis mekanisme PLTGL tipe pengungkit dilakukan dengan tujuan untuk mendapatkan persamaan gerak sehingga dapat disimulasikan pada program *mathlab simulink*. Tahap akhir pemodelan Matematis PLTGL tipe pengungkit dilakukan dengan penyusunan state-variabel untuk sistem mekanisme lengan pengungkit ditambah dengan sistem elektromagnetik berupa generator linier.

3.4 Uji Eksperimental Eksitasi Gelombang Air Laut

Uji gelombang air laut dilakukan untuk mendapatkan nilai dan persamaan gerak air laut pada kolam uji. Dengan menggunakan osiloskop gelombang air laut sebagai gaya eksitasi dapat ditangkap secara real sesuai kondisi lapangan.

3.5 Simulasi Dengan *Mathlab Simulink*

Untuk mempermudah dalam melakukan simulasi, maka dibuat *flowchart* sebagai berikut.



Gambar 3.2 Diagram alir simulasi mekanisme PLTGL tipe pengungkit

Simulasi dibagi menjadi dua tahapan. Tahap pertama adalah simulasi untuk mendapatkan validasi antara metode simulasi dan eksperimen. Tahap kedua adalah simulasi untuk menentukan titik tertinggi voltase yang dibangkitkan oleh sistem dengan variasi panjang lengan pengungkit dan volume pelampung. Teknik menentukannya adalah dengan cara *looping* panjang titik tumpu lengan dan massa pelampung pada *matlab simulink*. *Looping* penentuan titik tumpu sebanyak 16 titik dengan panjang ya g sama pada batang pengungkit. Penentuan titik tumpu sebanyak 16 titik dilakukan sebatas simulasi, dan untuk eksperimen hanya menggunakan 3 titik tumpu terbaik yang dihasilkan pada simulasi.

Validasi hasil simulasi dilakukan terhadap uji eksperimen yang telah dilakukan pada penelitian sebelumnya. Tujuan dari validasi adalah untuk

mendapatkan model simulasi yang mendekati kondisi sebenarnya. Agar lebih jelas maka dibuat tahapan simulasi untuk keperluan validasi sebagai berikut.

Error yang kurang dari sama dengan 10% atau 0,1 antara model simulasi dan uji eksperimen menandakan model valid. *Error* ini tentu mengacu pada besaran yang saling dibandingkan. Agar dapat dibandingkan maka sebelumnya dilakukan RMS untuk hasil uji eksperimen dan pemodelan. Jika lebih dari itu maka proses dilakukan dengan menambahkan faktor koreksi yang telah didapat dari perhitungan antara error rata-rata antara, efisiensi hasil simulasi dan eksperimen. Eksperimen Mekanisme PLTGL Tipe Pengungkit

Pengujian Mekanisme dengan variasi titik tumpu lengan dan volume pelampung dilakukan untuk proses validasi terhadap metode pemodelan yang telah dilakukan, sekaligus untuk mengetahui pengaruh hubungan input output antara energi yang dihasilkan oleh gelombang berupa voltase (tegangan). Untuk mempermudah dalam eksperimen dapat digambarkan dalam *flowchart* sebagai berikut.



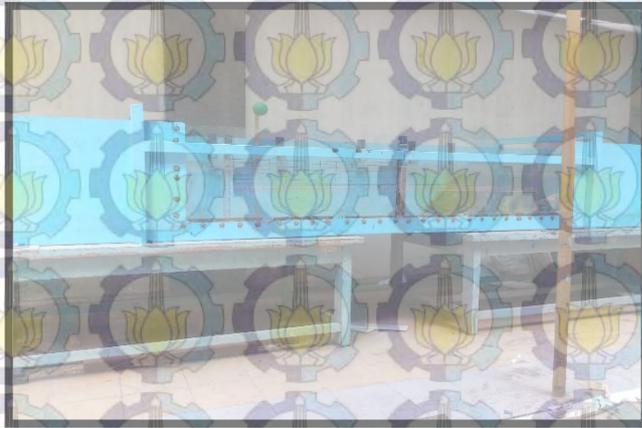
Gambar 3.3 Diagram alir pengujian mekanisme PLTGL tipe pengungkit

Adapun peralatan yang digunakan untuk melakukan pengujian antara lain sebagai berikut:

- **Kolam**

Kolam merupakan media untuk dilakukannya pengujian terhadap mekanisme PLTGL tipe pengungkit ini dimana pada kolam tersebut dapat dihasilkan gelombang yang merupakan sumber utama dalam membangkitkan

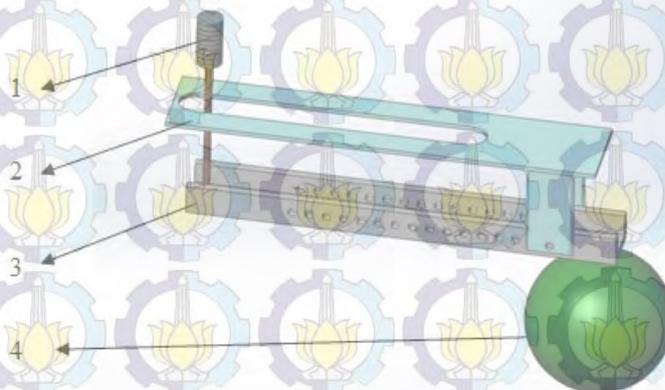
listrik melalui mekanisme yang dirancang. Dimensi kolam yang digunakan ialah 5x1x1 m.



Gambar 3.4 Kolam pengujian

- **Mekanisme PLTGL Tipe Pengungkit**

Dalam dilakukannya pengujian tentunya menggunakan mekanisme yang telah dirancang yakni mekanisme PLTGL Tipe Pengungkit dimana pada mekanisme ini terdiri atas komponen utama yakni pelampung sebagai konversi gerakan gelombang menjadi gerakan naik turun, komponen lengan pengungkit sebagai penggerak utama mekanisme yang turut menggerakkan magnet sehingga dapat menghasilkan listrik dan komponen magnet itu sendiri sebagai penghasil listrik dengan prinsip induksi elektromagnetik.



Gambar 3.5 PLTGL tipe pengungkit

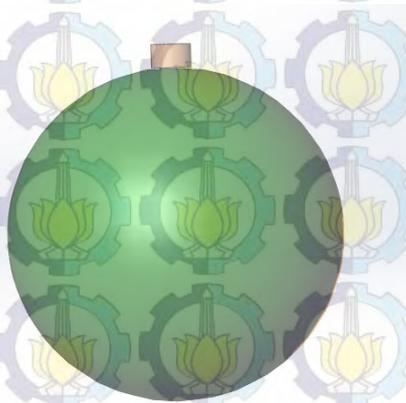
Keterangan

1. Generator linier
2. *Holder*
3. Batang pengungkit
4. Pelampung

Komponen komponen mekanisme PLTGL akan dijelaskan sebagai berikut:

- **Pelampung**

Pelampung yang digunakan berbentuk bola. Bahan yang digunakan pada pelampung adalah plastik. Pelampung divariasikan kedalam tiga volume. Untuk volume pertama (v_1) sebesar 1.2 liter, volume kedua sebesar 1,5 liter dan volume ketiga sebesar 1,8 liter.gambar dari desain pelampung adalah sebagai berikut:



Gambar 3.6 Pelampung bola

- **Batang pengungkit**

Bahan yang digunakan pada batang pengungkit adalah plastic acrylic. Bentuk dari batang pengungkit ialah U profil dengan panjang 500 mm. Gambar dari batang pengungkit adalah sebagai berikut:



Gambar 3.7 Batang pengungkit

- **Magnet linier**

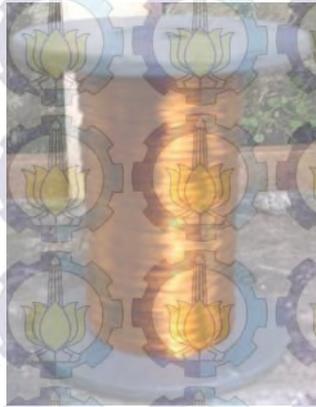
Magnet yang digunakan adalah magnet keping berjumlah 14 disusun seri, dengan ukuran tiap keping adalah diameter 18mm dan tebal tiap magnet adalah 3mm.



Gambar 3.8 Magnet linier

- **Kawat kumparan**

Kawat yang digunakan pada kumparan adalah kawat dengan diameter 0.2 mm dan dililitkan pada pipa plastik dengan diameter pipa plastik 20 mm.



Gambar 3.9 Kawat kumparan

- **Perekam Data dan Pengolah Data**

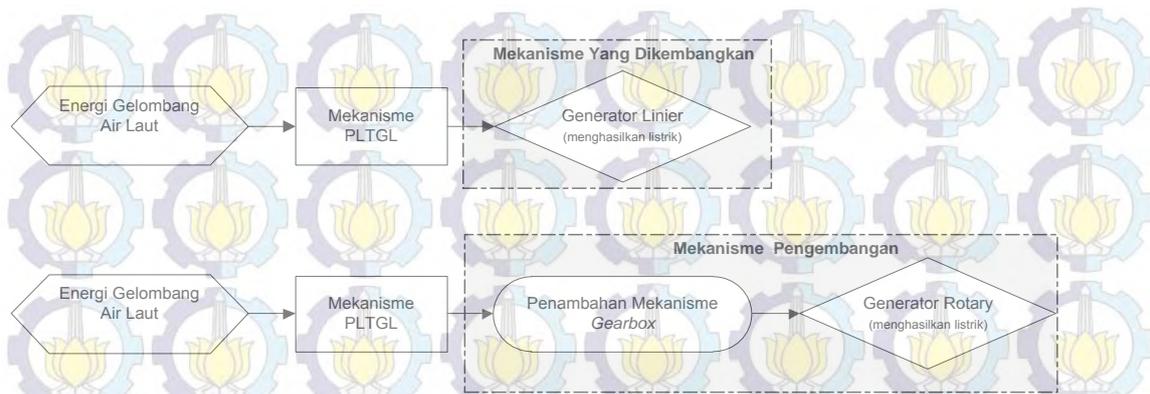
Untuk merekam data pada pengujian ini digunakan *Digital Storage Oscilloscope* dengan merk UNI-T UT2062C, keluaran dari alat ini ialah data tegangan yang dihasilkan oleh mekanisme PLTGL. Data tersebut berupa grafik voltase bangkitan induksi elektromagnetik terhadap waktu.



Gambar 3.10 *Digital Storage Oscilloscope*

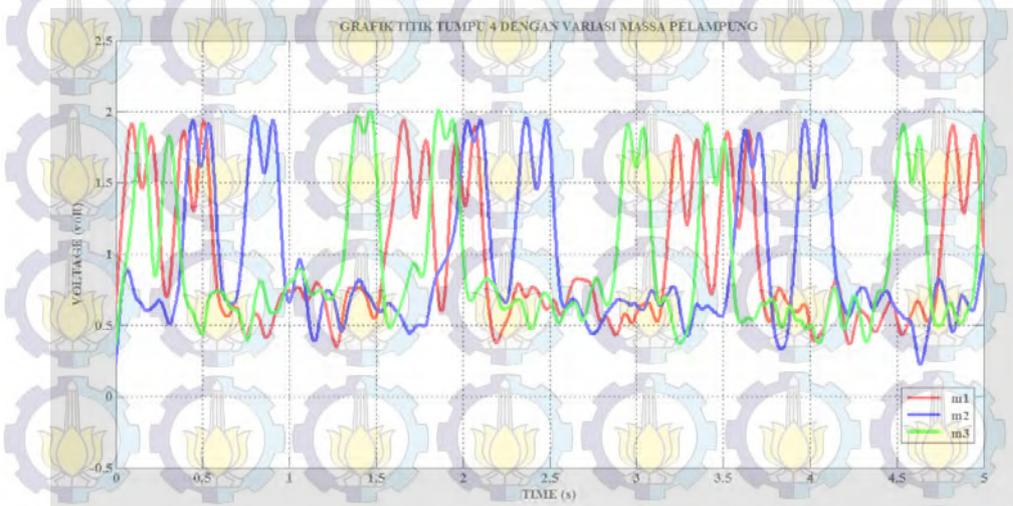
3.6 Pengembangan Mekanisme

Pengembangan dilakukan untuk memperbaiki mekanisme yang telah dibuat. Pengembangan yang dilakukan adalah dengan menambahkan mekanisme *Gearbox* dan generator rotasi. Tujuan dari penambahan *Gearbox* untuk mendapatkan energi listrik yang lebih besar. Sebagai penghubung antara mekanisme PLTGL dan mekanisme *Gearbox* dengan mengganti linier generator dengan roda gigi *rack*. Sedangkan generator linier diganti dengan generator rotary. Gambar mekanisme pengembangan adalah sebagai berikut:



Gambar 3.11 Bagan pengembangan PLTGL tipe pengungkit

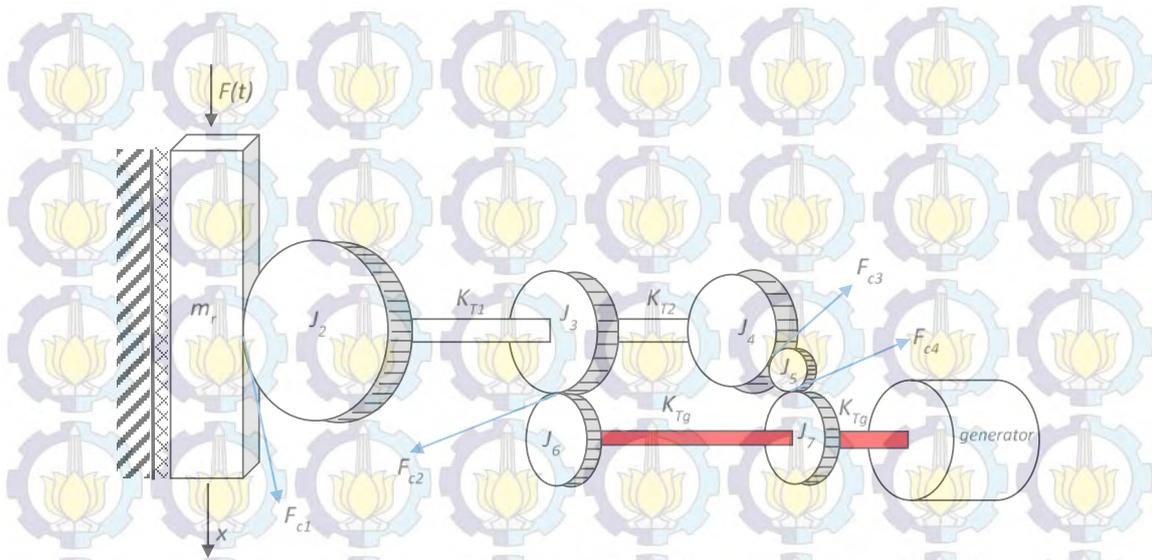
Perbedaan yang mendasar dari penelitian sebelumnya [3] terletak pada penambahan gear box untuk mendapatkan energi listrik yang bersifat konstan dengan mengaplikasikan generator rotary. Hasil energi listrik pada penelitian sebelumnya adalah sebagai berikut:



Gambar 3.12 Grafik voltase bangkitan yang dihasilkan pada penelitian sebelumnya [3]

- **Desain Gearbox**

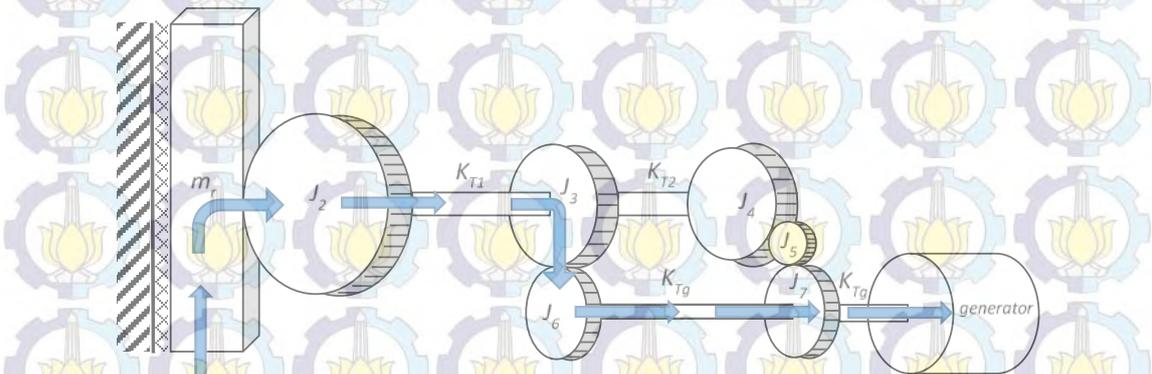
Desain gearbox yang di lakukan pada tahap pengembangan ini adalah sebagai berikut



Gambar 3.13 Mekanisme pengembangan gearbox

- **Aliran Tenaga pada Gearbox**

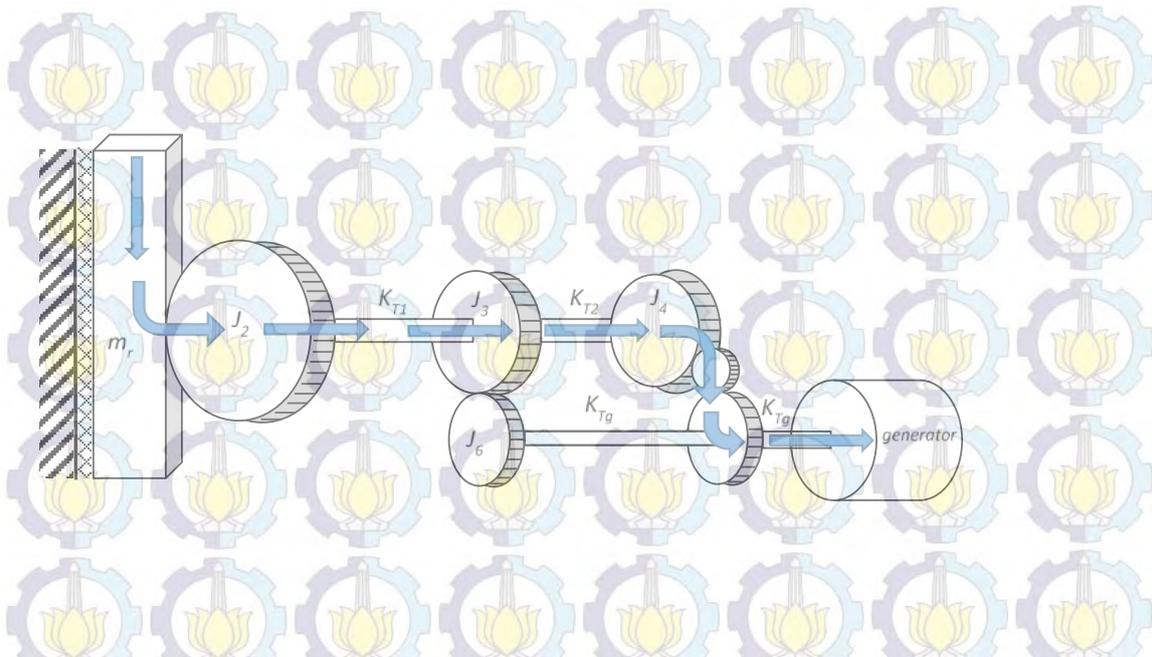
Saat pelampung terangkat naik maka aliran gaya yang terjadi adalah sebagai berikut.



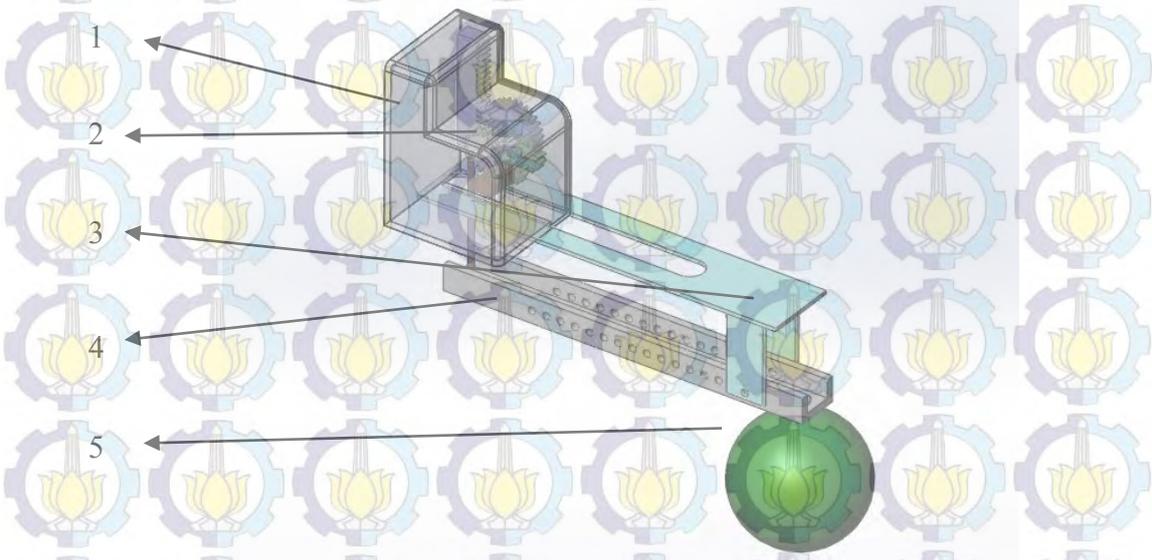
Gambar 3.14 Aliran tenaga pada gearbox saat pelampung naik

- **Saat pelampung turun**

Saat pelampung bergerak turun maka aliran gaya yang terjadi adalah sebagai berikut



Gambar 3.15 Aliran tenaga pada gearbox saat pelampung turun



Gambar 3.16 Mekanisme PLTGL beserta pengembangannya

Keterangan gambar

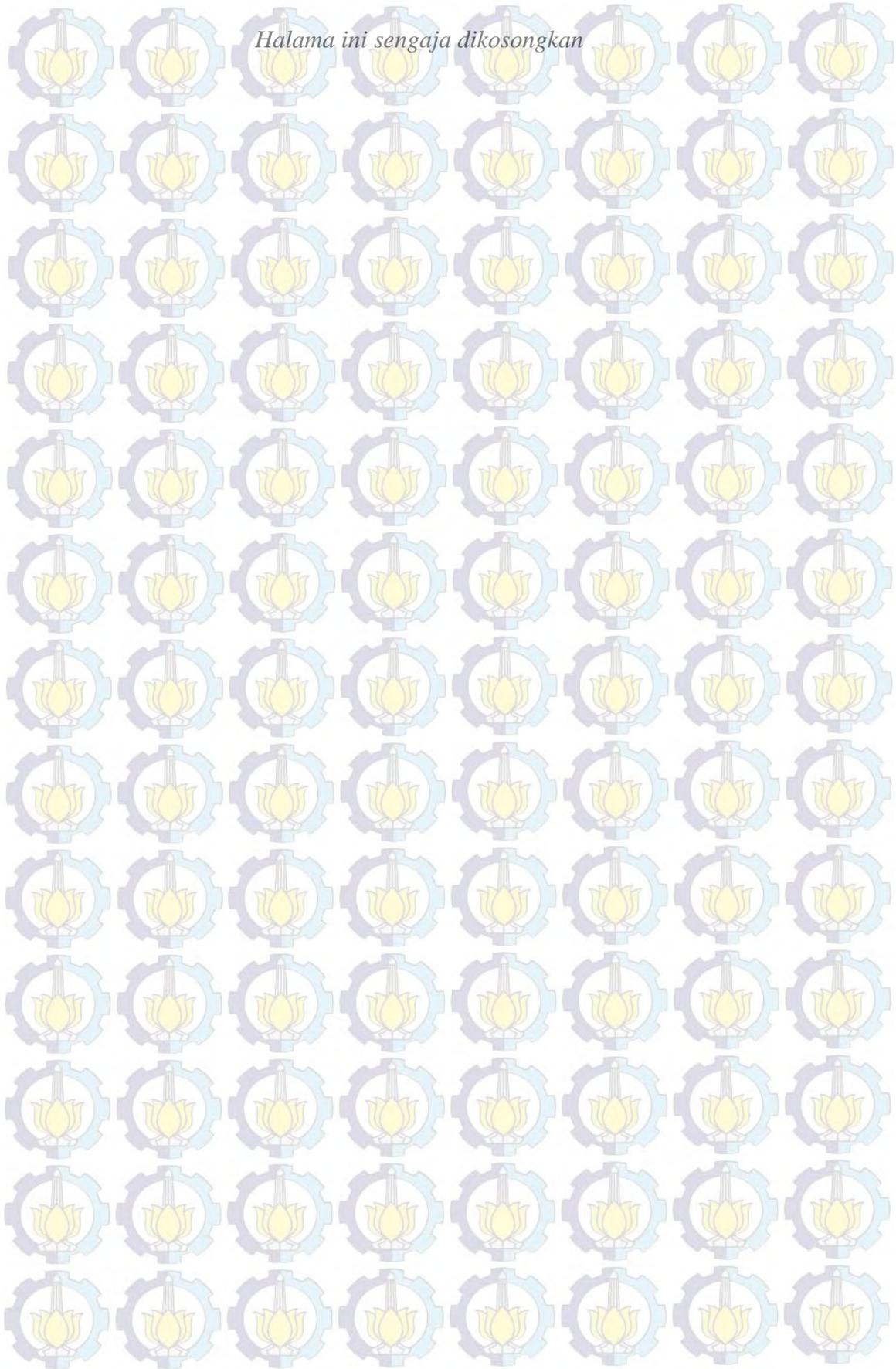
1. Rumah roda gigi
2. Rotary generator-gear box
3. Holder
4. batang pengungkit

5. pelampung

3.7 Analisa Hasil dan Pengolahan Data

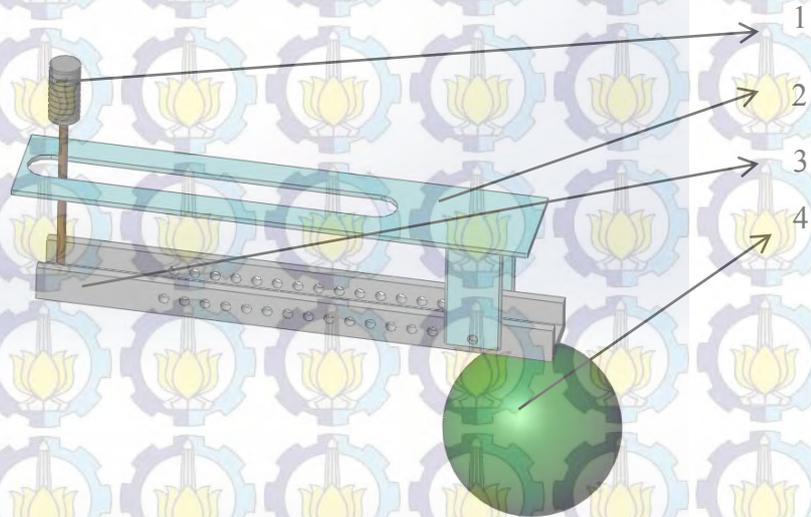
Terdapat dua analisa hasil yang diperoleh pada penelitian ini yaitu analisa hasil mekanisme PLTGL menggunakan linier generator dan analisa hasil mekanisme PLTGL menggunakan *gerabox-rotary generator*. Kedua hasil pengujian tersebut akan dibandingkan dan kemudian ditarik kesimpulan. Data yang diperoleh dari hasil pengujian PLTGL menggunakan tipe pengungkit menggunakan pengembangan mekanisme akan diolah sehingga hasil pegujian akan ditampilkan dalam bentuk grafik 2D. Grafik yang ditampilkan berupa grafik bangkitan daya, energi dan arus. Setelah itu grafik akan dianalisa dan diterjemahkan dan disimpulkan.

Halama ini sengaja dikosongkan



BAB 4 ANALISA DAN PEMBAHASAN

4.1 PLTGL tipe pengungkit Generator linier



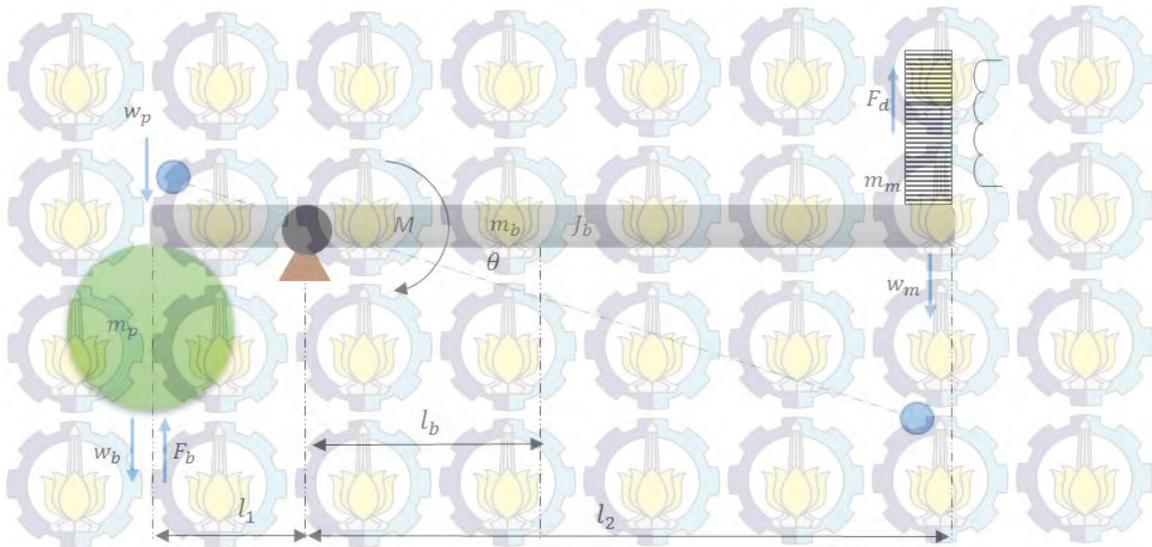
Gambar 4.1 Simulator PLTGL tipe pengungkit generator linier

Keterangan:

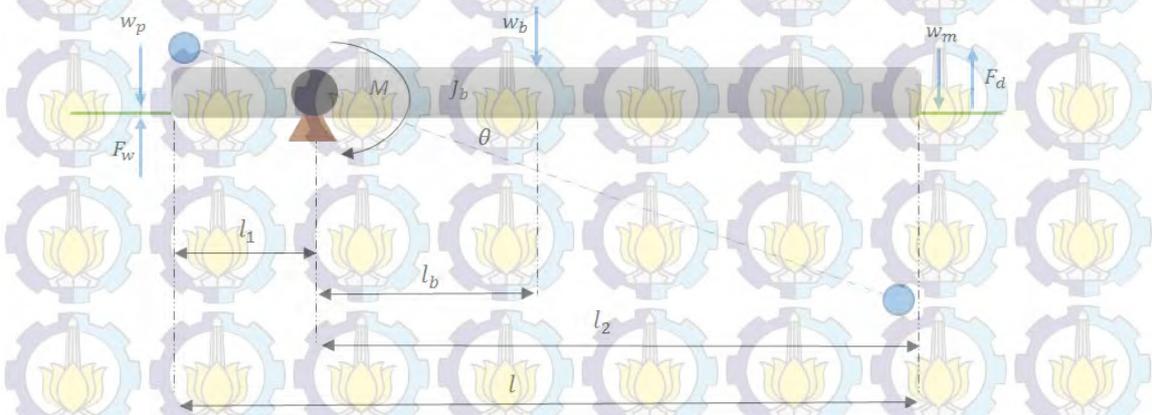
1. Generator linier
2. Penyangga (Holder)
3. Batang pengungkit
4. Pelampung

4.1.1 Pemodelan matematis PLTGL tipe pengungkit generator linier

Pemodelan matematis PLTGL Generator linier dan generator rotary terbagi menjadi dua bagian. Bagian pertama adalah memodelkan mekanisme batang pengungkit dan yang kedua adalah memodelkan mekanisme elektromagnetik. Model matematis PLTGL generator linier adalah sebagai berikut.



