



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TM 141585

**STUDI EKSPERIMENTAL REDUKSI RESPON  
GETARAN TRANSLASI DAN ENERGI LISTRIK  
BANGKITAN SISTEM UTAMA OLEH MEKANISME  
CANTILEVER *PIEZOELECTRIC* *DOUBLE*  
VIBRATION ABSORBER**

ARIF RACHMAN A  
NRP 2113 100 095

Dosen Pembimbing  
Dr. Wiwiek Hendrowati, ST., MT

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA 2017



TUGAS AKHIR – TM141585

**STUDI EKSPERIMENTAL REDUKSI RESPON  
GETARAN TRANSLASI DAN ENERGI LISTRIK  
BANGKITAN SISTEM UTAMA OLEH MEKANISME  
*CANTILEVER PIEZOELECTRIC DOUBLE VIBRATION  
ABSORBER***

ARIF RACHMAN A  
NRP. 2113100095

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

PROGRAM SARJANA  
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA 2017



---

FINAL PROJECT – TM141585

**EXPERIMENTAL STUDY REDUCTION RESPONSE  
VIBRATION OF TRANSLATION AND ELECTRICAL  
ENERGY RISE MAIN SYSTEM BY CANTILEVER  
POLYMER PIEZOELECTRIC DOUBLE VIBRATION  
ABSORBER**

ARIF RACHMAN A  
NRP. 2113100095

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

BACHELOR PROGRAM  
MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT  
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA 2017

**STUDI EKSPERIMENTAL REDUKSI  
RESPON GETARAN TRANSLASI DAN  
ENERGI LISTRIK BANGKITAN SISTEM  
UTAMA OLEH MEKANISME CANTILEVER  
PIEZOELECTRIC DOUBLE VIBRATION  
ABSORBER**

**TUGAS AKHIR**

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

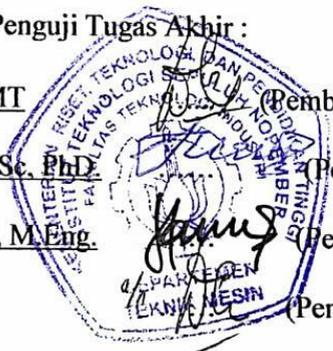
Oleh :

**Arif Rachman Abdulloh**

NRP. 2113 100 095

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Wiwiek Hendrowati, ST, MT (Pembimbing)  
NIP. 197004121997032003
2. Prof. Ir. I Nyoman Sutantra, MSc. PhD (Penguji I)  
NIP. 196010041986011001
3. Dr. Harus Laksana Guntur, ST, M. Eng. (Penguji II)  
NIP. 197505111999031001
4. Moch Solichin, ST, MT (Penguji III)  
NIP. 198908172015041003



**SURABAYA**

**JULI, 2017**

**STUDI EKSPERIMENTAL REDUKSI RESPON  
GETARAN TRANSLASI DAN ENERGI LISTRIK  
BANGKITAN SISTEM UTAMA OLEH  
MEKANISME *CANTILEVER PIEZOELECTRIC*  
*DOUBLE VIBRATION ABSORBER***

Nama : Arif Rachman A  
NRP : 2113100095  
Dosen Pembimbing : Dr. Wiwiek Hendrowati, ST., MT.

**ABSTRAK**

*Fenomena getaran pada mesin-mesin di industri dapat mengakibatkan gangguan pada komponen mesin serta membuat umur pakai mesin lebih pendek. Salah satu cara untuk mengurangi getaran berlebih tersebut adalah dengan Dynamic Vibration Absorber (DVA). Energi getaran yang diserap pada proses reduksi getaran dengan DVA dapat dimanfaatkan lagi menjadi energi listrik. Pemanfaatan energi tersebut dapat dilakukan oleh komponen elektrik yaitu piezoelectric. Dengan menggunakan komponen piezoelectric pada sistem DVA, maka energi getaran akan direduksi sekaligus dapat dimanfaatkan menjadi energi listrik.*

*Pembuatan tugas akhir kali ini dilakukan pada skala laboratorium mengenai studi eksperimental “CPDVA” cantilever piezoelectric double vibration absorber yaitu mekanisme dynamic vibration absorber sekaligus juga sebagai energy harvester dengan material piezoelectric yang ditempatkan pada sistem utama. Sistem utama merupakan sistem yang terdiri dari massa yang ditopang empat buah pegas dengan nilai konstanta pegas yang sama dan*

*dikenai gaya eksitasi yang bersumber dari massa eksentris motor DC sehingga sistem dapat bergetar secara translasi. CPDVA yang dirancang nantinya dapat mereduksi getaran translasi sistem utama sekaligus menghasilkan listrik. Variasi yang digunakan pada penelitian ini adalah variasi jumlah piezoelectric pada CPDVA yaitu 4, 6, dan 8 buah, frekuensi putaran motor DC pada 32 rad/s, 36,5 rad/s, dan 39 rad/s, dan amplitudo disk sumber getar pada 2 cm, 3 cm, dan 4 cm.*

*Hasil dari penelitian ini adalah terciptanya mekanisme sistem utama yang dapat bergetar dalam arah translasi, serta CPDVA yang dapat mereduksi respon getaran sistem utama sekaligus menghasilkan energi listrik. Dari analisa dan pembahasan yang dilakukan, didapatkan bahwa semakin besar amplitudo dan jumlah piezoelectric maka reduksi respon getaran dan voltase bangkitan semakin tinggi. Sedangkan semakin tinggi frekuensi, reduksi respon getaran maupun voltase bangkitan semakin rendah. Mekanisme CPDVA dengan jumlah piezoelectric 8 buah menghasilkan nilai reduksi optimum sebesar 96,89% dan voltase bangkitan sebesar 0,554 volt apabila digunakan pada sistem utama yang beroperasi di frekuensi natural 36,5 rad/s dengan amplitudo 4 cm.*

***Kata kunci: amplitudo, cantilever piezoelectric double mass vibration absorber, energi listrik, frekuensi, jumlah piezoelectric.***

**EXPERIMENTAL STUDY REDUCTION RESPONSE  
VIBRATION OF TRANSLATION AND ELECTRICAL  
ENERGY RISE MAIN SYSTEM BY CANTILEVER  
POLICYVER PIEZOELECTRIC DOUBLE  
VIBRATION ABSORBER**

Name : Arif Rachman A  
NRP : 2113100095  
Advisory Lecturer : Dr. Wiwiek Hendrowati, ST., MT.

***ABSTRACT***

*The phenomena of vibration in the industrial machines can lead to interference in the components and shortern the life time. One way to reduce the excessive vibration is with Dynamic Vibration Absorber (DVA). The vibration energy that is absorbed in the vibration reduction process on DVA can be utilized more into electrical energy. Utilization of that energy can be done by piezoelectric components. By using piezoelectric components in the DVA system, the vibration energy will be reduced and also can be utilized into electrical energy.*

*This final assignment was performed on a laboratory scale on the experimental study of "CPDVA" cantilever piezoelectric double vibration absorber, which is a dynamic vibration absorber mechanism as well as an energy harvester with piezoelectric material placed on the main system. The main system is a system consisting of a mass supported by four springs with the same spring constant value and is subjected to an excitation force sourced from*

*the eccentric masses of the DC motor so that the system can vibrate in a translation. CPDVA designed later can reduce the vibration of the translation of the main system while generating electricity. The variations are piezoelectric on CPDVA of 4, 6, and 8 pieces, frequency of 32 rad / s, 36.5 rad / s, and 39 rad / s, and amplitude of 2 cm, 3 cm, and 4 cm.*

*The result of this research is the creation of the main system mechanism that can vibrate in the translation direction only, and CPDVA that can reduce the response of the main system vibration as well as generate electrical energy. From the analysis that has been conducted, it is found that the greater the amplitude and the number of piezoelectric then the reduction of vibration response and rising voltage higher. While the higher the frequency, the reduction of the vibration response and the voltage rise the lower. CPDVA mechanism with 8 piezoelectric quantities resulted in an optimum reduction value of 96.89% and a voltage rise of 0.554 volts when used on main systems operating at 36.5 rad / s natural frequency with 4 cm amplitude.*

***Keywords: amplitude, cantilever piezoelectric double mass vibration absorber, electrical energy, frequency, piezoelectric number.***

## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur selalu terpanjatkan kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat, taufik, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini. Salawat serta salam juga senantiasa disampaikan kepada Nabi Muhammad SAW beserta keluarga dan sahabatnya.

Penyusunan tugas akhir ini tidak terlepas dari bantuan, bimbingan, dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Bambang Pramujati, selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin FTI ITS.
2. Ibu Wiwiek Hendrowati selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan, saran, dan waktu sehingga tugas akhir ini dapat terselesaikan.
3. Bapak Harus L.G, Moch Solichin, I Nyoman Sutantra, Ibu Aida A.A.D. selaku dosen penguji yang telah memberi evaluasi dan saran.
4. Seluruh dosen dan karyawan departemen Teknik mesin ITS yang turut mendukung tugas akhir ini.
5. Teman, kerabat, dan saudara yang telah banyak membantu dalam proses tugas akhir ini.
6. Orang tua kami yang terus memberikan semangat dan dukungan baik secara moril maupun materiil.

Penulis hanya dapat mendoakan agar pahala dan balasan Allah SWT untuk seluruh kebaikan yang telah dilakukan. Penulis berharap laporan ini dapat bermanfaat bagi penulis khususnya dan pembaca umumnya.

Surabaya, Juli 2017

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK .....	i
ABSTRACT .....	iii
KATA PENGANTAR .....	v
DAFTAR ISI .....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR TABEL .....	xv
<b>BAB 1 PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
<b>BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>5</b>
2.1.1 <i>Forced Multi DoF Vibration</i> .....	5
2.1.2 <i>Base Motion Vibration</i> .....	6
2.1.3 <i>Dynamic Vibration Absorber</i> .....	8
2.1.4 <i>Damped Dynamic Vibration Absorber</i> .....	10
2.2 Dasar Teori <i>Piezoelectric</i> .....	12
2.2.1 <i>Material Piezoelectric</i> .....	12
2.2.2 <i>Cantilever Piezoelectric</i> .....	15
2.2.3 Susunan <i>Cantilever Piezoelectric</i> .....	16
2.3 Penelitian Terdahulu .....	13
<b>BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN .....</b>	<b>23</b>
3.1 <i>Flowchart Penelitian</i> .....	23
3.2 Penjelasan Flowchart Penelitian.....	24
3.2.1 Studi Literatur .....	24
3.2.2 Identifikasi Permasalahan .....	24
3.2.3 Perencanaan dan Pemodelan Sistem .....	24
3.2.3.1 Rancangan Penelitian .....	25
3.2.3.2 Penurunan Persamaan Gerak.....	26
3.2.3.3 Perencanaan Parameter .....	33
3.2.4 Rancang Bangun .....	34
3.2.5 Eksperimen .....	38

3.2.6 Analisa Data dan Pembahasan .....	41
3.2.7 Kesimpulan .....	41
<b>BAB 4 ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>43</b>
4.1 Perencanaan Sistem .....	43
4.1.1 Pemodelan Sistem .....	43
4.1.1.1 Sistem Utama tanpa CPDVA .....	43
4.1.1.2 Sistem Utama dengan CPDVA .....	44
4.1.2 Parameter Penelitian .....	46
4.2 Perancangan Sistem .....	51
4.2.1 Sistem Utama .....	52
4.2.2 <i>Cantilever Piezoelectric Double Vibration Absorber</i> ( <i>CPDVA</i> ) .....	53
4.3 Analisa dan Pembahasan .....	53
4.3.1 Analisa Pemodelan .....	53
4.3.1.1 Pemodelan Sistem Utama tanpa CPDVA .....	54
4.3.1.2 Pemodelan Sistem Utama dengan CPDVA .....	56
4.3.1.2.1 Respon Percepatan .....	56
4.3.1.2.2 Respon Voltase .....	60
4.3.2 Analisa Eksperimen .....	63
4.3.2.1 Eksperimen Sistem Utama tanpa CPDVA .....	63
4.3.2.2 Eksperimen Sistem Utama dengan CPDVA.....	67
4.3.2.2.1 Respon Percepatan .....	68
4.3.2.2.2 Respon Voltase .....	76
4.3.2.3 Eksperimen Gerakan Translasi Sistem Utama tanpa CPDVA .....	81
4.4 Perbandingan Grafik .....	83
4.4.1 Grafik Respon Percepatan .....	83
4.4.2 Grafik Respon Voltase .....	86
<b>BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....</b>	<b>89</b>
5.1 Kesimpulan .....	89
5.2 Saran .....	90
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>91</b>
<b>BIODATA PENULIS.....</b>	<b>93</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Skema forced multi dof vibration [1] .....	5
Gambar 2. 2 Skema base motion vibration [1] .....	6
Gambar 2. 3 Grafik hubungan (a) amplitudo ratio dengan frequency ratio, (b) phase angle dengan frequency ratio [1] .....	8
Gambar 2. 4 Skema peredaman dynamic vibration absorber [1] ..	9
Gambar 2. 5 Efek penggunaan DVA terhadap rasio frekuensi natural sistem [1] .....	9
Gambar 2. 6 Permodelan dinamis sistem utama dengan damped DVA [1] .....	10
Gambar 2. 7 Pengaruh dari damped DVA terhadap rasio respon dari sistem utama [1] .....	12
Gambar 2. 8 Macam bentuk piezoelectric [3] .....	13
Gambar 2. 9 Cantilever piezoelectric [3] .....	15
Gambar 2. 10 Model pemanen energi kinetik [3] .....	15
Gambar 2. 11 Rangkaian listrik ekuivalen pemanen energi [3] ..	16
Gambar 2. 12 Rangkaian piezoelectric disusun secara seri [3] ...	13
Gambar 2. 13 Permodelan sistem utama (a) tanpa DVA dan (b) sistem dengan DDVA [4] .....	14
Gambar 2. 14 Grafik respon getaran sistem tanpa DVA, dengan SDVA dan dengan DDVA[4] .....	15
Gambar 2. 15 Grafik respon sistem dengan SDVA [4] .....	15
Gambar 2. 16 Skema penelitian ditinjau dari gerakan magnet terhadap coil [5] .....	17
Gambar 2. 17 Proses eksperimen penelitian [5] .....	17
Gambar 2. 18 Grafik hasil eksperimen voltase output terhadap frekuensi getaran mekanisme tipe I oleh (a) PZT cantilever (b) elektromagnetik [5] .....	18
Gambar 2. 19 Grafik hasil eksperimen voltase output terhadap jumlah magnet dengan variasi akselerasi mekanisme	

type I oleh (a) PZT cantilever (b) elektromagnetik [5]	19
Gambar 2. 20 Skema sistem dinamis penelitian .....	20
Gambar 2. 21 Grafik respon perpindahan .....	20
Gambar 2. 22 Grafik daya bangkitan listrik dengan variasi amplitudo [6].....	21
Gambar 3. 1 Flowchart penelitian .....	23
Gambar 3. 2 Rancangan sistem utama (a) tampak isometri dan (b) tampak depan .....	25
Gambar 3. 3 Rancangan CPDVA (a) tampak isometri dan (b) tampak depan .....	26
Gambar 3. 4 Rancangan sistem gabungan.....	27
Gambar 3. 5 Skema sistem utama (a) tanpa CPDVA dan (b) dengan ditambahkan CPDVA.....	27
Gambar 3. 6 Free body diagram sistem utama tanpa CPDVA ....	28
Gambar 3. 7 Free body diagram sistem dengan CPDVA (a) massa absorber 2, (b) massa ekivalen, dan (c) massa utama .....	30
Gambar 3. 8 Case CPDVA.....	35
Gambar 3. 9 Coil pegas absorber CPDVA.....	35
Gambar 3. 10 Massa absorber 1 (a) dan (b) absorber 2.....	36
Gambar 3. 11 Poros pengarah CPDVA.....	36
Gambar 3. 12 Cantilever piezoelectrtic MEAS .....	36
Gambar 3. 13 Komponen elektrik (a) Photoboard dan (b) kabel	37
Gambar 3. 14 Flowchart eksperimen.....	38
Gambar 3. 15 Posisi pengujian dengan probe accelerometer (a) sistem utama tanpa CPDVA dan (b) sistem utama dengan CPDVA .....	40
Gambar 4.1 Blok diagram sistem utama .....	44
Gambar 4.2 Blok diagram sistem utama dengan CPDVA .....	44
Gambar 4.3 Bode diagram sistem utama tanpa CPDVA dan dengan CPDVA hasil simulasi.....	46
Gambar 4.4 Grafik Hubungan Gaya dan Regangan Pegas $K_0$ .....	48