Gambar 4.2 Mekanisme Batang Pengungkit PLTGL



Gambar 4.3 Free Body Diagram (FBD) mekanisme batang PLTGL

$$\sum M = J_o \cdot \ddot{\theta}$$

$$F_w \cdot l_1 - W_p(l_1 + l_1 \sin \theta) + W_m(l_2 - l_2 \sin \theta) - F_d \cdot l_2 + F_b \cdot l_1 = J_o \cdot \ddot{\theta} \quad (4.1)$$

Karena nilai θ mendekati, maka $\sin \theta = \theta$, maka didapat persamaan sebagai berikut:

$$F_w \cdot l_1 - W_p \cdot l_1 - W_p \cdot l_1 \cdot \theta + W_m \cdot l_2 - W_m \cdot l_2 \cdot \theta - F_d \cdot l_2 + F_b \cdot l_1 = J_o \cdot \ddot{\theta}$$

$$F_w \cdot l_1 - W_p \cdot l_1 + W_m \cdot l_2 - F_d \cdot l_2 - (W_p \cdot l_1 + W_m \cdot l_2) \cdot \theta + F_b \cdot l_1 = J_o \cdot \ddot{\theta} \quad (4.2)$$

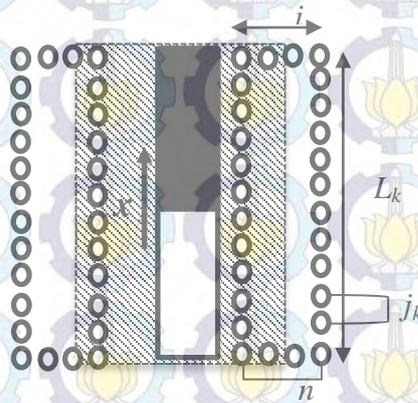
$$J_o \cdot \ddot{\theta} = F_w \cdot l_1 - (W_p \cdot l_1 + W_m \cdot l_2) \theta - F_d \cdot l_2$$

$$F_w \cdot l_1 = J_o \cdot \ddot{\theta} + F_d \cdot l_2 + (W_p \cdot l_1 + W_m \cdot l_2) \cdot \theta \quad (4.3)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{1}{J_o} [F_w \cdot l_1 - (W_p \cdot l_1 + W_m \cdot l_2) \theta - F_d \cdot l_2] \quad (4.4)$$

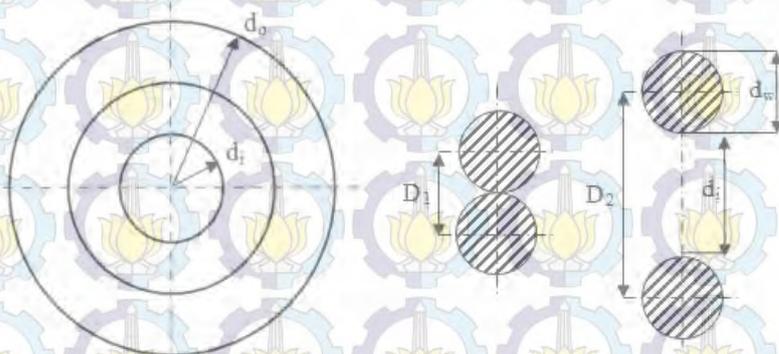
1. Persamaan Generator Linier

Persamaan gerak linier generator digunakan untuk menentukan tegangan yang dibangkitkan oleh mekanisme sistem, gambar tampak samping generator linier adalah seperti gambar 4.4 dibawah ini.



Gambar 4.4 kuat medan magnet linier penampang melintang

Pada gambar 4.4 terlihat susunan kumparan tampak melintang dimana kuat medan magnet yang dihasilkan dipengaruhi oleh jumlah lilitan (n), diameter kumparan (i), jumlah kumparan yang tersusun vertikal (j_k), dan panjang kumparan (L_k). Sedangkan susunan diameter dalam (d_i) dan diameter luar (d_o) pada kumparan magnet linier tampak atas seperti gambar 4.5 sebagai berikut.



Gambar 4.5 Susunan kawat pada kumparan generator linier

Panjang diameter terdalam (D_1) dan diameter terluar kumparan (D_2) dapat dituliskan dengan rumusan sebagai berikut.

$$D_1 = d_i + d_w \quad (4.5)$$

$$D_2 = d_i + n \cdot d_w \quad (4.6)$$

Nilai parameter dari generator linier sesuai dengan hasil perhitungan dan pengukuran geometri linier generator, data inilah nantinya akan diolah dengan simulink matlab hingga akan keluar nilai-nilai output yang diinginkan. Nilai parameter generator linier ditunjukkan pada tabel 4.1 sebagai berikut.

Tabel 4.1 Nilai parameter generator linier

Parameter	Simbol (unit)	Nilai Parameter
Diameter kawat kumparan	d_w (m)	2×10^{-4}
Jari-jari kawat kumparan	d_i (m)	1×10^{-4}
Jumlah lilitan kawat	l (m)	3000
Tinggi kumparan	L_k (m)	0,35
Jumlah kumparan	n	3000
Jari-jari kumparan	i (m)	0.1

Untuk mencari keliling kumparan (k_k) dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut.

$$k_k = \pi \cdot D$$

$$d k_k = \pi \cdot D dD$$

$$\int dk_k = \int \pi \cdot D dD$$

$$k_k = \frac{1}{2} \pi \cdot D^2 \Big|_{D_1}^{D_2}$$

$$k_k = \frac{\pi \cdot D_2^2}{2} - \frac{\pi \cdot D_1^2}{2}$$

$$k_k = \frac{1}{2} (\pi \cdot D_2^2 - \pi \cdot D_1^2) \quad (4.7)$$

Substitusi persamaan dengan persamaan 4.5 dan 4.6 ke dalam persamaan 4.7 dengan perhitungan sebagai berikut.

$$k_k = \frac{1}{2} (\pi \cdot (d_i + n \cdot d_w)^2 - \pi \cdot (d_i + d_w)^2)$$

$$\begin{aligned}
 k_k &= \frac{\pi}{2} (d_i^2 + 2.n.d_i.d_w + n^2.d_w^2 - d_i^2 - 2.d_i.d_w - d_w^2) \\
 k_k &= \frac{\pi}{2} (n^2.d_w^2 - d_w^2 + 2.n.d_i.d_w - 2.d_i.d_w) \\
 k_k &= \frac{\pi}{2} (n^2 - 1).d_w^2 + 2.d_i.d_w(n - 1) \quad (4.8)
 \end{aligned}$$

Untuk mencari panjang kumparan (l_k) didapatkan dengan mengalikan jumlah susunan baris kawat kumparan (j_k) dengan keliling kumparan (k_k) sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 l_k &= j_k.k_k \\
 l_k &= \frac{x}{d_w}.k_k \\
 l_k &= \frac{x}{d_w}.\left(\frac{\pi}{2}(n^2 - 1).d_w^2 + 2.d_i.d_w(n - 1)\right) \\
 l_k &= \frac{x}{d_w}.\left(\frac{\pi}{2}(n^2 - 1).d_w^2 + 2.d_i.d_w(n - 1)\right) \\
 l_k &= x.\left(\frac{\pi}{2}(n^2 - 1).d_w + 2.d_i.(n - 1)\right) \\
 l_k &= \left(\frac{\pi}{2}(n^2 - 1).d_w + 2.d_i.(n - 1)\right).x \quad (4.9)
 \end{aligned}$$

Pada persamaan 4.9 disederhanakan untuk mempermudah perhitungan dengan simbol α

$$\alpha = \left(\frac{\pi}{2}(n^2 - 1).d_w + 2.d_i.(n - 1)\right) \quad (4.10)$$

Sehingga persamaannya menjadi

$$l_k = \alpha.x \quad (4.11)$$

Untuk mencari tegangan (ε_{ind}) maka dilakukan substitusi persamaan 2.31 dan ke persamaan 2.24

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_{ind} &= B.l_k.v \\
 \varepsilon_{ind} &= B.\alpha.x.v \quad (4.12)
 \end{aligned}$$

2. Parameter hasil desain PLTGL tipe pengungkit generator linier

Data parameter PLTGL sesuai dengan hasil perhitungan geometri. Data yang dihasilkan dari perhitungan tersebut akan dihitung dan diolah menggunakan

matlab sehingga didapatkan nilai-nilai luaran yang diinginkan. Parameter-parameter yang dianalisa adalah sebagai berikut.

- **Perrhitungan parameter keseluruhan sistem PLTGL**

Tabel 4.2 parameter gelombang simulator

Model parameter	Simbol (unit)	Nilai parameter
Tinggi gelombang	H (m)	0,11
Periode gelombang	T (s)	1
Frekuensi	f (Hz)	1, 2 dan 3
Massa jenis	ρ (kg/m ³)	1000
Percepatan grafitasi	g (kg.m/s ²)	9,8

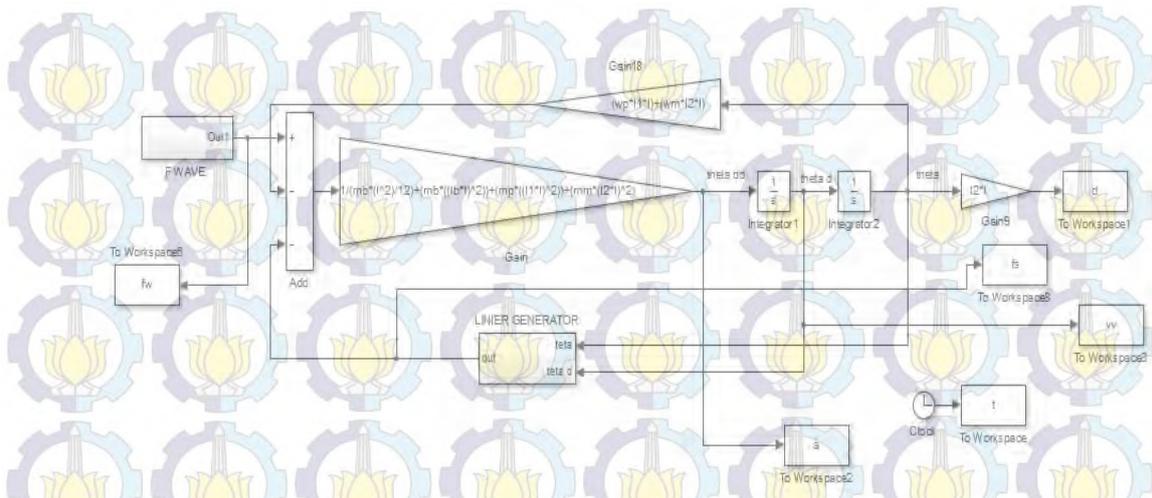
Tabel 4.3 Parameter mekanisme PLTGL tipe pengungkit generator linier

Model parameter	Simbol (unit)	Nilai Parameter
Volume pelampung	P1 (m ³)	0.0019 (P1)
	P2 (m ³)	0.0028 (P2)
	P3 (m ³)	0.0042 (P3)
Massa Lengan	mb (m)	0.612
Panjang Lengan	l (m)	0.5
Periode Gelombang	T (s)	1
Massa magnet	Mm (kg)	0.2
Kuat medan magnet	B (wb/m ²)	0.1
Panjang kawat kumparan	L (m)	188.4
Induktansi	L	0.15
Hambatan listrik generator linier	Ri (ohm)	1

3. Simulink PLTGL generator linier

Hasil dari pemodelan matematis adalah persamaan gerak yang menjadi acuan dalam pembuatan blok diagram. Blok diagram dibuat pada simulink matlab sehingga mekanisme PLTGL dapat disimulasikan sehingga dapat diketahui pengaruh antara volume pelampung dan pergeseran titik tumpu lengan pengungkit terhadap energi bangkitan.

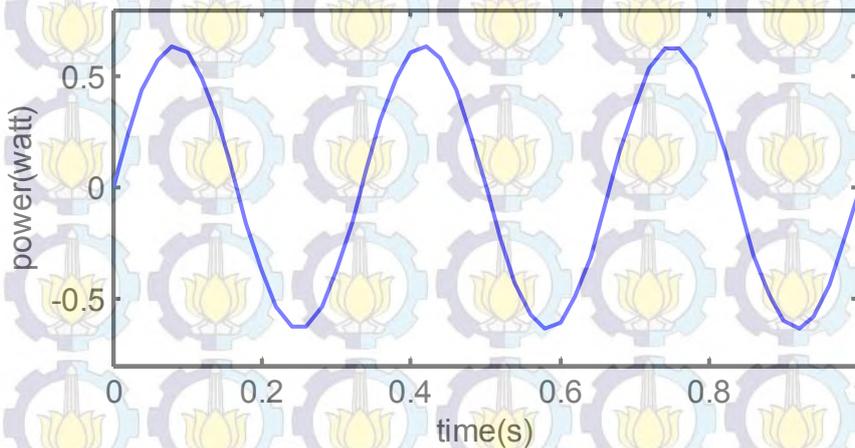
Dilakukan pembuatan blok diagram PLTGL dengan generator linier ditunjukkan pada gambar 4.6 sebagai berikut.



Gambar 4.6 Blok diagram PLTGL dengan linier generator

- **Pemodelan inputan gelombang air laut**

Gaya eksitasi yang diberikan pada simulasi PLTGL dikondisikan sesuai dengan bentuk gelombang air laut yang berupa gaya sinusoidal. Grafik gaya gelombang air laut ditampilkan pada gambar 4.7 sebagai berikut.



Gambar 4.7 Daya input pemodelan gelombang air laut

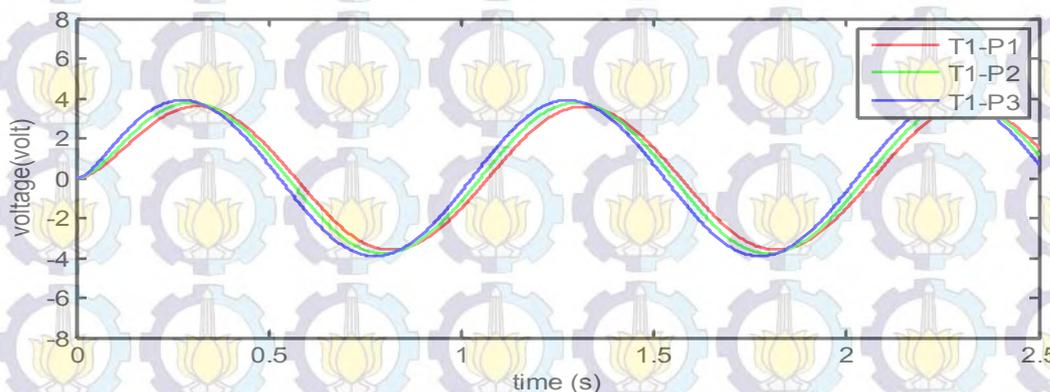
Dari gambar 4.7 dihasilkan pada kolom simulator yang digunakan dalam simulasi ini yaitu sebesar 0.0486 watt. Dari daya tersebut diteruskan untuk menggerakkan mekanisme PLTGL tipe pengungkit generator linier.

4. Hasil simulasi dan analisa berupa tegangan pada pemodelan time respon

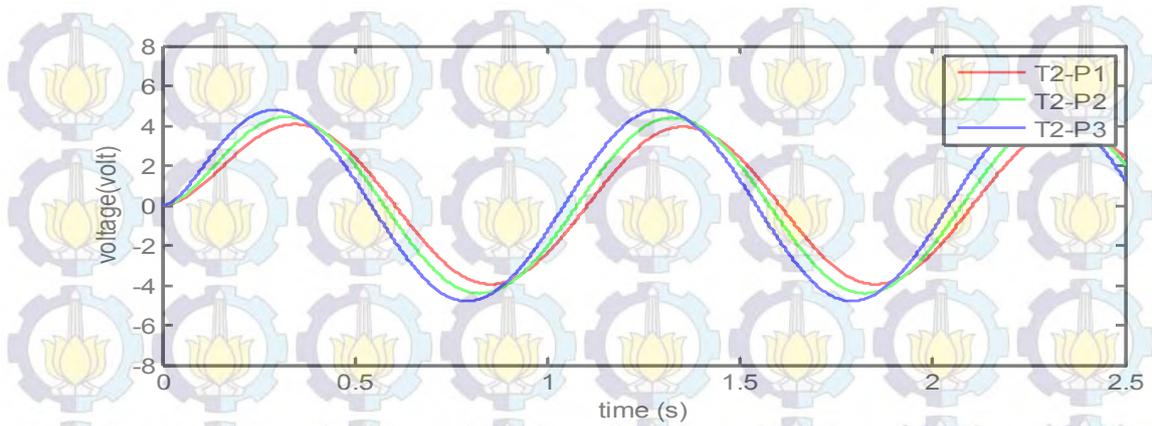
Pada simulasi ini didapatkan gelombang laut dan energi bangkitan dari mekanisme PLTGL tipe pengungkit generator rotary, gaya yang digunakan pada pemodelan ini berupa sinusiodal gelombang air laut. Frekuensi eksitasi gelombang air laut bervariasi pada 1 Hz (f_1), 2 Hz (f_2), 3 Hz (f_3). Sedangkan untuk variasi volume pelampung adalah 0.0019 m^3 (P1), 0.0028 m^3 (P2), dan 0.0052 m^3 (P3). Untuk variasi titik tumpu sebanyak tiga titik tumpu yaitu 25 cm (T1), 31.25 cm (T2), dan 37,5 cm (T3) dari lengan yang terhubung pada pelampung (l_1). Dari masing-masing variasi didapat pengaruh titik tumpu dan volume pelampung terhadap energi listrik yang dihasilkan.

a. Tegangan yang dihasilkan pada variasi titik tumpu terhadap variasi volume pelampung pada frekuensi 1 Hz

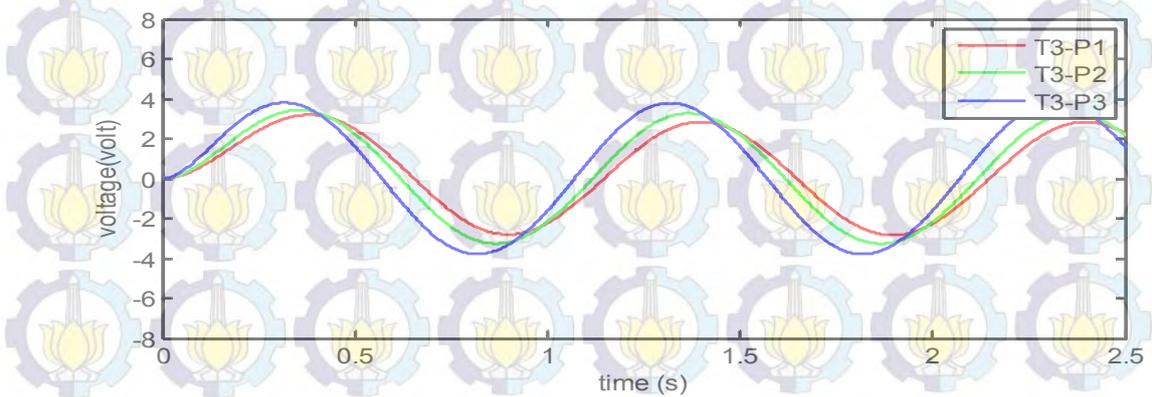
Variasi titik tumpu T1, T2, T3 dan variasi volume pelampung P1, P2, P3 pada frekuensi 1 Hz. Pengaruh volume pelampung dan panjang lengan terhadap tegangan listrik yang dihasilkan, besarnya tegangan yang dihasilkan ditampilkan pada gambar 4.8 sampai dengan gambar 4.10 dibawah ini



Gambar 4.8 Grafik respon energi yang dihasilkan pada titik tumpu 1 (T1) dengan variasi pelampung P1, P2, P3



Gambar 4.9 Grafik respon energi yang dihasilkan pada titik tumpu 1 (T2) dengan variasi pelampung P1, P2, P3



Gambar 4.10 Grafik respon energi yang dihasilkan pada titik tumpu 1 (T3) dengan variasi pelampung P1, P2, P3

Dari gambar 4.8 sampai gambar 4.10 terlihat bahwa perbedaan tegangan yang dihasilkan pada perubahan panjang titik tumpu dan volume pelampung, masing-masing RMS tegangan yang dihasilkan disajikan pada tabel 4.4 sebagai berikut.

Tabel 4.4 Hasil simulasi pada frekuensi 1

Spesimen yang divariaskan		Tegangan hasil simulasi (volt)
f1	T1-P1	2.340
	T1-P2	2.365
	T1-P3	2.370
	T2-P1	2.489
	T2-P2	2.533
	T2-P3	2.542
	T3-P1	2.298

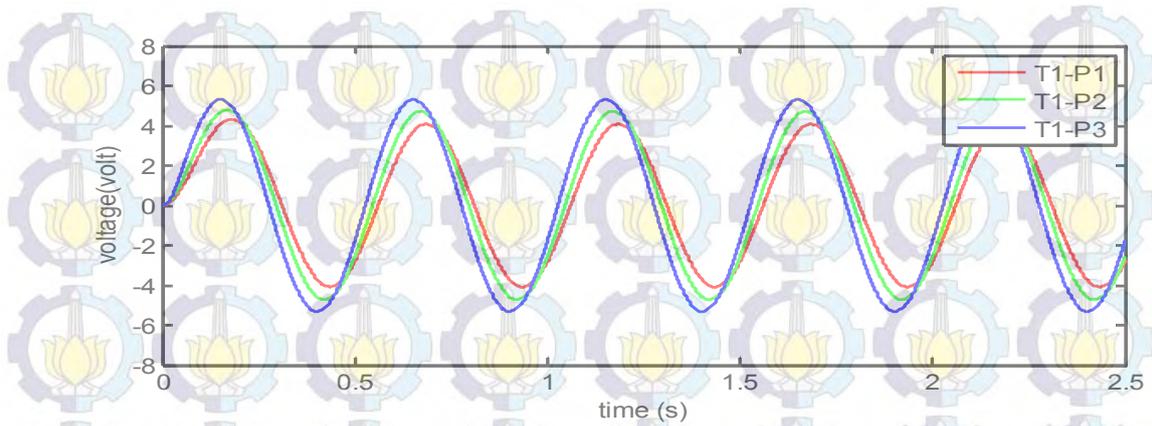
T3-P2	2.348
T3-P3	2.358

Pada tabel 4.4 diatas tegangan tertinggi dihasilkan oleh titik tumpu tiga (T3) dengan variasi volume pelampung ketiga (P3) dengan RMS tegangan yang dihasilkan sebesar 2.358 volt. Perubahan hasil bangkitan tegangan sangat dipengaruhi oleh panjang titik tumpu dan volume pelampung. Dari masing-masing variasi didapat pengaruh panjang titik tumpu dan volume pelampung terhadap energi listrik yang dihasilkan. Perubahan titik tumpu sangat berpengaruh terhadap torsi yang dihasilkan, semakin kecil torsi yang dihasilkan oleh lengan l_1 maka semakin besar kecepatan generator linier, semakin cepat gerakan generator linier maka semakin besar pula tegangan yang dihasilkan.

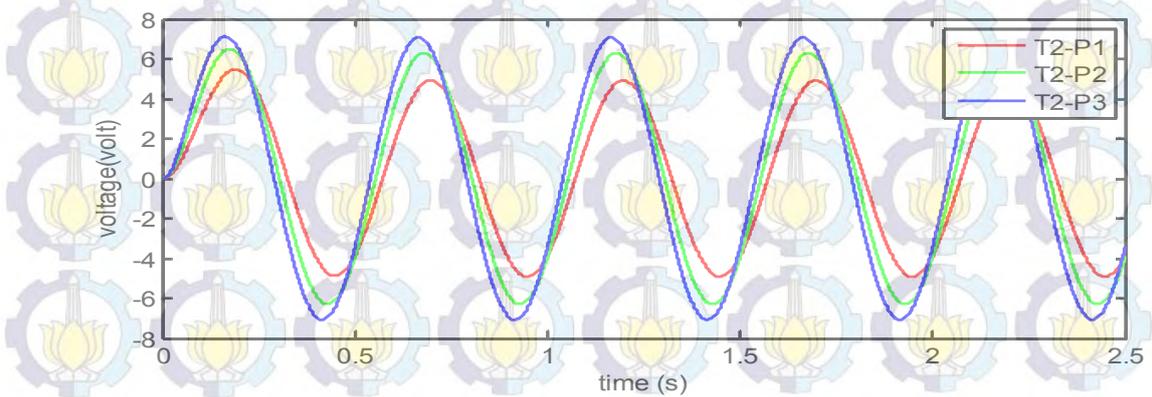
Perubahan hasil bangkitan tegangan sangat dipengaruhi oleh volume pelampung dan titik tumpu lengan pengungkit. Dari masing-masing variasi didapat pengaruh volume pelampung dan titik tumpu lengan pengungkit terhadap energi listrik yang dihasilkan. Namun terjadi penurunan tegangan pada titik tumpu ke tiga setelah sebelumnya naik dari titik tumpu pertama menuju kedua. Hal ini disebabkan karena semakin titik tumpu mendekati generator maka semakin besar perubahan torsi yang dihasilkan. Semakin kecil torsi yang dihasilkan maka kecepatan yang dihasilkan oleh generator linier semakin besar. Perubahan volume pelampung sangat berpengaruh terhadap tegangan yang dihasilkan, hal tersebut diakibatkan karena semakin besar volume pelampung maka gaya angkat yang dihasilkan semakin besar.

b. Tegangan yang dihasilkan pada variasi titik tumpu terhadap variasi volume pelampung pada frekuensi 2 Hz

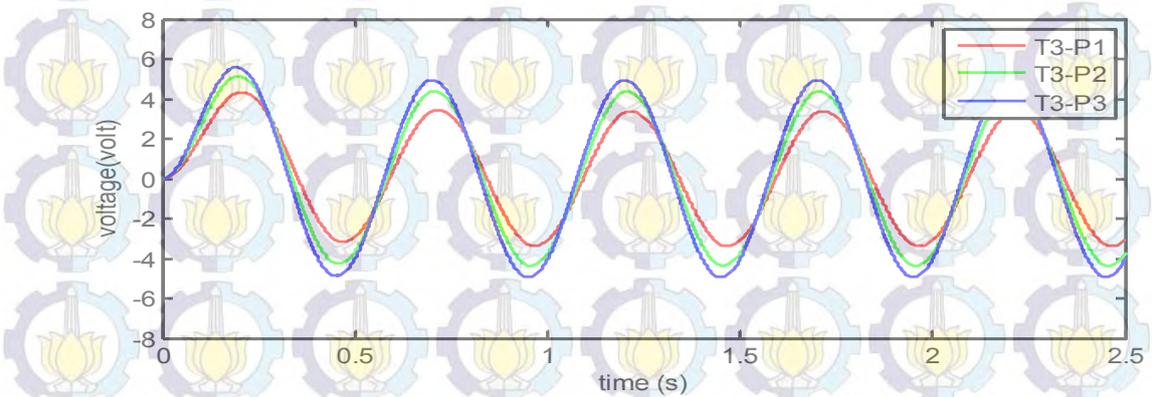
Variasi titik tumpu T1, T2, T3 dan variasi volume pelampung P1, P2, P3 pada frekuensi 2 Hz. Pengaruh volume pelampung dan panjang lengan terhadap tegangan listrik yang dihasilkan, besarnya tegangan yang dihasilkan ditampilkan pada gambar 4.11 samapai 4.13 dibawah ini.



Gambar 4.11 Grafik respon energi yang dihasilkan pada titik tumpu 1 (T1) dengan variasi pelampung P1, P2, P3



Gambar 4.12 Grafik respon energi yang dihasilkan pada titik tumpu 2 (T2) dengan variasi pelampung P1, P2, P3



Gambar 4.13 Grafik respon energi yang dihasilkan pada titik tumpu 3 (T3) dengan variasi pelampung P1, P2, P3

Dari gambar 4.11 sampai gambar 4.13 terlihat bahwa perbedaan tegangan yang dihasilkan pada perubahan panjang titik tumpu dan volume pelampung,

masing-masing RMS tegangan yang dihasilkan disajikan pada tabel 4.5 sebagai berikut.

Tabel 4.5 Hasil simulasi pada frekuensi 2

Spesimen yang divariasikan	Tegangan hasil simulasi (volt)
T1-P1	3.042
T1-P2	3.074
T1-P3	3.081
T2-P1	3.236
T2-P2	3.293
T2-P3	3.304
T3-P1	2.988
T3-P2	3.052
T3-P3	3.066

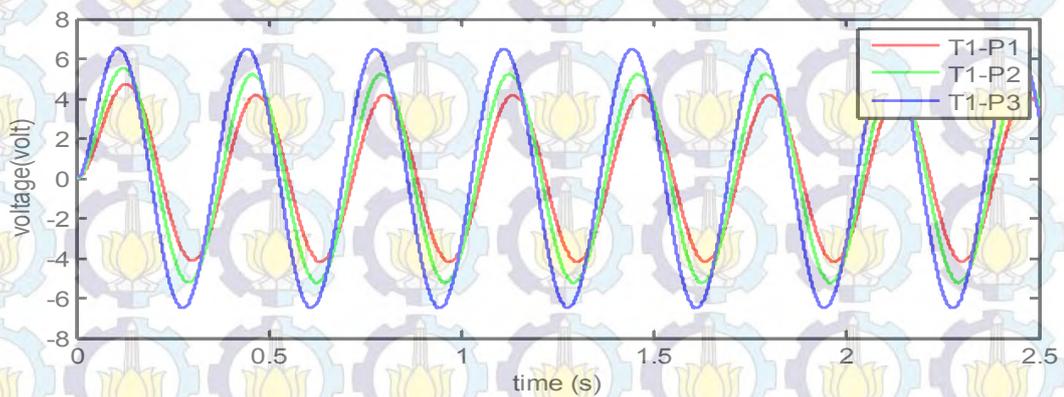
Pada kondisi frekuensi 2 dengan titik tumpu tiga (T3) dengan variasi volume pelampung (P1, P2, dan P3) tegangan yang dihasilkan masing masing sebesar 3.042 volt, 3.074 volt, dan 3.081 volt. Untuk titik tumpu kedua (T2) dengan variasi volume pelampung (P1, P2, dan P3) tegangan yang dihasilkan masing masing sebesar tegangan yang dihasilkan sebesar 3.236 volt, 3.293 volt, dan 3.304 volt. Sedangkan pada titik tumpu 3 (T3) dengan variasi volume pelampung (P1, P2, dan P3) tegangan yang dihasilkan masing masing sebesar 2.988 volt, 3.052 volt, dan 3.066 volt.