Gambar 4.5 Hasil Pengujian damper $C_1$ yang telah di filtering dan smoothing MATLAB.....	49
Gambar 4.6 Bode diagram sistem utama tanpa CPDVA dan dengan CPDVA parameter riil.....	51
Gambar 4.7 Sistem utama.....	52
Gambar 4.9 Respon percepatan sistem utama tanpa CPDVA pada frekuensi 36,5 rad/s dan amplitudo 3 cm hasil simulasi .....	54
Gambar 4.10 Grafik RMS respon percepatan sistem utama tanpa CPDVA terhadap frekuensi variasi amplitudo hasil simulasi .....	55
Gambar 4.11 Respon percepatan sistem utama dengan CPDVA pada frekuensi 36,5 rad/s, amplitudo 3 cm, dan piezoelectric 8 buah hasil simulasi.....	56
Gambar 4.12 Grafik RMS respon percepatan sistem utama dengan CPDVA pada piezoelectric berjumlah 8 buah terhadap frekuensi variasi amplitudo hasil simulasi.....	57
Gambar 4.13 Perbandingan grafik RMS respon percepatan sistem tanpa dan dengan CPDVA hasil simulasi .....	59
Gambar 4.14 Respon percepatan sistem utama dengan CPDVA hasil simulasi pada frekuensi 36,5 rad/s, amplitudo 3 cm, dan piezoelectric 8 buah.....	60
Gambar 4.15 Grafik RMS voltase sistem utama dengan CPDVA jumlah piezoelectric 8 buah terhadap frekuensi variasi amplitude.....	62
Gambar 4.16 Bode diagram perpindahan relatif dan respon voltase bangkitan .....	63
Gambar 4.17 Oscilloscope sistem utama tanpa CPDVA frekuensi 36,5 rad/s amplitudo 3 cm.....	64
Gambar 4.18 Grafik respon sistem tanpa CPDVA frekuensi 36,5 rad/s amplitudo 3 cm hasil eksperimen yang di filtering dan smoothing.....	64

Gambar 4.19 Grafik sistem tanpa CPDVA amplitudo 3 cm variasi frekuensi hasil eksperimen.....	65
Gambar 4.20 Grafik sistem tanpa CPDVA frekuensi 36,5 rad/s hasil eksperimen variasi amplitudo.....	66
Gambar 4.21 Grafik RMS respon sistem utama tanpa CPDVA terhadap frekuensi variasi amplitudo hasil eksperimen .....	67
Gambar 4.22 Hasil rekam osciloscope sistem utama tanpa CPDVA frekuensi 36,5 rad/s, amplitudo 3 cm, dan jumlah piezoelectric 8 buah .....	68
Gambar 4.23 Grafik sistem dengan CPDVA frekuensi 36,5 rad/s, amplitudo 3 cm, dan 8 buah piezoelectric hasil eksperimen yang telah di filtering dan smoothing ..	68
Gambar 4.24 Grafik respon percepatan sistem utama dengan CPDVA amplitudo 3 cm dan jumlah piezoelectric 8 buah variasi frekuensi hasil eksperimen .....	69
Gambar 4.25 Grafik respon percepatan sistem utama dengan CPDVA frekuensi 36,5 rad/s dan jumlah piezoelectric 8 buah variasi amplitudo hasil eksperimen .....	70
Gambar 4.26 Grafik respon percepatan sistem utama dengan CPDVA amplitudo 3 cm dan frekuensi 36,5 rad/s variasi jumlah piezoelectric hasil eksperimen .....	70
Gambar 4.27 Grafik RMS respon percepatan sistem utama dengan CPDVA pada piezoelectric berjumlah 8 buah terhadap frekuensi variasi amplitude hasil eksperimen .....	71
Gambar 4.28 Grafik RMS respon percepatan sistem utama dengan CPDVA pada amplitudo 3 cm terhadap frekuensi variasi jumlah piezoelectric hasil eksperimen .....	72
Gambar 4.29 Grafik perbandingan RMS respon percepatan sistem tanpa dan dengan CPDVA hasil eksperimen .....	73

- Gambar 4.30 Grafik voltase bangkitan sistem utama dengan CDPVA pada frekuensi 36,5 rad/s, amplitudo 3 cm, dan jumlah piezoelectric 8 buah hasil eksperimen..76
- Gambar 4.31 Grafik respon voltase sistem utama dengan CDPVA jumlah piezoelectric 8 buah variasi frekuensi hasil eksperimen .....76
- Gambar 4.32 Grafik respon voltase sistem utama dengan CPDVA jumlah piezoelectric 8 buah dan frekuensi 36,5 rad/s variasi amplitudo hasil eksperimen .....77
- Gambar 4.33 Grafik respon voltase sistem utama dengan CPDVA amplitudo 3 cm dan frekuensi 36,5 rad/s variasi jumlah piezoelectric hasil eksperimen .....78
- Gambar 4.34 Grafik RMS voltase sistem utama dengan CPDVA jumlah piezoelectric 8 buah terhadap frekuensi variasi amplitudo hasil eksperimen.....79
- Gambar 4.35 Grafik RMS voltase sistem utama dengan CPDVA amplitudo 3 cm terhadap frekuensi variasi jumlah piezoelectric hasil eksperimen .....80
- Gambar 4.36 Hasil eksperimen translasi sistem utama tanpa CPDVA pada frekuensi 36,5 rad/s dan amplitudo 3 cm (a) rekam oscilloscope (b) Matlab.....82
- Gambar 4.37 Grafik RMS translasi sistem utama tanpa CPDVA frekuensi 36,5 rad/s variasi amplitudo hasil eksperimen .....82
- Gambar 4.38 Grafik perbandingan RMS respon percepatan sistem tanpa dan dengan CPDVA (a) hasil simulasi (b) hasil eksperimen .....84
- Gambar 4.39 Grafik perbandingan RMS reduksi percepatan sistem CPDVA pada frekuensi 36,5 rad/s dan 8 piezoelectric hasil simulasi dan eksperimen .....85
- Gambar 4.40 Grafik RMS voltase sistem utama dengan CPDVA pada jumlah piezoelectric 8 buah terhadap frekuensi

variasi amplitudo (a) hasil simulasi (b) hasil eksperimen .....	86
Gambar 4.41 Grafik perbandingan RMS voltase bangkitan sistem dengan CPDVA pada amplitudo 4 cm dan 8 piezoelectric hasil simulasi dan eksperimen .....	87

## DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Voltase bangkitan, displacement dan kapasitansi.....	14
Tabel 2. 2 Data teknis beberapa jenis material piezoelectric [3].	14
Tabel 3. 1 Spesifikasi Material Piezoelectric .....	37
Tabel 3. 2 Data eksperimen respon sistem .....	41
Tabel 4.1 Parameter Penelitian optimum hasil simulasi.....	45
Tabel 4.2 Data hasil pengujian konstanta pegas $K_0$ .....	48
Tabel 4.3 Data hasil pengujian konstanta pegas $C_1$ .....	50
Tabel 4. 4 Parameter penelitian riil hasil pengujian .....	50
Tabel 4.5 RMS respon percepatan sistem utama tanpa CPDVA hasil simulasi.....	55
Tabel 4.6 RMS respon dan reduksi sistem dengan CPDVA semua variasi hasil simulasi .....	58
Tabel 4.7 RMS Voltase bangkitan sistem dengan CPDVA semua variasi hasil simulasi .....	61
Tabel 4.8 RMS Respon Sistem Utama tanpa CPDVA Hasil Eksperimen .....	66
Tabel 4.9 RMS Respon Sistem Utama dengan CPDVA 8 buah piezoelectric hasil eksperimen .....	71
Tabel 4.10 RMS respon dan reduksi sistem dengan CPDVA 8 piezoelectric hasil eksperimen .....	74
Tabel 4.11 RMS Respon dan reduksi sistem dengan CPDVA semua variasi hasil eksperimen .....	75
Tabel 4.12 RMS voltase sistem utama dengan CPDVA 8 buah piezoelectric hasil eksperimen .....	78
Tabel 4.13 RMS Voltase bangkitan sistem dengan CPDVA semua variasi hasil eksperimen .....	80
Tabel 4.14 RMS reduksi respon percepatan sistem pada frekuensi 36,5 rad/s dan 8 piezoelectric hasil simulasi dan eksperimen .....	86
Tabel 4.15 RMS voltase bangkitan sistem CPDVA frekuensi 36,5 rad/s 8 piezoelectric hasil simulasi dan eksperimen.....	88



# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Fenomena getaran merupakan fenomena yang umum terjadi pada peralatan yang beroperasi terutama pada mesin-mesin di industri, baik getaran translasi maupun rotasi. Getaran translasi dapat terjadi pada mesin bor, pipa, *power house*, dan sebagainya. Getaran tersebut ada yang masuk kategori berlebihan yang mana dapat terjadi pada daerah frekuensi natural sistem [1] dan dapat mengakibatkan gangguan pada komponen mesin serta membuat umur pakai mesin lebih pendek. Terdapat beberapa cara untuk mengurangi getaran berlebih tersebut, salah satunya adalah dengan menggunakan komponen pereduksi getaran yaitu *Dynamic Vibration Absorber* (DVA). Prinsip kerja dari DVA adalah penambahan massa dan pegas pada sistem utama yang akan mereduksi respon getaran sistem utama yang ada [1]. Pada proses reduksi getaran dengan DVA tersebut, terjadi proses penyerapan energi getaran menjadi gerakan massa *absorber* dan pegas *absorber*. Energi getaran tersebut merupakan energi buangan yang seharusnya dapat dimanfaatkan lagi dan diubah menjadi energi listrik.

Dengan pesatnya perkembangan teknologi saat ini, telah banyak ditemukan cara untuk menghasilkan energi listrik, termasuk diantaranya adalah memanfaatkan energi kinetik dari getaran. Energi yang dihasilkan oleh getaran tersebut dapat ditangkap dan diolah oleh suatu komponen elektrik yaitu *piezoelectric*. Komponen tersebut dapat mengolah energi getaran mekanik untuk diubah menjadi energi listrik. Kemampuan *piezoelectric* menghasilkan suatu energi listrik karena terjadi suatu perubahan mekanis pada material *piezoelectric* yang dinamakan efek *piezoelectric* [2]. Efek *piezoelectric* sendiri merupakan fenomena yang sudah lama dikenal di dunia *engineer* dan banyak dimanfaatkan pada komponen - komponen elektrik, serta digunakan untuk proses pemanen energi dari getaran atau *vibration energy harvesting*.

Dari latar belakang di atas, maka dilakukan penelitian skala laboratorium mengenai studi eksperimental mekanisme *energy harvesting* alat “CPDVA” *cantilever piezoelectric double vibration absorber* yang ditempatkan pada sistem utama dengan sumber getar. Sistem utama merupakan sistem yang terdiri dari massa utama yang ditopang empat buah pegas dengan nilai konstanta pegas sama. Massa utama tersebut dikenai gaya eksitasi yang bersumber dari massa eksentris motor DC sehingga sistem dapat bergetar dalam arah translasi secara vertikal. Hal tersebut dilakukan untuk dapat menimbulkan getaran arah translasi pada sistem utama yang nantinya akan direduksi CPDVA. CPDVA dirancang terdiri dari dua massa *absorber*, dua pasang pegas *absorber*, dan beberapa pasang *cantilever piezoelectric* untuk dapat mereduksi getaran translasi sistem utama sekaligus menghasilkan listrik. Penggunaan dua massa *absorber* dikarenakan sesuai desain dan perencanaan alat yang memungkinkan untuk dibuat sistem DVA dua massa *absorber* disertai dengan komponen *piezoelectric* pada salah satu massa *absorber*.

Analisa yang dilakukan dalam penelitian ini yaitu mengenai pengaruh variasi jumlah *piezoelectric* CPDVA, variasi besar kecepatan putar, dan amplitudo disk motor DC sebagai sumber getar terhadap reduksi getaran sistem utama dan tegangan listrik yang dihasilkan. Hasil yang didapat adalah hubungan antara jumlah *piezoelectric* CPDVA, kecepatan putar motor, dan amplitudo sumber getar terhadap reduksi getaran sistem utama dan voltase yang dihasilkan CPDVA. CPDVA ini akan dapat diaplikasikan pada skala industri setelah proses validasi dan normalisasi dari masing-masing dimensi dan parameter yang telah dianalisa pada penelitian ini sehingga dapat bermanfaat.

## **1.2 Perumusan Masalah**

Dari uraian pada latar belakang diatas, diperlukan suatu rancangan mekanisme CPDVA yang cara kerjanya adalah dapat mereduksi getaran arah translasi sekaligus dapat menghasilkan energi listrik dengan komponen pegas, massa *absorber*, dan

*cantilever piezoelectric*. Dengan demikian, rumusan masalah yang ada dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana merancang rekayasa sistem utama yang merupakan sistem massa yang ditopang empat pegas dan dapat bergetar arah translasi?
2. Bagaimana merancang suatu mekanisme “CPDVA” *cantilever piezoelectric double vibration absorber* yang dapat mereduksi getaran translasi sekaligus menghasilkan energi listrik?
3. Bagaimana pengaruh variasi jumlah *piezoelectric* terhadap karakteristik tegangan bangkitan dan reduksi getaran yang dihasilkan “CPDVA”?
4. Bagaimana pengaruh variasi kecepatan motor terhadap karakteristik tegangan bangkitan dan reduksi getaran “CPDVA”?
5. Bagaimana pengaruh variasi ampiltudo sumber getar terhadap karakteristik tegangan bangkitan dan reduksi getaran “CPDVA”?