Perubahan hasil bangkitan tegangan sangat dipengaruhi oleh volume pelampung dan titik tumpu lengan pengungkit. Dari masing-masing variasi didapat pengaruh volume pelampung dan titik tumpu lengan pengungkit terhadap energi listrik yang dihasilkan. Namun terjadi penurunan tegangan pada titik tumpu ke tiga setelah sebelumnya naik dari titik tumpu pertama menuju kedua. Hal ini disebabkan karena semakin titik tumpu mendekati generator maka semakin besar perubahan torsi yang dihasilkan. Semakin kecil torsi yang dihasilkan maka kecepatan yang dihasilkan oleh generator linier semakin semakin besar. Perubahan volume pelampung sangat berpengaruh terhadap tegangan yang dihasilkan, dari grafik diatas dapat terlihat semakin besar pelampung maka tegangan yang

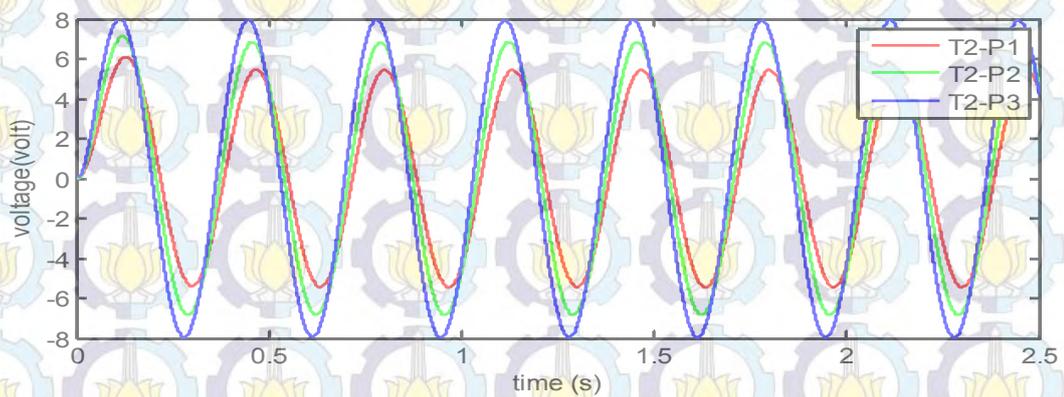
dihasilkan semakin besar, hal tersebut diakibatkan karena semakin besar volume pelampung maka gaya angkat yang dihasilkan semakin besar.

c. Tegangan yang dihasilkan pada variasi titik tumpu terhadap variasi volume pelampung pada frekuensi 3 Hz

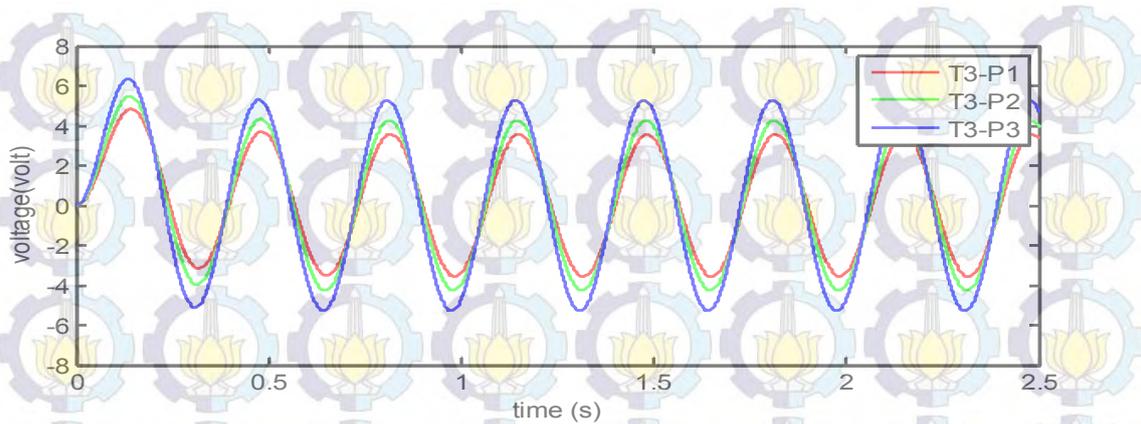
Variasi titik tumpu T1, T2, T3 dan variasi volume pelampung P1, P2, P3 pada frekuensi 1 Hz. Pengaruh volume pelampung dan panjang lengan terhadap tegangan listrik yang dihasilkan, besarnya tegangan yang dihasilkan ditampilkan pada grafik dibawah ini.



Gambar 4.14 Grafik respon energi yang dihasilkan pada titik tumpu 3 (T3) dengan variasi pelampung



Gambar 4.15 Grafik respon energi yang dihasilkan pada titik tumpu 2 (T2) dengan variasi pelampung



Gambar 4.16 Grafik respon energi yang dihasilkan pada titik tumpu 2 (T2) dengan variasi pelampung

Dari gambar 4.14 sampai gambar 4.16 terlihat bahwa perbedaan tegangan yang dihasilkan pada perubahan panjang titik tumpu dan volume pelampung, masing-masing RMS tegangan yang dihasilkan disajikan pada tabel 4.6 sebagai berikut.

Tabel 4.6 Hasil simulasi pada frekuensi 3

Spesimen yang divariasikan	Tegangan hasil simulasi (volt)	
f3	T1-P1	4.915
	T1-P2	4.965
	T1-P3	4.976
	T2-P1	5.228
	T2-P2	5.319
	T2-P3	5.338
	T3-P1	4.826
	T3-P2	4.931
	T3-P3	4.953

Pada kondisi frekuensi 3 dengan titik tumpu tiga (T3) dengan variasi volume pelampung (P1, P2, dan P3) tegangan yang dihasilkan masing masing sebesar 4.915 volt, 4.965 volt, dan 4.976 volt. Untuk titik tumpu kedua (T2) dengan variasi volume pelampung (P1, P2, dan P3) tegangan yang dihasilkan masing masing sebesar tegangan yang dihasilkan sebesar 5.228 volt, 5.319 volt, dan 5.338 volt. Sedangkan pada titik tumpu 3 (T3) dengan variasi volume

pelampung (P1, P2, dan P3) tegangan yang dihasilkan masing masing sebesar 4.826 volt, 4.931 volt, dan 4.953 volt.

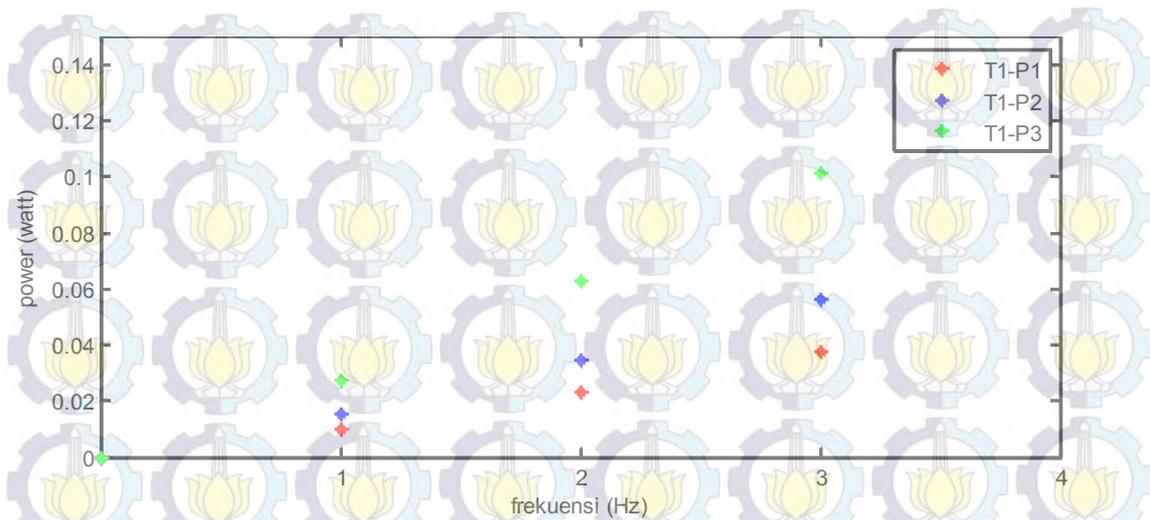
Perubahan hasil bangkitan tegangan sangat dipengaruhi oleh volume pelampung dan titik tumpu lengan pengungkit. Dari masing-masing variasi didapat pengaruh volume pelampung dan titik tumpu lengan pengungkit terhadap energi listrik yang dihasilkan. Namun terjadi penurunan tegangan pada titik tumpu ke tiga setelah sebelumnya naik dari titik tumpu pertama menuju kedua. Hal ini disebabkan karena semakin titik tumpu mendekati generator maka semakin besar perubahan torsi yang dihasilkan. Semakin kecil torsi yang dihasilkan maka kecepatan yang dihasilkan oleh generator linier semakin semakin besar. Perubahan volume pelampung sangat berpengaruh terhadap tegangan yang dihasilkan, dari grafik diatas dapat terlihat semakin besar pelampung maka tegangan yang dihasilkan semakin besar, hal tersebut diakibatkan karena semakin besar volume pelampung maka gaya angkat yang dihasilkan semakin besar.

Dari hasil simulasi didapatkan nilai tertinggi tegangan yang dapat dibangkitkan PLTGL tipe generator linier dihasilkan oleh pelampung ke tiga (P3) dan panjang lengan T2. Hal ini sesuai dengan hukum *buoyance* bahwa besar gaya angkat sebuah benda yang tercelup berbanding lurus dengan volume benda tersebut, gaya angkat yang dihasilkan semakin tinggi semakin menambah kecepatan gerak generator linier.

5. Hasil daya bangkitan fungsi frekuensi akibat pengaruh volume pelampung dan titik tumpu.

a. Titik tumpu 1 (T1) dengan variasi volume pelampung (P1, P2, dan P3)

Hubungan volume pelampung terhadap daya yang dihasilkan pada titik tumpu pertama T1 dengan variasi panjang volume pelampung (P1, P2, dan P3) terhadap frekuensi 1 Hz, 2 Hz dan 3 Hz adalah sebagai berikut:



Gambar 4.17 Hubungan frekuensi dan volume pelampung terhadap daya yang dihasilkan pada pada titik tumpu 1 (T1)

Dari gambar 4.17 terlihat semakin besar frekuensi besarnya daya yang dihasilkan semakin besar, hasil RMS perhitungan daya yang dihasilkan disajikan pada tabel 4.7 berikut ini.

Tabel 4.7 RMS daya hasil simulasi pada titik tumpu T1

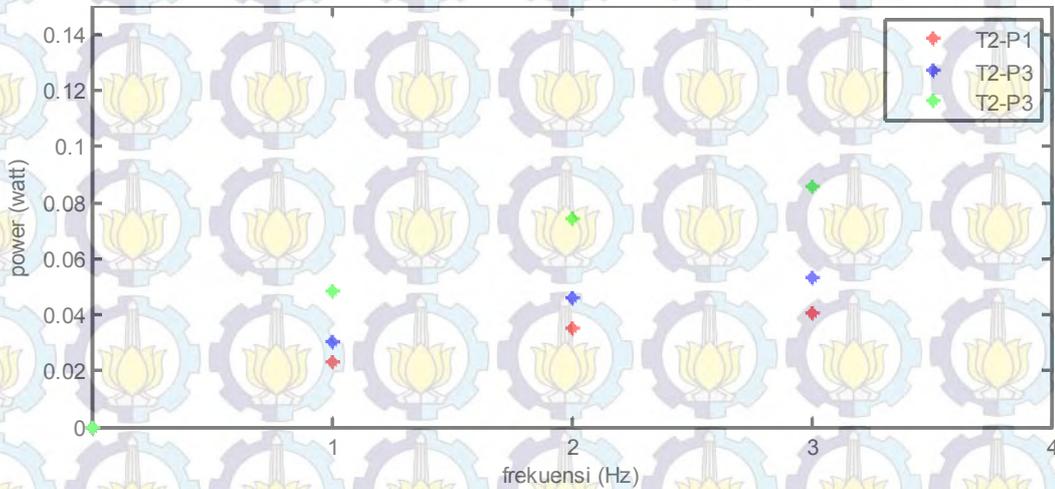
Spesimen yang divariasikan		Daya pemodelan (watt)
f1	T1-P1	0.01008
	T1-P2	0.01024
	T1-P3	0.01027
f2	T1-P1	0.01310
	T1-P2	0.01331
	T1-P3	0.01336
f3	T1-P1	0.02751
	T1-P2	0.02795
	T1-P3	0.02805

Dari tabel 4.7 diatas pada frekuensi 3 Hz titik tumpu 1 (T1) dihasilkakan daya bangkitan maksimum oleh pelampung volume 3 (P3) 0.0280 watt sebesar 0.02805 watt. Sedangkan daya minum dihasilkan pada frekuensi 1 Hz dengan titik tumpu 1 (T1) dan volume pelampung 1 (P1) mendapat daya sebesar 0.01008 watt.

Dari perubahan tersebut terlihat semakin besar frekuensi maka semakin besar daya yang dihasilkan.

b. Titik tumpu 2 (T2) dengan variasi volume pelampung (P1, P2, dan P3)

Hubungan volume pelampung terhadap daya yang dihasilkan pada titik tumpu pertama T2 dengan variasi panjang volume pelampung (P1, P2, dan P3) terhadap frekuensi 1 Hz, 2 Hz dan 3 Hz adalah sebagai berikut:



Gambar 4.18 Hubungan frekuensi dan volume pelampung terhadap daya yang dihasilkan pada pada titik tumpu 2 (T2)

Dari gambar 4.18 terlihat semakin besar frekuensi besarnya daya yang dihasilkan semakin besar, hasil RMS perhitungan daya yang dihasilkan disajikan pada tabel 4.8 berikut ini.

Tabel 4.8 RMS daya hasil simulasi pada titik tumpu T2

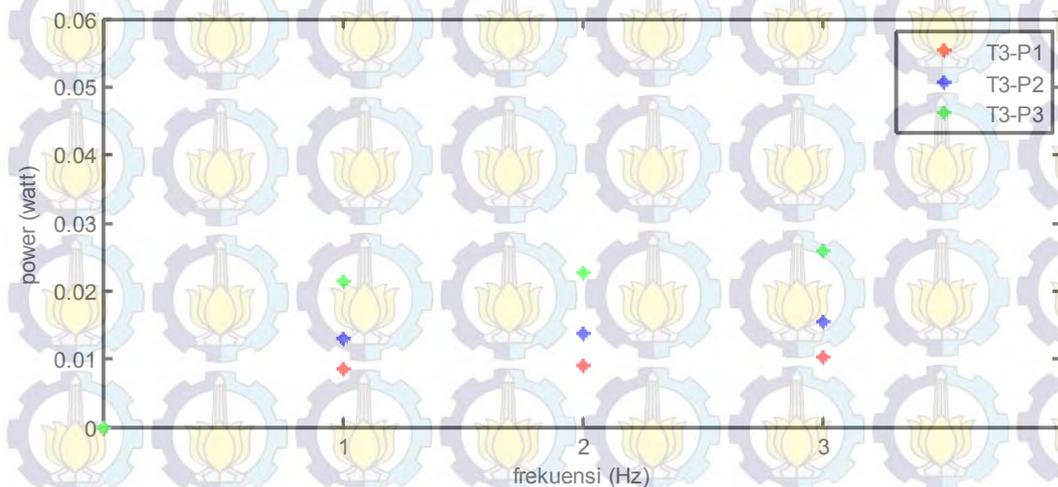
Spesimen yang divariasikan		Daya pemodelan (watt)
f1	T2-P1	0.01078
	T2-P2	0.01106
	T2-P3	0.01112
f2	T2-P1	0.01405
	T2-P2	0.01438
	T2-P3	0.01445
f3	T2-P1	0.02951
	T2-P2	0.03020
	T2-P3	0.03035

Dari tabel 4.8 diatas pada frekuensi 3 Hz titik tumpu 2 (T2), dihasilkkn daya bangkitan maksimum oleh pelampung volume 3 (P3) sebesar 0.03035 watt. Sedangkan daya minum dihasilkan pada frekuensi 1 Hz dengan titik tumpu 1 (T2)

dan volume pelampung 1 (P1) mendapat daya sebesar 0.01078 watt. Dari perubahan tersebut terlihat semakin besar frekuensi maka semakin besar daya yang dihasilkan.

c. Titik tumpu 3 (T3) dengan variasi volume pelampung (P1, P2, dan P3)

Hubungan volume pelampung terhadap daya yang dihasilkan pada titik tumpu pertama T3 dengan variasi panjang volume pelampung (P1, P2, dan P3) terhadap frekuensi 1 Hz, 2 Hz dan 3 Hz adalah sebagai berikut



Gambar 4.19 Hubungan frekuensi dan volume pelampung terhadap daya yang dihasilkan pada pada titik tumpu 3 (T3)

Dari gambar 4.19 terlihat semakin besar frekuensi besarnya daya yang dihasilkan semakin besar, hasil RMS perhitungan daya yang dihasilkan disajikan pada tabel 4.9 berikut ini.

Tabel 4.9 RMS daya hasil simulasi pada titik tumpu T3

Spesimen yang divariasikan		Daya pemodelan (watt)
f1	T3-P1	0.00855
	T3-P2	0.00887
	T3-P3	0.00895
f2	T3-P1	0.01112
	T3-P2	0.01154
	T3-P3	0.01163
f3	T3-P1	0.02334
	T3-P2	0.02423

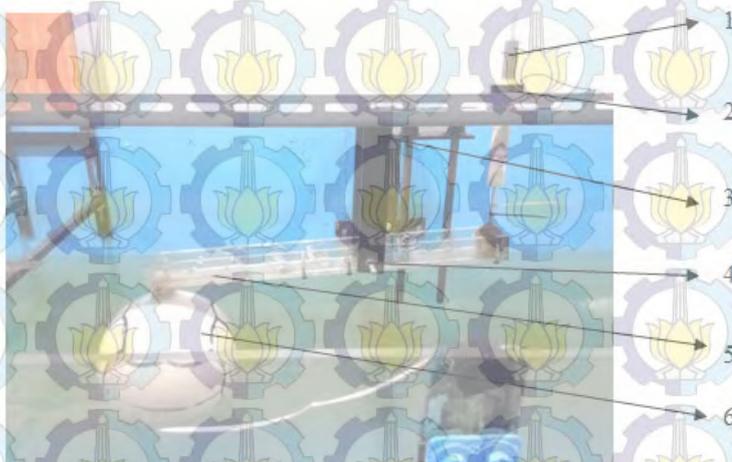
T3-P3	0.02442
-------	---------

Dari tabel 4.9 diatas pada frekuensi 3 Hz titik tumpu 3 (T3), dihasilkakan daya bangkitan maksimum oleh pelampung volume 3 (P3) sebesar 0.02442 watt. Sedangkan daya minum dihasilkan pada frekuensi 1 Hz dengan titik tumpu 1 (T3) dan volume pelampung 1 (P 1) mendapat daya sebesar 0.00855 watt. Dari perubahan tersebut terlihat semakin besar frekuensi maka semakin besar daya yang dihasilkan

Pada hasil pemodelan PLTGL tipe pengungkit generator linier diketahui prosentase pengaruh variasi terhadap energi listrik yang perhitungannya dapat dilihat pada lampiran 3. Variasi frekuensi memberikan prosentase energi listrik sebesar 96.05%, variasi titik tumpu sebesar 1.23% dengan arah yang berlawanan, dan volume pelampung sebesar 2.52%.

4.1.2 Hasil Eksperimen mekanisme PLTGL tipe pengungkit generator linier

Guna mendapatkan hasil penelitian mekanisme pembangkit listrik tenaga gelombang air laut (PLTGL) tipe pengungkit linier generator maka diperlukan sebuah mekanisme PLTGL sehingga dapat dilakukan pengambilan data penelitian. Berikut ini adalah gambar dari mekanisme PLTGL tipe pengungkit.



Gambar 4.20 Eksperimen Mekanisme PLTGL tipe pengungkit generator linier

Keterangan gambar:

1. Selongsong magnet

2. Kumparan
3. Hooke (penahan)
4. Titik tumpu
5. Batang pengungkit
6. Pelampung

Inputan pada pengujian respon panjang titik tumpu dan volume pelampung adalah eksitasi harmonik yang dihasilkan gelombang kolam simulator dengan frekuensi 1 Hz, 2 Hz dan 3 Hz pada inverter. Langkah pengujian dinamis PLTGL tipe pelampung silinder ini diawali dengan pemasangan mekanisme PLTGL tipe pengungkit generator linier pada kolam simulator, setelah mekanisme terpasang dengan baik, panjang strock pada kolam simulator sebesar 11 cm.

Dari hasil pengujian yang dilakukan didapat besaran tegangan bangkitan yang dihasilkan pada masing masing frekuensi, volume pelampung, dan titik tumpu yang divariasikan. Hasil pengujian didapat tegangan bangkitan yang ditunjukkan pada tabel 4.10 sebagai berikut.

Tabel 4.10 RMS tegangan hasil eksperimen

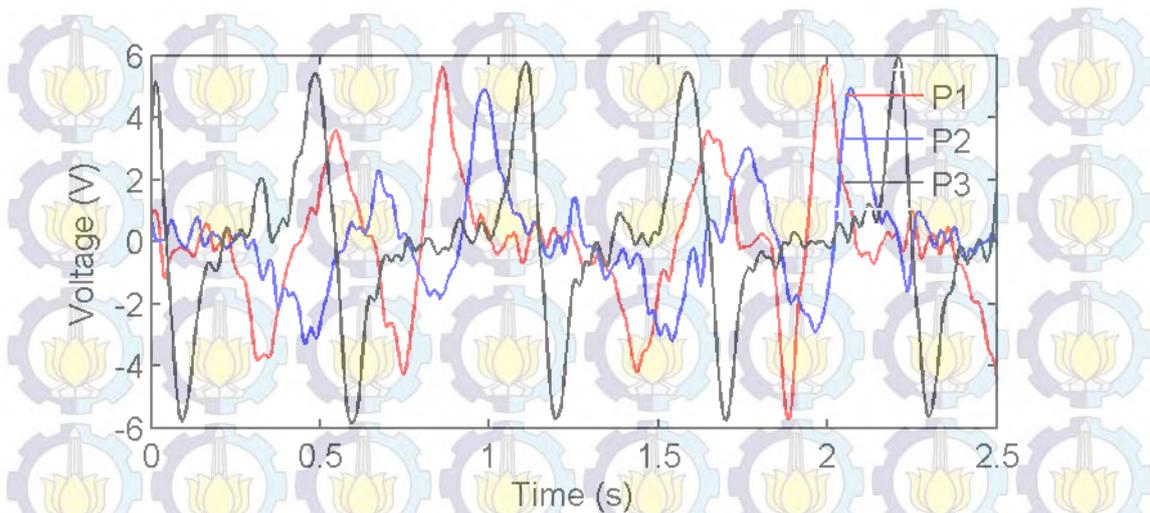
	Spesimen yang divariasikan	Tegangan hasil eksperimen (Volt)
f1	T1-P1	1.917
	T1-P2	1.959
	T1-P3	1.987
	T2-P1	2.000
	T2-P2	1.995
	T2-P3	1.968
	T3-P1	1.915
	T3-P2	1.835
	T3-P3	1.895
f2	T1-P1	1.951
	T1-P2	1.997
	T1-P3	2.030
	T2-P1	2.047
	T2-P2	2.046
	T2-P3	2.024
	T3-P1	1.975

f3	T3-P2	1.897
	T3-P3	1.902
	T1-P1	1.958
	T1-P2	2.005
	T1-P3	2.039
	T2-P1	2.036
	T2-P2	2.056
	T2-P3	2.057
	T3-P1	1.853
	T3-P2	1.910
T3-P3	1.988	

Dari tabel 4.10 diketahui bahwa energi yang dihasilkan cenderung berubah mengikuti perubahan frekuensi gelombang, panjang titik tumpu, dan volume pelampung. Semakin besar frekuensi gelombang maka semakin besar tegangan yang dihasilkan. Begitu juga dengan perubahan volume pelampung, semakin besar volume pelampung maka semakin besar tegangan yang dihasilkan. Untuk panjang titik tumpu semakin titik tumpu bergeser mendekati magnet linier semakin besar tegangan yang dihasilkan, namun timbul fenomena tegangan menurun seiring titik tumpu bergeser mendekati magnet linier. Hal ini dapat dilihat dari tegangan yang dihasilkan pada titik titik tumpu T3 lebih kecil daripada T2. Energi maksimum yang dihasilkan adalah pada frekuensi 3, titik tumpu T2, dan volume pelampung P3 sebesar 2.057 volt.

1. Pengujian dengan frekuensi 1 Hz pada titik tumpu T1

Hasil eksperimen pada frekuensi 1 Hz pada titik tumpu 1 (T1) dan variasi volume pelampung (P1, P2, dan P3) dan grafik respon pengaruh volume pelampung terhadap besarnya energi yang dihasilkan ditampilkan pada gambar 4.21 berikut ini.



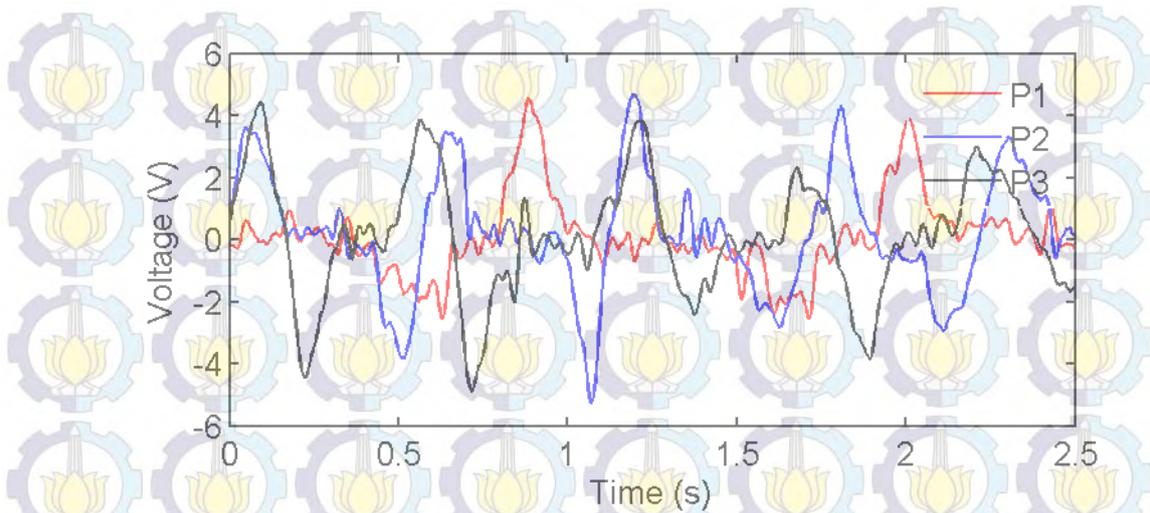
Gambar 4.21 Respon energi yang dihasilkan PLTGL pada frekuensi 1 Hz, T1, untuk P1, P2, dan P3

Hasil pengujian dengan frekuensi 1 Hz, titik tumpu 1 (T1) terhadap variasi volume pelampung P1, P2, dan P3 didapatkan nilai RMS untuk P1 sebesar 1.0682 volt, P2 sebesar 1.272 volt, dan P3 sebesar 1.775 volt. Variasi pada pelampung P3 memiliki amplitudo yang paling stabil jika dibandingkan pelampung P1 dan pelampung P2.

Pada setiap perubahan volume pelampung menyebabkan besarnya tegangan yang dihasilkan oleh generator semakin berubah, semakin besar volume pelampung maka semakin besar energi yang dihasilkan, hal ini disebabkan oleh semakin luas permukaan dari pelampung yang terkena air maka daya angkat dari ombak semakin besar. Selain itu jika volume pelampung semakin besar maka massa pelampung akan bertambah sehingga gerakan pelampung turun pada saat tidak terkena ombak akan naik semakin cepat.

2. Pengujian dengan frekuensi 1 Hz pada titik tumpu T2

Dari hasil pengujian dengan titik tumpu 2 (T2) dan variasi volume pelampung (P1, P2, dan P3), didapat besarnya tegangan yang dihasilkan ditampilkan pada gambar 4.23 sebagai berikut.



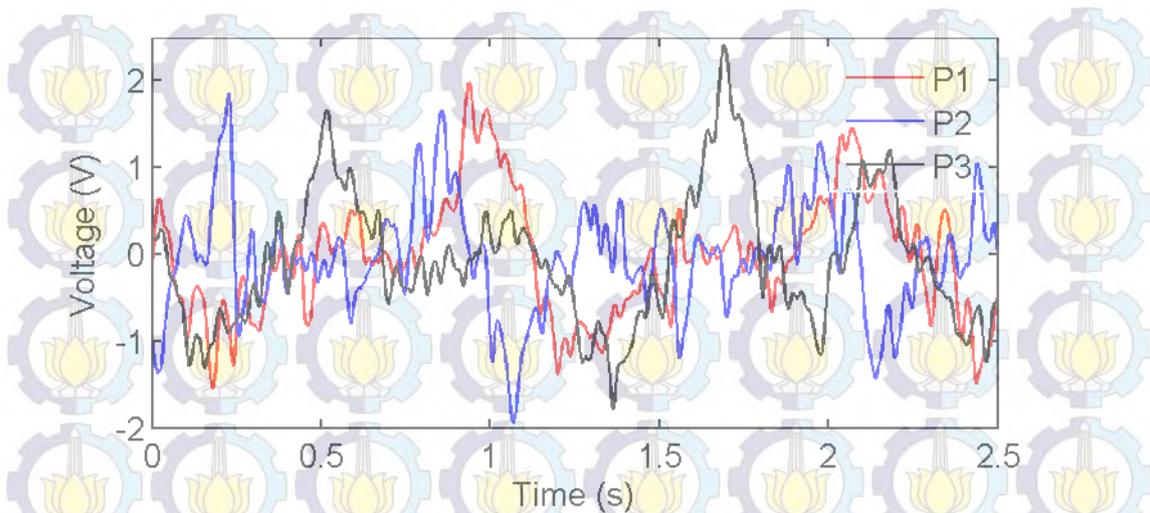
Gambar 4.22 Respon energi yang dihasilkan PLTGL pada frekuensi 1 Hz, T2, untuk P1, P2, dan P3

Dari gambar 4.22 terlihat bahwa perubahan volume pelampung berpengaruh terhadap tegangan yang dihasilkan dengan selisih tidak jauh berbeda. Pada pengujian dengan frekuensi 1 Hz dan titik tumpu T2 dengan volume P1, P2, dan P3 RMS energi yang dihasilkan sebesar 1.8884 volt. Sedangkan RMS terkecil yang dihasilkan sebesar 1.2831 volt.

Pada setiap perubahan volume pelampung menyebabkan besarnya tegangan yang dihasilkan oleh generator linier berubah, semakin besar volume pelampung mengakibatkan semakin besar tegangan yang dihasilkan. Hal ini disebabkan oleh semakin luas permukaan pelampung yang terkena air maka daya angkat dari pelampung semakin besar.

3. Pengujian dengan frekuensi 1 Hz pada titik tumpu T3

Hasil eksperimen pada frekuensi 1 Hz pada titik tumpu 3 (T3) dan variasi volume pelampung (P1, P2, dan P3) dan grafik respon pengaruh volume pelampung terhadap besarnya energi yang dihasilkan ditampilkan pada gambar 4.26 berikut ini.



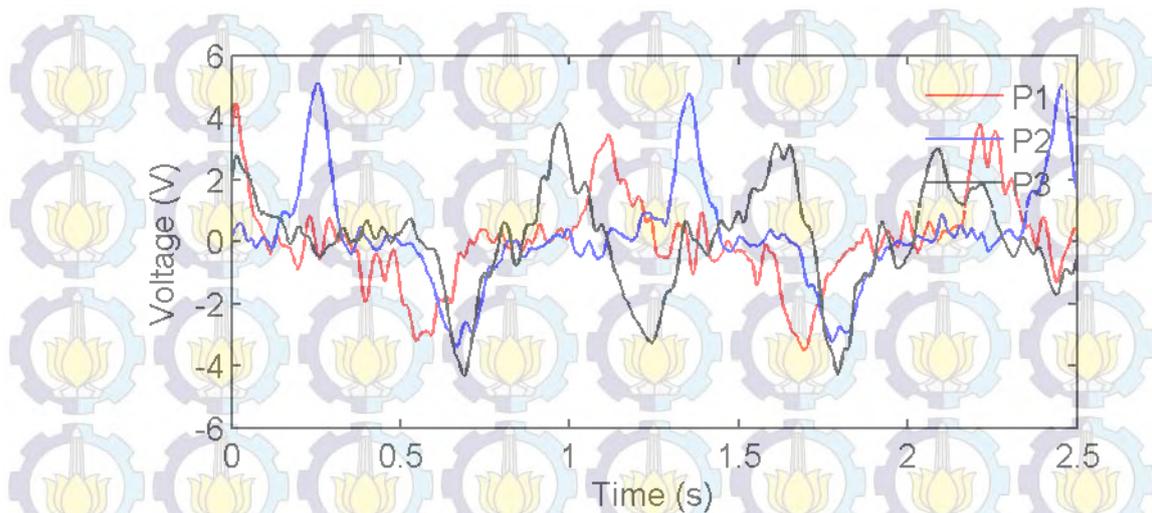
Gambar 4.23 Respon energi yang dihasilkan PLTGL pada frekuensi 1 Hz, T3, untuk P1, P2 dan P3

Pada gambar 4.23 menunjukkan hasil bangkitan tegangan pada titik tumpu T3 dan frekuensi 1 Hz terhadap variasi pelampung P1, P2, dan P3. Tegangan RMS yang dibangkitkan maksimal sebesar 1.4484 volt pada titik tumpu T3 dan volume pelampung P3. Sedangkan energi paling kecil dihasilkan pada titik tumpu T3 dengan volume pelampung P1 sebesar 1.2831 volt.

Dari gambar 4.24 dapat disimpulkan bahwa lengan pengungkit bergeser mendekati magnet generator linier semakin menurun tegangan yang dihasilkan. Hal ini berbeda dengan variasi volume pelampung yang digunakan, semakin besar volume pelampung menyebabkan energi gelombang laut yang mampu ditangkap semakin besar sehingga tegangan yang dihasilkan semakin besar.

4. Pengujian dengan frekuensi 2 Hz pada titik tumpu T1

Hasil eksperimen pada frekuensi 2 Hz pada titik tumpu (T1) dan variasi volume pelampung (P1, P2, dan P3) dan grafik respon pengaruh volume pelampung terhadap besarnya energi yang dihasilkan ditampilkan pada gambar 4.24 berikut ini.

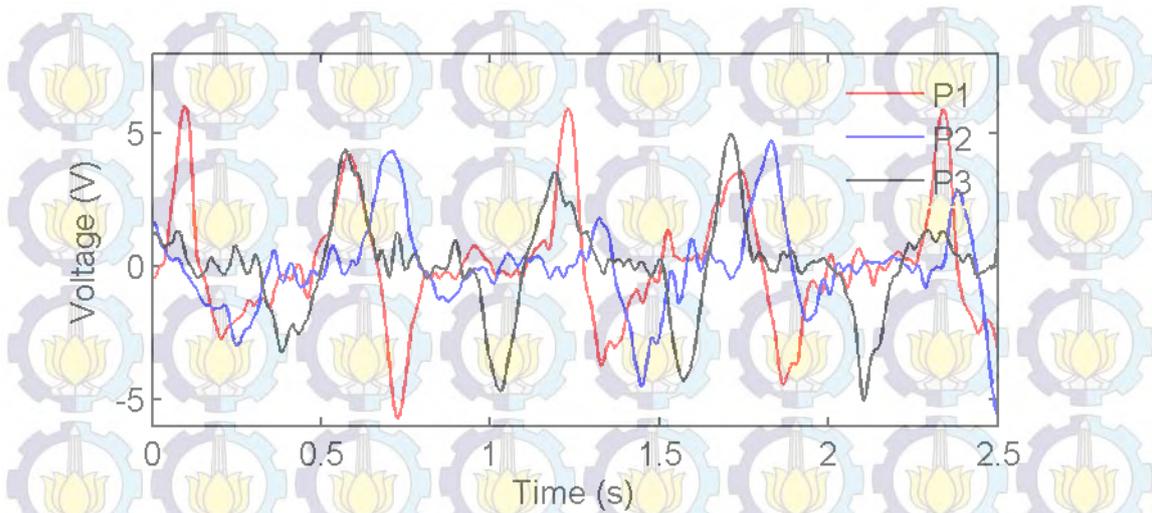


Gambar 4.24 Respon energi yang dihasilkan PLTGL pada frekuensi 2 Hz, T1, untuk P1, P2 dan P3

Hasil pengujian dengan frekuensi 1 Hz, titik tumpu 1 (T1) terhadap variasi volume pelampung P1, P2, dan P3 didapatkan nilai RMS untuk P1 sebesar 1.6408 volt, P2 sebesar 1.7069 volt, dan P3 sebesar 1.7933 volt. Pada setiap perubahan volume pelampung menyebabkan besarnya tegangan yang dihasilkan oleh generator semakin berubah, semakin besar volume pelampung maka semakin besar energi yang dihasilkan, hal ini disebabkan oleh semakin luas permukaan dari pelampung yang terkena air maka daya angkat dari ombak semakin besar. Selain itu jika volume pelampung semakin besar maka massa pelampung akan bertambah sehingga gerakan pelampung turun pada saat tidak terkena ombak akan naik semakin cepat.

5. Pengujian dengan frekuensi 2 Hz pada titik tumpu T2

Hasil eksperimen pada frekuensi 2 Hz pada titik tumpu 2 (T2) dan variasi volume pelampung (P1, P2, dan P3) dan grafik respon pengaruh volume pelampung terhadap besarnya energi yang dihasilkan ditampilkan pada gambar 4.25 berikut ini.



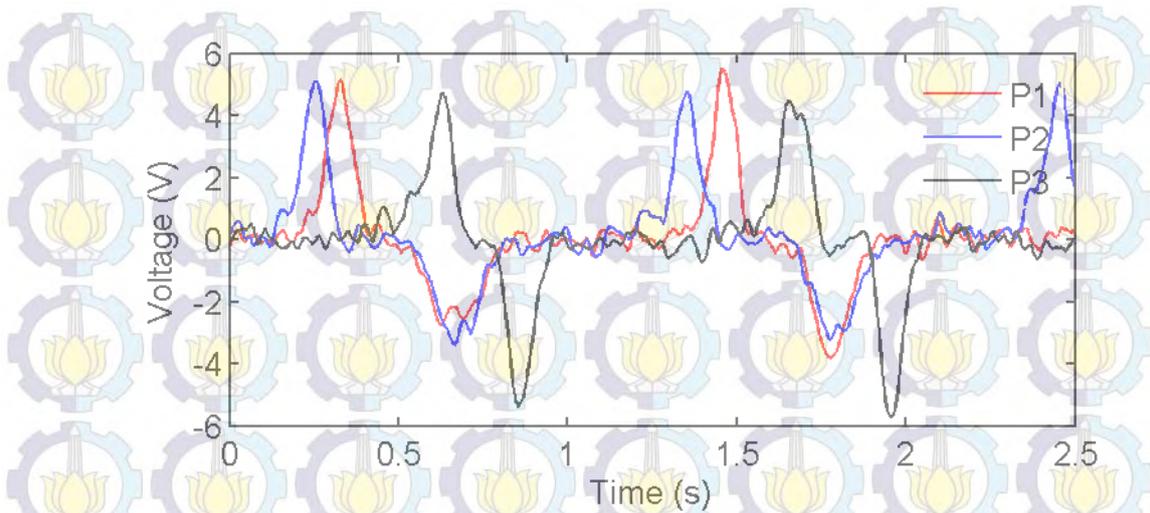
Gambar 4.25 Respon energi yang dihasilkan PLTGL pada frekuensi 2 Hz, T2, untuk P1, P2 dan P3

Pada gambar 4.25 menunjukkan hasil bangkitan tegangan pada titik tumpu T3 dan frekuensi 1 Hz terhadap variasi pelampung P1, P2, dan P3. RMS tegangan 1.7069 volt merupakan tegangan maksimal yang dihasilkan pada frekuensi 1 Hz, titik tumpu T3 dan volume pelampung P3. Sedangkan energi paling kecil dihasilkan pada titik tumpu T3 dengan volume pelampung P1 sebesar 1.6408 volt.

Dari gambar 4.26 dapat disimpulkan bahwa lengan pengungkit bergeser mendekati magnet generator linier semakin menurun tegangan yang dihasilkan. Hal ini berbeda dengan variasi volume pelampung yang digunakan, semakin besar volume pelampung menyebabkan energi gelombang laut yang mampu ditangkap semakin besar sehingga tegangan yang dihasilkan semakin besar.

6. Pengujian dengan frekuensi 2 Hz pada titik tumpu T3

Hasil eksperimen pada frekuensi 2 Hz pada titik tumpu 3 (T3) dan variasi volume pelampung (P1, P2, dan P3) dan grafik respon pengaruh volume pelampung terhadap besarnya energi yang dihasilkan ditampilkan pada gambar 4.29 berikut ini.

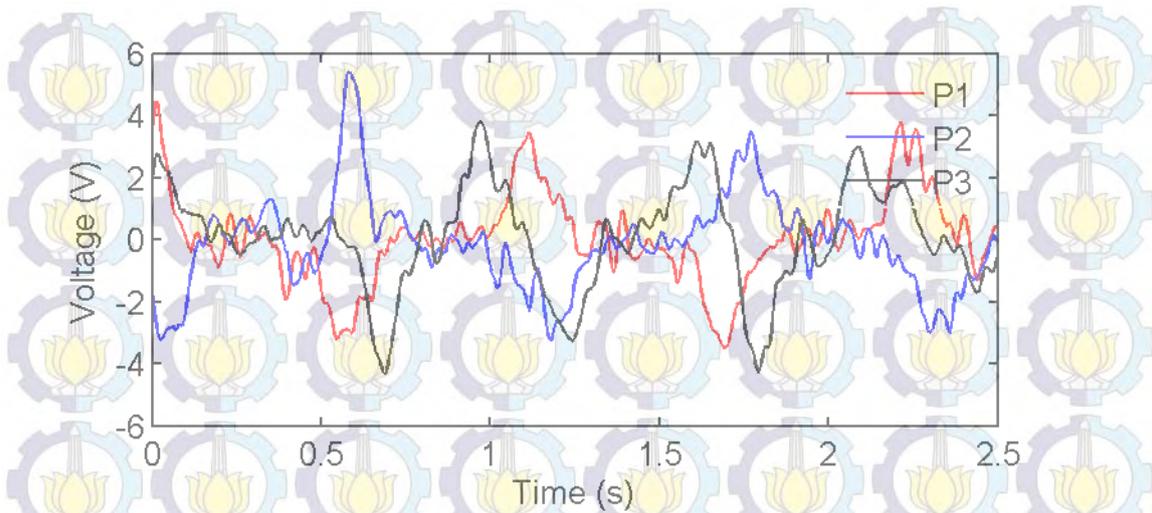


Gambar 4.26 Respon energi yang dihasilkan PLTGL pada frekuensi 3 Hz, T3, untuk P1, P2 dan P3

Pada gambar 4.26 menunjukkan hasil bangkitan tegangan pada titik tumpu T3 dan frekuensi 1 Hz terhadap variasi pelampung P1, P2, dan P3. Tegangan RMS yang dibangkitkan maksimal sebesar 1.8344 volt pada titik tumpu T3 dan volume pelampung P3. Sedangkan energi paling kecil dihasilkan pada titik tumpu T3 dengan volume pelampung P1 sebesar 1.7842 volt. Dari hasil eksperimen pada frekuensi 2 dengan titik tumpu T3 didapatkan bahwa lengan pengungkit bergeser mendekati magnet generator linier semakin menurun tegangan yang dihasilkan. Hal ini berbeda dengan variasi volume pelampung yang digunakan, semakin besar volume pelampung menyebabkan energi gelombang laut yang mampu ditangkap semakin besar sehingga tegangan yang dihasilkan semakin besar.

7. Pengujian dengan frekuensi 3 Hz pada titik tumpu T1

Hasil eksperimen pada frekuensi 3 Hz pada titik tumpu 1 (T1) dan variasi volume pelampung (P1, P2, dan P3) dan grafik respon pengaruh volume pelampung terhadap besarnya energi yang dihasilkan ditampilkan pada gambar 4.30 berikut ini.

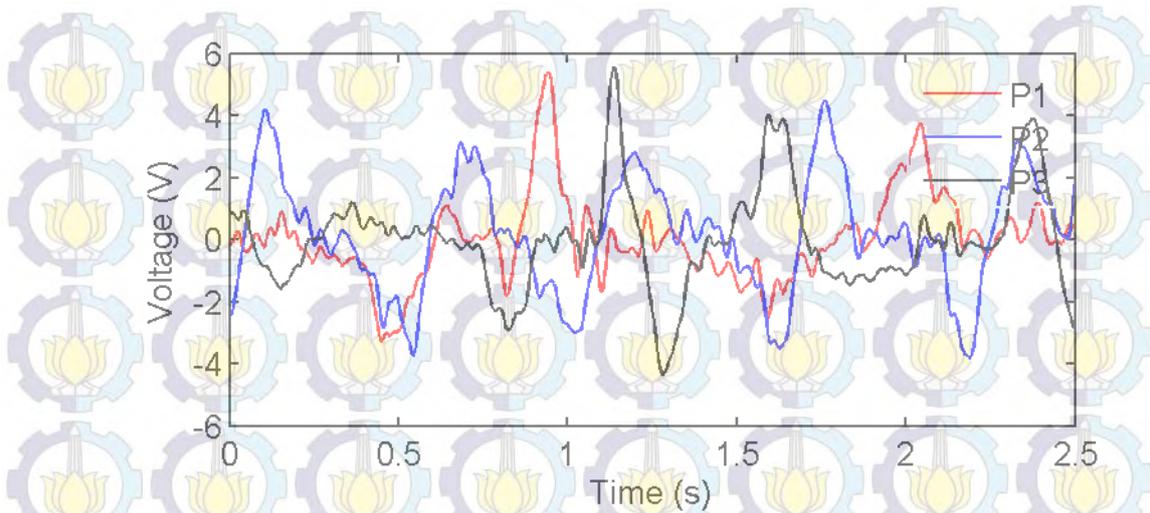


Gambar 4.27 Respon energi yang dihasilkan PLTGL pada frekuensi 3 Hz, T1, untuk P1, P2 dan P3

Hasil pengujian dengan frekuensi 1 Hz, titik tumpu 1 (T1) terhadap variasi volume pelampung P1, P2, dan P3 didapatkan nilai RMS untuk P1 sebesar 1.8426 volt, P2 sebesar 1.7468 volt, dan P3 sebesar 1.8174 volt. Pada setiap perubahan volume pelampung menyebabkan besarnya tegangan yang dihasilkan oleh generator semakin berubah, semakin besar volume pelampung maka semakin besar energi yang dihasilkan, hal ini disebabkan oleh semakin luas permukaan dari pelampung yang terkena air maka daya angkat dari ombak semakin besar. Selain itu jika volume pelampung semakin besar maka massa pelampung akan bertambah sehingga gerakan pelampung turun pada saat tidak terkena ombak akan naik semakin cepat.

8. Pengujian dengan frekuensi 3 Hz pada titik tumpu T2

Hasil eksperimen pada frekuensi 3 Hz pada titik tumpu 2 (T2) dan variasi volume pelampung (P1, P2, dan P3) dan grafik respos pengaruh volume pelampung terhadap besarnya energi yang dihasilkan ditampilkan pada gambar 4.31 berikut ini.



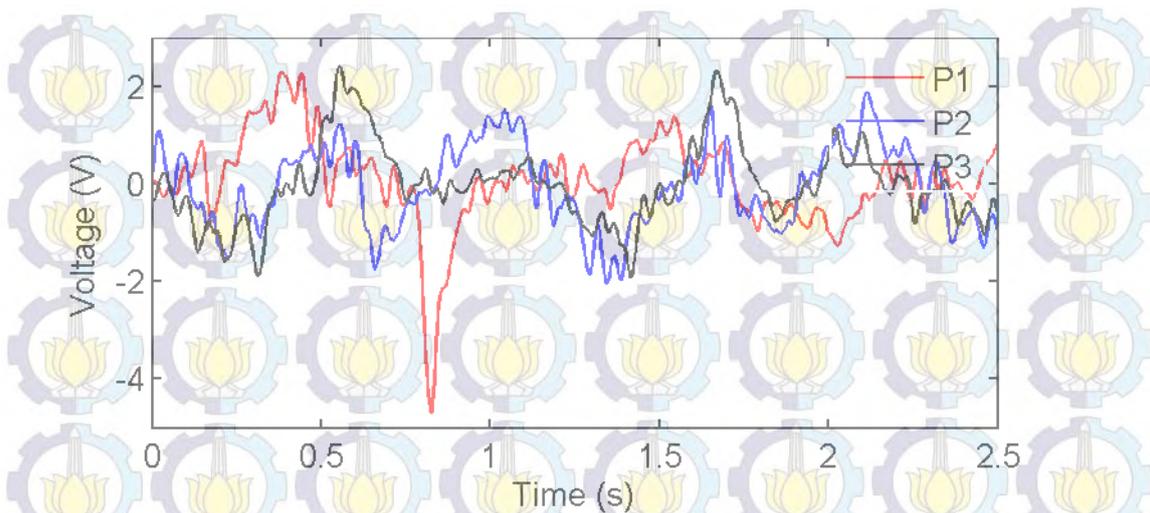
Gambar 4.28 Respon energi yang dihasilkan PLTGL pada frekuensi 3 Hz, T2, untuk P1, P2 dan P3

Pada gambar 4.28 menunjukkan hasil bangkitan tegangan pada titik tumpu T3 dan frekuensi 1 Hz terhadap variasi pelampung P1, P2, dan P3. RMS tegangan 1.9269 volt merupakan tegangan maksimal yang dihasilkan pada frekuensi 1 Hz, titik tumpu T3 dan volume pelampung P3. Sedangkan energi paling kecil dihasilkan pada titik tumpu T3 dengan volume pelampung P1 sebesar 1.5422 volt.

Dari gambar 4.29 dapat disimpulkan bahwa lengan pengungkit bergeser mendekati magnet generator linier semakin menurun tegangan yang dihasilkan. Hal ini berbeda dengan variasi volume pelampung yang digunakan, semakin besar volume pelampung menyebabkan energi gelombang laut yang mampu ditangkap semakin besar sehingga tegangan yang dihasilkan semakin besar.

9. Pengujian dengan frekuensi 3 Hz pada titik tumpu T3

Hasil eksperimen pada frekuensi 3 Hz pada titik tumpu 3 (T3) dan variasi volume pelampung (P1, P2, dan P3) dan grafik respon pengaruh volume pelampung terhadap besarnya energi yang dihasilkan ditampilkan pada gambar 4.32 berikut ini.



Gambar 4.29 Respon energi yang dihasilkan PLTGL pada frekuensi 3 Hz, T3, untuk P1, P2 dan P3

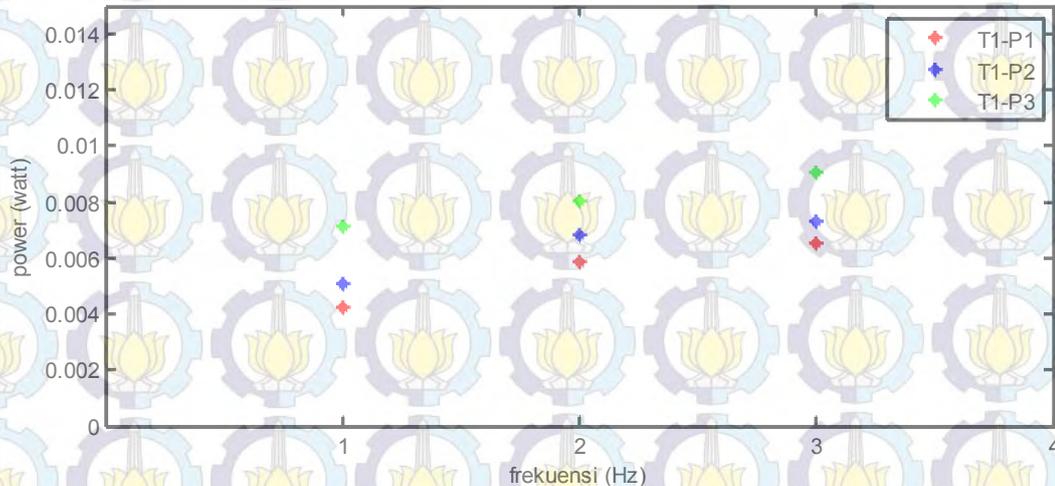
Pada gambar 4.29 menunjukkan hasil bangkitan tegangan pada titik tumpu T3 dan frekuensi 1 Hz terhadap variasi pelampung P1, P2, dan P3. Tegangan RMS yang dibangkitkan maksimal sebesar 1.8938 volt pada titik tumpu T3 dan volume pelampung P3. Sedangkan energi paling kecil dihasilkan pada titik tumpu T3 dengan volume pelampung P1 sebesar 1.7113 volt. Dari hasil eksperimen pada frekuensi 2 dengan titik tumpu T3 didapatkan bahwa lengan pengungkit bergeser mendekati magnet generator linier semakin menurun tegangan yang dihasilkan. Hal ini berbeda dengan variasi volume pelampung yang digunakan, semakin besar volume pelampung menyebabkan energi gelombang laut yang mampu ditangkap semakin besar sehingga tegangan yang dihasilkan semakin besar.

A. Analisa pengaruh titik tumpu, variasi volume pelampung terhadap daya yang dihasilkan

Pada analisa hasil eksperimen pengaruh titik tumpu T1, T2, dan T3 terhadap variasi volume pelampung P1, P2, dan P3 dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui seberapa besar perubahan energi yang dihasilkan pada saat divariasikan frekuensi 1 Hz, 2 Hz, dan 3 Hz.

1. Titik tumpu T1

Pada analisa hasil eksperimen pengaruh titik tumpu 1 (T1) dan variasi volume pelampung P1, P2, dan P3 pada frekuensi 1 Hz, 2 Hz dan 3 Hz terhadap daya yang dihasilkan disajikan pada gambar 4.33 sebagai berikut:



Gambar 4.30 Pengaruh variasi volume pelampung P1, P2, P3 pada titik tumpu pertama (T1)

Dari gambar 4.30 di atas terlihat setiap perubahan volume pelampung terjadi perubahan daya yang dihasilkan mekanisme PLTGL. Besarnya daya yang dihasilkan pada mekanisme ini ditampilkan pada tabel 4.11 berikut ini.

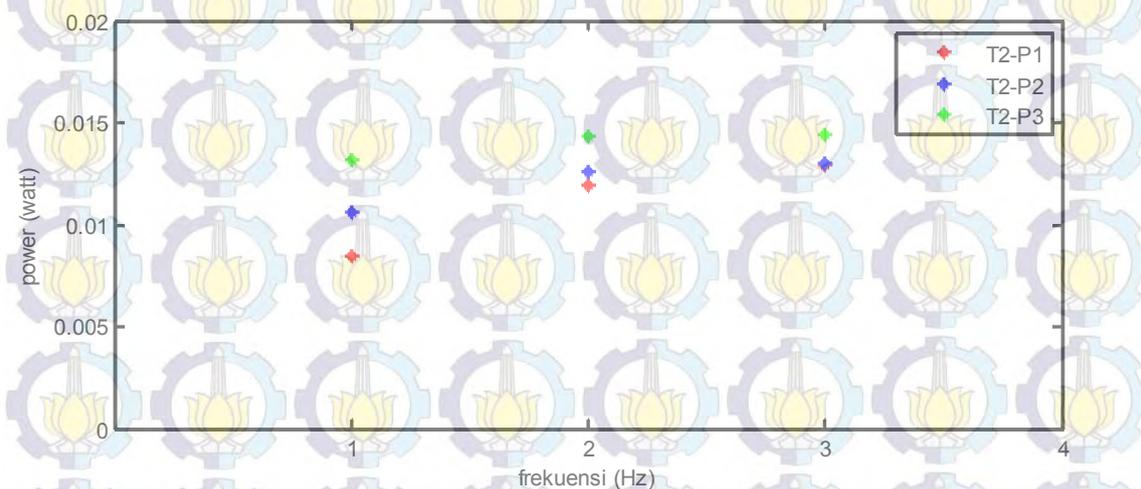
Tabel 4.11 Hasil eksperimen pada titik tumpu T1

	Spesimen yang divariasikan	Daya pemodelan (watt)
f1	T1-P1	0.00427
	T1-P2	0.00507
	T1-P3	0.00711
f2	T1-P1	0.00588
	T1-P2	0.00683
	T1-P3	0.00807
f3	T1-P1	0.00656
	T1-P2	0.00734
	T1-P3	0.00909

Dari tabel 4.11 diatas terlihat bahwa pada titik tumpu T1 RMS daya yang dihasilkan maksimal pada volume pelampung 3 (P3) dengan frekuensi 3 Hz yaitu 0.00909 watt. Sedangkan daya RMS yang minimum dihasilkan pada volume pelampung 1 (P1) pada frekuensi 1 Hz yaitu sebesar 0.00427 watt. Dari perbedaan energi yang dihasilkan terlihat dengan berubahnya volume pelampung berpengaruh terhadap besarnya tegangan yang dihasilkan, semakin besar volume pelampung maka daya angkat yang dihasilkan semakin besar dan semakin besar frekuensi maka pergerakan lengan semakin cepat sehingga kecepatan gerak magnet generator linier akan bertambah, hal ini menyebabkan semakin besar pula tegangan yang dihasilkan.

2. Titik tumpu T2

Hubungan titik tumpu T2 terhadap variasi volume pelampung (P1, P2, dan P3) terhadap daya yang dihasilkan pada frekuensi 1 Hz, 2 Hz dan 3 Hz. Hasil dan pengaruh variasi titik tumpu terhadap variasi volume pelampung disajikan pada gambar 4.34 sebagai berikut.



Gambar 4.31 Pengaruh variasi volume pelampung P1, P2, dan P3 pada titik tumpu pertama (T2)

Dari gambar 4.31 di atas terlihat setiap perubahan volume pelampung terjadi perubahan daya yang dihasilkan mekanisme PLTGL. Besarnya daya yang dihasilkan pada mekanisme ini ditampilkan pada tabel 4.8 berikut ini.

Tabel 4.12 Hasil eksperimen pada titik tumpu T2

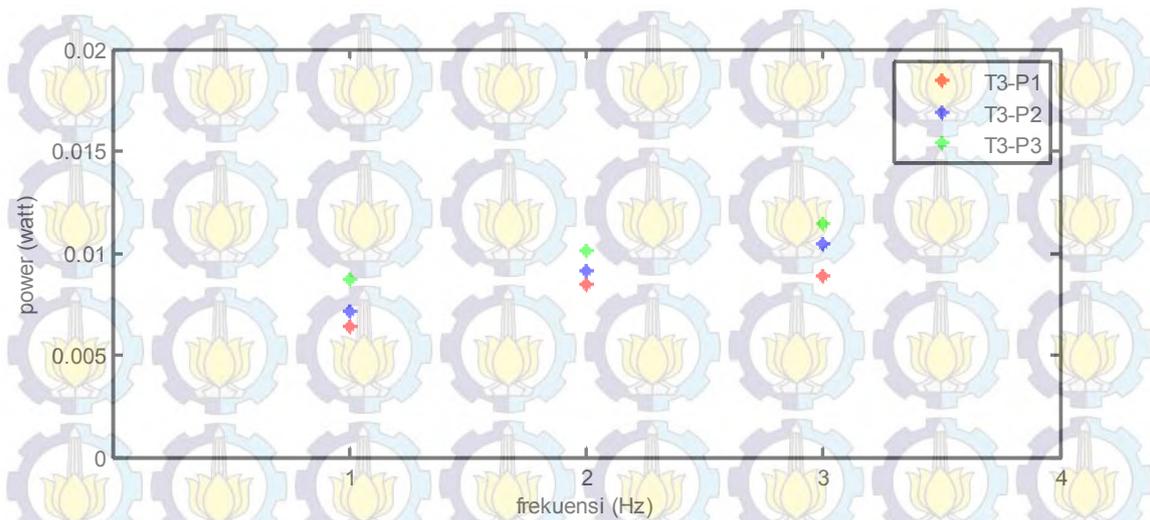
	Spesimen yang divariasikan	Daya pemodelan (watt)
f1	T2-P1	0.00851
	T2-P2	0.01062
	T2-P3	0.01322
f2	T2-P1	0.01198
	T2-P2	0.01264
	T2-P3	0.01435
f3	T2-P1	0.01290
	T2-P2	0.01299
	T2-P3	0.01445

Dari perbedaan energi yang dihasilkan terlihat dengan perubahan titik tumpu dan volume pelampung yang berpengaruh terhadap besarnya tegangan yang dihasilkan. Dari tabel 4.8 diatas RMS daya maksimum yang dihasilkan pada volume pelampung 3 (P 3) dengan frekuensi 3 H z sebesar 0.01445 watt. Sedangkan daya RMS yang minimum dihasilkan pada volume pelampung 1 (P1) pada frekuensi 1 Hz yaitu sebesar 0.00851 watt.

Semakin besar volume pelampung maka daya angkat yang dihasilkan semakin besar dan semakin besar frekuensi maka pergerakan lengan semakin cepat sehingga kecepatan gerak magnet generator linier akan bertambah, hal ini menyebabkan semakin besar pula tegangan yang dihasilkan.

3. Titik tumpu T3

Hasil eksperimen pengaruh titik tumpu T3 dan variasi volume pelampung P1, P2, dan P3 pada frekuensi 1 Hz, 2 Hz dan 3 Hz terhadap daya yang dihasilkan disajikan pada gambar 4.32 sebagai berikut.



Gambar 4.32 Pengaruh variasi volume pelampung P1, P2, dan P3 pada titik tumpu pertama (T3)

Dari gambar 4.33 di atas terlihat setiap perubahan volume pelampung terjadi perubahan daya yang dihasilkan mekanisme PLTGL. Besarnya daya yang dihasilkan pada mekanisme ini ditampilkan pada tabel 4.9 berikut ini.

Tabel 4.13 Hasil eksperimen pada titik tumpu T3

	Spesimen yang divariasikan	Daya pemodelan (watt)
f1	T3-P1	0.00642
	T3-P2	0.00719
	T3-P3	0.00869
f2	T3-P1	0.00848
	T3-P2	0.00909
	T3-P3	0.01009
f3	T3-P1	0.00892
	T3-P2	0.01042
	T3-P3	0.01143

Dari tabel 4.13 diatas bahwa pada titik tumpu T3 RMS daya yang dihasilkan maksimal pada volume pelampung 3 (P3) dengan frekuensi 3 Hz yaitu 0.01143 watt. Sedangkan daya RMS yang minimum dihasilkan pada volume pelampung 1 (P1) pada frekuensi 1 Hz yaitu sebesar 0.00642 watt. Perubahan yang dihasilkan terlihat dengan berubahnya volume pelampung berpengaruh terhadap besarnya tegangan yang dihasilkan, semakin besar volume pelampung

maka daya angkat yang dihasilkan semakin besar dan semakin besar frekuensi maka pergerakan lengan semakin cepat sehingga kecepatan gerak magnet generator linier akan bertambah, hal ini menyebabkan semakin besar pula tegangan yang dihasilkan.