### **1.3 Tujuan Penelitian**

Dari latar belakang dan rumusan masalah yang ada diatas, maka ditentukan tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Merancang rekayasa sistem utama yang merupakan sistem massa yang ditopang empat pegas dan dapat bergetar arah translasi.
2. Merancang suatu mekanisme “CPDVA” *cantilever piezoelectric double vibration absorber* yang dapat mereduksi getaran translasi sekaligus menghasilkan energi listrik.
3. Mengetahui pengaruh variasi jumlah *piezoelectric* terhadap karakteristik tegangan bangkitan dan reduksi getaran yang dihasilkan “CPDVA”.
4. Mengetahui pengaruh variasi frekuensi motor terhadap karakteristik tegangan bangkitan dan reduksi getaran “CPDVA”.

5. Mengetahui pengaruh variasi amplitudo sumber getar terhadap karakteristik tegangan bangkitan dan reduksi getaran “CPDVA”.

#### 1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan untuk memfokuskan penelitian sesuai dengan ruang lingkup seperti pada penjelasan latar belakang adalah sebagai berikut:

1. Gaya eksitasi oleh motor DC dan semua getaran yang terjadi pada sistem hanya translasi arah vertikal.
2. Pegas dan *cantilever piezoelectric* memiliki konstanta elastisitas yang tetap.
3. Getaran dari luar mekanisme diabaikan.
4. Massa pegas diabaikan.
5. Hubungan *cantilever piezoelectric* dengan massa *absorber* pada CPDVA dianggap *rigid*.

#### 1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat diperoleh dari kegiatan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Sebagai referensi dan literatur untuk penelitian *dynamic vibration absorber with energy harvesting* sebagai pereduksi getaran sekaligus penghasil energi listrik selanjutnya.
2. Sebagai inovasi dalam bidang *energy harvesting* dari getaran mekanik yang sekaligus dapat mereduksi getaran sistem dan untuk pengembangan dalam skala yang lebih besar.

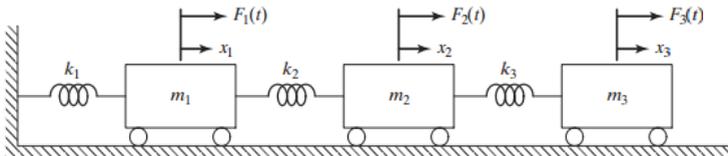
## BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Dasar Teori Mekanika Getaran

Getaran dapat didefinisikan sebagai gerakan bolak-balik suatu benda dari posisi awal melalui titik keseimbangan dengan periode, amplitudo dan frekuensi tertentu [4]. Getaran dapat terjadi jika terdapat massa, pegas, dan peredam dalam suatu sistem. Respon getaran dari suatu sistem dipengaruhi oleh frekuensi natural yang dimiliki oleh semua benda yang memiliki massa dan konstanta pegas. Teori mekanika getaran yang digunakan sebagai landasan dan literatur pada penelitian ini mengenai *forced multi DoF*, *base motion*, *dynamic vibration absorber*.

#### 2.1.1 *Forced Multi DoF Vibration*

Getaran mekanik paksa pada sistem derajat kebebasan ganda atau *forced multi dof vibration* adalah peristiwa getaran yang terjadi pada suatu sistem *multi dof* karena ada gaya eksternal yang mengenai sistem tersebut [1]. Selain getaran alami sistem, sistem juga dapat menerima getaran paksa yang disebabkan karena adanya gaya eksternal yang mengenai sistem dan dinamakan *forced vibration*. Sistem derajat kebebasan ganda merupakan sistem yang memiliki beberapa komponen massa yang dihubungkan oleh elemen pegas yang masing-masing berjumlah lebih dari dua [1]. Sistem *forced multi dof vibration* dapat dimodelkan pada gambar 2.1 berikut.



Gambar 2. 1 Skema forced multi dof vibration [1]

Dari gambar 2.1 di atas, maka akan didapatkan matriks dari persamaan gerak dengan menggunakan Hukum Newton kedua yang diberikan untuk setiap massa.

$$m_i \ddot{x}_i + k_i x_i = \sum_i F_i \quad (2.1)$$

Persamaan 2.1 di atas terdiri dari  $i=1$ ,  $i=2$  dan  $i=3$  sehingga dapat ditulis dalam bentuk matriks:

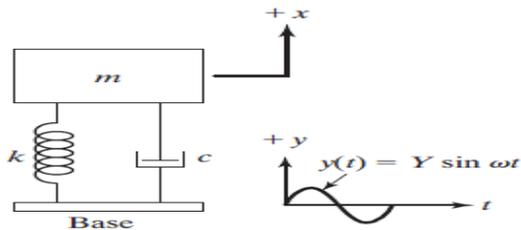
$$[m] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix}, \quad [k] = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix}, \quad [F] \\ = \begin{Bmatrix} F_1(t) \\ F_2(t) \\ F_3(t) \end{Bmatrix} \quad (2.2)$$

Dengan menyubstitusikan persamaan 2.1 ke persamaan 2.2, maka akan didapatkan:

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1(t) \\ F_2(t) \\ F_3(t) \end{Bmatrix} \quad (2.3)$$

### 2.1.2 Base Motion Vibration

Salah satu tipe getaran mekanik yang digunakan sebagai teori penelitian ini adalah *base motion vibration*. *Base motion vibration* merupakan getaran yang terjadi karena adanya pergerakan harmonis dari *base* suatu sistem yang mempengaruhi massa di atasnya [1]. Skema *base motion vibration* ditunjukkan pada gambar 2.2 di bawah ini.



Gambar 2. 2 Skema *base motion vibration* [1]

Dari gambar 2.2 maka didapat bentuk persamaan gerak yaitu:

$$\begin{aligned} m\ddot{x} + c\dot{x} + kx &= ky + c\dot{y} \\ &= kY \sin \omega t + c\omega Y \cos \omega t \end{aligned} \quad (2.4)$$

Dari persamaan 2.4, didapat respon *steady state* massa terhadap *base motion*  $Y(t)$  yaitu:

$$x_p(t) = \frac{Y\sqrt{k^2+(c\omega)^2}}{[(k-m\omega^2)^2+(c\omega)^2]^{\frac{1}{2}}} \sin(\omega t - \phi_1 - \alpha) \quad (2.5)$$

Dengan

$$\phi_1 = \tan^{-1}\left(\frac{c\omega}{k-m\omega^2}\right) \quad (2.6)$$

Menggunkan persamaan trigonometri, persamaan 2.6 di atas dapat dibentuk menjadi sebagai berikut

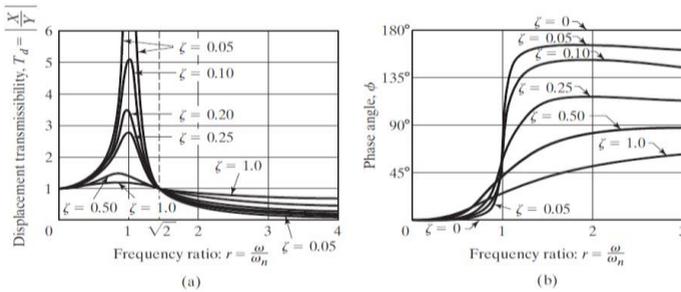
$$x_p(t) = X \sin(\omega t - \phi) \quad (2.7)$$

Dengan

$$\frac{X}{Y} = [(k^2 + (c\omega)^2) / ((k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2)]^{1/2} \quad (2.8)$$

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{mc\omega^3}{k(k-m\omega^2)+(c\omega)^2}\right) \quad (2.9)$$

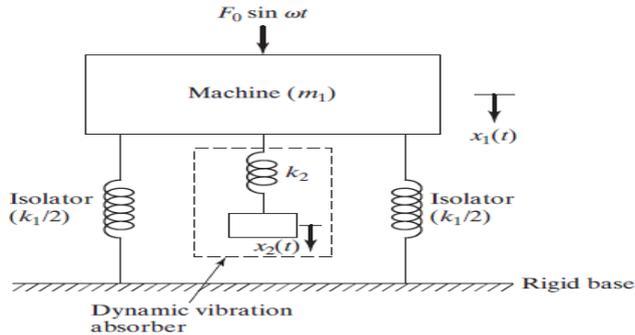
Dimana  $\frac{X}{Y}$  adalah *displacement transmissibility*. Grafik hubungan *displacement transmissibility* dan *phase angle* dengan *frequency ratio* pada sistem *base motion vibration* pada gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Grafik hubungan (a) amplitudo ratio dengan *frequency ratio*, (b) *phase angle* dengan *frequency ratio* [1]

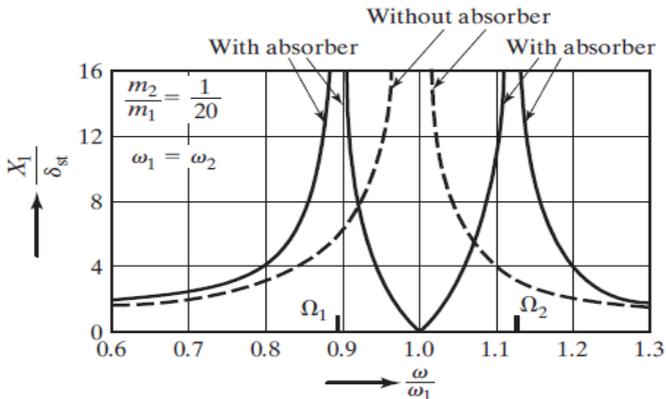
### 2.1.3 Dynamic Vibration Absorber

Proses *vibration absorber* merupakan salah satu proses *vibration control* pada sistem utama untuk mengurangi atau menghilangkan efek getaran yang tidak diinginkan [1]. DVA dapat dimodelkan sebagai sistem dengan komponen *absorber* atau peredam yang dipasang pada sistem utama yang bergetar. *Absorber* tersebut dapat berupa sistem massa dan pegas yang dipasangkan pada sistem sumber getar yang akan direduksi getarannya. *Absorber* yang dipasang akan bekerja dengan membuat sistem memiliki dua frekuensi natural. Pemasangan massa absorber pada massa utama ini menghasilkan sistem dengan 2 DOF, sehingga sistem tersebut akan memiliki dua frekuensi natural. Skema peredaman *dynamic vibration absorber* dapat dilihat pada gambar 2.4.



Gambar 2. 4 Skema peredaman *dynamic vibration absorber* [1]

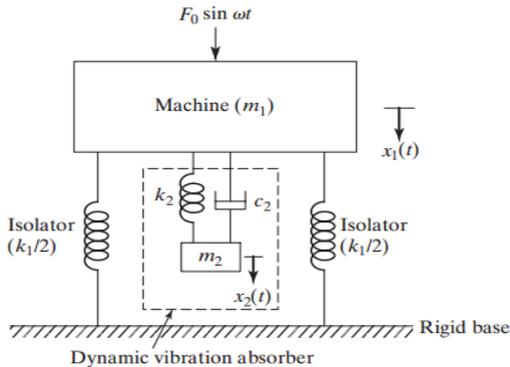
Penggunaan DVA pada sistem utama akan berdampak pada respon getaran yang akan tereduksi karena adanya DVA tersebut. Penambahan DVA pada sistem juga akan membagi dan mereduksi rasio frekuensi natural sistem menjadi dua bagian yang mana akan menimbulkan rasio frekuensi natural yang berbeda. Skema efek penggunaan DVA pada rasio amplitude respon sistem terhadap rasio frekuensi natural sistem pada gambar 2.5 di bawah.



Gambar 2. 5 Efek penggunaan DVA terhadap rasio frekuensi natural sistem [1]

### 2.1.3.1 Damped Dynamic Vibration Absorber

Tipe *Dynamic Vibration Absorber* yang menggunakan peredam atau *damper* dikategorikan sebagai *damped dynamic vibration absorber*. *Damped DVA* merupakan DVA yang berfungsi untuk menghasilkan dua puncak frekuensi natural baru serta mereduksi amplitudo tersebut [4]. Skema *damped dynamic vibration absorber* yang terdiri dari massa *absorber*, pegas dan *damper absorber* ditunjukkan pada gambar 2.6 dibawah ini.



Gambar 2. 6 Permodelan dinamis sistem utama dengan *damped* DVA [1]

Berdasarkan gambar 2.6 diatas didapatkan persamaan gerak dari massa  $m_1$  dan  $m_2$  adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 m_1 \ddot{x}_1 + k_1 x_1 + k_2 (x_1 - x_2) + c_2 (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) &= F_0 \sin \omega t \\
 m_2 \ddot{x}_2 + k_2 (x_2 - x_1) + c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) &= 0
 \end{aligned}
 \tag{2.10}$$

Dengan mengasumsikan penyelesaian harmonik, maka didapat :

$$\begin{aligned}
 x_j(t) &= X_j e^{i\omega t} \\
 j &= 1,2
 \end{aligned}$$

Sehingga amplitudo *steady state* dari  $m_1$  dan  $m_2$  adalah sebagai berikut :

$$X_1 = \frac{F_0(k_2 - m_2\omega^2 + ic_2\omega)}{[(k_1 - m_1\omega^2)(k_2 - m_2\omega^2) - m_2k_2\omega^2] + ic_2\omega(k_1 - m_1\omega^2 - m_2\omega^2)} \quad (2.11)$$

$$X_2 = \frac{X_1(k_2 + ic_2\omega)}{(k_2 - m_2\omega^2 + ic_2\omega)} \quad (2.12)$$

Nilai  $X_1$  dan  $X_2$  pada persamaan 2.11 dan 2.12 di atas dapat dinyatakan dalam :

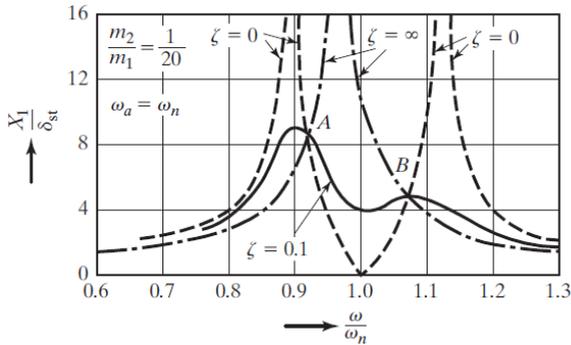
$$\frac{X_1}{\delta_{st}} = \left[ \frac{(2\zeta g)^2 + (g^2 - f^2)^2}{(2\zeta g)^2 (g^2 - 1 + \mu g^2)^2 + \{\mu f^2 g^2 - (g^2 - 1)(g^2 - f^2)\}^2} \right]^{1/2} \quad (2.13)$$

$$\frac{X_2}{\delta_{st}} = \left[ \frac{(2\zeta g)^2 + f^4}{(2\zeta g)^2 (g^2 - 1 + \mu g^2)^2 + \{\mu f^2 g^2 - (g^2 - 1)(g^2 - f^2)\}^2} \right]^{1/2} \quad (2.14)$$

Dimana :

- $\mu = m_2/m_1 = \text{Mass ratio} = \text{Absorber mass} / \text{main mass}$
- $\delta_{st} = F_0/k_1 = \text{Static deflection of the system}$
- $\omega_a^2 = k_2/m_2 = \text{Square of natural frequency of the absorber}$
- $\omega_n^2 = k_1/m_1 = \text{Square of natural frequency of main mass}$
- $f = \omega_a / \omega_n = \text{Ratio of natural frequencies}$
- $g = \omega / \omega_n = \text{Forced frequency ratio}$
- $c = 2m\omega_n = \text{Critical damping constant}$
- $\zeta = c_2 / c_c = \text{Damping ratio}$

Respon getaran pada persamaan 2.14 di atas dapat dibentuk ke dalam grafik untuk melihat pengaruhnya terhadap *forced frequency ratio*. Grafik respon getaran *damped DVA* terhadap rasio respon sistem utama dapat dilihat pada gambar 2.7. Pada grafik tersebut terdapat respon ideal sistem dengan *damped DVA* nilai  $\zeta = 0,1$ .



Gambar 2. 7 Pengaruh dari damped DVA terhadap rasio respon dari sistem utama [1]

## 2.2 Dasar Teori *Piezoelectric*

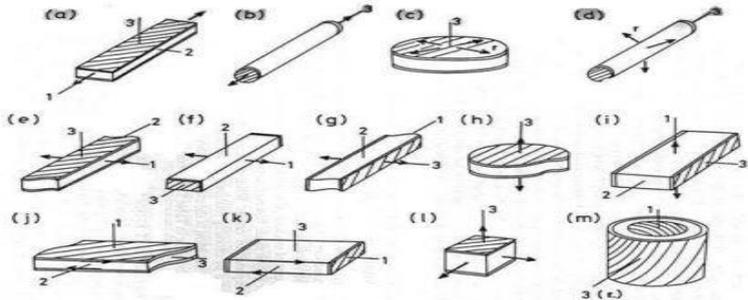
Bahan *piezoelectric* adalah suatu bahan yang apabila diberi tekanan mekanik akan menghasilkan medan listrik dan sebaliknya, apabila medan listrik diterapkan pada bahan *piezoelectric* akan terjadi deformasi mekanik. Sifat yang reversibel ini membuat material *piezoelectric* dapat berfungsi sebagai transduser dan aktuator [2]. Teori mengenai *piezoelectric* pada penelitian ini akan difokuskan kepada *cantilever piezoelectric* dengan karakteristiknya.

### 2.2.1 Material *Piezoelectric*

*Piezoelectric* terbuat dari kristal batuan, keramik, termasuk tulang dan polimer yang memiliki kemampuan untuk membangkitkan potensial listrik [3]. Potensial listrik ini merupakan respons dari tegangan yang diberikan pada material *piezoelectric* tersebut. Material *piezoelectric* dibagi menjadi 3 jenis yaitu:

- Kristal, seperti Quartz ( $\text{SiO}_2$ ), Gallium Orthophosphate ( $\text{GaPO}_4$ )
- Keramik, seperti Lead Zirconate Titanate (PZT)
- Polimer, seperti Polyvinylidene Difluoride (PVDF)

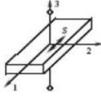
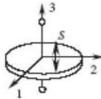
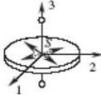
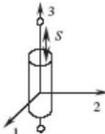
Efek piezoelektrik terjadi saat medan listrik melewati material, molekul yang terpolarisasi akan menyesuaikan dengan medan listrik, dihasilkan dipole yang terinduksi dengan molekul atau struktur kristal materi. Penyesuaian molekul mengakibatkan material berubah dimensi. Macam *piezoelectric* pada gambar 2.8.



Gambar 2. 8 Macam bentuk *piezoelectric* [3]

Voltase bangkitan yang dihasilkan oleh material *piezoelectric* disebabkan oleh adanya muatan yang berbeda antar partikel dalam *piezoelectric*. Dan ketika material *piezoelectric* tersebut dikenai gaya eksternal atau mengalami defleksi, hal ini menyebabkan jarak antar partikel tersebut berubah. Perubahan jarak antar partikel tersebut menyebabkan beda tegangan yang disebut dengan *Pull-in Voltage*. Berikut data *piezoelectric* pada tabel 2.1, dan tabel 2.2 data teknis *piezoelectric*.

Tabel 2. 1 Voltase bangkitan, displacement dan kapasitansi bahan piezoelectric [3]

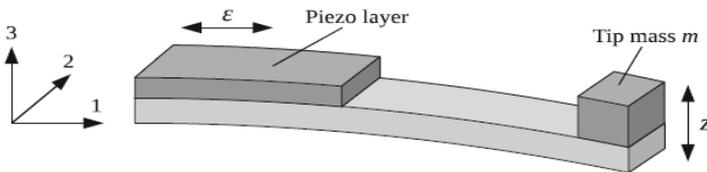
Action Mode ( $L$ , length; $W$ , width; $T$ , thickness; $D$ , diameter)	Generated Voltage, $V$	Displacement, $\Delta L$ ( $\Delta T$ )	Capacitance, $C$
Transverse length mode: $L > 3W > 3T$	$V = \frac{g_{31}F}{W}$	$\Delta l = \frac{d_{31}L}{T}V$	$C = \frac{\epsilon_3^T LW}{T}$
			
Thickness extension mode: $D > 5T$	$V = \frac{4Tg_{33}F}{\pi D^2}$	$\Delta T = d_{33}V$	$C = \frac{\pi\epsilon_3^T D^2}{4T}$
			
Radial mode: $D > 5T$	Not applied	$\Delta D = \frac{d_{31}D}{T}V$	$C = \frac{\pi K_3^T \epsilon_0 D^2}{4T}$
			
Longitudinal mode: $L > 3D$	$V = \frac{4L}{\pi D^2}g_{33}F$	$\Delta L = d_{33}V$	$C = \frac{\pi D^2}{4L}K_3^T \epsilon_0$
			

Tabel 2. 2 Data teknis beberapa jenis material *piezoelectric* [3]

Property	Units	PVDF Film	PZT	BaTiO3
Density	$10^3 \text{ kg/m}^3$	1.78	7.5	5.7
Relative Permittivity	$\epsilon/\epsilon_0$	12	1200	1700
$d_{31}$ Constant	$(10^{-12}) \text{ C/N}$	23	110	78
$g_{31}$ Constant	$(10^{-3}) \text{ Vm/N}$	216	10	5
$k_{31}$ Constant	1 Khz	12	30	21
Acoustic Impedance	$(10^6) \text{ kg/m}^2\text{-sec}$	27	30	30

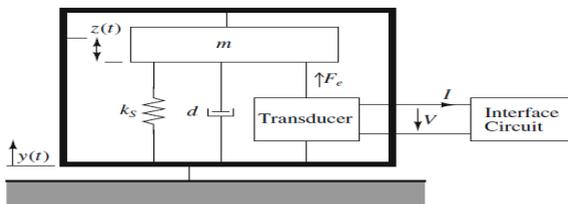
### 2.2.2 Cantilever Piezoelectric

*Cantilever piezoelectric* adalah *piezoelectric* yang berbentuk *cantilever* dengan bagian atas dan bawah *cantilever* terdapat material *piezoelectric transducer* (PZT) [3]. Material *cantilever piezoelectric* dapat dimodelkan sebagai sebagai pegas *cantilever beam* yang dilengkapi dengan massa pada ujungnya sebagai *tip mass*. Defleksi yang terjadi pada material dari arah 3 atau searah dengan sumbu  $z$ , dan regangan yang terjadi adalah pada arah satu atau pada arah sumbu  $x$ , sedangkan gaya yang diterima oleh *piezoelectric* adalah pada arah 3 atau pada arah sumbu  $z$ . Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 2.9 berikut.



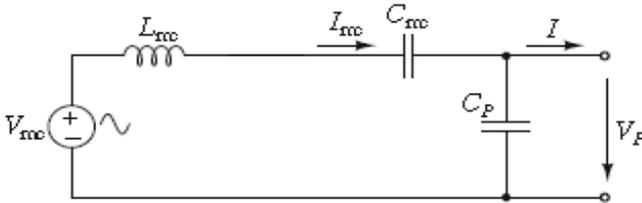
Gambar 2. 9 Cantilever piezoelectric [3]

Penggunaan material *piezoelectric* jenis *cantilever* dalam penelitian ini adalah sebagai komponen *absorber* sistem *dynamic vibration absorber* yang berfungsi sebagai komponen penghasil listrik juga sekaligus penyerap getaran. Untuk model dinamis pemanen energi kinetik dari *cantilever piezoelectric* dapat dimodelkan sebagai susunan massa pegas yang diberikan gaya harmonis. Susunan massa pegas tersebut dilengkapi dengan rangkaian elektrik pemanen energi seperti pada gambar 2.10.



Gambar 2. 10 Model pemanen energi kinetik [3]

Dari gambar 2.10 di atas didapat rangkaian listrik ekuivalen pada gambar 2.11.



Gambar 2. 11 Rangkaian listrik ekuivalen pemanen energi [3]

Persamaan rangkai listrik ekuivalen pada gambar 2.11 di atas dapat dirumuskan sebagai:

$$V_{mc} = L_{mc} \frac{dI_{mc}}{dt} + R_{mc} I_{mc} + \frac{1}{C_{mc}} \int I_{mc} dt + V_p \quad (2.15)$$

$$F_e = n \Gamma V_p$$

dengan:

$$L_{mc} = \frac{M}{\Gamma^2} \quad R_{mc} = \frac{d_p}{\Gamma^2} \quad C_{mc} = \frac{\Gamma^2}{k_p} \quad \Gamma = \sqrt{k_{31} k_p C_p}$$

dengan:

$d_p$  = Konstanta damping *piezoelectric*

$k_p$  = Konstanta pegas *piezoelectric*

$C_p$  = Kapasitansi *piezoelectric*

$M$  = Massa *piezoelectric*

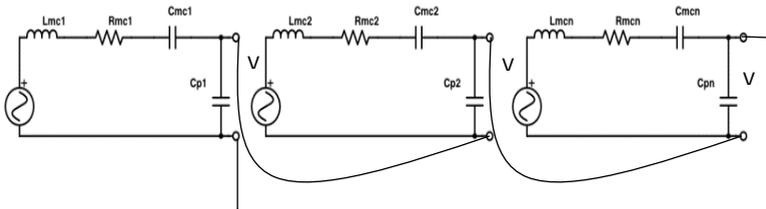
$F_e$  = Gaya elektromekanik

$n$  = Jumlah *Piezoelectric*

$\Gamma$  = *electromechanical factor piezoelectric*

### 2.2.3 Susunan *Cantilever Piezoelectric*

*Piezoelectric* dapat disusun secara seri dan paralel. Susunan dari *piezoelectric* ini dapat merubah sifat mekanik dan elektrik dari *piezoelectric* yang bergantung dari bentuk susunan *piezoelectric*.



Gambar 2. 12 Rangkaian *piezoelectric* disusun secara seri [3]

voltase yang dihasilkan oleh *piezoelectric* jika disusun secara seri adalah

$$V_{eq} = V_1 + V_2 + \dots + V_n \quad (2.16)$$

Jika  $V_1 = V_2 = V_n$ , maka:

$$V_{eq} = n \cdot V_n \quad (2.17)$$

Arus yang dihasilkan oleh *piezoelectric* jika disusun secara seri adalah

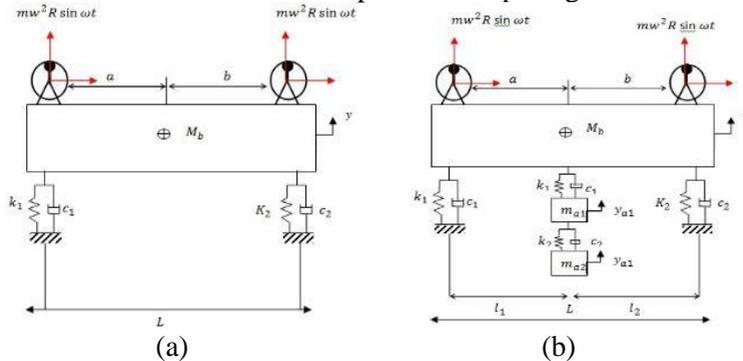
$$I_{eq} = I_1 = I_2 = \dots = I_n \quad (2.18)$$

Dari persamaan pada rangkaian seri dapat disimpulkan bahwa dengan menyusun elektriknya secara seri, maka voltase yang dihasilkan akan semakin meningkat. Namun kondisi arus pada susunan seri bernilai tetap seiring bertambahnya jumlah material *piezoelectric*.

### 2.3 Penelitian Terdahulu

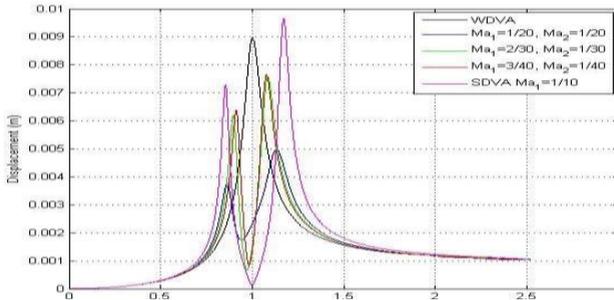
Penelitian terdahulu yang digunakan sebagai referensi diantaranya penelitian mengenai *dynamic vibration absorber*, *cantilever piezoelectric*, dan *vibration absorber harvester*. Penelitian tentang *dynamic vibration absorber* sebelumnya yaitu pada tahun 2013 oleh Aini Lostari [4] berjudul studi perbandingan pengaruh penambahan SDVA dan DDVA tersusun seri terhadap respon getaran translasi sistem utama. Penelitian tersebut bertujuan untuk membandingkan pengaruh penambahan SDVA (*Single Dynamic Vibration Absorber*) dan DDVA (*Dual Dynamic Vibration Absorber*) tersusun seri pada sistem utama yang bergetar

dan dilihat respon reduksi getarannya. Sistem utama pada penelitian ini menggunakan balok ( $M_b$ ) sebagai massa utama dan dihubungkan dengan *cantilever* sebagai pegas dan *dampner*. Sumber getar dari massa utama didapatkan dari gaya eksitasi akibat massa *unbalance* motor. DVA yang digunakan terdiri dari pegas *absorber* dan massa *absorber* yang ditempatkan pada sistem utama. Pemodelan matematis pada sistem pada gambar 2.13.



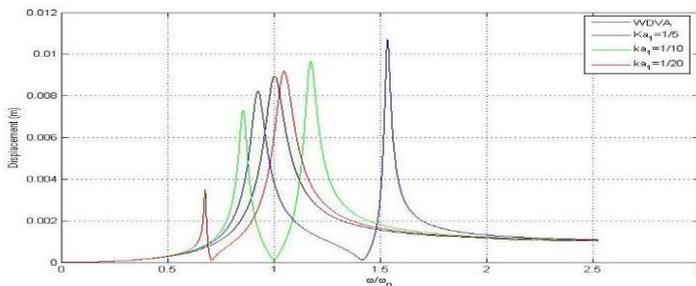
Gambar 2. 13 Pemodelan sistem utama (a) tanpa DVA dan (b) sistem dengan DDVA [4]

Penurunan persamaan matematis pemodelan dilakukan kemudian dibuat ke dalam blok simulasi *software* MATLAB. Simulasi pada MATLAB melalui program Simulink dengan memasukkan nilai parameter dari massa utama dan DVA yang telah ditentukan. Variasi yang dilakukan adalah variasi nilai frekuensi sumber pada 0 Hz sampai 30 Hz, variasi kombinasi massa *absorber* yaitu 1/10, 2/30, 1/30, 3/40, 1/20, dan 1/40 dari massa utama untuk DDVA.