Terlihat hubungan antara variasi volume pelampung, frekuensi eksitasi dan titik tumpu pertama (T1) terhadap daya yang dihasilkan oleh mekanisme. Semakin tinggi frekuensi eksitasi maka daya yang dihasilkan oleh mekanisme semakin besar. Kecepatan frekuensi semakin bertambah menyebabkan kecepatan magnet linier juga semakin bertambah.. Hal ini sesuai dengan prinsip hukum Farady yang menyebutkan bahwa tegangan yang dihasilkan oleh medan magnet berbanding lurus dengan kecepatan simpangan magnet tersebut. Dari gambar a1 terlihat bahwa variasi volume pelampung mempengaruhi bangkitan daya yang dihasilkan oleh mekanisme. Semakin besar volume pelampung maka semakin tinggi daya yang dihasilkan. Hal ini disebabkan oleh luasan pelampung yang menyentuh permukaan air jika semakin luas maka semakin besar daya angkat pelampung saat mekanisme bergerak naik. Pada saat mekanisme pengungkit bergerak turun masa pelampung mempengaruhi kecepatan turun mekanisme. Massa pelampung berhubungan dengan volume pelampung, semakin berat massa pelampung maka semakin besar volume pelampung. Diketahui bahwa daya bangkitan terbesar terjadi pada saat frekuensi ketiga (f_3) dan volume pelampung ke 3 (P3) yaitu sebesar 0.0066 watt.

Frekuensi eksitasi mempunyai pengaruh yang cukup besar, karena kecepatan magnet yang memotong kumparan daya yang dihasilkan oleh mekanisme semakin besar. Hal ini sesuai dengan prinsip hukum Farady yang menyebutkan bahwa tegangan yang dihasilkan oleh medan magnet berbanding lurus dengan kecepatan simpangan magnet tersebut. Dari gambar a2 terlihat bahwa variasi volume pelampung mempengaruhi bangkitan daya yang dihasilkan oleh mekanisme. Semakin besar volume pelampung maka semakin tinggi daya yang dihasilkan. Hal ini disebabkan oleh luasan pelampung yang menyentuh permukaan air jika semakin luas maka semakin besar daya angkat pelampung saat mekanisme bergerak naik. Pada saat mekanisme pengungkit bergerak turun masa

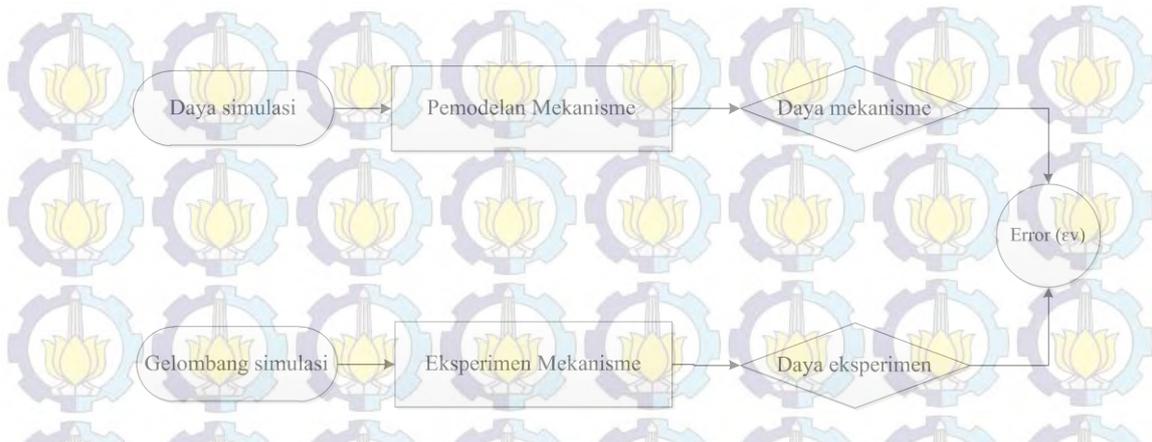
pelampung mempengaruhi kecepatan turun mekanisme. Massa pelampung berhubungan dengan volume pelampung, semakin berat massa pelampung maka semakin besar volume pelampung.

Pada frekuensi 1 dapat dilihat daya listrik yang dihasilkan dengan metode eksperimen dan pemodelan pada titik tumpu 1 (T1) dan pelampung 1 (P1) terus mengalami kenaikan hingga paling tinggi berada pada titik tumpu 2 (T2) dengan pelampung 3 (P3). Kemudian daya dan tegangan listrik mengalami penurunan sampai pada titik tumpu (T3) pelampung 1 (P1). Hal ini juga berlaku pada frekuensi 2 dan frekuensi 3. Dengan kata lain daya listrik yang dihasilkan akan semakin naik apabila titik tumpu semakin digeser mendekati magnet kumparan.

Pada hasil eksperimen PLTGL tipe pengungkit generator linier diketahui prosentase pengaruh variasi terhadap energi listrik yang perhitungannya dapat dilihat pada lampiran 3. Variasi frekuensi memberikan prosentase energi listrik sebesar 37%, variasi titik tumpu sebesar 33.07%, dan volume pelampung sebesar 36.40%.

4.1.3 Error tegangan hasil simulasi dan tegangan hasil eksperimen

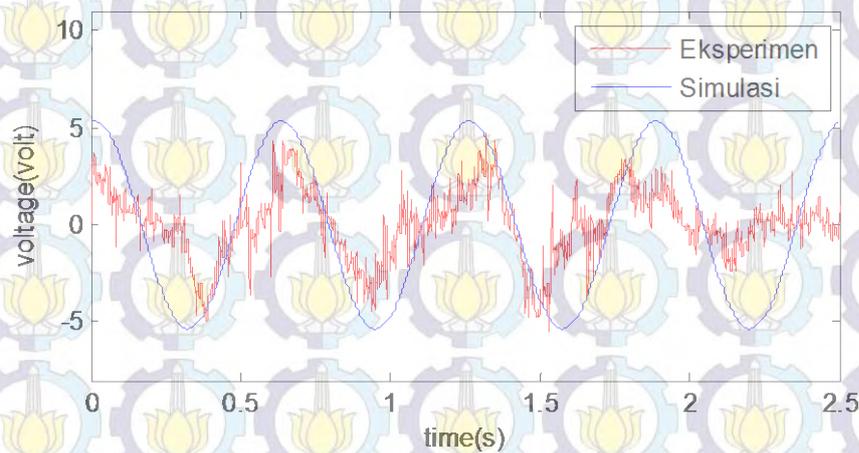
Error tegangan dilakukan untuk melihat kesamaan pola hasil simulasi dan eksperimen dari respon dinamis berupa energi bangkitan. Jika trend grafik yang dihasilkan simulasi berbeda maka kemungkinan besar terjadi kesalahan dalam proses simulasi. Dalam proses validasi ini hasil eksperimen menjadi acuan hasil simulasi. Selain untuk melihat kesamaan, juga untuk melihat seberapa besar error yang terjadi pada simulasi. Diagram alir untuk mendapatkan error disajikan pada gambar 4.33 sebagai berikut.



Gambar 4.33 Diagram alir untuk mendapatkan error tegangan

Error tegangan yang dilakukan diambil pada frekuensi 1 Hz, 2 hz, dan 3 Hz pada titik tumpu T2 dan variasi p elampung P3. Hasil dari simulasi dan eksperimen adalah sebagai berikut.

1. Energi yang dihasilkan pada frekuensi 1 Hz, titik tumpu T2 dan volume pelampung P3



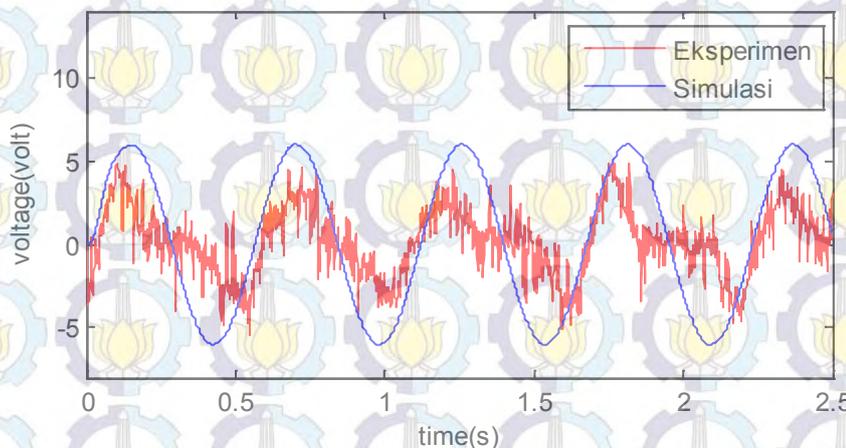
Gambar 4.34 Grafik validasi pada frekuensi 1 titik tumpu 1 (T1) pada volume pelampung 2 (P2)

Pada gambar 4.34 dengan melihat nilai error yang terjadi antara simulasi dan eksperimen maka dilakukan perbandingan nilai RMS tegangan dengan perhitungan sebagai berikut:

$$\epsilon_v = \frac{2.533 - 1.995}{2.533} \times 100\% = 22.587 \%$$

Sedangkan besarnya error pada nilai peak amplitudo besarnya energi yang dihasilkan pada PLTGL dengan frekuensi 1 Hz terhadap titik tumpu T2 dan volume pelampung P3. Pada perhitungan diatas terlihat bahwa error tegangan yang terjadi pada pada T1 dan P2 sebesar 22.587 %. Error yang terjadi cukup besar, hal ini disebabkan oleh torsi yang d adanya redaman mekanisme yang diabaikan seperti bearing dan gaya gesek antara magnet dan pipa dudukan kumparan. Selain itu penyebab error yang terjadi dikarenakan adanya gelombang balik yang terjadi pada kolam, dimana gelombang balik tersebut tidak dimodelkan dan masuk dalam proses simulasi.

2. Energi yang dihasilkan pada frekuensi 2 Hz, titik tumpu T2 dan volume pelampung P3



Gambar 4.35 Grafik validasi pada frekuensi 2 titik tumpu 1 (T1) pada volume pelampung 2 (P2)

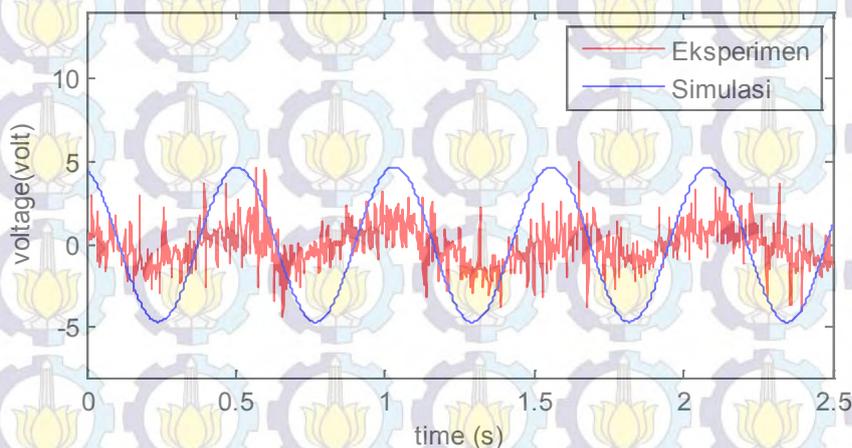
Pada gambar 4.35 dengan melihat nilai error yang terjadi antara simulasi dan eksperimen maka dilakukan perbandingan nilai RMS tegangan dengan perhitungan sebagai berikut:

$$\varepsilon_v = \frac{3.304 - 2.024}{3.304} \times 100\% = 38.755 \%$$

Sedangkan besarnya error pada nilai peak amplitudo besarnya energi yang dihasilkan pada PLTGL dengan frekuensi 2 Hz terhadap titik tumpu T2 dan volume pelampung P3. Pada perhitungan diatas terlihat bahwa error yang terjadi pada T2 dan P2 sebesar 38.755 %. Error yang terjadi cukup besar, hal ini

disebabkan oleh torsi yang adanya redaman mekanisme yang diabaikan seperti bearing dan gaya gesek antara magnet dan pipa dudukan kumparan. Selain itu penyebab error yang terjadi dikarenakan adanya gelombang balik yang terjadi pada kolam, dimana gelombang balik tersebut tidak dimodelkan dan masuk dalam proses simulasi.

3. Energi yang dihasilkan pada frekuensi 3 Hz, titik tumpu T2 dan volume pelampung P3



Gambar 4.36 Grafik validasi pada frekuensi 3 titik tumpu 1 (T1) pada volume pelampung 2 (P2)

Pada gambar 4.36 dengan melihat nilai error yang terjadi antara simulasi dan eksperimen maka dilakukan perbandingan nilai RMS tegangan dengan perhitungan sebagai berikut:

$$\varepsilon = \frac{5.338 - 2.057}{5.338} \times 100\% = 33.603\%$$

Sedangkan besarnya error pada nilai peak amplitudo besarnya energi yang dihasilkan pada PLTGL dengan frekuensi 3 Hz terhadap titik tumpu T2 dan volume pelampung P3. Pada perhitungan diatas terlihat bahwa error yang terjadi pada pada T3 dan P2 sebesar 33.603 %. Error yang terjadi cukup besar, hal ini disebabkan oleh torsi yang d adanya redaman mekanisme yang diabaikan seperti bearing dan gaya gesek antara magnet dan pipa dudukan kumparan. Selain itu penyebab error yang terjadi dikarenakan adanya gelombang balik yang terjadi

pada kolam, dimana gelombang balik tersebut tidak dimodelkan dan masuk dalam proses simulasi.

Tabel 4.14 Error yang terjadi pada PLTGL tipe pengungkit generator linier

	Spesimen yang divariasikan	Tegangan (volt)		Error (%)
		Eksperimen	Pemodelan	
f1	T1-P1	1.917	2.340	18.069
	T1-P2	1.959	2.365	17.151
	T1-P3	1.987	2.370	16.129
	T2-P1	2.000	2.489	19.642
	T2-P2	1.995	2.533	21.238
	T2-P3	1.968	2.542	22.587
	T3-P1	1.915	2.298	16.663
	T3-P2	1.835	2.348	21.865
	T3-P3	1.895	2.358	19.652
f2	T1-P1	1.951	3.042	35.868
	T1-P2	1.997	3.074	35.041
	T1-P3	2.030	3.081	34.115
	T2-P1	2.047	3.236	36.739
	T2-P2	2.046	3.293	37.848
	T2-P3	2.024	3.304	38.755
	T3-P1	1.975	2.988	33.891
	T3-P2	1.897	3.052	37.857
	T3-P3	1.902	3.066	64.376
f3	T1-P1	1.958	4.915	60.150
	T1-P2	2.005	4.965	59.623
	T1-P3	2.039	4.976	59.031
	T2-P1	2.036	5.228	60.646
	T2-P2	2.057	5.319	61.317
	T2-P3	2.057	5.338	33.603
	T3-P1	1.853	4.826	57.375
	T3-P2	1.910	4.931	58.273
	T3-P3	1.988	4.953	62.587
Error rata-rata				38.522

Error rata-rata yang terjadi cukup besar yakni sebesar 38.522%. Hal ini dikarenakan pada saat melakukan uji eksperimen terdapat beberapa gelombang balik pada kolam simulator. Gelombang balik tidak dimodelkan pada penelitian ini, padahal gelombang balik bersifat sebagai hambatan (*damping*) dari getaran air

kolam yang mengenai pelampung. Dikarenakan keterbatasan peneliti dalam memodelkan sifat-sifat fluida cair maka gelombang balik pada kolam simulator tidak disimulasikan.

4.1.4 Efisiensi Mekanisme PLTGL tipe pengungkit generator linier

Perhitungan potensi daya yang dapat dihasilkan pembangkit listrik tenaga gelombang laut dihitung dengan menggunakan rumus:

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

Dimana A merupakan luasan pelampung dari mekanisme PLTGL. Untuk luasan pelampung pertama sebesar 187.139 m², luasan pelampung dua sebesar 240.406 m², dan untuk pelampung tiga sebesar 315.886 m². Perhitungan efisiensi mekanisme PLTGL tipe pengungkit generator dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$\eta_{PLTGL} = \frac{P_{output}}{P_w} \times 100\%$$

Contoh hasil perhitungan efisiensi mekanisme adalah sebagai berikut:

$$\eta_{PLTGL} = \frac{0.004}{0.446} \times 100\% = 0.957\%$$

Nilai efisiensi yang diperoleh sebesar 0.957%, nilai efisiensi dari mekanisme ini dipengaruhi oleh nilai error atau *losses* pada mekanisme seperti nilai gesek pada bearing dan komponen lainnya.

Pada tahap perhitungan efisiensi mekanisme PLTGL generator linier, bangkitan daya maksimum diambil dengan menghitung nilai daya gelombang air laut dan daya yang dihasilkan oleh mekanisme kemudian membagi daya gelombang air laut dengan daya keluaran mekanisme dikali 100%. Daya gelombang laut diperoleh dari persamaan $\frac{\rho \cdot g^2 \cdot H^2 \cdot T \cdot v}{32\pi}$, sehingga nilai P_{wave} yang didapat sebesar 0.0486 watt.

Tabel 4.15 Efisiensi daya mekanisme PLTGL tipe pengungkit generator linier

	Spesimen yang divariasikan	Daya ombak (watt)	Daya Ekseprimen (watt)	Efisiensi alat (100%)
f1	T1-P1	0.0486	0.004	8.773
	T1-P2	0.0486	0.005	10.416
	T1-P3	0.0486	0.007	14.608
	T2-P1	0.0486	0.009	17.484
	T2-P2	0.0486	0.011	21.819
	T2-P3	0.0486	0.013	27.161
	T3-P1	0.0486	0.006	13.190
	T3-P2	0.0486	0.007	14.772
	T3-P3	0.0486	0.009	17.854
f2	T1-P1	0.0486	0.006	12.080
	T1-P2	0.0486	0.007	14.032
	T1-P3	0.0486	0.008	16.580
	T2-P1	0.0486	0.012	24.613
	T2-P2	0.0486	0.013	25.969
	T2-P3	0.0486	0.014	29.482
	T3-P1	0.0486	0.008	17.422
	T3-P2	0.0486	0.009	18.675
	T3-P3	0.0486	0.010	20.730
f3	T1-P1	0.0486	0.007	13.478
	T1-P2	0.0486	0.007	15.080
	T1-P3	0.0486	0.009	18.675
	T2-P1	0.0486	0.013	26.503
	T2-P2	0.0486	0.013	26.688
	T2-P3	0.0486	0.014	29.688
	T3-P1	0.0486	0.009	18.326
	T3-P2	0.0486	0.010	21.408
	T3-P3	0.0486	0.011	23.483

Nilai efisiensi terkecil yang diperoleh sebesar 8.773% sedangkan yang terbesar sebesar 29.688 %, jika dirata-rata nilai efisiensi yang dihasilkan sebesar 19.222 %. Nilai efisiensi yang sangat kecil ini diakibatkan oleh error yang sangat besar pada mekanisme PLTGL.

4.1.5 Validasi mekanisme PLTGL tipe pengungkit generator linier

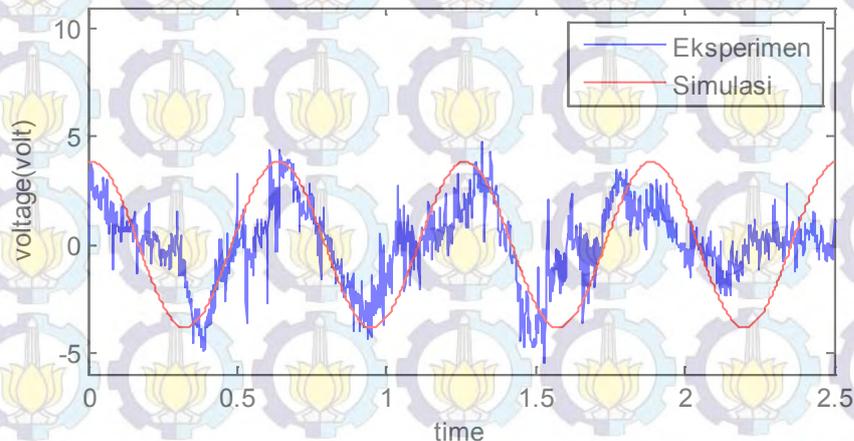
Validasi tegangan dilakukan dengan jalan mengalikan daya mekanisme sistem PLTGL tipe pengungkit linier generator dengan hasil kali error mekanisme dan efisiensi mekanisme, perhitungan validasi adalah sebagai berikut:

daya mekanisme pada system PLTGL tipe pengungkit linier generator

$$P_{validasi} = \eta_{rata-rata} \times \varepsilon_{rata-rata} \times P_{input}$$

Validasi diambil pada frekuensi 1 Hz, 2 Hz, dan 3 Hz pada titik tumpu T2 dan variasi pelampung P3. Hasil validasi diambil dari nilai tegangan setelah dikalikan dengan error dan efisiensi mekanisme PLTGL tipe pengungkit linier generator. Validasi dari simulasi dan eksperimen adalah sebagai berikut.

1. Energi yang dihasilkan pada frekuensi 1 Hz, titik tumpu T2 dan volume pelampung P3



Gambar 4.37 Grafik validasi pada frekuensi 1 titik tumpu 1 (T1) pada volume pelampung 2 (P2)

Pada gambar 4.37 dengan melihat nilai error yang terjadi antara simulasi dan eksperimen maka dilakukan perbandingan nilai RMS tegangan dengan perhitungan sebagai berikut:

$$\varepsilon_v = \frac{2.1813 - 1.9875}{2.1813} \times 100\% = 8.18 \%$$

Besarnya error yang terjadi adalah 8.18%. Error tersebut disebabkan beberapa permasalahan yang terjadi pada eksperimen seperti gelombang balik

pada kolom simulator. Untuk menghitung daya validasi digunakan persamaan sebagai berikut.

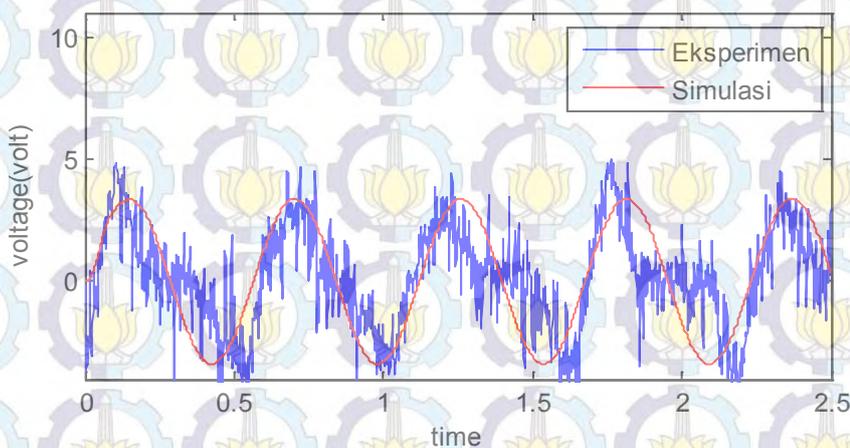
$$P_{validasi} = \eta_{rata-rata} \times \varepsilon_{rata-rata} \times P_{input}$$

Dari hasil perhitungan daya validasi berdasarkan persamaan di atas dapat dilihat pada data sebagai berikut

Spesimen Yang divariasikan			Error 1 (%)	Error 2 (%)	Efisiensi (%)	P _{input} (Watt)	P _{validasi} (Watt)
f (Hz)	Titik tumpu	V _{pelampung}					
1	T2	P3	22.587	8.18	27.161	0.04867	0.0069

Sedangkan hasil validasi daya yang dihasilkan perhitungan pada frekuensi 1 Hz dan titik tumpu T2 terhadap volume pelampung P3 yaitu sebesar 0.0069 watt.

2. Energi yang dihasilkan pada frekuensi 2 Hz, titik tumpu T2 dan volume pelampung P3



Gambar 4.38 Grafik validasi pada frekuensi 2 titik tumpu 1 (T1) pada volume pelampung 2 (P2)

Pada gambar 4.38 dengan melihat nilai error yang terjadi antara simulasi dan eksperimen maka dilakukan perbandingan nilai RMS tegangan dengan perhitungan sebagai berikut:

$$\varepsilon_v = \frac{2.3060 - 2.0238}{2.3060} \times 100\% = 8.54\%$$

Dari hasil validasi pada gambar 4.38 diatas didapat error sebesar 8.54%. error tersebut disebabkan beberapa permasalahan yang terjadi pada eksperimen seperti gelombang balik pada kolam simulator. Untuk menghitung daya validasi digunakan persamaan sebagai berikut.

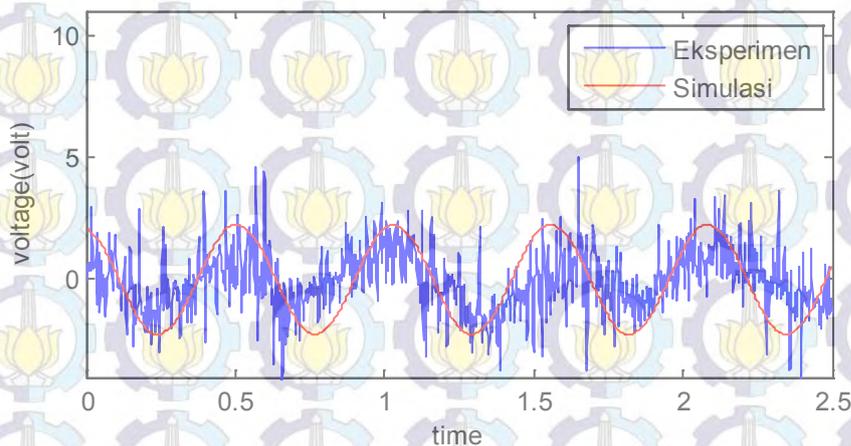
$$P_{validasi} = \eta_{rata-rata} \times \varepsilon_{rata-rata} \times P_{input}$$

Dari hasil perhitungan daya validasi berdasarkan persamaan di atas dapat dilihat pada data sebagai berikut

Spesimen Yang divariasikan			Error 1 (%)	Error 2 (%)	Efisiensi (%)	P _{input} (Watt)	P _{validasi} (Watt)
f (Hz)	Titik tumpu	V _{pelampung}					
2	T2	P3	38.75	8.54	29.482	0.0486	0.00889

Sedangkan hasil validasi daya yang dihasilkan perhitungan pada frekuensi 1 Hz dan titik tumpu T2 terhadap volume pelampung P3 yaitu sebesar 0.00889 watt.

3. Energi yang dihasilkan pada frekuensi 3 Hz, titik tumpu T2 dan volume pelampung P3



Gambar 4.39 Grafik validasi pada frekuensi 3 titik tumpu 1 (T1) pada volume pelampung 2 (P2)

Pada gambar 4.39 dengan melihat nilai error yang terjadi antara simulasi dan eksperimen maka dilakukan perbandingan nilai RMS tegangan dengan perhitungan sebagai berikut:

$$\varepsilon = \frac{2.5278 - 2.0575}{2.5278} \times 100\% = 8.81\%$$

Error yang dihasilkan pada PLTGL dengan frekuensi 3 Hz terhadap titik tumpu T2 dan volume pelampung P3 sebesar 8.81%. Untuk menghitung daya validasi digunakan rumus sebagai berikut.

$$P_{validasi} = \eta_{rata-rata} \times \varepsilon_{rata-rata} \times P_{input}$$

Hasil perhitungan daya validasi berdasarkan persamaan di atas dapat dilihat pada data sebagai berikut

Spesimen Yang divariasikan			Error 1 (%)	Error 2 (%)	Efisiensi (%)	P _{input} (Watt)	P _{validasi} (Watt)
f (Hz)	f (Hz)	V _{pelampung}					
3	T2	P3	33.603	8.81	29.688	0.0486	0.00987

Sedangkan hasil daya validasi (P_{validasi}) yang dihasilkan dari rumus perhitungan pada frekuensi 3 Hz dengan titik tumpu T1 terhadap volume pelampung P3 yaitu sebesar 0.00987 watt. Untuk itu dari penelitian ini didapatkan persamaan sebagai berikut.

$$P_{out} = \eta \times \varepsilon \times P_{in}$$

Dimana:

η = Efisiensi mekanis (%)

ε = Error (%)

Sehingga persamaan menjadi:

$$P_{out} = f_k \times P_{in}$$

Dengan f_k adalah faktor koreksi dari mekanisme. Dimana persamaan ini hanya digunakan untuk mekanisme PLTGL tipe pelampung berbentuk bola yang hanya memperhitungkan komponen mekanik.

4.1.6 Skala Mekanisme PLTGL tipe pengungkit generator linier

Dari efisiensi mekanisme dapat dihitung daya yang dihasilkan ketika mekanisme diletakkan pada laut lepas. Dalam proses skala mekanisme perlu diperhatikan gelombang laut tempat mekanisme ini akan dipasang. Gelombang yang tepat ditempatkan di pantai utara pulau Jawa, dimana memiliki tinggi gelombang 1-2.5 meter.

Tabel 4.16 Tabel skala Mekanisme PLTGL tipe pengungkit generator linier

Skala	Tinggi Gelombang (m)	Volume Pelampung (m ³)	Panjang Lengan (m)	Daya
1 : 1	0.07	0.0042	0.5	0.014 watt
1:17	1.19	0,0714	8.5	18.271 kW

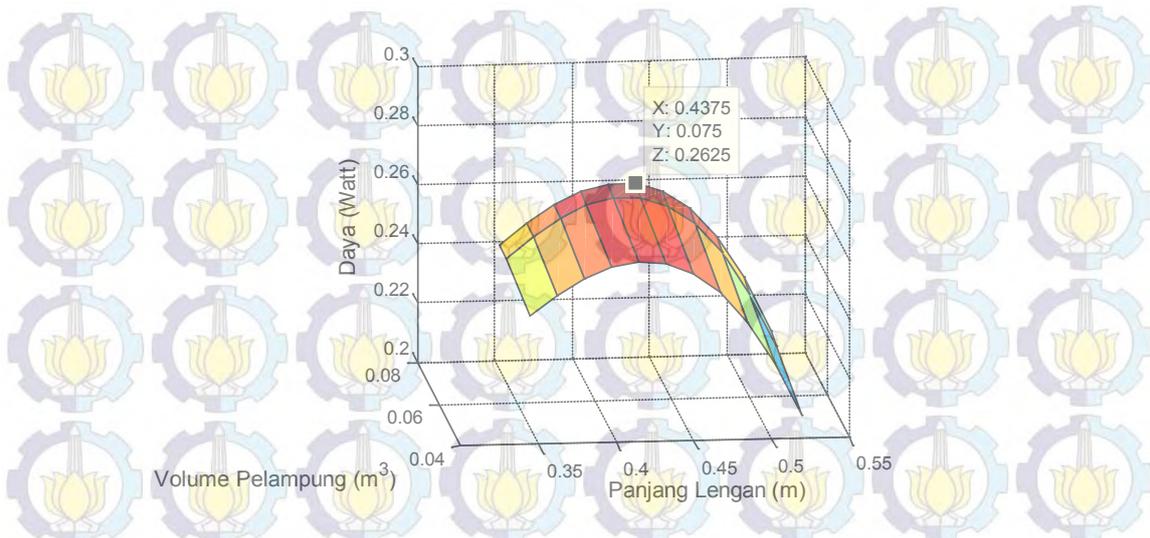
Dapat terlihat di Tabel 4.5 pada skala 17:1 dengan tinggi gelombang 1.19 meter diharapkan mekanisme ini menghasilkan daya sebesar 12.996 watt, dengan volume pelampung sebesar 12.75 m³ dan panjang lengan 8,5 meter.

$$\begin{aligned} P_{real} &= Skala\ model \times \eta_{model} \times P_{in} \\ &= 17 \times 29.688 \times 36.20347 \\ &= 18.271\ kW \end{aligned}$$

Dapat ditarik kesimpulan bahwa PLTGL tipe pengungkit generator linier jika dipasang pada laut lepas dengan skala 1:17 diperoleh nilai daya maksimal sebesar 18.271 kW dengan tinggi gelombang sebesar 1 meter hingga 3 meter.