Gambar 2. 14 Grafik respon getaran sistem tanpa DVA, dengan SDVA dan dengan DDVA[4]

Pada gambar 2.14 di atas tentang grafik respon sistem tanpa DVA, dengan SDVA dan dengan DDVA didapat bahwa perbandingan sistem dengan DVA terhadap sistem tanpa DVA terjadi penurunan respon getaran. Pada rasio frekuensi sama dengan 1 dimana terjadi resonansi sistem utama tanpa DVA menghasilkan getaran berlebih dengan rms *displacement* sebesar 0.008291 m. Pada kondisi rasio frekuensi yang sama, sistem dengan DDVA dengan massa absorber  $Ma_1=1/20$  dan  $Ma_2=1/20$ ,  $Ma_1=2/30$  dan  $Ma_2=1/30$ , dan  $Ma_1=3/40$  dan  $Ma_2=1/40$  menghasilkan getaran dengan rms *displacement* sebesar 0.001484 m, 0.002691 m, dan 0.001343 m. Dapat diketahui bahwa semakin besar massa *absorber*, maka rms *displacement* respon getaran semakin kecil, sehingga mampu mereduksi getaran berlebih. Namun masih perlu dicari kombinasi besar massa *absorber* yang optimal dalam mereduksi getaran sistem.

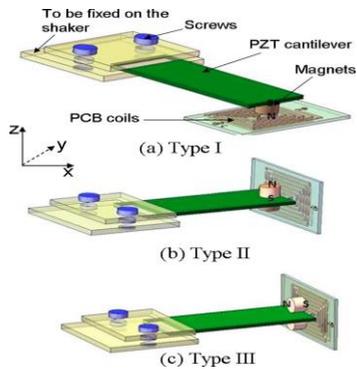


Gambar 2. 15 Grafik respon sistem dengan SDVA [4]

Pada gambar 2.15 dapat diketahui bahwa sistem SDVA dengan variasi kekakuan pegas absorber dihasilkan kekakuan pegas yang mereduksi paling kecil yaitu  $1/10$ . Perbandingan respon getaran sistem SDVA dengan variasi kekakuan menghasilkan dua buah puncak resonansi yang berbeda, dimana pada kekakuan pegas  $1/10$  mempunyai rms *displacement* sebesar 0.007287 m dan 0.009664 m. Kekakuan pegas absorber  $1/20$  bernilai 0.0035 m dan 0.009153 m. Kekakuan pegas absorber  $1/5$  bernilai 0.00822 m dan 0.01069 m.

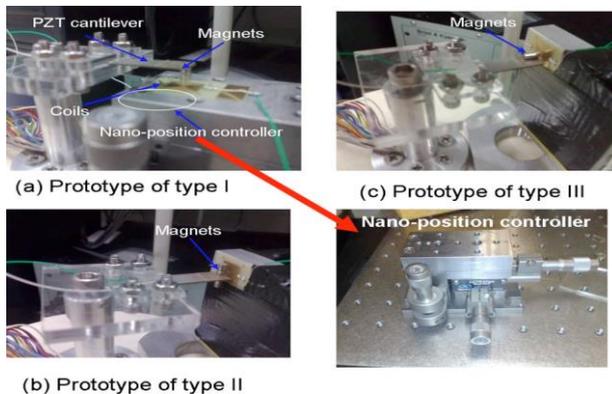
Dari penelitian ini didapat kesimpulan kombinasi massa *absorber* DDVA yang maksimum mereduksi getaran sistem adalah massa *absorber*  $Ma_1=3/40$  dan  $Ma_2 =1/40$  dari massa utama. Kombinasi pegas *absorber* yang maksimum mereduksi respon getaran  $K_a=1/10$  K utama.

Penelitian selanjutnya adalah tentang simulasi dan eksperimen *cantilever piezoelectric* yang dilakukan Bin Yang, et al. yang dipublikasikan pada tahun 2010 [5]. Penelitian tersebut berjudul *Hybrid energy harvester based on piezoelectric and electromagnetic mechanisms* dan bertujuan untuk mengetahui desain optimal yang dapat memmberi nilai output maksimum pada *piezoelectric* dan *electromagnetic coil*. Metodologi penelitian dilakukan perancangan sistem, simulasi dengan software, dan eksperimen. Pada perancangan sistem, dijelaskan bahwa *piezoelectric* (PZT) *cantilever* akan di pasang pada penggetar dan salah satu ujungnya diberi magnet yang akan berhubungan dengan *coil* sebagai eklektromagnet. Terdapat tiga macam model dari letak dan gerakan magnet terhadap *coil*. Tipe I adalah arah kutub magnet pada sumbu Z, *coil* pada bidang horizontal. Tipe II adalah arah kutub magnet pada sumbu Z, *coil* pada bidang vertikal. Tipe III adalah arah kutub magnet pada sumbu Y, *coil* pada bidang vertikal. Skema permodelan pada gambar 2.16.



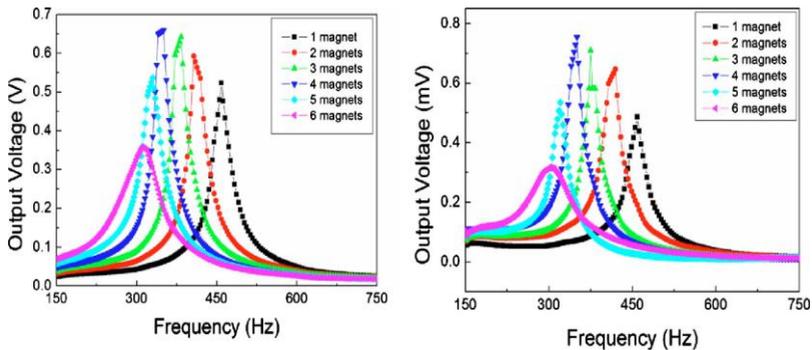
Gambar 2. 16 Skema penelitian ditinjau dari gerakan magnet terhadap coil [5]

Simulasi sistem dinamis dilakukan dengan *finite element* menggunakan software ANSYS untuk mengetahui pengaruh jumlah magnet pada ujung PZT terhadap voltase bangkitan. Hasil simulasi adalah jumlah magnet optimal empat buah untuk tipe I. Eksperimen dilakukan sesuai dengan perencanaan dengan memvariasikan beberapa komponen yaitu jumlah magnet, besar akselerasi getaran, frekuensi getaran, dan *load resistant*. Eksperimen pada gambar 2.17.



Gambar 2. 17 Proses eksperimen penelitian [5]

Hasil dari eksperimen dengan variasi beberapa nilai parameter dibentuk kedalam grafik. Diantaranya grafik hubungan voltase bangkitan terhadap frekuensi mekanisme tipe I yang dapat dilihat pada gambar 2.18 (a) di bawah, grafik hubungan voltase output terhadap jumlah magnet dengan variasi akselerasi mekanisme tipe I pada gambar 2.18 (b) di bawah, grafik hubungan voltase output terhadap jumlah magnet pada setiap tipe mekanisme yang dapat dilihat pada gambar 2.19 di bawah.

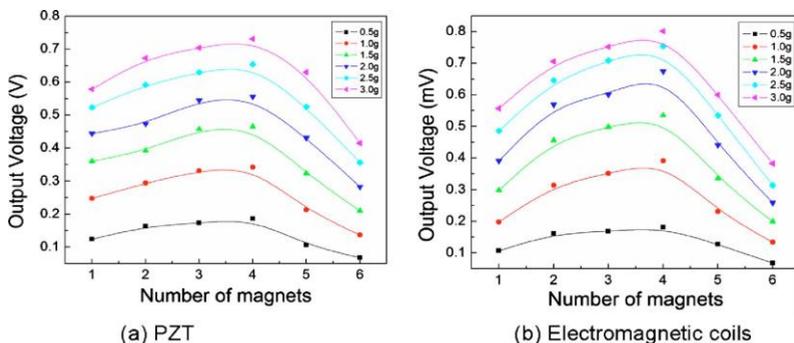


(a) PZT

(b) Electromagnetic coils

Gambar 2. 18 Grafik hasil eksperimen voltase output terhadap frekuensi getaran mekanisme tipe I oleh (a) PZT *cantilever* (b) elektromagnetik [5]

Pada gambar 2.18 dapat diketahui bahwa pada mekanisme tipe I, pengaruh penambahan frekuensi getaran dapat memberi efek yang berbeda terhadap voltase output. Untuk setiap jumlah magnet yang dipakai terdapat nilai optimum frekuensi agar nilai voltase output dapat maksimum. Jumlah magnet optimum yang didapat adalah empat buah magnet.

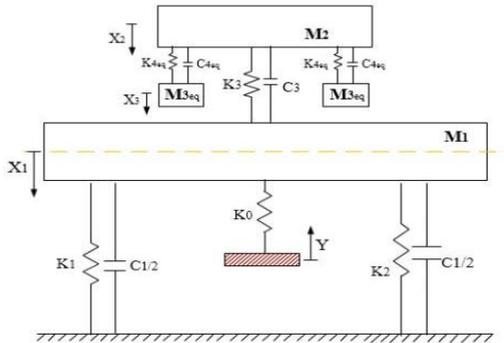


Gambar 2. 19 Grafik hasil eksperimen voltase output terhadap jumlah magnet dengan variasi akselerasi mekanisme tipe I oleh (a) PZT *cantilever* (b) elektromagnetik [5]

Gambar 2.19 di atas menunjukkan bahwa untuk tipe I, hubungan antara voltase output dengan jumlah magnet dengan variasi akselerasi getaran mencapai maksimal saat jumlah magnet empat buah, dan dengan akselerasi getaran 3 g. Hasil dari penelitian adalah daya yang dapat dihasilkan oleh mekanisme *harvester* dengan enam magnet maksimum sebesar  $176 \mu\text{W}$  dari *piezoelectric* dan  $0.19 \mu\text{W}$  dari elektromagnetik pada getaran sumber  $2.5\text{m/s}^2$  dengan frekuensi 310 Hz. *Power density* dari mekanisme tersebut adalah  $790 \mu\text{W/cm}^3$  untuk PZT dan  $0.85 \mu\text{W/cm}^3$  untuk elektromagnetik.

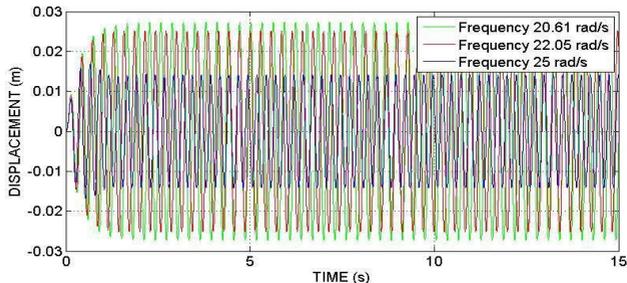
Penelitian selanjutnya mengenai pemodelan sistem pemanen energi sekaligus pereduksi respon getaran sistem oleh W. Rachma Effendy pada tahun 2016 [6]. Judul penelitiannya adalah pemodelan dan analisa reduksi respon getaran translasi pada sistem utama dan energi listrik yang dihasilkan oleh mekanisme *dynamic vibration absorber* metode *cantilever piezoelectric* (CPDVA). Penelitian tersebut bertujuan untuk mengetahui hubungan variasi putaran motor, amplitude, dan jumlah *piezoelectric* terhadap reduksi getaran pada sistem utama dan listrik yang dihasilkan. Simulasi penelitian menggunakan software MATLAB. Sistem utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah plat datar yang

ditopang oleh empat pegas dengan konstanta pegas sama besar dan bergerak arah translasi. Plat tersebut akan menerima gaya eksitasi dari pegas dibawahnya yang dihubungkan dengan massa eksentris pada motor DC. Diatas plat akan ditempatkan CPDVA sebagai pereduksi getaran massa utama dan penghasil energi listrik.



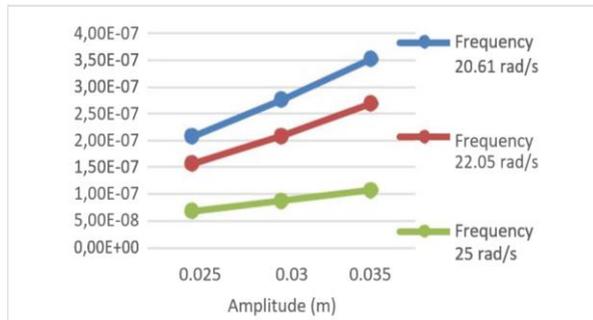
Gambar 2. 20 Skema sistem dinamis penelitian sistem utama dengan CPVA [6]

Pada penelitian ini, dilakukan analisa dengan variasi amplitudo massa eksentris sebesar 0.025 m, 0.030 m, dan 0.035 m. Kecepatan putaran motor sebesar 20.61 rad/s (frekuensi natural), 22.05 rad/s (frekuensi panen), dan 25 rad/s (frekuensi lembah). Sedangkan variasi jumlah *cantilever piezoelectric* yang digunakan adalah 2600, 2800, dan 3000 buah. Penelitian disimulasikan dengan software MATLAB. Skema penelitian dapat dilihat pada gambar 2.20.



Gambar 2. 21 Grafik respon perpindahan massa utama dengan CPDVA variasi frekuensi [6]

Gambar 2.21 di atas merupakan salah satu grafik hasil simulasi. Dapat dilihat pada grafik gambar 2.22 diatas bahwa respon perpindahan dari massa utama akan mengalami penurunan ketika frekuensi operasi semakin jauh dari salah satu frekuensi natural sistem, yaitu 20.61 rad/s.



Gambar 2. 22 Grafik daya bangkitan listrik dengan variasi amplitudo [6]

Dari gambar 2.22 diatas dapat diketahui bahwa dengan semakin besarnya nilai amplitudo yang diberikan, maka daya bangkitan listrik juga menjadi semakin besar. Hal ini disebabkan dengan bertambahnya amplitudo eksitasi, voltase bangkitan *piezoelectric* menjadi semakin besar, sehingga daya bangkitan listrik juga semakin besar.

Dari penelitian ini dapat disimpulkan bahwa semakin besar amplitudo eksitasi, jumlah *piezoelectric* yang digunakan, dan frekuensi operasi yang semakin mendekati frekuensi natural menyebabkan perpindahan yang terjadi pada massa utama, massa absorber, dan massa *piezoelectric* juga semakin besar. Hal ini menyebabkan voltase dan daya bangkitan dari CPDVA semakin bertambah. Akan tetapi, bertambahnya jumlah *piezoelectric* yang digunakan meyebabkan perpindahan massa absorber dan massa *piezoelectric* semakin kecil. Hal ini menyebabkan penelitian ini dapat lebih disempurnakan dengan metode *double absorber mass*.

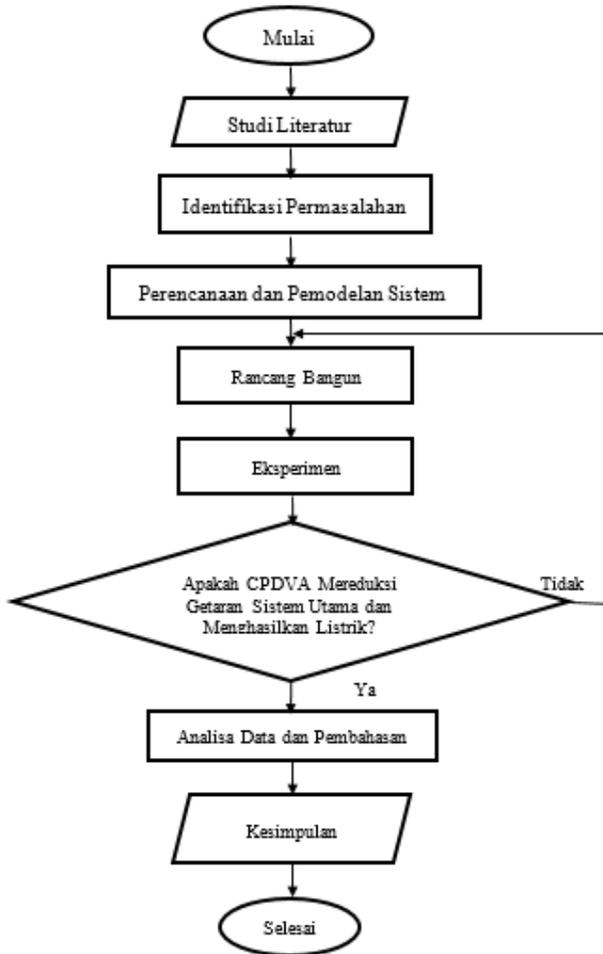
.

***“Halaman ini sengaja dikosongkan”***

## BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 *Flowchart Penelitian*

Langkah-langkah penelitian ditunjukkan pada *flowchart* penelitian gambar 3.1.



Gambar 3. 1 *Flowchart* penelitian

## 3.2 Penjelasan Flowchart Penelitian

### 3.2.1 Studi Literatur

Langkah awal penelitian ini adalah melakukan studi literatur dan referensi yang terkait dengan penelitian. Beberapa referensi pustaka berasal dari *text book*, jurnal penelitian, dan tugas akhir sebelumnya. Teori diantaranya adalah tentang getaran *multi degree of freedom forced vibration*, *base motion vibration*, *dynamic vibration absorber*, dan *piezoelectric*.

### 3.2.2 Identifikasi Permasalahan

Identifikasi permasalahan yang terdapat pada penelitian ini terbagi menjadi dua bagian yaitu bagian *input* dan *output*. *Input* merupakan masukan yang diberikan yaitu berupa variasi amplitudo sumber getar, frekuensi sumber getar, dan jumlah *piezoelectric* pada CPDVA. *Output* merupakan reduksi getaran sistem utama dan voltase bangkitan dari CPDVA.

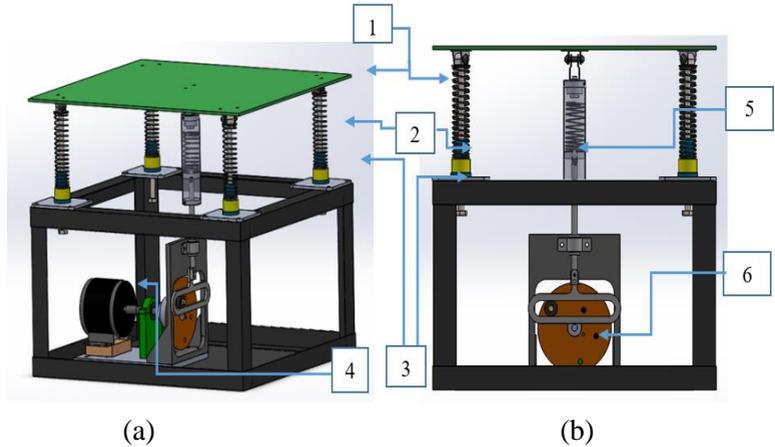
### 3.2.3 Perencanaan dan Pemodelan Sistem

Perencanaan dan pemodelan sistem terbagi menjadi dua yaitu pada sistem utama dan CPDVA. Sistem utama merupakan plat datar yang ditopang oleh empat pegas dengan dikenai gaya eksitasi dibawah plat oleh motor DC sebagai sumber getar. Gaya eksitasi di bawah plat dihubungkan dengan massa eksentrik pada motor DC sehingga dapat memberi getaran pada plat secara kontinyu. Konstanta pegas yang digunakan untuk menumpu plat datar bernilai sama sehingga gerakan plat hanya translasi vertikal.

Sistem CPDVA merupakan *dynamic vibration absorber* dengan *cantilever piezoelectric* yang dipasang pada permukaan atas tengah plat datar untuk dapat mereduksi getaran sistem sekaligus memberi *output* daya listrik. CPDVA adalah sistem tiga DOF yang terdiri dari massa *absorber*, pegas *absorber*, *cantilever piezoelectric*, poros pengarah, dan PCB.

### 3.2.3.1 Rancangan Penelitian

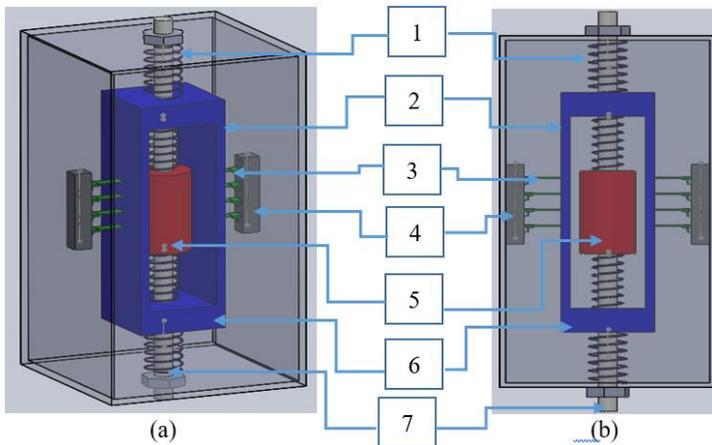
Rancangan sistem utama dapat dilihat pada gambar 3.2. Rancangan CPDVA dapat dilihat pada gambar 3.3 di bawah



Gambar 3. 2 Rancangan sistem utama (a) tampak isometri dan (b) tampak depan

Keterangan :

1. Massa utama
2. Pegas
3. Damper
4. Motor DC
5. Pegas Penunjuk
6. *Disc* Motor



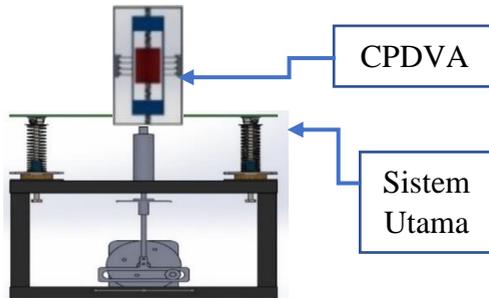
Gambar 3. 3 Rancangan CPDVA (a) tampak isometri dan (b) tampak depan

Keterangan :

- 1 Pegas absorber 1
- 2 Pegas absorber 2
- 3 PZT cantilever
- 4 PCB
- 5 Massa Absorber 2
- 6 Massa Absorber 1
- 7 Poros Pengarah

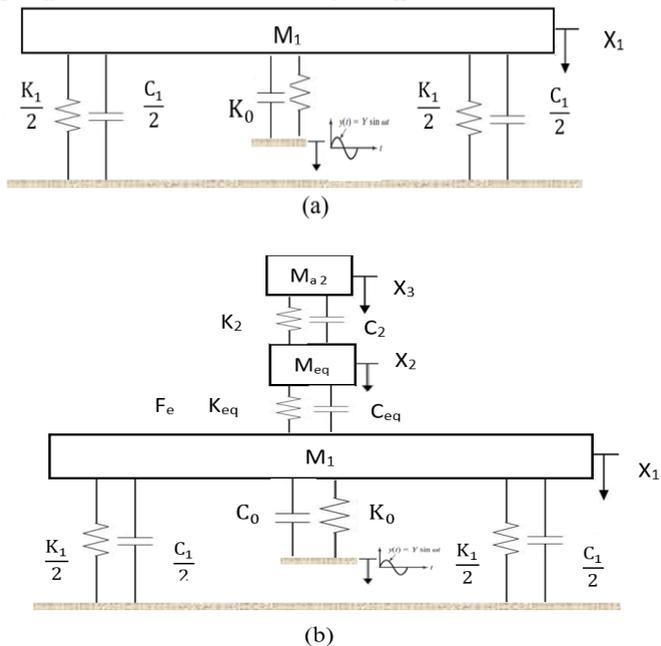
### 3.2.3.2 Penurunan Persamaan Gerak

Persamaan gerak dari sistem terlebih dahulu diturunkan dari model fisik sistem yang telah disederhanakan. Berikut akan dijabarkan skema sistem gabungan pada gambar 3.4 di bawah.



Gambar 3. 4 Rancangan sistem gabungan

Pemodelan yang disederhanakan untuk analisa model dinamis dari sistem utama tanpa CPDVA pada gambar 3.5 (a) dan sistem utama yang ditambahkan CPDVA pada gambar 3.5 (b).

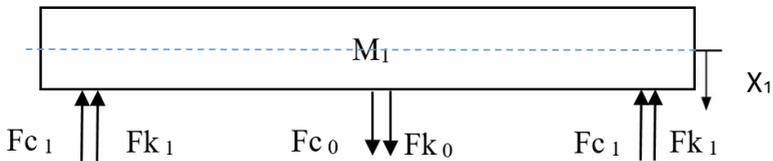


Gambar 3. 5 Skema sistem utama (a) tanpa CPDVA dan (b) dengan ditambahkan CPDVA

Keterangan :

$M_1$ : Massa utama	$K_{eq}$ : Konstanta pegas $M_{eq}$
$M_{eq}$ : Massa absorber 1 + Massa piezoelectric	$K_2$ : Konstanta pegas $M_{a2}$
$M_{a2}$ : Massa absorber 2	$C_0$ : Konstanta redaman eksitasi
$X_1$ : Displacement $M_1$	$C_1$ : Konstanta redaman $M_1$
$X_2$ : Displacement $M_{eq}$	$C_{eq}$ : Konstanta redaman $M_{eq}$
$X_3$ : Displacement $M_{a2}$	$C_2$ : Konstanta redaman $M_{a2}$
$Y$ : Displacement eksitasi disk	$F_e$ : Gaya elektromekanik Piezoelectric
$K_0$ : Konstanta pegas eksitasi	
$K_1$ : Konstanta pegas $M_1$	

*Free body* diagram dan persamaan dinamis sistem utama tanpa CPDVA pada gambar 3.6 dan sistem utama dengan CPDVA pada gambar 3.7.



Gambar 3. 6 Free body diagram sistem utama tanpa CPDVA

Keterangan Gaya:

$$F_{k0} = K_0(y - x_1)$$

$$F_{c0} = C_0(y - x_1)$$

$$F_{k1} = \frac{1}{2}k_1x_1$$

$$F_{c1} = \frac{1}{2}c_1\dot{x}_1$$

a. Persamaan Sistem Utama tanpa CPDVA

Pada sistem tanpa CPDVA, massa utama menerima gaya eksitasi oleh pegas  $K_0$ , damper  $C_0$  dan gaya oleh pegas  $K_1$  dan damper  $C_1$ .

Berikut persamaan gerak massa utama (M1)

$$\sum F = M\ddot{x}$$

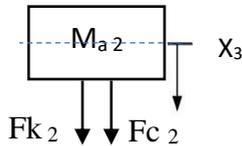
$$-Fc_1 - Fc_1 - Fk_1 - Fk_1 + Fk_0 + Fc_0 = M_1\ddot{x}_1$$

$$-\frac{1}{2}c_1\dot{x}_1 - \frac{1}{2}c_1\dot{x}_1 - \frac{1}{2}k_1x_1 - \frac{1}{2}k_1x_1 - k_0(y - x_1) - c_0(\dot{y} - \dot{x}_1) = M_1\ddot{x}_1$$

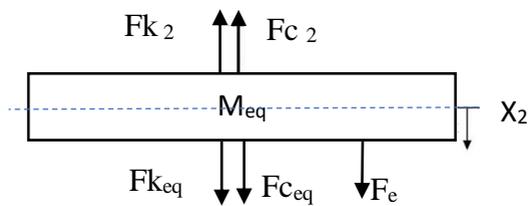
$$M_1\ddot{x}_1 + (c_1 + c_0)\dot{x}_1 + (k_1 + k_0)x_1 = k_0y + c_0\dot{y} \quad (3.1)$$

Matriks persamaan gerak sebagai berikut

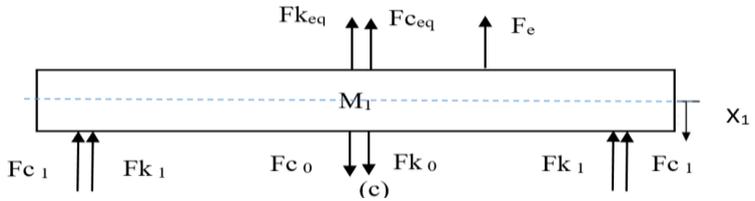
$$[m_1]\{\ddot{x}_1\} + [(c_1 + c_0)]\{\dot{x}_1\} + [(k_1 + k_0)]\{x_1\} = \{k_0y + c_0\dot{y}\} \quad (3.2)$$



(a)



(b)



Gambar 3. 7 *Free body diagram* sistem dengan CPDVA (a) massa *absorber 2*, (b) massa ekuivalen, dan (c) massa utama

Keterangan Gaya:

$$F_{k0} = K_0(y - x_1)$$

$$F_{C0} = C_0(\dot{y} - \dot{x}_1)$$

$$F_{k1} = \frac{1}{2}k_1x_1$$

$$F_{C1} = \frac{1}{2}c_1\dot{x}_1$$

$$F_{k_{eq}} = k_{eq}(x_1 - x_2)$$

$$F_{C_{eq}} = c_{eq}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2)$$

$$F_e = k_{pe}(x_1 - x_2)$$

$$F_{k_2} = k_2(x_2 - x_3)$$

$$F_{C_2} = c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_3)$$

#### b. Persamaan Sistem Utama dengan CPDVA

Pada sistem dengan CPDVA, massa absorber 1 dianggap ekuivalen dengan massa *piezoelectric* menjadi  $M_{eq}$ , dengan nilai konstanta pegas *absorber 1* juga dianggap ekuivalen dengan konstanta pegas *piezoelectric* menjadi  $K_{eq}$ .