4.1.7 Penentuan titik tumpu dan volume pelampung maksimum

Pada tahap ini langkah yang dilakukan adalah mengambil nilai variasi terbaik dari hasil simulasi mekanisme PLTGL generator linier tipe pengungkit yang dapat menghasilkan daya listrik tertinggi. Pencarian nilai variasi terbaik yang dapat menghasilkan energi paling maksimum dilakukan dengan metode iterasi. Hasil dari penentuan titik optimum dapat dilihat pada gambar 4.40 sebagai berikut.



Gambar 4.40 Titik tumpu dan volume pelampung optimum yang dapat menghasilkan daya maksimum pada frekuensi 3

Diketahui bahwa lengan maksimal yang dapat menghasilkan daya tertinggi sebesar $0,075 \times 0,5$ m sama dengan $0,375$ m dari pelampung. Hal ini disebabkan karena semakin titik titik tumpu digeser menjauhi pelampung (semakin tuasnya panjang) maka semakin besar kecepatan getaran magnet linier. Getaran semakin cepat berakibat pada daya yang dibangkitkan generator linier semakin besar. Hal ini sesuai dengan Hal ini sesuai dengan persamaan $\varepsilon_{ind} = B \cdot l_k \cdot v$. Daya maksimal yang dapat dibangkitkan oleh PLTGL generator linier sebesar $0,2625$ watt.

4.2 PLTGL tipe pengungkit generator rotary

Sebelum dilakukan pemodelan pada mekanisme PLTGL tipe pengungkit, maka tahap yang harus dilakukan adalah menentukan daya input generator rotary yang dihasilkan pada saat mekanisme masih menggunakan generator linier. Daya mekanis PLTGL tipe pengungkit generator linier dihitung untuk mengetahui efektifitas mekanisme yang kemudian dijadikan dasar inputan dalam menentukan masukkan inputan kedalam *gear box* pada saat mekanisme dikembangkan menjadi generator rotary. Adapun perhitungan daya input generator rotay adalah sebagai berikut.

$$P_{input.gen\ rotary} = \varepsilon_{sistem} \times P_{output.gen\ linier}$$

Daya input generator rotary ($P_{input.gen\ rotary}$) merupakan hasil dari daya output (P_{output}) yang dikeluarkan oleh mekanisme PLTGL tipe pengungkit generator linier dikali dengan error rata-rata sistem (ϵ_{sistem}). Untuk sampel perhitungannya diambil pada frekuensi 3 variasi titik tumpu T2 dan volume pelampung P3 sebagai berikut:

$$P_{input.gen\ rotary} = 18.069 \times 0.01008$$

$$P_{input.gen\ rotary} = 0.0039 \text{ watt}$$

Untuk hasil daya mekanis sistem untuk seluruh variasi akan disajikan pada tabel 4.17 sebagai berikut:

Tabel 4.17 Daya input sistem PLTGL tipe pengungkit generator rotary

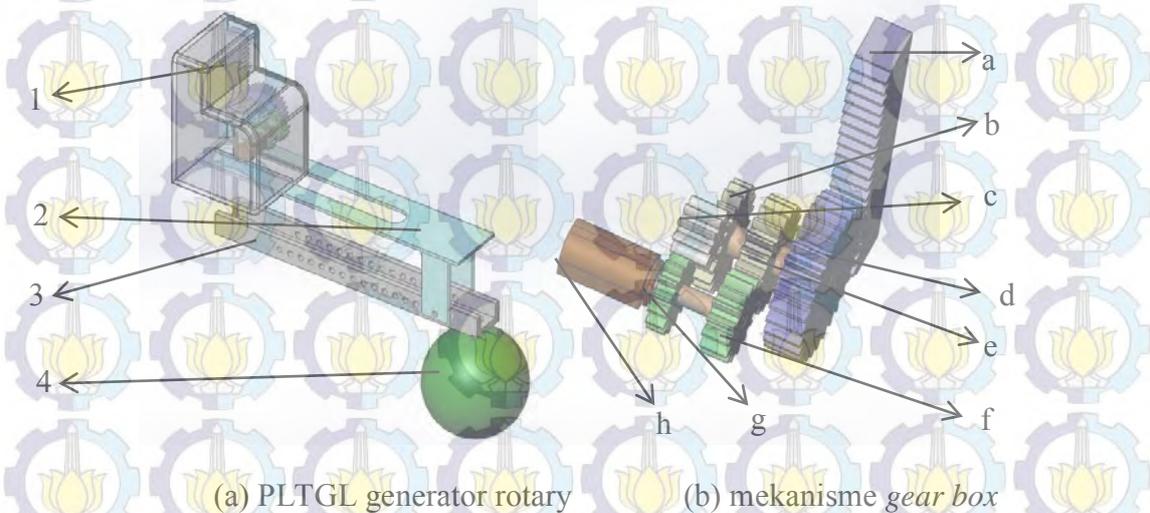
Spesimen yang divariasikan	Tegangan gen. linier (volt)		Error (%)	Daya (watt)		a (m/s ²)	
	Eks	Sim		Daya pemodelan gen. linier	Daya input gen. rotary		
f1	T1-P1	1.917	2.340	18.069	0.01008	0.0039	0.9486
	T1-P2	1.959	2.365	17.151	0.01024	0.0039	0.9658
	T1-P3	1.987	2.370	16.129	0.01027	0.0040	0.9810
	T2-P1	2.000	2.489	19.642	0.01078	0.0042	0.9936
	T2-P2	1.995	2.533	21.238	0.01106	0.0043	1.0030
	T2-P3	1.968	2.542	22.587	0.01112	0.0043	1.0085
	T3-P1	1.915	2.298	16.663	0.00855	0.0033	1.0090
	T3-P2	1.835	2.348	21.865	0.00887	0.0034	1.0032
	T3-P3	1.895	2.358	19.652	0.00895	0.0034	0.9894
f2	T1-P1	1.951	3.042	35.868	0.01310	0.0050	1.1275
	T1-P2	1.997	3.074	35.041	0.01331	0.0051	1.1491
	T1-P3	2.030	3.081	34.115	0.01336	0.0051	1.1684
	T2-P1	2.047	3.236	36.739	0.01405	0.0054	1.1847
	T2-P2	2.046	3.293	37.848	0.01438	0.0055	1.1974
	T2-P3	2.024	3.304	38.755	0.01445	0.0056	1.2055
f3	T3-P1	1.975	2.988	33.891	0.01112	0.0043	1.2078
	T3-P2	1.897	3.052	37.857	0.01154	0.0044	1.2024
	T3-P3	1.902	3.066	64.376	0.01163	0.0045	1.1874
	T1-P1	1.958	4.915	60.150	0.02751	0.0106	1.2995
	T1-P2	2.005	4.965	59.623	0.02795	0.0108	1.3246

T1-P3	2.039	4.976	59.031	0.02805	0.0108	1.3471
T2-P1	2.036	5.228	60.646	0.02951	0.0114	1.3662
T2-P2	2.057	5.319	61.317	0.03020	0.0116	1.3812
T2-P3	2.057	5.338	33.603	0.03035	0.0117	1.3909
T3-P1	1.853	4.826	57.375	0.02334	0.0090	1.3939
T3-P2	1.910	4.931	58.273	0.02423	0.0093	1.3880
T3-P3	1.988	4.953	62.587	0.02442	0.0094	1.3710

4.2.1 Pemodelan matematis PLTGL tipe pengungkit generator rotary

Untuk pemodelan matematis PLTGL tipe pengungkit generator rotary dapat dilihat pada lampiran 1

1. Gambar PLTGL tipe pengungkit generator rotary



Gambar 4.41 PLTGL tipe pengungkit rotary generator beserta gear box

Keterangan PLTGL:

1. Penyangga (Holder)
2. Batang pengungkit
3. Pelampung
- a. Roda gigi rack
- b. Roda gigi 4
- c. Roda gigi 5
- d. Roda gigi 2
- e. Roda gigi 3

f. Roda gigi 6

g. Roda gigi 7

h. Generator rotary

A. Persamaan matematis PLTGL tipe pengungkit generator rotary

Persamaan matematis PLTGL tipe pengungkit generator rotary dapat dilihat pada lampiran 1

B. Parameter PLTGL tipe pengungkit generator rotary

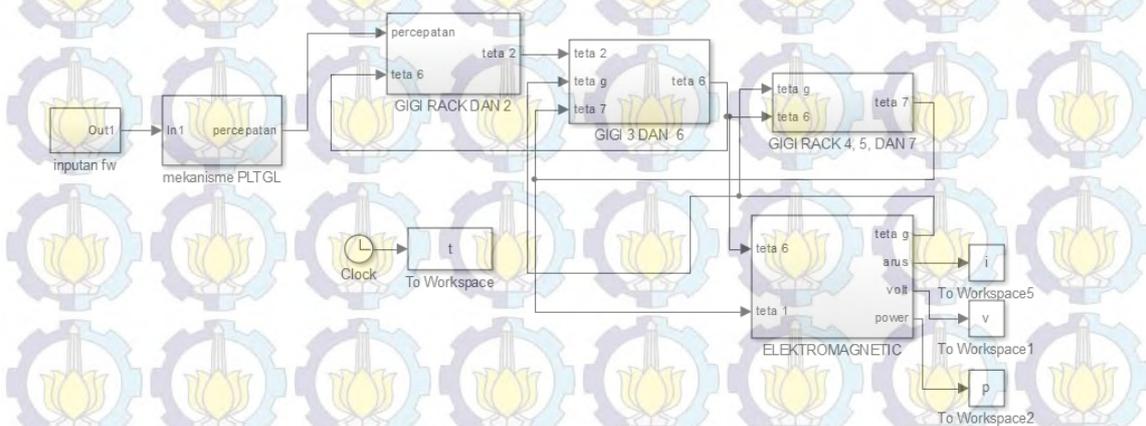
Nilai parameter dari generator linier sesuai dengan hasil perhitungan, data inilah nantinya akan diolah dengan simulink matlab hingga akan keluar nilai-nilai output yang diinginkan. Nilai parameter generator rotary ditunjukkan pada tabel 4.18 sebagai berikut.

Tabel 4.18 Parameter mekanisme PLTGL tipe pengungkit generator rotary

Parameter generator rotary			
Model parameter	Simbol (unit)		Nilai Parameter
Jumlah lilitan	N		3000
Kuan medan	B (wm/m2)		1.5
Induktansi	L		0.15
Hambatan listrik	R (ohm)		1
Parameter gear box			
Roda gigi	Jari – jari (m)	Massa (kg)	Momen Inersia (kg.m2)
Roda gigi rack		0.2	
Roda gigi 2	0.005	0.5	6.2500e-07
Roda gigi 3	0.015	0.15	1.6875e-05
Roda gigi 4	0.015	0.15	1.6875e-05
Roda gigi 5	0.0005	0.005	6.2500e-10
Roda gigi 6	0.007	0.010	2.4500e-07
Roda gigi 7	0.007	0.010	2.4500e-07

4.2.2 Simulink PLTGL tipe pengungkit generator rotary

Dilakukan pembuatan blok diagram PLTGL dengan generator linier. Tujuan dari pembuatan blok diagram ini adalah untuk mendapatkan hasil time respon bangkitan voltase. Blok diagram simulasi ditunjukkan pada gambar 4.42 dibawah ini.



Gambar 4.42 Blok diagram PLTGL dengan generator rotary

- **Inputan gaya pada gear box generator rotary**

Gaya eksitasi yang diberikan pada simulasi PLTGL tipe linier generator rotary berupa percepatan (\ddot{x}) yang dihasilkan oleh batang pengungkit dikali dengan massa roda gigi rack. Sedangkan nilai (\ddot{x}) oleh batang pengungkit ditunjukkan sebagai pada tabel 4.19 sebagai berikut.

Tabel 4.19 Nilai percepatan mekanisme PLTGL tipe pengungkit generator rotary

	Spesimen yang divariasikan	Percepatan (m/s^2)
f1	T1-P1	0.949
	T1-P2	0.966
	T1-P3	0.981
	T2-P1	0.994
	T2-P2	1.003
	T2-P3	1.008
	T3-P1	1.009
	T3-P2	1.003
	T3-P3	0.989

f2	T1-P1	1.128
	T1-P2	1.149
	T1-P3	1.168
	T2-P1	1.185
	T2-P2	1.197
	T2-P3	1.206
	T3-P1	1.208
	T3-P2	1.202
	T3-P3	1.187
f3	T1-P1	1.299
	T1-P2	1.325
	T1-P3	1.347
	T2-P1	1.366
	T2-P2	1.381
	T2-P3	1.391
	T3-P1	1.394
	T3-P2	1.388
	T3-P3	1.371

Percepatan yang sudah didapat dari lengan pengungkit kemudian dikalikan dengan massa roda gigi rack sebesar 0.2 Kg untuk mendapatkan gaya inputan sesuai dengan rumu $F = m \cdot a$ sehingga didapatkan gaya yang kemudian dijadikan inputan menuju *gear box* generator rotary.

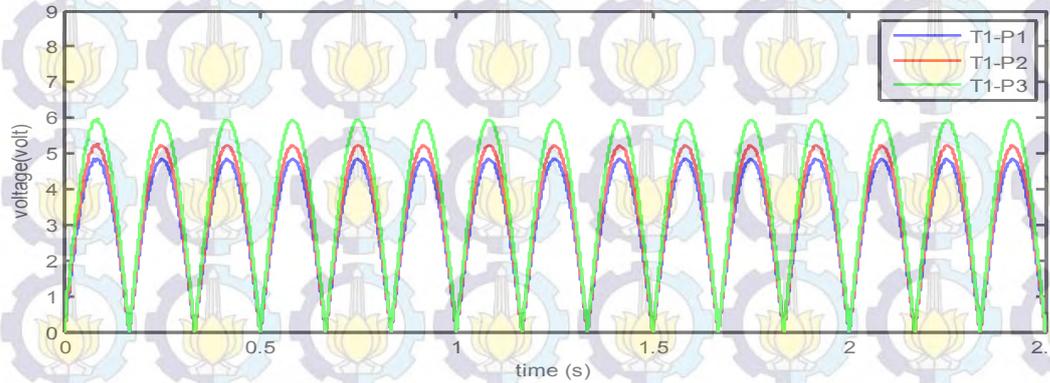
4.2.3 Hasil dan analisa

Pada simulasi ini dedapatkan energi bangkitan dari mekanisme PLTGL tipe pengungkit generator rotary, gaya input yang digunakan pada pemodelan ini berupa percepatan (\ddot{x}) dari lengan pengungkit yang digunakan pada pemodelan PLTGL tipe pengungkit generator rotary.

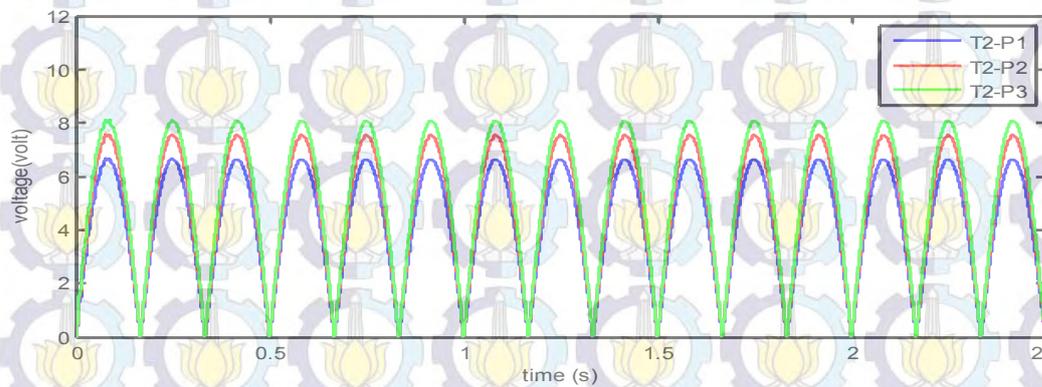
a. Tegangan yang dihasilkan p ada variasi panjang lengan terhadap variasi volume pelampung pada frekuensi 3 Hz

Tegangan hasil pada variasi titik tumpu T1, T2, T3 dan variasi volume pelampung P1, P2, P3 untuk frekuensi 3 Hz. Pengaruh volume pelampung dan

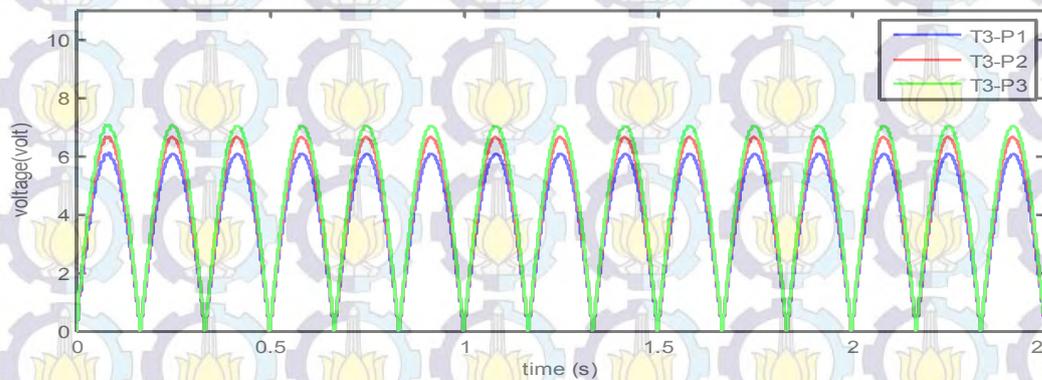
panjang lengan terhadap tegangan listrik yang dihasilkan, besarnya tegangan yang dihasilkan ditampilkan pada gambar 4.43 sampai 4.45 di bawah ini.



Gambar 4.43 Bangkitan voltase PLTGGL rotary generator pada pada frekuensi 3, titik tumpu dua T1 dengan variasi pelampung



Gambar 4.44 Bangkitan voltase PLTGGL rotary generator pada pada frekuensi 3, titik tumpu dua T2 dengan variasi pelampung



Gambar 4.45 Bangkitan voltase PLTGGL rotary generator pada pada frekuensi 3, titik tumpu dua T3 dengan variasi pelampung

Dari gambar 4.43 sampai gambar 4.45 terlihat bahwa perbedaan tegangan yang dihasilkan pada perubahan panjang titik tumpu dan volume pelampung, masing-masing RMS tegangan yang dihasilkan disajikan pada tabel 4.21 sebagai berikut.

Tabel 4.20 Hasil tegangan pada pemodelan generator rotary

Spesimen yang divariasikan	Tegangan generator rotary (volt)
T1-P1	7.15532
T1-P2	7.61696
T1-P3	8.07859
T2-P1	9.00186
f3 T2-P2	9.69431
T2-P3	10.38676
T3-P1	8.30941
T3-P2	8.54023
T3-P3	8.77104

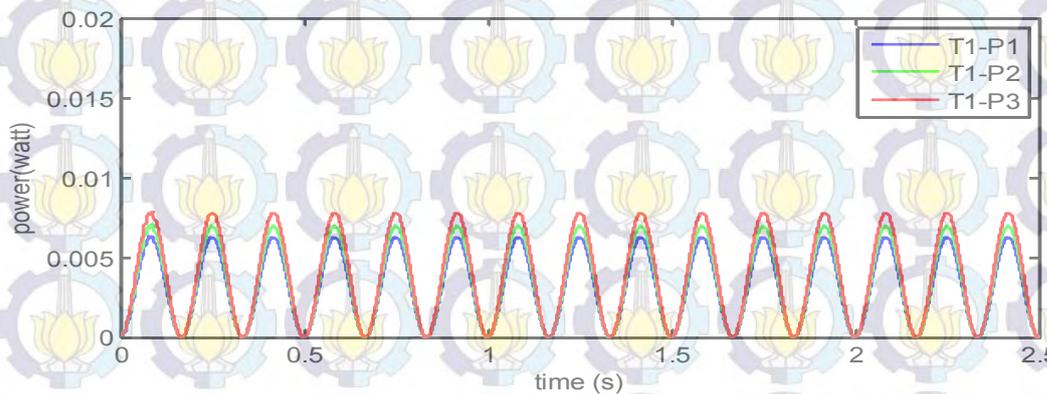
Pada kondisi frekuensi 3 dengan titik tumpu tiga (T3) dengan variasi volume pelampung (P1, P2, dan P3) tegangan yang dihasilkan masing masing sebesar 3.042 volt, 3.074 volt, dan 3.081 volt. Untuk titik tumpu kedua (T2) dengan variasi volume pelampung (P1, P2, dan P3) tegangan yang dihasilkan masing masing sebesar tegangan yang dihasilkan sebesar 3.236 volt, 3.293 volt, dan 3.304 volt. Sedangkan pada titik tumpu 3 (T3) dengan variasi volume pelampung (P1, P2, dan P3) tegangan yang dihasilkan masing masing sebesar 2.988 volt, 3.052 volt, dan 3.066 volt.

Perubahan hasil bangkitan tegangan sangat dipengaruhi oleh volume pelampung dan titik tumpu lengan pengungkit. Dari masing-masing variasi didapat pengaruh volume pelampung dan titik tumpu lengan pengungkit terhadap energi listrik yang dihasilkan. Namun terjadi penurunan tegangan pada titik tumpu ke tiga setelah sebelumnya naik dari titik tumpu pertama menuju kedua. Hal ini disebabkan karena semakin titik tumpu mendekati generator maka semakin besar perubahan torsi yang dihasilkan. Semakin kecil torsi yang dihasilkan maka kecepatan yang dihasilkan oleh generator linier semakin semakin besar. Perubahan volume pelampung sangat berpengaruh terhadap tegangan yang dihasil,

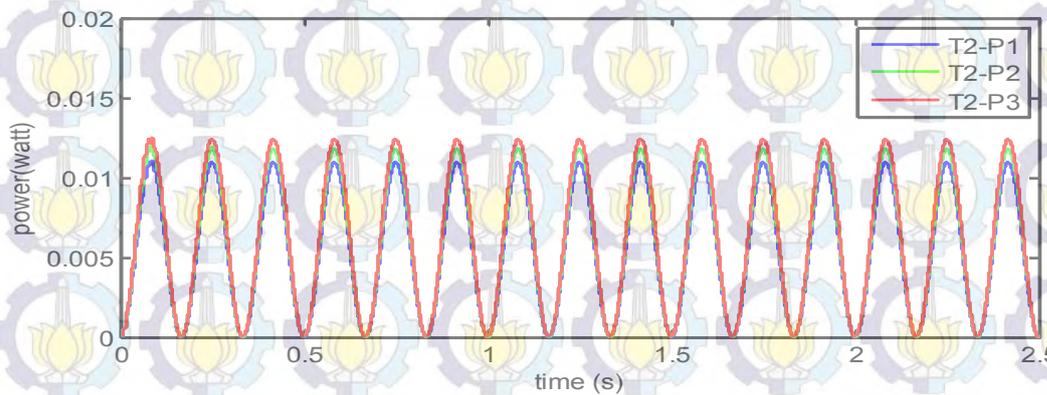
dari grafik diatas dapat terlihat semakin besar pelampung maka tegangan yang dihasilkan semakin besar, hal tersebut diakibatkan karena semakin besar volume pelampung maka gaya angkat yang dihasilkan semakin besar.

b. Daya yang dihasilkan pada variasi panjang lengan terhadap variasi volume pelampung pada frekuensi 3 Hz

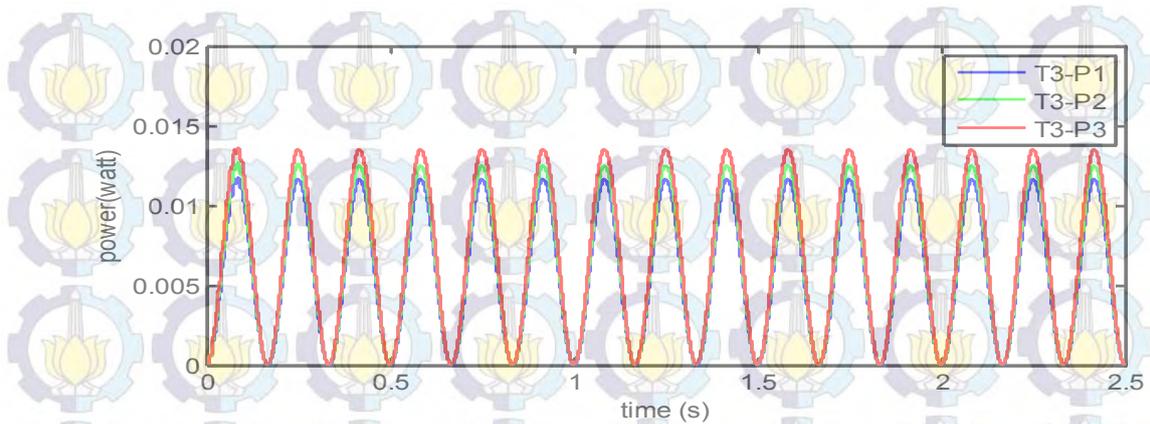
Daya yang dihasilkan pada variasi titik tumpu T1, T2, T3 dan variasi volume pelampung P1, P2, P3 untuk frekuensi 3 Hz. Pengaruh volume pelampung dan panjang lengan terhadap daya listrik yang dihasilkan, besarnya tegangan yang dihasilkan ditampilkan pada gambar 4.46 sampai 4.48 di bawah ini.



Gambar 4.46 Bangkitan daya PLTGL rotary generator pada pada frekuensi 3, titik tumpu dua T1 dengan variasi pelampung



Gambar 4.47 Bangkitan daya PLTGL rotary generator pada pada frekuensi 3, titik tumpu dua T2 dengan variasi pelampung



Gambar 4.48 Bangkitan daya PLTGL rotary generator pada pada frekuensi 3, titik tumpu dua T3 dengan variasi pelampung

Dari gambar 4.46 sampai gambar 4.48 terlihat bahwa perbedaan tegangan yang dihasilkan pada perubahan panjang titik tumpu dan volume pelampung, masing-masing RMS tegangan yang dihasilkan disajikan pada tabel 4.22 sebagai berikut.

Tabel 4.21 RMS daya yang dihasilkan pada pemodelan generator rotary

Spesimen yang divariasikan	Daya bangkitan generator rotary (watt)
T1-P1	0.01534
T1-P2	0.01633
T1-P3	0.01732
T2-P1	0.01831
f3 T2-P2	0.02078
T2-P3	0.02227
T3-P1	0.01782
T3-P2	0.01831
T3-P3	0.01881

Terlihat bahwa tegangan dan daya tertinggi dihasilkan pada titik tumpu 2 (T2) dengan pelampung 3. Untuk tegangan dan daya bakitan terendah dihasilkan pada titik tumpu 1 dengan pelampung 1. Hal ini sama dengan yang terjadi pada generator linier. Volume pelampung memberikan efek bangkitan daya dan tegangan yang cukup besar. Hal ini dikarenakan pelampung mempunyai berat yang mempengaruhi naik turunnya mekanisme PLTGL akibat gaya eksitasi gelombang air laut.

Perubahan hasil bangkitan daya sangat dipengaruhi oleh volume pelampung dan titik tumpu lengan pengungkit. Dari masing-masing variasi didapat pengaruh volume pelampung dan titik tumpu lengan pengungkit terhadap energi listrik yang dihasilkan. Namun terjadi penurunan daya pada titik tumpu ke tiga setelah sebelumnya naik dari titik tumpu pertama menuju kedua. Hal ini disebabkan karena semakin titik tumpu mendekati generator maka semakin besar perubahan torsi yang dihasilkan. Semakin kecil torsi yang dihasilkan maka kecepatan yang dihasilkan oleh generator linier semakin semakin besar. Perubahan volume pelampung sangat berpengaruh terhadap tegangan yang dihasilkan, dari grafik diatas dapat terlihat semakin besar pelampung maka daya yang dihasilkan semakin besar, hal tersebut diakibatkan karena semakin besar volume pelampung maka gaya angkat yang dihasilkan semakin besar.

Pada hasil pemodelan PLTGL tipe pengungkit generator rotary diketahui prosentase pengaruh variasi terhadap energi listrik yang perhitungannya dapat dilihat pada lampiran 3. Variasi frekuensi memberikan prosentase energi listrik sebesar 93.77%, variasi titik tumpu sebesar 11.24% dengan arah yang berlawanan, dan volume pelampung sebesar 13,09%.

4.3 Perbandingan PLTGL tipe pengungkit Linier Generator dan rotary generator

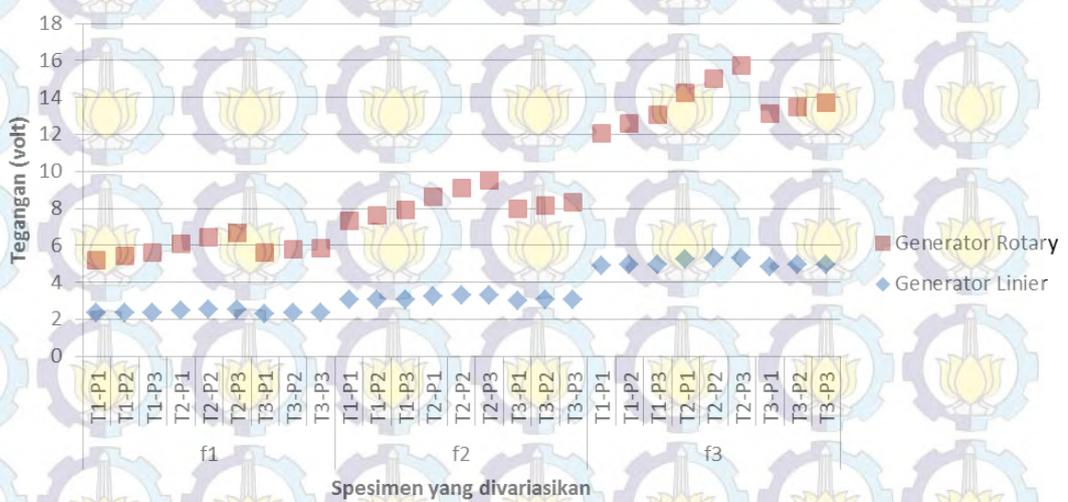
Hasil perbandingan pemodelan antara PLTGL tipe pengungkit yang menggunakan generator linier dengan yang menggunakan generator rotary dapat ditunjukkan pada tabel 4.23 sebagai berikut:

Tabel 4.22 Perbandingan hasil generator linier dan generator rotary

Data	Generator Linier		Generator Rotary		
	Tegangan (volt)	Daya (watt)	tegangan (volt)	Daya (watt)	
f1	T1-P1	2.34031	0.01008	2.86213	0.00614
	T1-P2	2.36452	0.01024	3.04678	0.00653
	T1-P3	2.36969	0.01027	3.23144	0.00693
	T2-P1	2.48937	0.01078	3.60074	0.00732
	T2-P2	2.53280	0.01106	3.87772	0.00831
	T2-P3	2.54182	0.01112	4.15470	0.00891

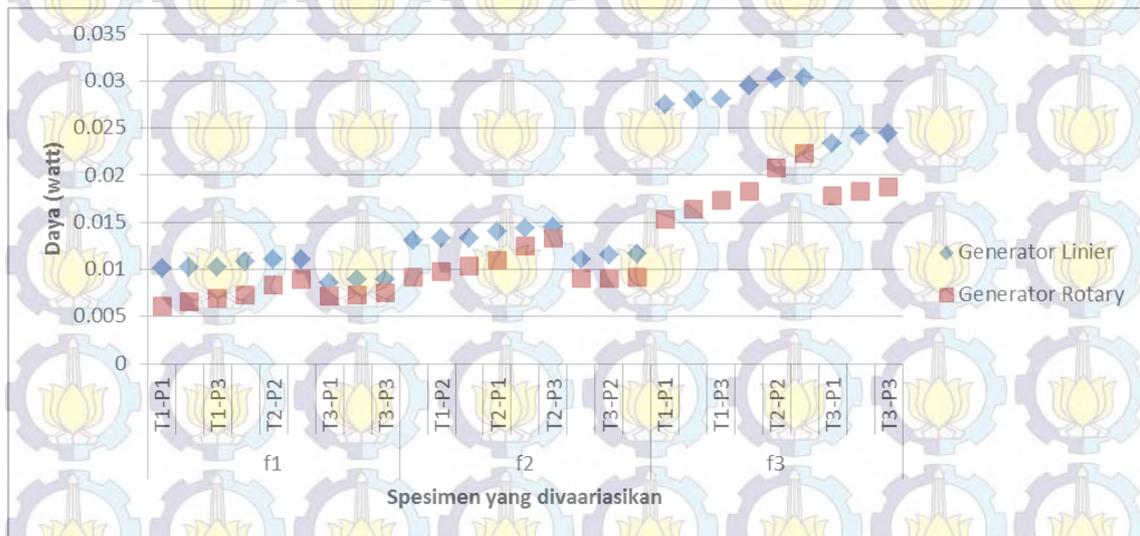
f2	T3-P1	2.29833	0.00855	3.32376	0.00713
	T3-P2	2.34801	0.00887	3.41609	0.00732
	T3-P3	2.35848	0.00895	3.50842	0.00752
	T1-P1	3.04240	0.01310	4.29319	0.00920
	T1-P2	3.07387	0.01331	4.57017	0.00980
	T1-P3	3.08060	0.01336	4.84715	0.01039
	T2-P1	3.23618	0.01405	5.40112	0.01099
	T2-P2	3.29264	0.01438	5.81659	0.01247
	T2-P3	3.30436	0.01445	6.23206	0.01336
f3	T3-P1	2.98783	0.01112	4.98564	0.01069
	T3-P2	3.05241	0.01154	5.12414	0.01099
	T3-P3	3.06603	0.01163	5.26263	0.01128
	T1-P1	4.91464	0.02751	7.15532	0.01534
	T1-P2	4.96549	0.02795	7.61696	0.01633
	T1-P3	4.97635	0.02805	8.07859	0.01732
	T2-P1	5.22767	0.02951	9.00186	0.01831
	T2-P2	5.31889	0.03020	9.69431	0.02078
	T2-P3	5.33782	0.03035	10.38676	0.02227
	T3-P1	4.82650	0.02334	8.30941	0.01782
	T3-P2	4.93081	0.02423	8.54023	0.01831
	T3-P3	4.95281	0.02442	8.77104	0.01881

Untuk perbandingan grafik tegangan yang dihasilkan oleh generator linier dan generator rotary ditunjukkan pada gambar 4.49 sebagai berikut.