Persamaan gerak translasi massa utama ( $M_1$ )

$$\begin{aligned} \sum F &= M_1\ddot{x}_1 \\ -F_{C1} - F_{C1} + F_{C0} - F_{k1} - F_{k1} + F_{k0} - F_{k_{eq}} - F_{C_{eq}} \\ &\quad - F_e = M_1\ddot{x}_1 \\ -\frac{1}{2}c_1\dot{x}_1 - \frac{1}{2}c_1\dot{x}_1 + c_0(\dot{y} - \dot{x}_1) - c_{eq}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - \frac{1}{2}k_1x_1 \\ &\quad - \frac{1}{2}k_1x_1 + k_0(y - x_1) - k_{eq}(x_1 - x_2) \\ &\quad - k_{pe}(x_1 - x_2) = M_1\ddot{x}_1 \\ M_1\ddot{x}_1 + c_1\dot{x}_1 + c_0\dot{x}_1 + c_{eq}\dot{x}_1 - c_{eq}\dot{x}_2 - c_0\dot{y} + k_1x_1 + k_0x_1 - \\ &\quad k_0y + k_{eq}x_1 - k_{eq}x_2 + k_{pe}x_1 - k_{pe}x_2 = 0 \end{aligned}$$

$$M_1\ddot{x}_1 + (c_1 + c_0 + c_{eq})\dot{x}_1 - c_{eq}\dot{x}_2 + (k_0 + k_1 + k_{eq} + k_{pe})x_1 - (k_{eq} + k_{pe})x_2 = k_0y + c_0\dot{y} \quad (3.3)$$

Persamaan gerak translasi massa *absorber 1* dan *cantilever piezoelectric* ( $M_{eq}$ )

$$\begin{aligned} \sum F &= M_{eq}\ddot{x}_2 \\ Fk_{eq} + Fc_{eq} - Fk_2 - Fc_2 + F_e &= M_{eq}\ddot{x}_2 \\ M_{eq}\ddot{x}_2 - k_{eq}(x_1 - x_2) - c_{eq}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_2(x_2 - x_3) \\ &\quad + c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) - k_{pe}(x_1 - x_2) = 0 \\ M_{eq}\ddot{x}_2 - c_{eq}\dot{x}_1 + (c_{eq} + c_2)\dot{x}_2 - c_2\dot{x}_3 - (k_{eq} + k_{pe})x_1 + \\ (k_{eq} + k_2 + k_{pe})x_2 - k_2x_3 &= 0 \end{aligned} \quad (3.4)$$

Persamaan gerak translasi massa *absorber 2* ( $M_{a2}$ )

$$\begin{aligned} \sum F &= M_{a2}\ddot{x}_3 \\ Fk_2 + Fc_2 &= M_{a2}\ddot{x}_3 \\ M_{a2}\ddot{x}_3 - c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) - k_2(x_2 - x_3) &= 0 \\ M_{a2}\ddot{x}_3 + c_3\dot{x}_3 - c_3\dot{x}_2 + k_2x_3 - k_2x_2 &= 0 \end{aligned} \quad (3.5)$$

Matriks persamaan gerak sebagai berikut

$$\begin{aligned} &\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_{eq} & 0 \\ 0 & 0 & m_{a2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \end{Bmatrix} + \\ &\begin{bmatrix} (c_1 + c_0 + c_{eq}) & -c_{eq} & 0 \\ -c_{eq} & (c_{eq} + c_2) & -c_2 \\ 0 & -c_2 & c_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{Bmatrix} + \\ &\begin{bmatrix} (k_0 + k_1 + k_{eq} + k_{pe}) & -(k_{eq} + k_{pe}) & 0 \\ -(k_{eq} + k_{pe}) & (k_{eq} + k_2 + k_{pe}) & -k_2 \\ 0 & -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix} = \\ &\begin{Bmatrix} (k_0y + c_0\dot{y}) \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (3.6)$$

c. Persamaan Kelistrikan *Piezoelectric*

Pada penelitian ini material PZT *cantilever* disusun secara seri. Hal tersebut dikarenakan dengan susunan secara seri dapat menghasilkan nilai voltase lebih tinggi daripada susunan paralel. Voltase bangkitan mekanisme dirumuskan pada 3.7. Nilai gaya elektromekanik *piezoelectric* Fe dirumuskan pada 3.8.

$$V_p = \frac{3d_{31}E_p w_p t}{4C} X_p \quad (3.7)$$

$$F_e = n \Gamma V_p \quad (3.8)$$

$$= K_{pe} X_p \quad (3.9)$$

dimana :

$V_p$  = Voltase

*piezoelectric*

$d_{31}$  = Voltage constant

$E_p$  = Modulus elastisitas

$w_p$  = Lebar *piezoelectric*

$t$  = Tebal *piezoelectric*

$C$  = *Piezoelectric capacitance*

$X_p$  = Defleksi

*piezoelectric*

$n$  = Jumlah

*Piezoelectric*

$\Gamma$  = *electromechanical factor piezoelectric*

$K_{pe}$  = Konstanta pegas *piezoelectric* ekivalen

Arus bangkitan  $I_{mc}$  (ampere) *piezoelectric* pada mekanisme ini dapat dirumuskan dengan:

$$V_{mc} = L_{mc} \frac{dI_{mc}}{dt} + R_{mc} I_{mc} + \frac{1}{C_{mc}} \int I_{mc} dt + V_p \quad (3.10)$$

$$I_{mc} = \frac{1}{L_{mc}} (V_{mc} - R_{mc} I_{mc} - \frac{1}{C_{mc}} \int I_{mc} dt - V_p) \quad (3.11)$$

Daya bangkitan dari *piezoelectric* P (watt) dapat dirumuskan dengan :

$$P = V_p I_{mc} \quad (3.12)$$

### 3.2.3.3 Perencanaan Parameter

Parameter-parameter pada komponen penelitian direncanakan untuk dapat merancang masing-masing komponen pada rancang bangun nantinya. Parameter ini meliputi massa, frekuensi operasi dan natural, serta konstanta pegas dan redaman.

a. Frekuensi kerja dan amplitudo sumber getar

Motor DC sebagai sumber getar sistem utama dioperasikan pada variasi nilai yang direncanakan sesuai dengan respon yang ingin didapat. Frekuensi motor DC akan divariasikan pada tiga buah nilai frekuensi ( $F_1$ ,  $F_2$ , dan  $F_3$ ) yaitu frekuensi natural sistem utama, frekuensi panen [1] dan [2], dan frekuensi diluar frekuensi natural sistem. Amplitudo disk motor DC akan divariasikan tiga nilai ( $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ ) yang sesuai dengan panjang pegas utama dan penunjuk.

b. Massa utama dan *absorber* ( $M_1$ ,  $M_2$ , dan  $M_3$ )

Massa utama sistem ditentukan sesuai dengan perencanaan dan desain sistem. Desain yang direncanakan berukuran panjang, lebar, tebal dan massa tertentu. Material massa utama *steel*.

Massa absorber dalam sistem CPDVA yang dipakai dalam penelitian ini akan direncanakan sesuai dengan referensi [4] dan pustaka penelitian terdahulu [1] dan [3]. Massa *absorber* pertama  $M_2$  bernilai  $M_2 = 1/20 M_1$ .  $M_2$  tersebut ditambahkan massa *cantilever piezoelectric* dan menjadi massa equivalen ( $M_{eq}$ ). Massa *absorber* kedua  $M_3 = 3/40 M_1$ .

c. Konstanta kekakuan pegas ( $K_0$ ,  $K_1$ ,  $K_2$  dan  $K_3$ )

Nilai konstanta pegas penunjuk ( $K_0$ ) ditentukan dengan mempertimbangkan gaya dan respon yang dapat dihasilkan terhadap massa utama. Konstanta pegas utama ( $K_1$ ) ditentukan dengan kondisi awal (*initial condition*) pegas utama sudah terdefleksi sebagian. Nilai konstanta pegas *absorber*  $K_2$  dan  $K_3$  ditentukan simulasi MATLAB. Perhitungan pegas pada 3.13.

$$k = \frac{GD^4}{64N_a R^3}$$

Dimana :

$k$ = konstanta pegas (lb/in)	$N_a$ = jumlah lilitan aktif
$G$ = <i>shear modulus</i> (psi)	$R$ = radius coil utama (in)
$D$ = diameter kawat (in)	

d. Konstanta *damping* ( $C_0$ ,  $C_1$ ,  $C_a$  dan  $C_2$ )

Nilai konstanta *damping* ditentukan dengan melakukan pengujian *dampner* pada komponen *linear bushing* massa utama dan pada CPDVA. Pengujian dilakukan dengan memasang *probe accelerometer* pada komponen dan kemudian diberi beban, lalu diamati penurunan logaritmik respon getarannya. Perhitungan konstanta *dampner* pada persamaan 3.14.

$$C = \frac{1}{\pi} m \sqrt{\frac{k}{m}} \frac{1}{n} \ln \left( \frac{x_1}{x_{n+1}} \right)$$

Dimana:  $x_n$  = besar respon getaran ke-n  
 $x_{n+1}$  = besar respon  
getaran ke- n+1  
 $n$  = jumlah siklus  
getaran

### 3.2.4 Rancang Bangun

Pembuatan komponen terdiri dari pembuatan sistem utama dan pembuatan CPDVA. Pembuatan sistem utama dilakukan terlebih dahulu karena merupakan sistem sumber getaran yang akan direduksi oleh CPDVA nantinya.

Material penyusun sistem utama diantaranya besi untuk rangka, plat aluminium untuk disk motor dan massa utama, aluminium untuk *slider* pegas dan penunjuk, *steel* untuk *coil* pegas, *journal bearing* untuk *slider* pegas, serta motor DC sebagai sumber getar. Desain dapat dilihat pada gambar 3.2.

Material penyusun CPDVA yaitu:

1. *Case*

*Case* CPDVA berfungsi sebagai rangka untuk melekatnya

semua komponen. *Case* dibuat dengan bahan akrilik dengan massa jenis  $1,18 \text{ g/cm}^3$ . Desain *case* CPDVA pada gambar 3.8 di bawah.



Gambar 3. 8 *Case* CPDVA

## 2. *Coil* pegas *absorber*

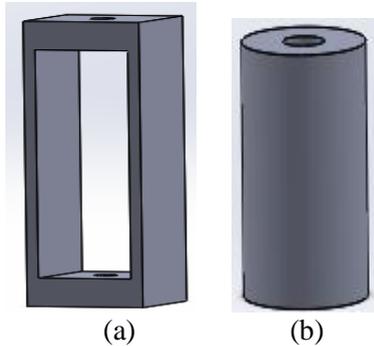
*Coil* pegas *absorber* direncanakan dibuat dengan material *steel* yang sesuai dengan bahan di pasaran. Dimensi *coil* dan lilitan ditentukan sesuai perencanaan pegas. Massa jenis *steel*  $7850 \text{ kg/m}^3$ . Gambar desain *coil* pegas *absorber* CPDVA pada 3.9.



Gambar 3. 9 *Coil* pegas *absorber* CPDVA

## 3. Massa *absorber*

Massa *absorber* 1 dibuat dari material akrilik bermassa jenis  $1,18 \text{ g/cm}^3$ . Massa tersebut berfungsi jadi massa *absorber* sekaligus pengikat *piezoelectric*. Massa *absorber* 2 dari material *steel*. Gambar massa *absorber* 1 dan 2 pada 3.10.



Gambar 3. 10 Massa *absorber* 1 (a) dan (b) *absorber* 2

#### 4. Poros pengarah

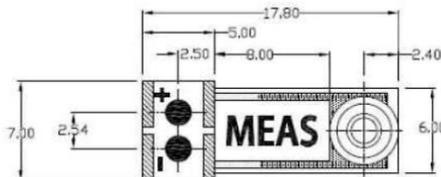
Poros pengarah dibuat dari bahan aluminium. Poros pengarah berfungsi sebagai pegarah massa *absorber* agar tidak menabrak dinding box CPVA. Gambar poros pengarah CPDVA pada 3.11.



Gambar 3. 11 Poros pengarah CPDVA

#### 5. *Cantilever piezoelectric* serta komponen elektrik

*Cantilever piezoelectric* sebagai komponen utama dalam penghasil energi listrik pada gambar 3.12 memiliki spesifikasi pada tabel 3.1.

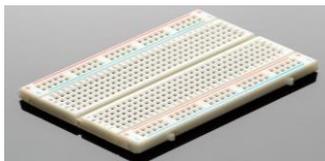


Gambar 3. 12 *Cantilever piezoelectric* MEAS

Tabel 3. 1 Spesifikasi Material Piezoelectric

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Massa piezoelectric	$M_{pzt}$	$6 \times 10^{-4}$	Kg
Ketebalan piezoelectric	$t$	$1 \times 10^{-3}$	m
Lebar piezoelectric	$w_{pzt}$	$6 \times 10^{-3}$	m
Panjang piezoelectric	$L_{pzt}$	$12 \times 10^{-3}$	m
Kapasitansi	$C_{pzt}$	$244 \times 10^{-10}$	F
Konstanta regangan piezoelectric	$d_{31}$	$110 \times 10^{-12}$	C/N
Electromechanical coupling factor	$k_{31}$	12	%
Kontanta pegas piezoelectric	$k_{pzt}$	$5,75 \times 10^{-1}$	N/m
Modulus Young	$E$	$3 \times 10^9$	N/m <sup>2</sup>
Voltage Sensitivity (baseline)	$V_m$	1.1	V/gr
Resonance Frequency	$f_r$	75	Hz
Voltage Sensitivity (at resonance)	$V_r$	6	V/g
Inertial Mass	$I$	0.3	Gram

Komponen elektrik sebagai penyalur listrik bangkitan dari *piezoelectric* terdiri dari *photoboard* sebagai sirkuit *piezoelectric* dan kabel sebagai penghubung dengan *probe*. Komponen elektrik pada gambar 3.13.



(a)

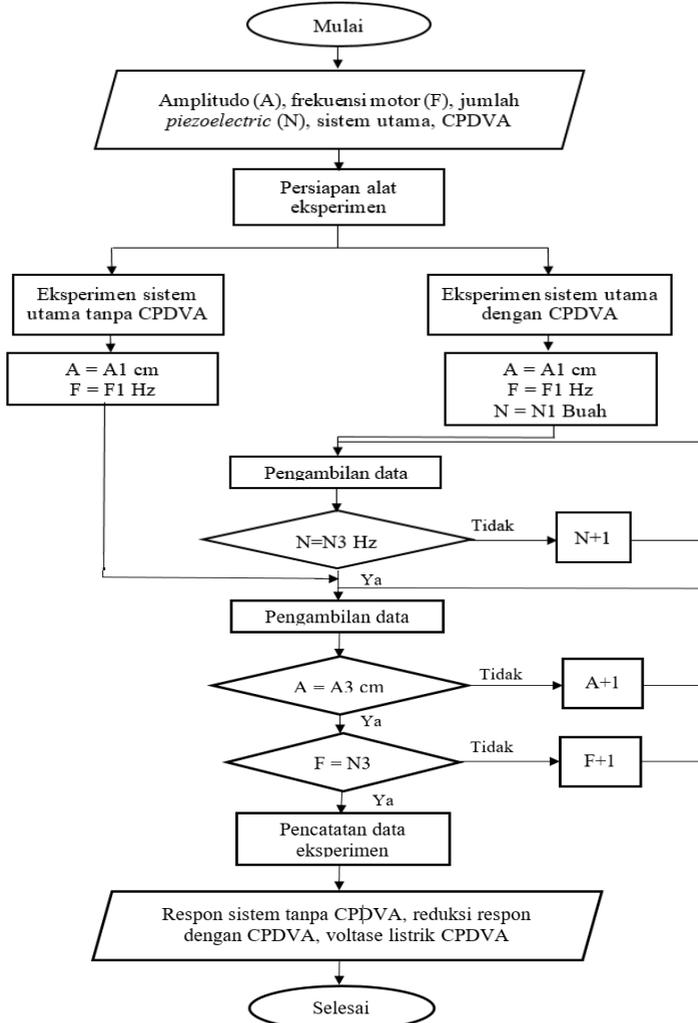


(b)

Gambar 3. 13 Komponen elektrik (a) *Photoboard* dan (b) kabel

### 3.2.5 Eksperimen

Eksperimen dilakukan sesuai dengan tahap-tahap seperti pada gambar 3.14 di bawah.