Gambar 4.49 perbandingan tegangan generator linier dan generator rotary

Sedangkan untuk perbandingan grafik daya yang dihasilkan oleh generator linier dan generator rotary ditunjukkan pada gambar 4.50 sebagai berikut.

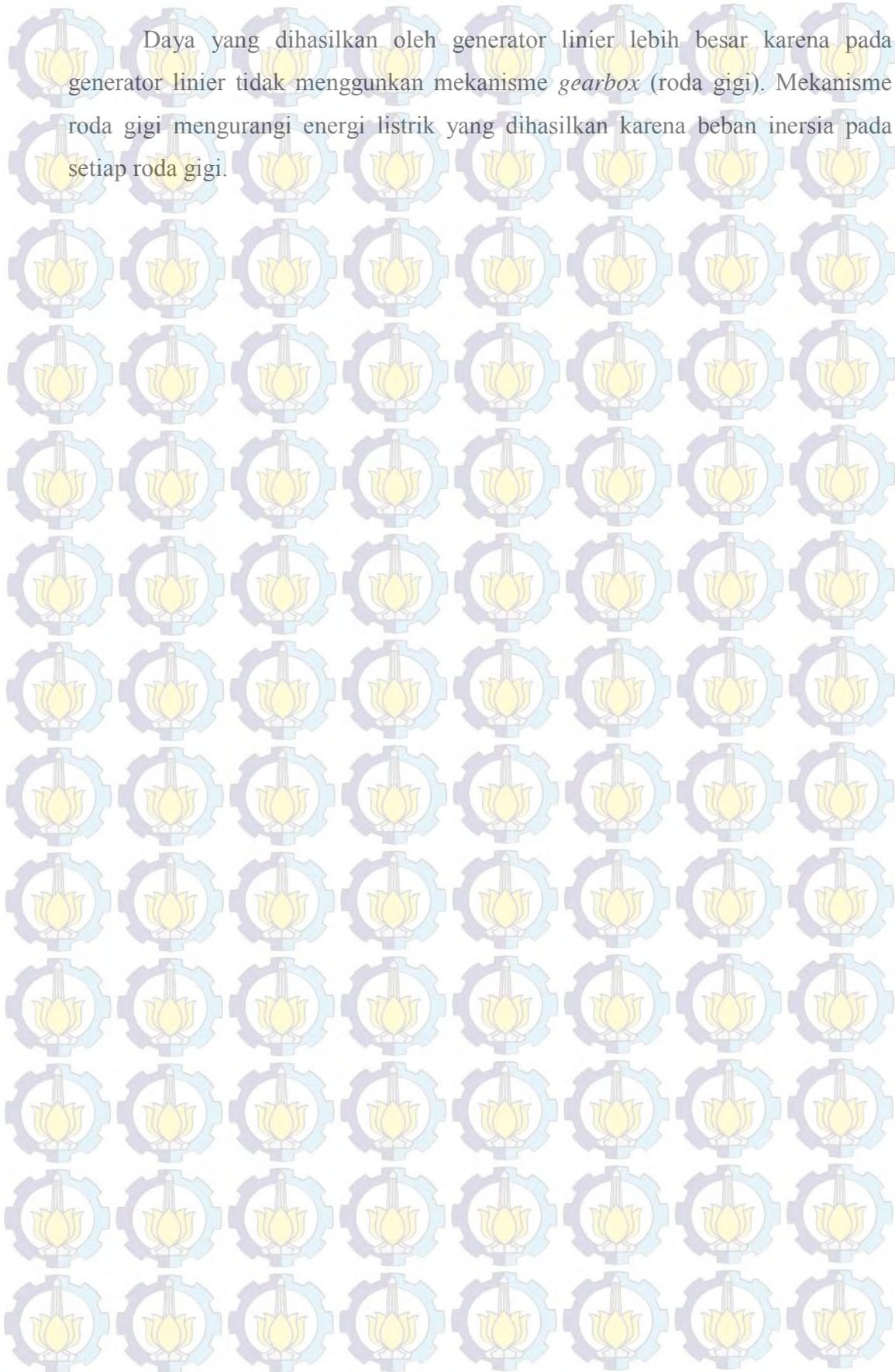


Gambar 4.50 perbandingan tegangan generator linier dan generator rotary

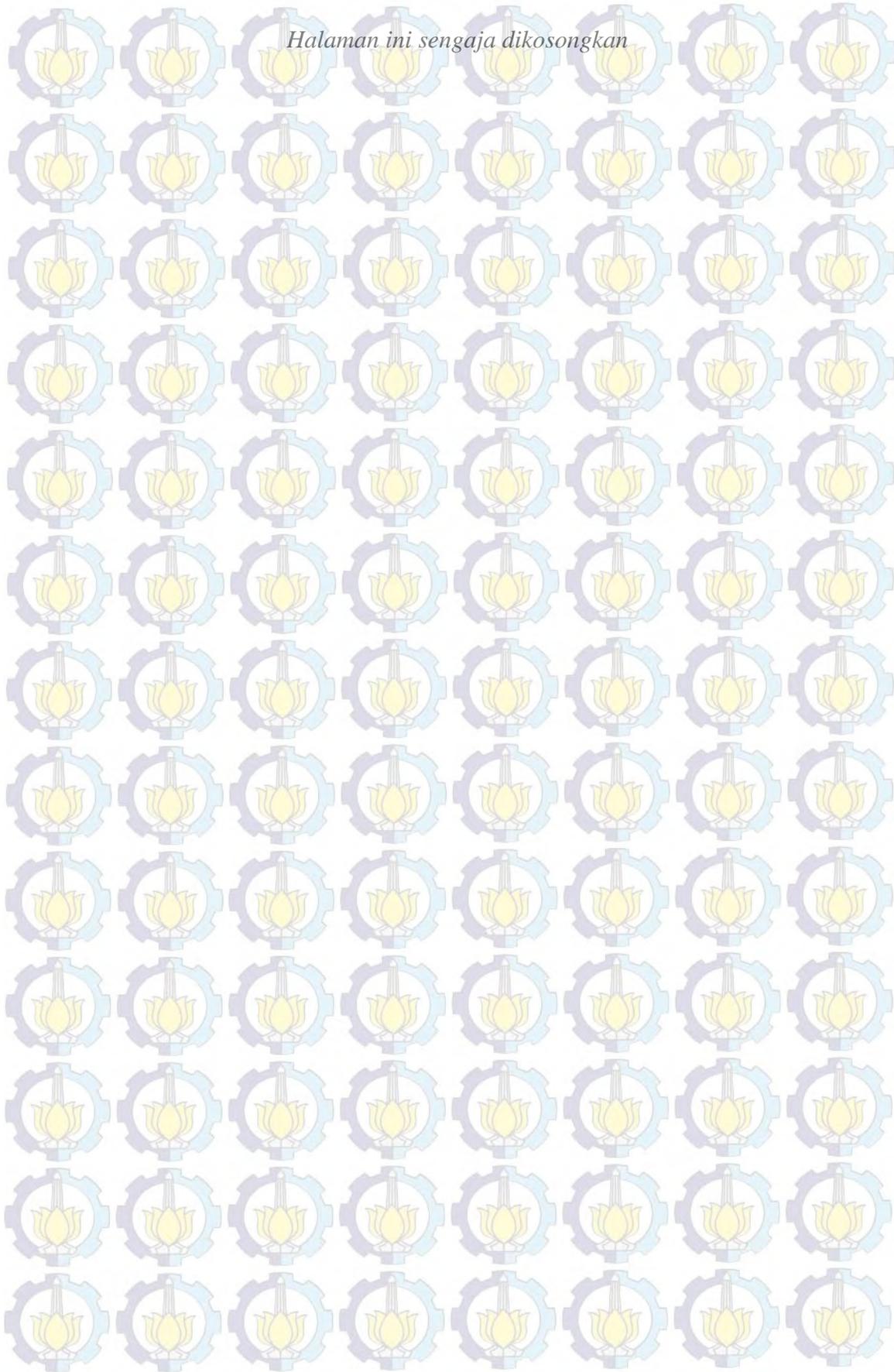
Hasil yang didapat menunjukkan bahwa pada frekuensi ke tiga ($f=3$ Hz) memiliki nilai tegangan dan daya yang lebih besar dibandingkan dengan frekuensi yang lain. Tegangan dan daya terbesar dihasilkan pada frekuensi 3 dengan titik pengungkit 2 (T2) pelampung 3 (P3). Sedangkan untuk tegangan dan daya terkecil dihasilkan oleh frekuensi 1 titik tumpu 1 (T1) dan pelampung 1 (P1). Hal ini menunjukkan kesamaan dan kecenderungan (tren) naik terhadap tegangan dan daya yang dihasilkan oleh mekanisme PLTGL tipe pengungkit baik menggunakan generator linier maupun generator rotary memiliki pada variabel yang sama.

Tegangan yang dihasilkan oleh mekanisme PLTGL yang menggunakan generator rotary lebih besar daripada mekanisme PLTGL yang menggunakan generator linier. Hal ini disebabkan karena kecepatan angular yang terjadi pada generator rotary lebih besar sehingga generator linier mengalami perpindahan fluks magnet yang lebih lambat dari pada generator rotary. Sehingga dapat disimpulkan bahwa untuk menaikkan kecepatan putar generator lebih tepat menggunakan generator rotary dengan mekanisme *gearbox*, sedangkan untuk meningkatkan daya lebih tepat menggunakan generator linier tanpa *gearbox*.

Daya yang dihasilkan oleh generator linier lebih besar karena pada generator linier tidak menggunakan mekanisme *gearbox* (roda gigi). Mekanisme roda gigi mengurangi energi listrik yang dihasilkan karena beban inersia pada setiap roda gigi.



Halaman ini sengaja dikosongkan



BAB 5 KESIMPULAN

5.1. Kesimpulan

Dari analisa dan pembahasan pada PLTGL tipe pengungkit dengan variasi titik tumpu dan massa pelampung didapat kesimpulan sebagai berikut:

1. Nilai daya akan meningkat seiring dengan bergesernya titik tumpu mendekati magnet kumparan generator linier pada mekanisme PLTGL tipe pengungkit.
2. Nilai daya akan meningkat seiring bertambahnya volume pelampung pada mekanisme PLTGL Tipe Pengungkit generator linier.
3. Nilai daya terbesar pada mekanisme PLTGL tipe pengungkit generator linier sebesar 0.303 watt yang dihasilkan oleh titik tumpu T2 (0.3125 m dari titik pelampung) dengan volume pelampung P3 (0.042 m³) pada frekuensi 3 Hz. Sedangkan daya terkecil sebesar 0.086 watt dihasilkan pada titik tumpu T1 (0.25 m dari titik pelampung) dengan volume pelampung P1 (0.019 m³) pada frekuensi 1 Hz.
4. Nilai daya terbesar pada mekanisme PLTGL tipe pengungkit generator rotary sebesar 0.02227 watt yang dihasilkan oleh titik tumpu T2 (0.3125 m dari titik pelampung) dengan volume pelampung P3 (0.042 m³). Sedangkan daya terkecil sebesar 0.00855 watt dihasilkan pada titik tumpu T1 (0.25 m dari titik pelampung) dengan volume pelampung P1 (0.019 m³) pada frekuensi 1 Hz.
5. Efisiensi nilai terbesar pada mekanisme PLTGL tipe pengungkit terjadi pada frekuensi 3 Hz dengan panjang titik tumpu T2 (0.3125 m dari titik pelampung) dan volume pelampung P2 (0.042 m³) sebesar 29.668%. Untuk error yang terjadi pada mekanisme rata-rata sebesar 38.522%.
6. Pada kondisi sebenarnya di laut lepas, energi yang dihasilkan dengan skala 1:17 sebesar 18.271 kW.
7. Penggunaan generator rotary dengan penambahan mekanisme *gearbox* dapat meningkatkan kecepatan gerak rotor dan tegangan listrik yang dihasilkan,

- namun daya listrik yang dihasilkan menurun karena beban-beban inersia yang dihasilkan oleh mekanisme *gearbox*.
8. Perbandingan efisiensi yang dihasilkan oleh Mats Leijon sebesar 50%, dan Chunyuan Liu sebesar 90.03%. Sedangkan pada penelitian ini dihasilkan efisiensi tertinggi sebesar 29.668%.
 9. Penelitian ini memberikan kontribusi berupa desain konstruksi PLTGL yang sederhana dengan efisiensi sebesar 29.688%
 10. Penelitian ini memiliki kontribusi berupa acuan standart untuk pengembangan model PLTGL (skala 1:13) menjadi PLTGL dalam kondisi real (skala 1:1) dengan pemodelan yang telah dibuat.
 11. Faktor koreksi (f_k) yang telah didapat merupakan sebuah konstanta yang digunakan untuk menurunkan error yang terjadi sehingga dapat digunakan sebagai konstanta guna mengembangkan mekanisme PLTGL ke arah yang lebih luas, baik berupa pembesaran skala mekanis ataupun penambahan mekanisme dengan *gearbox* ataupun generator rotary.

5.2. Saran

Penelitian ini masih banyak memiliki kekurangan, oleh karena itu penulis mempunyai beberapa saran, yaitu:

1. Masih terjadi gelombang balik pada kolam simulator yang berada di laboratorium vibrasi ITS. Sehingga perlu uadanya perbaikan mekanisme kolam simulator agar hasil penelitian selanjutnya lebih maksimal.
2. Pembuatan dudukan kumparan lebih dipresisikan sehingga noise yang terjadi semakin kecil dan hasilnya semakin maksimal.
3. Agar error yang terjadi lebih kecil maka perlu dipertimbangkan lagi bagian-bagian yang mengalami gesekan pada mekanisme PLTGL untuk dimasukkan kedalam perhitungan simulasi
4. Perlu dilakukan pembuatan model mekanisme PLTGL tipe pengungkit generator rotary guna keperluan uji eksperien agar hasilnya dapat dibandingkan dengan yang menggunakan generator linier.

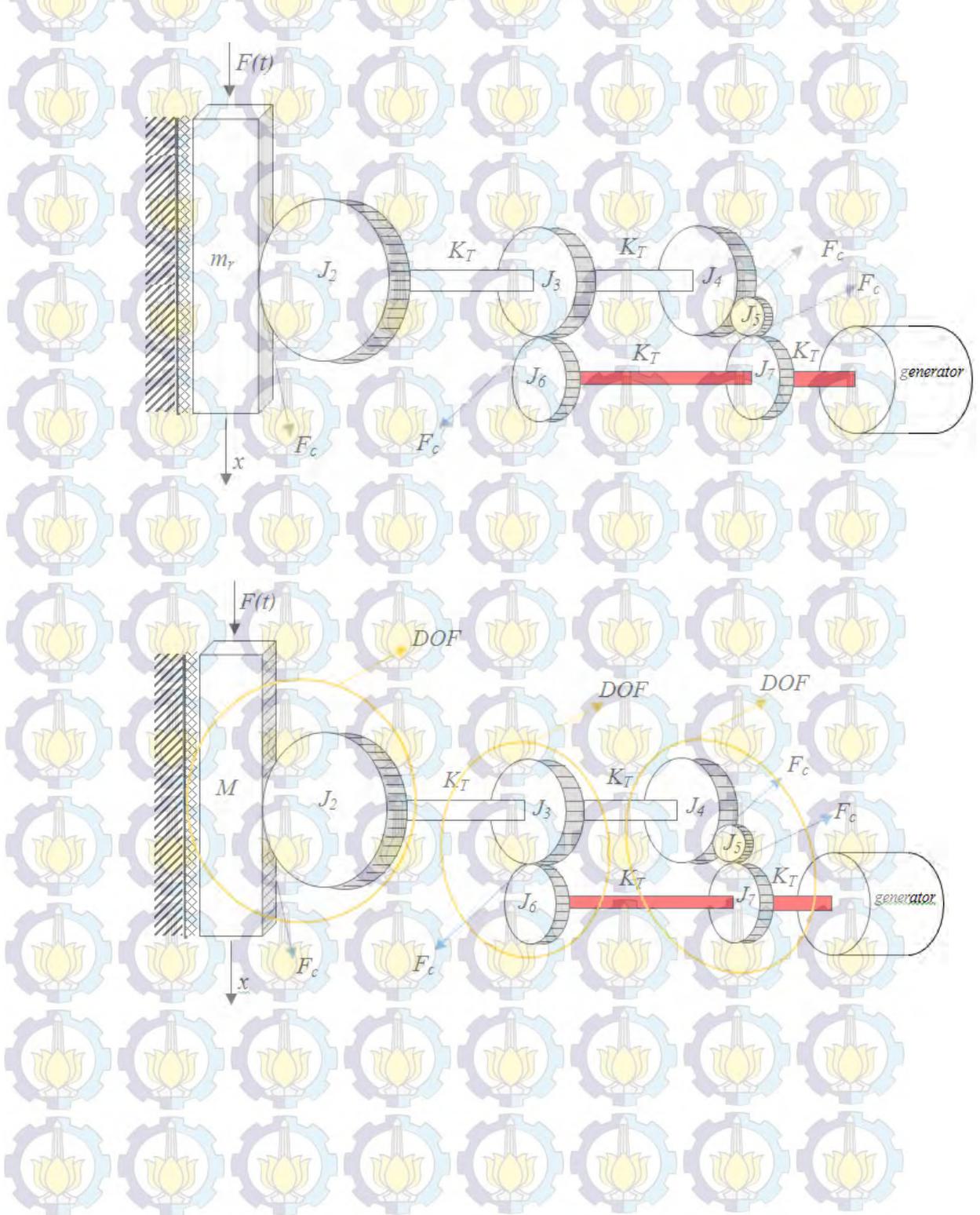
Daftar Pustaka

- [1] M. B. Subagio, "Analisa Teknis Sistem Konversi Pneumatis Energi Gelombang Laut Untuk Pembangkit Listrik," *Anal. Tek. Sist. Konversi Pneum. Energi Gelombang Laut Untuk Pembangkit List. Tech. Anal. Pneum. Sea Wave Energy Convert. Micro Power Plant Anal. Tek. Sist. Konversi Pneum.*, vol. 0, no. 0, Jul. 2012.
- [2] S. Hadi, "Energi Listrik Alternatif Berbasis Arus Laut Indonesia," Sabtu, Agustus-2014. [Online]. Available: http://www.itb.ac.id/news/itb_berita_4475.pdf. [Accessed: 14-Apr-2015].
- [3] A. P. Maris, "Studi Eksperimen dan Analisa Energi Listrik yang Dihasilkan oleh Mekanisme Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut Tipe Pengungkit Dengan Variasi Titik Tumpu Lengan Pengungkit dan Massa Pelampung," *ITS*, 2015.
- [4] M. Kramer, "The wave energy converter Wave Star: a multi point absorber system," Jan. 2006.
- [5] M. Kramer, L. Marquis, and P. Frigaard, "Performance Evaluation of the Wavestar Prototype," presented at the University of Southampton, 2011.
- [6] A. Wijaya and I. Wayan, "Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut Menggunakan Teknologi Oscilating Water Column Di Perairan Bali," *Maj. Ilm. Teknol. Elektro J. Electr. Technol.*, vol. 9, no. 2, Nov. 2012.
- [7] D. Magagna, "Oscillating water column wave pump: a wave energy converter for water delivery," phd, University of Southampton, 2011.
- [8] H. Polinder, M. E. C. Damen, and F. Gardner, "Linear PM Generator system for wave energy conversion in the AWS," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 19, no. 3, pp. 583–589, Sep. 2004.
- [9] "AWS Ocean Energy Ltd," 14-Apr-2015. [Online]. Available: <http://www.linkedin.com/company/aws-ocean-energy-ltd>. [Accessed: 14-Apr-2015].
- [10] P. M. C. Godinho, M. R. A. Calado, and S. J. P. S. Mariano, "Design and numerical analysis of a new linear generator for wave energy conversion," presented at the 2011 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP), 2011, pp. 525–529.
- [11] M. Leijon, H. Bernhoff, O. Agren, J. Isberg, J. Sundberg, M. Berg, K. E. Karlsson, and A. Wolfbrandt, "Multiphysics simulation of wave energy to electric energy conversion by permanent magnet linear generator," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 20, no. 1, pp. 219–224, Mar. 2005.
- [12] W. Li, K. T. Chau, and J. Z. Jiang, "Application of Linear Magnetic Gears for Pseudo-Direct-Drive Oceanic Wave Energy Harvesting," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 47, no. 10, pp. 2624–2627, Oct. 2011.

- [13] C. Liu, H. Yu, M. Hu, Q. Liu, S. Zhou, and L. Huang, "Research on a permanent magnet tubular linear generator for direct drive wave energy conversion," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 8, no. 3, pp. 281–288, Apr. 2014.
- [14] S. Rahmi, "Studi Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Air Laut," *Lontar UI*, Apr. 2010.
- [15] J. A. Cahyadi, "Studi Eksperimental Pengaruh Bentuk Pelampung Pada Mekanisme Pltgl Metode Pelampung Terhadap Energi Listrik Yang Dihasilkan," *Studi Eksp. Pengaruh Bentuk Pelampung Pada Mek. Pltgl Metode Pelampung Terhadap Energi List. Yang Dihasilkan Studi Eksp. Pengaruh Bentuk Pelampung Pada Mek. Pltgl Metode Pelampung Terhadap Energi List. Yang Dihasilkan*, vol. 0, no. 0, Feb. 2015.
- [16] "oseanografi dan ilmu kelautan: Gelombang Laut," *oseanografi dan ilmu kelautan*, 14-Jan-2011. .
- [17] "250px-Buoyancy.svg.png (PNG Image, 250 × 312 pixels)." [Online]. Available: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/7/74/Buoyancy.svg/250px-Buoyancy.svg.png>. [Accessed: 27-Dec-2015].
- [18] O. Manha, "Modeling and Analysis of Dynamic Systems 3rd Edition PDF Solutions Manual Download Ebook | Site PDF Download | Electronics Books and ebooks," *Modeling and Analysis of Dynamic Systems 3rd Edition PDF Solutions Manual Download Ebook | Site PDF Download | Electronics Books and ebooks*, 11-Nov-2012. .
- [19] "Gear box - PANCA DESAIN," 14-Apr-2015. [Online]. Available: <http://www.pancadesain.com/desain-mesin-industri/gear-box>. [Accessed: 14-Apr-2015].
- [20] "Google Image Result for <http://fisikastudycenter.files.wordpress.com/2010/06/pic-p37-n0-26.png>," 14-Apr-2015. [Online]. Available: http://www.google.com/imgres?imgurl=http://fisikastudycenter.files.wordpress.com/2010/06/pic-p37-n0-26.png&imgrefurl=http://fisikastudycenter.com/bank-soal-un-fisika-sma/71-un-fisika-ggl-induksi-dan-transformator&h=200&w=225&tbnid=VurzVFSkBi32NM:&zoom=1&docid=LADE4q178v2yZM&ei=vIItVY_SMsmLuwSUuIGQCQ&tbn=isch&ved=0CCUQMygGMAY. [Accessed: 14-Apr-2015].

Lampiran 1

Model matematis Gerak Gearbox



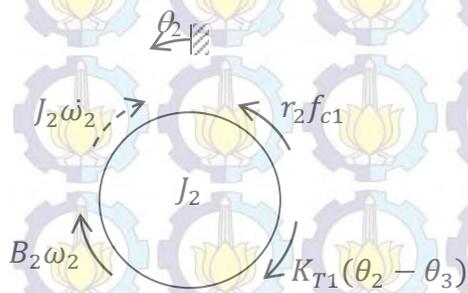
UNTUK D.O.F 1

$$\sum F = 0$$

$$-M\ddot{x} - B_1\dot{x} - Kx - f_{c1} + F(t) = 0$$

$$f_{c1} = -M\ddot{x} - B_1\dot{x} - Kx + F(t) \quad (11.1)$$

FBD 2



$$\sum T = 0$$

$$-J_2\ddot{\theta}_2 - B_2\dot{\theta}_2 - K_{T1}(\theta_2 - \theta_3) + r_2f_{c1} = 0$$

$$J_2\ddot{\theta}_2 + B_2\dot{\theta}_2 + K_{T1}\theta_2 - K_{T1}\theta_3 - r_2f_{c1} = 0$$

$$J_2\ddot{\theta}_2 + B_2\dot{\theta}_2 + K_{T1}\theta_2 - K_{T1}\theta_3 - r_2(-M\ddot{x} - B_1\dot{x} - Kx + F(t)) = 0 \quad (11.2)$$

Karena $x = r_2, \theta_2$ dan juga berlaku untuk x turunan pertama dan kedua

$$J_2 \ddot{\theta}_2 + B_2 \dot{\theta}_2 + K_{T1} \theta_2 - K_{T1} \theta_3 - r_2 (-M \cdot r_2 \cdot \ddot{\theta}_2 - B_1 r_2 \cdot \dot{\theta}_2 - K \cdot r_2 \cdot \theta_2 + F(t))$$

$$= 0$$

$$J_2 \ddot{\theta}_2 + B_2 \dot{\theta}_2 + K_{T1} \theta_2 - K_{T1} \theta_3 + M \cdot r_2^2 \cdot \ddot{\theta}_2 + B_1 r_2^2 \cdot \dot{\theta}_2 + K \cdot r_2^2 \cdot \theta_2 - F(t) \cdot r_2$$

$$= 0$$

$$(J_2 + M \cdot r_2^2) \cdot \ddot{\theta}_2 + (B_2 + B_1 r_2^2) \cdot \dot{\theta}_2 + (K_{T1} + K \cdot r_2^2) \cdot \theta_2 - K_{T1} \theta_3 - F(t) \cdot r_2 = 0$$

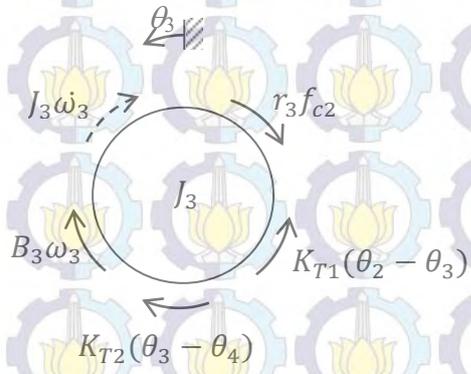
State variable

$$\dot{\theta}_2 = \omega_2$$

$$\dot{\omega}_2$$

$$= \frac{1}{(J_2 + M \cdot r_2^2)} [-(B_2 + B_1 r_2^2) \cdot \dot{\theta}_2 - (K_{T1} + K \cdot r_2^2) \cdot \theta_2 + K_{T1} \theta_3 \cdot N_1 + F(t) \cdot r_2^2]$$

FBD 3



$$\sum T = 0$$

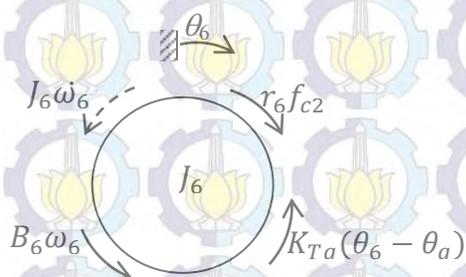
$$-J_3 \ddot{\theta}_3 - B_3 \dot{\theta}_3 + K_{T1}(\theta_2 - \theta_3) - K_{T2}(\theta_3 - \theta_4) - r_3 f_{c2} = 0$$

$$J_3 \ddot{\theta}_3 + B_3 \dot{\theta}_3 + K_{T1} \theta_3 + K_{T2} \theta_3 - K_{T1} \theta_2 - K_{T2} \theta_4 + r_3 f_{c2} = 0$$

$$r_3 f_{c2} = -J_3 \ddot{\theta}_3 - B_3 \dot{\theta}_3 - K_{T1} \theta_3 - K_{T2} \theta_3 + K_{T1} \theta_2 + K_{T2} \theta_4$$

$$f_{c2} = \frac{1}{r_3} (-J_3 \ddot{\theta}_3 - B_3 \dot{\theta}_3 - K_{T1} \theta_3 - K_{T2} \theta_3 + K_{T1} \theta_2 + K_{T2} \theta_4) \quad (11.3)$$

FBD 6



$$\sum T = 0$$

$$-J_6\ddot{\theta}_6 - B_6\dot{\theta}_6 + r_6 f_{c2} - K_{Tg}(\theta_6 - \theta_g) = 0$$

$$-J_6\ddot{\theta}_6 - B_6\dot{\theta}_6 - K_{Tg}\theta_6 + K_{Tg}\theta_g + r_6 f_{c2} = 0$$

$$J_6\ddot{\theta}_6 + B_6\dot{\theta}_6 + K_{Tg}\theta_6 - K_{Tg}\theta_g - r_6 f_{c2} = 0$$

$$J_6\ddot{\theta}_6 + B_6\dot{\theta}_6 + K_{Tg}\theta_6 - K_{Tg}\theta_g$$

$$- r_6 \left(\frac{1}{r_3} (-J_3\ddot{\theta}_3 - B_3\dot{\theta}_3 - K_{T1}\theta_3 - K_{T2}\theta_3 + K_{T1}\theta_2 + K_{T2}\theta_4) \right) = 0$$

$$\text{Misalkan } N_1 = \frac{r_6}{r_3} \text{ dan } \theta_3 = N_1 \cdot \theta_6$$

$$\theta_3 r_3 = \theta_6 r_6$$

$$\dot{\theta}_3 r_3 = \dot{\theta}_6 r_6$$

$$\ddot{\theta}_3 r_3 = \ddot{\theta}_6 r_6$$

$$J_6\ddot{\theta}_6 + B_6\dot{\theta}_6 + K_{Tg}\theta_6 - K_{Tg}\theta_g$$

$$- \frac{r_6}{r_3} \left((-J_3\ddot{\theta}_3 - B_3\dot{\theta}_3 - K_{T1}\theta_3 - K_{T2}\theta_3 + K_{T1}\theta_2 + K_{T2}\theta_4) \right) = 0$$

$$J_6\ddot{\theta}_6 + B_6\dot{\theta}_6 + K_{Tg}\theta_6 - K_{Tg}\theta_g$$

$$- N_1 (-J_3 \cdot N_1 \cdot \ddot{\theta}_6 - B_3 \cdot N_1 \cdot \dot{\theta}_6 - K_{T1} \cdot N_1 \cdot \theta_6 - K_{T2} \cdot N_1 \cdot \theta_6 + K_{T1}\theta_2 + K_{T2}\theta_4) = 0$$

$$J_6\ddot{\theta}_6 + B_6\dot{\theta}_6 + K_{Tg}\theta_6 - K_{Tg}\theta_g + J_3 \cdot N_1^2 \cdot \ddot{\theta}_6 + B_3 \cdot N_1^2 \cdot \dot{\theta}_6 + K_{T1} \cdot N_1^2 \cdot \theta_6$$

$$+ K_{T2} \cdot N_1^2 \cdot \theta_6 - K_{T1} \cdot N_1 \cdot \theta_2 - K_{T2} \cdot N_1 \cdot \theta_4 = 0$$

$$(J_6 + J_3 \cdot N_1^2) \cdot \ddot{\theta}_6 + (B_6 + B_3 \cdot N_1^2) \cdot \dot{\theta}_6 + K_{T2} \cdot N_1^2 \cdot \theta_6 + K_{T1} \cdot N_1^2 \cdot \theta_6 + K_{Tg}\theta_6$$

$$- K_{Tg}\theta_g - K_{T1} \cdot N_1 \cdot \theta_2 - K_{T2} \cdot N_1 \cdot \theta_4 = 0$$

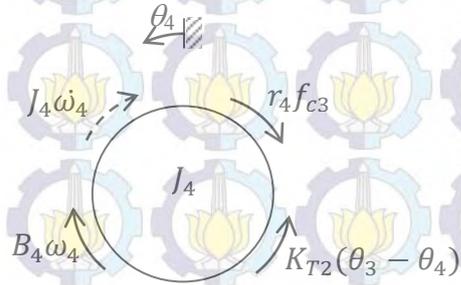
State variabel $\dot{\theta}_6$ adalah sebagai berikut:

$$\dot{\theta}_6 = \omega_6$$

$$\dot{\theta}_6 = \frac{1}{(J_6 + J_3 \cdot N_1^2)} \left[-(B_6 + B_3 \cdot N_1^2) \cdot \dot{\theta}_6 - (K_{T2} \cdot N_1^2 - K_{T1} \cdot N_1^2) \cdot \theta_6 - K_{Tg}\theta_6 + K_{Tg}\theta_g + K_{T1} \cdot N_1 \cdot \theta_2 + K_{T2} \cdot N_1 \cdot \theta_4 \right] \quad (11.4)$$

UNTUK D.O.F 3

FBD 4



$$\sum T = 0$$

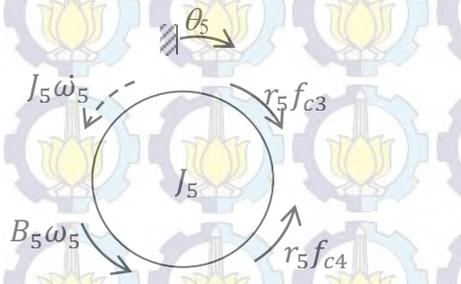
$$-J_4 \ddot{\theta}_4 - B_4 \dot{\theta}_4 + K_{T2}(\theta_3 - \theta_4) - r_4 f_{c3} = 0$$

$$J_4 \ddot{\theta}_4 + B_4 \dot{\theta}_4 + K_{T2} \theta_4 - K_{T2} \theta_3 + r_4 f_{c3} = 0$$

$$r_4 f_{c3} = -J_4 \ddot{\theta}_4 - B_4 \dot{\theta}_4 - K_{T2} \theta_4 + K_{T2} \theta_3$$

$$f_{c3} = \frac{1}{r_4} (-J_4 \ddot{\theta}_4 - B_4 \dot{\theta}_4 - K_{T2} \theta_4 + K_{T2} \theta_3)$$

FBD 5



$$\sum T = 0$$

$$-J_5 \ddot{\theta}_5 - B_5 \dot{\theta}_5 - r_5 f_{c4} + r_5 f_{c3} = 0$$

$$J_5 \ddot{\theta}_5 + B_5 \dot{\theta}_5 + r_5 f_{c4} - r_5 f_{c3} = 0$$

$$J_5 \ddot{\theta}_5 + B_5 \dot{\theta}_5 + r_5 f_{c4} - r_5 \left(\frac{1}{r_4} (-J_4 \ddot{\theta}_4 - B_4 \dot{\theta}_4 - K_{T2} \theta_4 + K_{T2} \theta_3) \right) = 0$$

Misalkan

$$\theta_4 r_4 = \theta_5 r_5 = N_2$$

$$\dot{\theta}_4 r_4 = \dot{\theta}_5 r_5 = N_2$$

$$\ddot{\theta}_4 r_4 = \ddot{\theta}_5 r_5 = N_2$$

$$J_5 \ddot{\theta}_5 + B_5 \dot{\theta}_5 + r_5 f_{c4} - \frac{r_5}{r_4} (-J_4 \ddot{\theta}_4 - B_4 \dot{\theta}_4 - K_{T2} \theta_4 + K_{T2} \theta_3) = 0$$

$$J_5 \ddot{\theta}_5 + B_5 \dot{\theta}_5 + r_5 f_{c4} - N_2 (-J_4 \cdot N_2 \cdot \ddot{\theta}_5 - B_4 \cdot N_2 \cdot \dot{\theta}_5 - K_{T2} \cdot N_2 \cdot \theta_5 + K_{T2} \theta_3) = 0$$

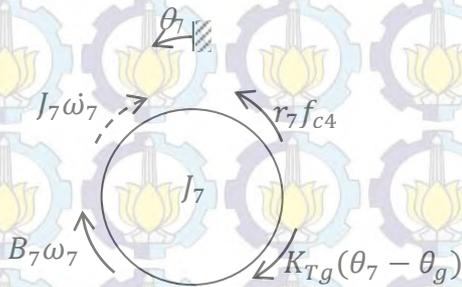
$$J_5 \ddot{\theta}_5 + B_5 \dot{\theta}_5 + r_5 f_{c4} + J_4 \cdot N_2^2 \cdot \ddot{\theta}_5 + B_4 \cdot N_2^2 \cdot \dot{\theta}_5 + K_{T2} \cdot N_2^2 \cdot \theta_5 - K_{T2} \cdot N_2 \cdot \theta_3 = 0$$

$$(J_5 + J_4 \cdot N_2^2) \cdot \ddot{\theta}_5 + (B_5 + B_4 \cdot N_2^2) \cdot \dot{\theta}_5 + K_{T2} \cdot N_2^2 \cdot \theta_5 + r_5 f_{c4} - K_{T2} \cdot N_2 \cdot \theta_3 = 0$$

$$r_5 f_{c4} = -(J_5 + J_4 \cdot N_2^2) \cdot \ddot{\theta}_5 - (B_5 + B_4 \cdot N_2^2) \cdot \dot{\theta}_5 - K_{T2} \cdot N_2^2 \cdot \theta_5 + K_{T2} \cdot N_2 \cdot \theta_3$$

$$f_{c4} = \frac{1}{r_5} \left(-(J_5 + J_4 \cdot N_2^2) \cdot \ddot{\theta}_5 - (B_5 + B_4 \cdot N_2^2) \cdot \dot{\theta}_5 - K_{T2} \cdot N_2^2 \cdot \theta_5 + K_{T2} \cdot N_2 \cdot \theta_3 \right)$$

FBD 7



$$\sum T = 0$$

$$-J_7 \ddot{\theta}_7 - B_7 \dot{\theta}_7 - K_{Tg} (\theta_7 - \theta_g) + r_7 f_{c4} = 0$$

$$J_7 \ddot{\theta}_7 + B_7 \dot{\theta}_7 + K_{Tg} \theta_7 - K_{Tg} \theta_g - r_7 f_{c4} = 0$$

$$J_7 \ddot{\theta}_7 + B_7 \dot{\theta}_7 + K_{Tg} \theta_7 - K_{Tg} \theta_g$$

$$- r_7 \cdot \frac{1}{r_5} \left(-(J_5 + J_4 \cdot N_2^2) \cdot \ddot{\theta}_5 - (B_5 + B_4 \cdot N_2^2) \cdot \dot{\theta}_5 - K_{T2} \cdot N_2^2 \cdot \theta_5 + K_{T2} \cdot N_2 \cdot \theta_3 \right)$$

$$= 0$$

Misalkan

$$\theta_5 r_5 = \theta_7 r_7 = N_3$$

$$\dot{\theta}_5 R_5 = \dot{\theta}_7 r_7 = N_3$$

$$\ddot{\theta}_5 r_5 = \ddot{\theta}_7 r_7 = N_3$$

$$J_7 \ddot{\theta}_7 + B_7 \dot{\theta}_7 + K_{Tg} \theta_7 - K_{Tg} \theta_g$$

$$- N_3 (- (J_5 + J_4 \cdot N_2^2) \cdot N_3 \cdot \ddot{\theta}_7 - (B_5 + B_4 \cdot N_2^2) \cdot N_3 \cdot \dot{\theta}_7 - K_{T2} \cdot N_2^2 \cdot N_3 \cdot \theta_7$$

$$+ K_{T2} \cdot N_2 \cdot \theta_3) = 0$$

$$J_7 \ddot{\theta}_7 + B_7 \dot{\theta}_7 + K_{Tg} \theta_7 - K_{Tg} \theta_g + (J_5 + J_4 \cdot N_2^2) \cdot N_3^2 \cdot \ddot{\theta}_7 + (B_5$$

$$+ B_4 \cdot N_2^2) \cdot N_3^2 \cdot \dot{\theta}_7 + K_{T2} \cdot N_2^2 \cdot N_3^2 \cdot \theta_7 - K_{T2} \cdot N_2 \cdot N_3 \cdot \theta_3 = 0$$

$$J_7 \ddot{\theta}_7 + B_7 \dot{\theta}_7 + K_{Tg} \theta_7 + (J_5 \cdot N_3^2 + J_4 \cdot N_2^2 \cdot N_3^2) \cdot \ddot{\theta}_7 + (B_4 \cdot N_3^2 \cdot N_2^2$$

$$+ B_5 \cdot N_3^2) \cdot \dot{\theta}_7 + K_{T2} \cdot N_2^2 \cdot N_3^2 \cdot \theta_7 - K_{Tg} \theta_g - K_{T2} \cdot N_2 \cdot N_3 \cdot \theta_3 = 0$$

$$(J_7 + J_5 \cdot N_3^2 + J_4 \cdot N_2^2 \cdot N_3^2) \cdot \ddot{\theta}_7 + (B_4 \cdot N_3^2 \cdot N_2^2 + B_5 \cdot N_3^2 + B_7) \cdot \dot{\theta}_7$$

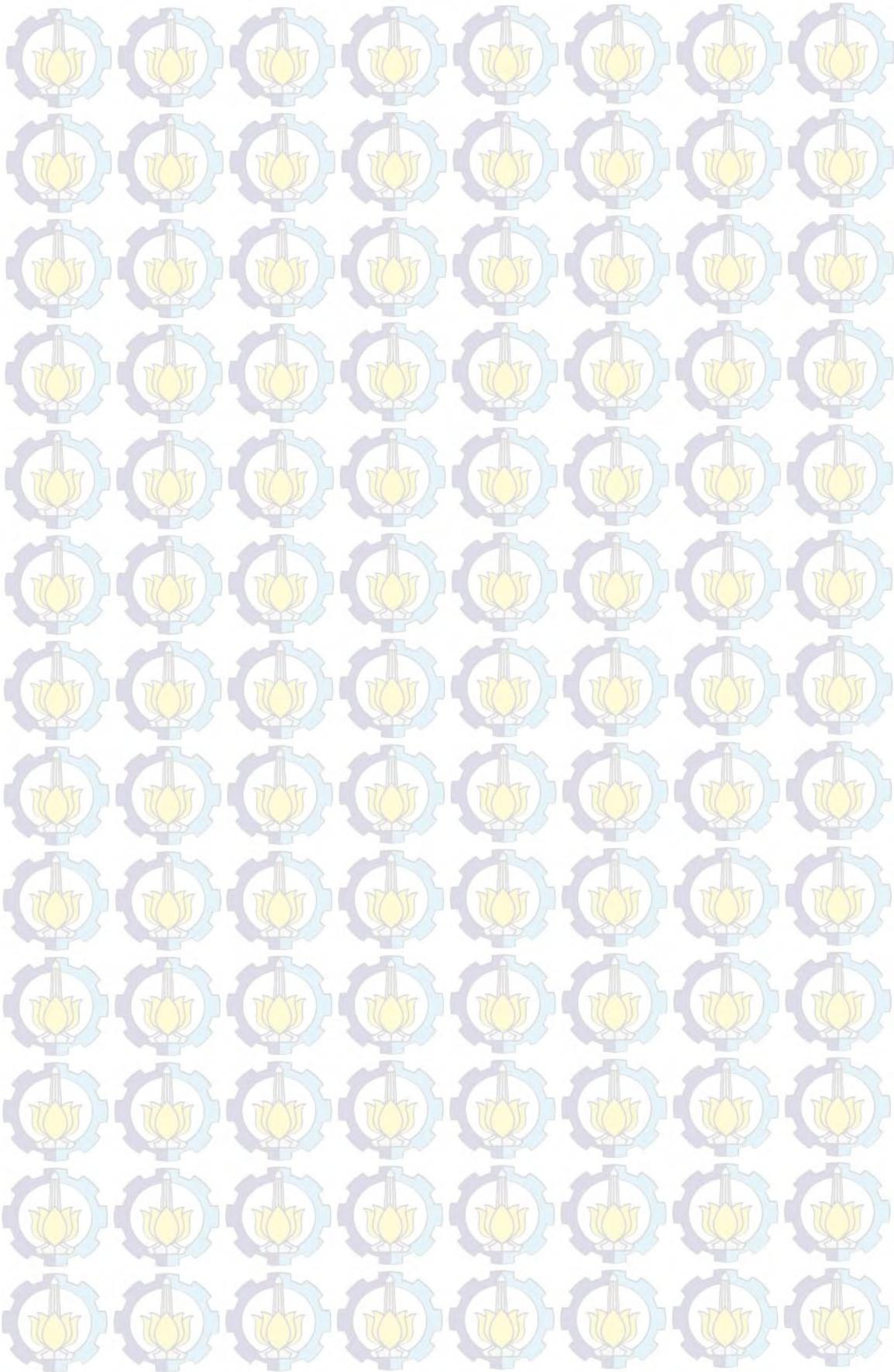
$$+ (K_{T2} \cdot N_2^2 \cdot N_3^2 + K_{Tg}) \cdot \theta_7 - K_{Tg} \theta_g - K_{T2} \cdot N_2 \cdot N_3 \cdot \theta_3 = 0$$

State variabel $\dot{\theta}_7$ adalah sebagai berikut:

$$\dot{\theta}_7 = \omega_7$$

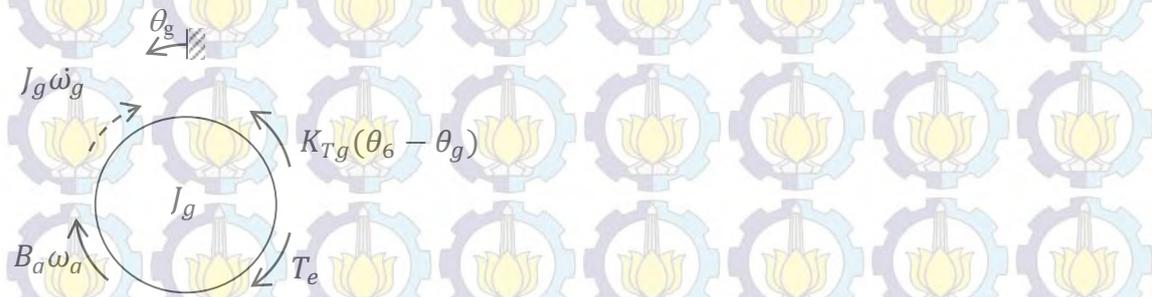
$$\dot{\omega}_7 =$$

$$\frac{1}{(J_7 + J_5 \cdot N_3^2 + J_4 \cdot N_2^2 \cdot N_3^2)} \left[- (B_4 \cdot N_3^2 \cdot N_2^2 + B_5 \cdot N_3^2 + B_7) \cdot \dot{\theta}_7 - (K_{T2} \cdot N_2^2 \cdot N_3^2 + K_{Tg}) \cdot \theta_7 + K_{Tg} \theta_g + K_{T2} \cdot N_2 \cdot N_3 \cdot \theta_3 \right] \quad (11.5)$$



D.O.F Generator

FBD Generator



$$\sum T = 0$$

$$-J_g \ddot{\theta}_g - B_g \dot{\theta}_g + K_{Tg}(\theta_6 - \theta_g) - T_e = 0 \text{ (gen 1)}$$

$$-J_g \ddot{\theta}_g - B_g \dot{\theta}_g + K_{Tg}\theta_6 - K_{Tg}\theta_g - T_e = 0$$

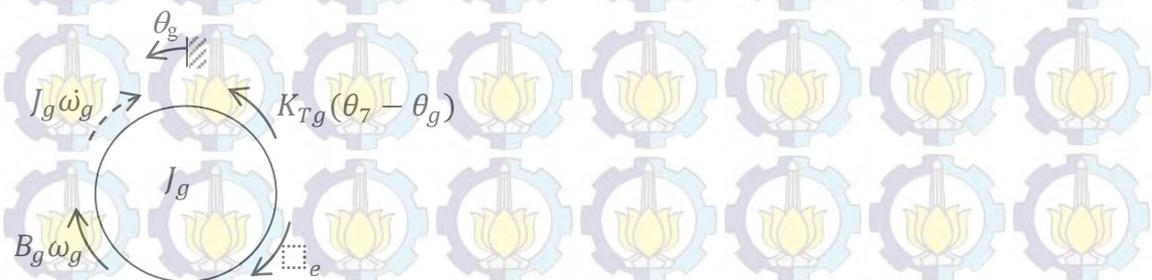
$$J_g \ddot{\theta}_g + B_g \dot{\theta}_g - K_{Tg}\theta_6 + K_{Tg}\theta_g - T_e = 0$$

State variabel $\dot{\theta}_g$ yang dipengaruhi oleh roda gigi 6 adalah sebagai berikut:

$$\dot{\theta}_g = \omega_g$$

$$\dot{\theta}_g = \frac{1}{J_g} [-B_g \dot{\theta}_g - K_{Tg}\theta_g + K_{Tg}\theta_6 - T_e] \quad (11.6)$$

FBD generator yang dipengaruhi roda gigi 7 (arah ke atas)



$$\sum T = 0$$

$$-J_g \ddot{\theta}_g - B_g \dot{\theta}_g + K_{Tg}(\theta_7 - \theta_g) - T_e = 0 \text{ (gen 2)}$$

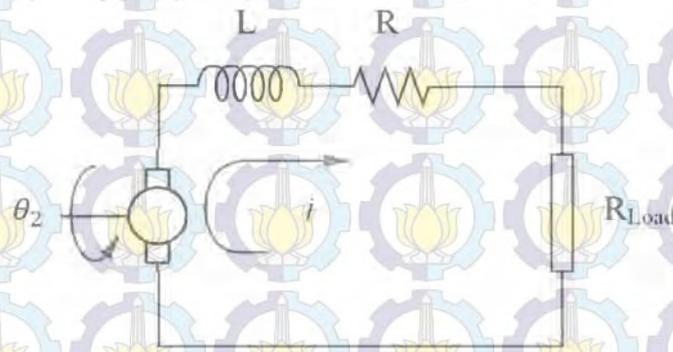
$$-J_g \ddot{\theta}_g - B_g \dot{\theta}_g + K_{Tg}\theta_7 - K_{Tg}\theta_g - T_e = 0$$

$$J_g \ddot{\theta}_g = -B_g \dot{\theta}_g - K_{Tg} \theta_g + K_{Tg} \theta_7 - T_e$$

State variabel θ_g yang dipengaruhi oleh roda gigi 7 adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_g &= \omega_g \\ \dot{\theta}_g &= \frac{1}{J_g} [-B_g \dot{\theta}_g - K_{Tg} \theta_g + K_{Tg} \theta_7 - T_e] \end{aligned} \quad (11.7)$$

Mekanik Generator



Torsi generator $T_e = (2.N.B.l.r)i$

Asumsi polaritas e_m

$$e_m = e(t) = (2.N.B.l.r)\dot{\theta}_g$$

$$L \frac{di}{dt} + R_i + R_{load} i = 2.N.B.l.r = e(t)$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L} [-R_i + (2.N.B.l.r)\dot{\theta}_g]$$

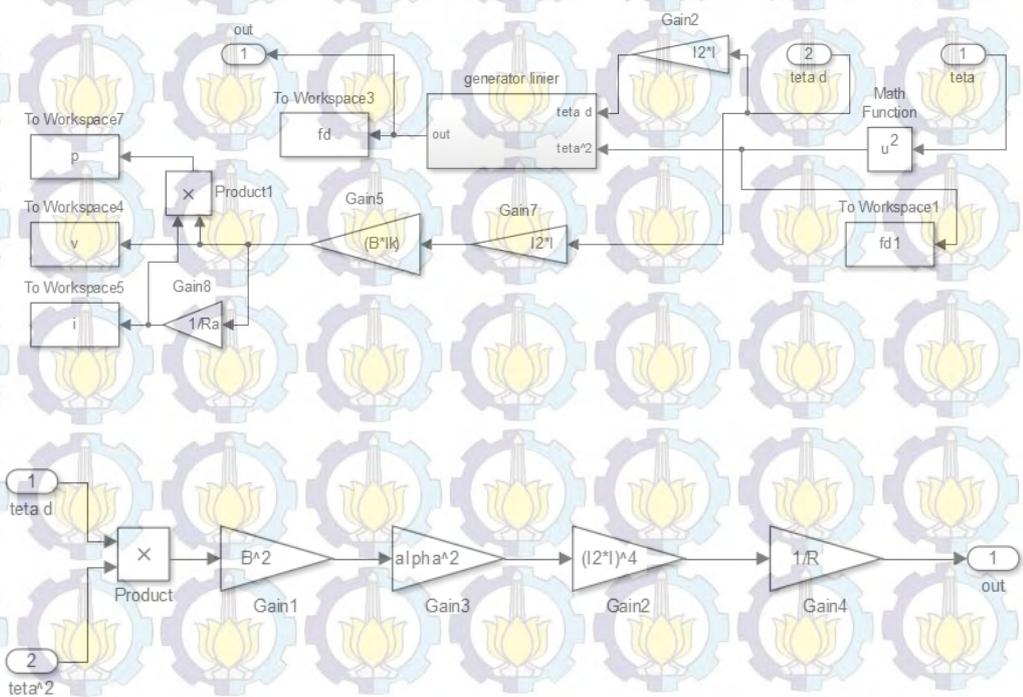
$$v = \frac{1}{L} [-R_i + (2.N.B.l.r)\dot{\theta}_g] \quad (11.8)$$

Lampiran 2

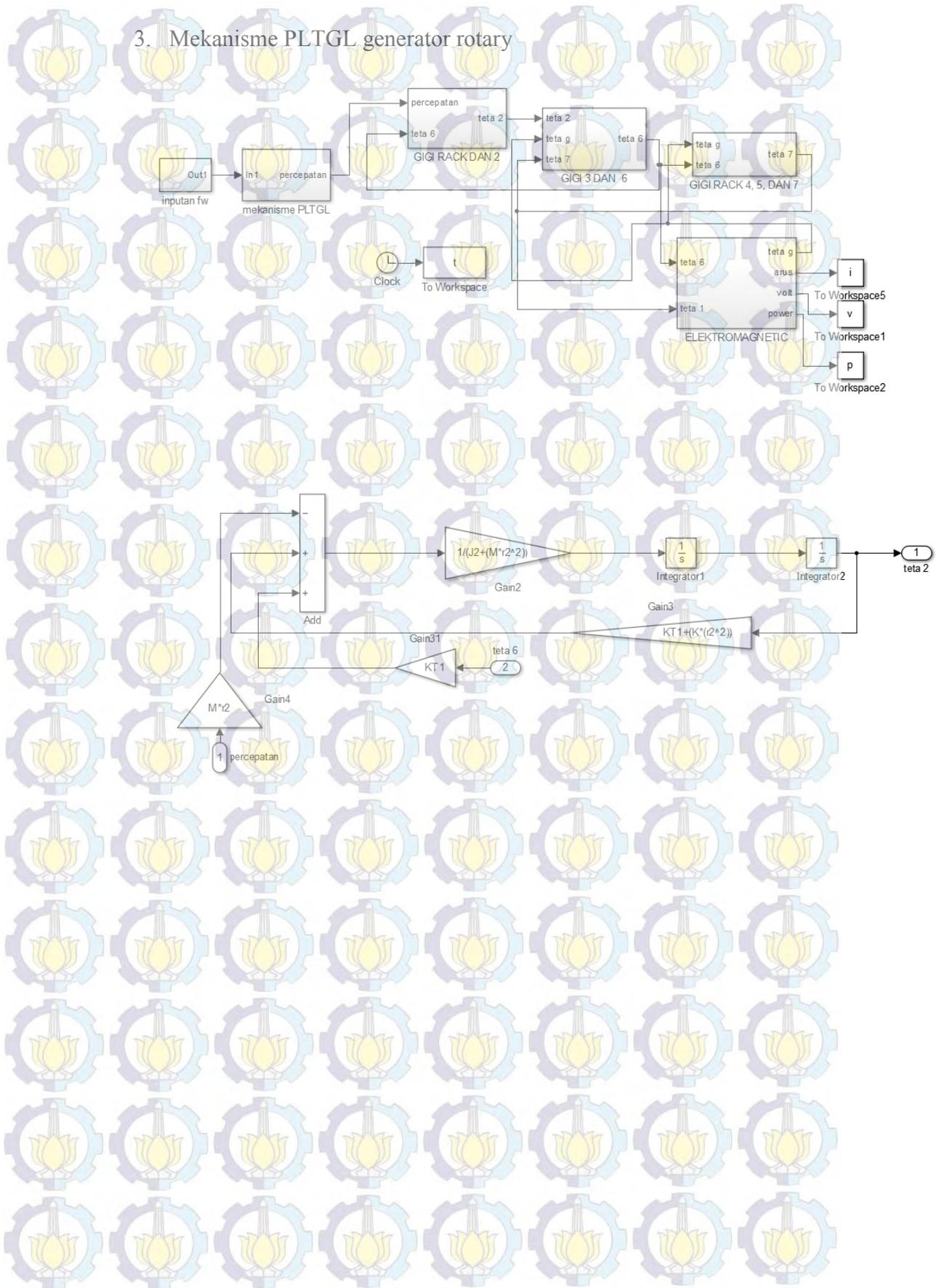
1. Input daya pada mekanisme PLTGL generator Linier dan rotary



2. Linier generator



3. Mekanisme PLTGL generator rotary



Lampiran 3

- Analisa Anova pada eksperimen PLTGL generator linier

SUMMARY						
Groups	Count	Sum	Average	Variance		
Frekuensi	27	54	2	0.692308		
Titik Tumpu	27	54	2	0.692308		
Volume Pelampung	27	54	2	0.692308		
Daya eksperimen generator linier	27	0.25261	0.009356	8.22E-06		

ANOVA						
Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	80.24394	3	26.74798	51.51443	1.73E-20	2.691979
Within Groups	54.00021	104	0.519233			
Total	134.2442	107				

	Frekuensi	titik tumpu	volume pelampung	daya eksperimen generator linier	
Frekuensi	1				
titik tumpu	0	1			
volume pelampung	0	0	1		
daya eksperimen generator linier	0.370863303	0.330713319	0.364091016		1

• **Analisa Anova pada pemodelan PLTGL generator linier**

SUMMARY

Groups	Count	Sum	Average	Variance
Frekuensi	27	54	2	0.692308
Titik Tumpu	27	54	2	0.692308
Volume Pelampung	27	54	2	0.692308
Daya pemodelan generator linier	27	95.23063	3.52706	1.312562

ANOVA

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	47.22125	3	15.74042	18.57558	1.01E-09	2.691979
Within Groups	88.12662	104	0.847371			
Total	135.3479	107				

	Frekuensi	titik tumpu	volume pelampung	daya pemodelan generator linier
Frekuensi	1			
titik tumpu	0	1		
volume pelampung	0	0	1	
daya pemodelan generator linier	0.960580183	0.01237298	0.025206321	1

• **Analisa Anova pada pemodelan PLTGL generator rotary**

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
Frekuensi	27	54	2	0.692308
Titik tumpu	27	54	2	0.692308
Volume pelampung	27	54	2	0.692308
Daya generator rotary	27	0.33057	0.012243	2.39E-05

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	80.01133	3	26.67044	51.3647	1.8949E-	20
Within Groups	54.00062	104	0.519237			2.691979
Total	134.0119	107				

	<i>Frekuensi</i>	<i>titik tumpu</i>	<i>volume pelampung</i>	<i>daya pemodelan generator rotary</i>
<i>Frekuensi</i>	1			
<i>titik tumpu</i>	0	1		
<i>volume pelampung</i>	0	0	1	
<i>daya pemodelan generator rotary</i>	0.937790872	0.112425221	0.13095789	1



Yoga Ahdiat Fakhruddin, Lahir pada tanggal 18 Mei 1988 di Madiun Jawa Timur. Dibesarkan di Desa Panggung, Kecamatan Barat, Kabupaten Magetan.

Memulai pendidikan di MI Mamba'ul Huda Panggung, SMP Negeri 1 Barat, dan menamatkan sekolah SMA Negeri 1 Maospati pada tahun 2006. Pada tahun 2008 melanjutkan pendidikan pada program studi Pendidikan Teknik Otomotif Universitas Negeri Malang (UM).

Setelah tamat dari S1 UM tahun 2012, melanjutkan pendidikan S2 pada tahun 2013 di Teknik Mesin FTI-ITS bidang keahlian Desain Sistem Mekanikal.

Alamat tetap penulis berada di Desa Panggung RT 19/RW 05, Kecamatan Barat, Kabupaten Magetan, Jawa Timur. Guna memudahkan dalam berkomunikasi baik berupa kritik dan saran dapat melalui alamat e-mail di yoga_sumonggo@yahoo.com.