Gambar 3. 14 *Flowchart* eksperimen

Tahap awal eksperimen adalah melakukan persiapan pada sistem utama dan CPDVA. Persiapan sistem adalah melakukan *setting inverter* untuk *power supply* motor, dan *RPM meter* untuk membaca putaran.

Tahap selanjutnya adalah eksperimen yang dibagi menjadi dua tahap yaitu:

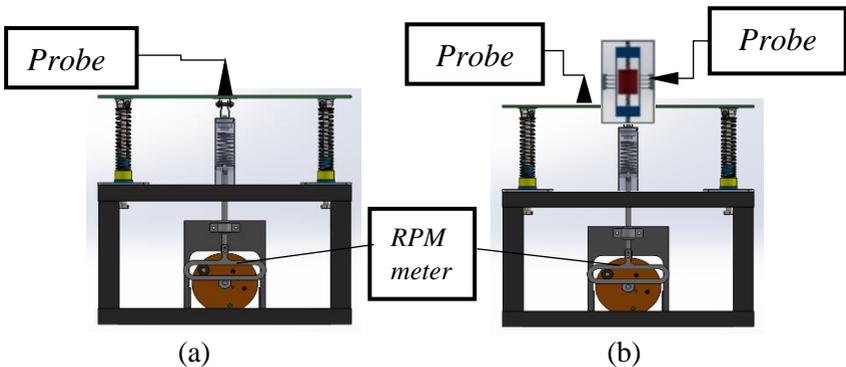
1. Eksperimen respon getaran sistem utama tanpa CPDVA  
Untuk eksperimen sistem tanpa CPDVA, hal yang dilakukan adalah melakukan *setting inverter* motor untuk variasi nilai masing-masing frekuensi putar dan jarak eksitasi pada disk untuk variasi amplitudo. *RPM meter* digunakan untuk membaca putaran motor. *Probe accelerometer* untuk membaca respon getaran sistem, diletakkan pada massa utama.
2. Eksperimen reduksi respon getaran sistem utama dengan CPDVA dan voltase CPDVA.

Untuk eksperimen sistem dengan CPDVA dilakukan dengan meletakkan CPDVA pada titik berat massa utama.

Eksperimen dilakukan di semua nilai variasi yaitu amplitudo, frekuensi motor, dan jumlah *piezoelectric* CPDVA.

Penggantian jumlah *piezoelectric* CPDVA dilakukan dengan menambah *piezoelectric* pada rangkaian CPDVA.

Pengambilan data dalam eksperimen menggunakan alat *probe accelerometer* dan diletakkan pada titik pusat massa utama untuk pengujian respon massa utama tanpa CPDVA dan pada massa utama di samping CPDVA untuk pengujian dengan CPDVA. Fungsi *probe accelerometer* adalah membaca nilai respon percepatan getaran sistem. Untuk pembacaan nilai voltase CPDVA digunakan *oscilloscope* yang dihubungkan dengan kabel dari CPDVA sehingga dapat terbaca grafik pada layar *oscilloscope*. Posisi pengujian pada gambar 3.15.



Gambar 3. 15 Posisi pengujian dengan probe accelerometer (a) sistem utama tanpa CPDVA dan (b) sistem utama dengan CPDVA

Selama eksperimen akan dicatat data hasil pengujian untuk masing-masing variasi pada tabel dan kemudian dibuat ke bentuk grafik. Tabel hasil eksperimen dapat dilihat pada tabel 3.2 di atas. Grafik yang akan dibuat yaitu :

1. Grafik respon sistem utama tanpa CPDVA terhadap variasi amplitudo sumber getar, frekuensi sumber getar.
2. Grafik reduksi respon sistem utama terhadap variasi amplitudo sumber getar, frekuensi sumber getar dan jumlah *piezoelectric*.
3. Grafik voltase listrik bangkitan CPDVA terhadap variasi amplitudo sumber getar, frekuensi sumber getar dan jumlah *piezoelectric*.
4. Grafik energi densitas CPDVA terhadap variasi amplitudo sumber getar, frekuensi sumber getar dan jumlah *piezoelectric*.

Tabel 3. 2 Data eksperimen respon sistem

Tanpa CPDVA (acc)				Dengan CPDVA (acc dan voltase)						
Frekuensi (rad/s)	Amplitudo (m)			NPZT (buah)	Amplitudo (m)					
	A1	A2	A3		A1		A2		A3	
	acc (m/s <sup>2</sup> )	acc (m/s <sup>2</sup> )	Acc (m/s <sup>2</sup> )		acc (m/s <sup>2</sup> )	V (volt)	Acc (m/s <sup>2</sup> )	V (volt)	acc (m/s <sup>2</sup> )	V (volt)
F1				N1						
				N2						
				N3						
F2				N1						
				N2						
				N3						
F3				N1						
				N2						
				N3						

### 3.2.6 Analisa Data dan Pembahasan

Data hasil eksperimen sistem akan dianalisa dan dibahas sesuai dengan dasar teori yang ada. Dari hasil analisa data dan pembahasan akan diketahui hubungan masing-masing variasi terhadap reduksi respon sistem utama dan listrik bangkitan CPDVA. Dari penjelasan analisa dan pembahasan tersebut akan digunakan untuk menarik kesimpulan penelitian.

### 3.2.7 Kesimpulan

Dari hasil analisa yang telah dilakukan akan dibuat kesimpulan dari penelitian ini. Kesimpulan menyangkut poin penting pembahasan hasil eksperimen serta menjawab tujuan penelitian. Akan dibuat juga saran untuk penelitian selanjutnya.

***“Halaman ini sengaja dikosongkan”***

## **BAB 4**

### **ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN**

#### **4.1 Perencanaan Sistem**

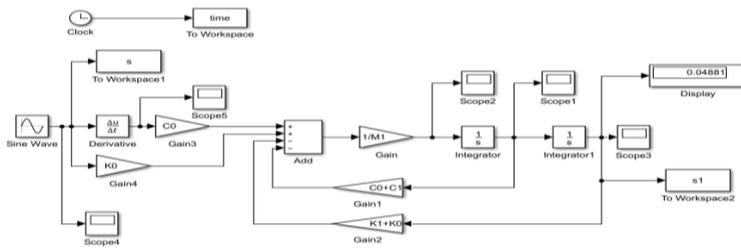
Perencanaan sistem telah dilakukan dan didapat hasil berupa rencana rancangan sistem utama dan CPDVA. Tahapan dalam perencanaan yang telah dilakukan diantaranya adalah pemodelan sistem utama dan CPDVA kemudian penentuan parameter penelitian. Hasil dari perencanaan sistem ini digunakan untuk tahap perancangan sistem.

##### **4.1.1 Pemodelan Sistem**

Pada sub bab ini menjelaskan tentang pemodelan sistem utama tanpa CPDVA dan sistem dengan CPDVA. Pemodelan sistem berawal dari penurunan persamaan matematis getaran kemudian didapat matriks yang ditunjukkan pada subbab 3.2.3.2 dengan persamaan 3.1 sampai 3.6. Selanjutnya pada subbab ini akan dijelaskan dibuat blok diagram dan di jalankan pada Simulink MATLAB. Pemodelan juga dilakukan dengan membuat koding pada *editor* MATLAB untuk mendapat grafik *bode diagram* sistem. Pemodelan ini dilakukan untuk mendapatkan nilai beberapa parameter seperti konstanta pegas dan *damp absorber* yang dapat mereduksi optimal dari hasil simulasi. Pemodelan juga berfungsi untuk mengetahui perbandingan data hasil simulasi dan eksperimen.

##### **4.1.1.1 Sistem Utama tanpa CPDVA**

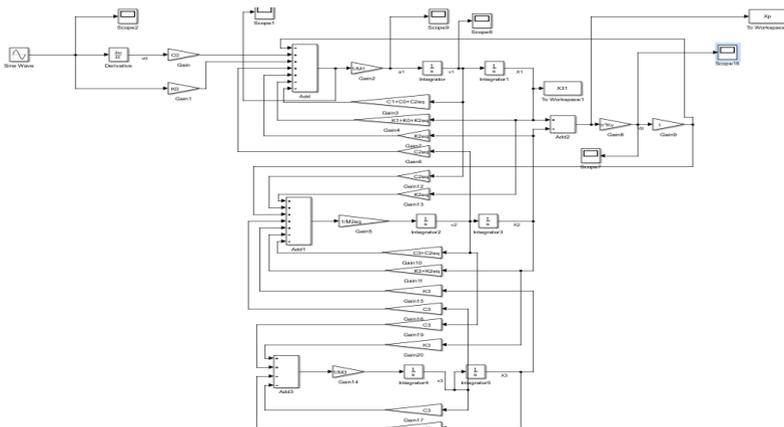
Untuk sistem utama tanpa CPDVA, telah dibuat blok diagram pada *software* Simulink MATLAB adalah sebagai berikut pada gambar 4.1 di bawah. Hasil simulasi sistem utama tanpa CPDVA dianalisa untuk mengetahui karakteristik respon awal sistem.



Gambar 4.1 Blok diagram sistem utama tanpa CPDVA pada Simulink

#### 4.1.1.2 Sistem Utama dengan CPDVA

Blok diagram sistem utama yang ditambahkan CPDVA yang dibuat pada *software* Simulink MATLAB adalah sebagai berikut pada gambar 4.2 di bawah. Blok diagram disimulasikan untuk mengetahui respon terhadap masing-masing massa. Parameter awal yang dimasukkan yaitu nilai massa, konstanta pegas, *dampers* penunjuk dan utama, serta dua massa *absorber*. Kemudian parameter lain seperti konstanta pegas dan *dampers absorber* yang optimum diperoleh dari hasil simulasi pemodelan.



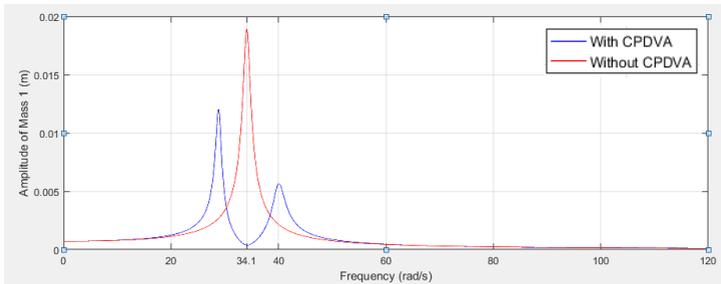
Gambar 4.2 Blok diagram sistem utama dengan CPDVA

Hasil dari simulasi Simulink tersebut didapatkan berupa grafik respon percepatan sistem utama dan voltase bangkitan dalam diagram *scope* Simulink. Sedangkan hasil dari koding MATLAB adalah didapakkannya *bode diagram* atau *frequency domain diagram* sistem dengan nilai parameter yang optimum. Nilai masing-masing parameter tersebut pada tabel 4.1.

Tabel 4.1 Parameter Penelitian optimum hasil simulasi

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Massa Utama	$M_1$	7	Kg
Massa Absorber 1	$M_a$	0.3548	Kg
Massa Absorber 2	$M_{a_2}$	0.525	Kg
Koefisien Pegas Penunjuk	$K_0$	146	N/m
Koefisien Pegas Utama	$K_1$	8000	N/m
Koefisien Pegas Absorber 1	$K_a$	2000	N/m
Koefisien Pegas Absorber 2	$K_2$	1000	N/m
Koefisien Redaman Penunjuk	$C_0$	2	N.s/m
Koefisien Redaman Utama	$C_1$	8	N.s/m
Koefisien Redaman Absorber 1	$C_a$	2	N.s/m
Koefisien Redaman Absorber 2	$C_2$	2	N.s/m

Dari nilai masing-masing parameter di atas, didapat grafik *Bode diagram* sistem utama dengan CPDVA yang sesuai pada gambar 4.3 di bawah. Variasi yang dimasukkan pada simulasi tersebut adalah jumlah *piezoelectric* 4 buah dan amplitudo 4 cm.



*Gambar 4.3 Bode diagram sistem utama tanpa CPDVA dan dengan CPDVA hasil simulasi*

Pada grafik di atas, garis yang berwarna merah adalah respon massa utama tanpa CPDVA, dan garis biru adalah respon massa utama dengan CPDVA. Nilai frekuensi natural tanpa CPDVA adalah 34,1 rad/s dan terdapat defleksi maksimum pada massa utama. Untuk sistem dengan CPDVA menghasilkan 3 frekuensi natural yaitu pada 28,86 rad/s, 40 rad/s, dan 97,16 rad/s. Dapat diketahui dari grafik diatas bahwa pada frekuensi natural sistem utama tanpa CPDVA, dapat direduksi maksimal dengan tambahan CPDVA dari 0,019 m menjadi 0,0005 m.

#### **4.1.2 Parameter Penelitian**

Parameter penelitian meliputi massa, frekuensi operasi, amplitudo, serta konstanta pegas dan redaman. Acuan awal nilai parameter adalah dari hasil simulasi MATLAB pada tabel 4.1 subbab 4.1.1 di atas. Kemudian setelah pembelian dan pembuatan komponen, nilai masing-masing parameter komponen tersebut diuji dan didapat nilai riil parameter hasil pengujian. Berikut akan dijabarkan hasil pengujian yang telah dilakukan pada masing-masing parameter.

##### **a. Frekuensi kerja dan amplitudo sumber getar**

Frekuensi motor DC akan divariasikan pada tiga buah nilai frekuensi (F1, F2, dan F3) yaitu frekuensi natural sistem utama,

frekuensi panen, dan frekuensi diluar frekuensi natural sistem. Pengujian nilai frekuensi dilakukan dengan alat *tachometer* yang ditembak pada disk poros motor DC. Didapat nilai frekuensi operasi yaitu 32 rad/s, 36,5 rad/s, dan 39 rad/s. Amplitudo disk motor DC divariasikan tiga nilai yaitu 2 cm, 3 cm dan 4 cm.

b. Massa utama dan *absorber* ( $M_1$ ,  $M_a$ , dan  $M_{a2}$ )

Massa utama sistem telah ditentukan sesuai dengan perencanaan dan desain sistem. Desain massa utama berukuran panjang x lebar x tebal adalah 50 cm x 50 cm x 5 mm. Berat massa utama tersebut adalah 7 Kg. Material massa utama aluminium.

Rincian massa utama adalah:

Massa plat dan rel : 5,2 Kg

Massa *spring rod* : 0,8 Kg

Massa selongsong pegas : 0,6 Kg

Massa tambahan : 0,4 Kg

Pada sistem CPDVA, Massa *absorber* pertama  $M_a$  bernilai 0,35 Kg dengan tambahan massa *piezoelectric*. Massa *absorber* kedua  $M_{a2}$  bernilai 0,525 Kg.

c. Konstanta kekakuan pegas ( $K_0$ ,  $K_1$ ,  $K_a$  dan  $K_2$ )

Pegas yang telah direncanakan sesuai dengan nilai pada parameter awal kemudian dibeli pada toko pembuat pegas. Konstanta pegas yang telah dibeli tersebut kemudian diuji sehingga didapat nilai riilnya. Berikut dijabarkan pengujian konstanta kekakuan pegas masing-masing sistem.  $K_0$  adalah konstanta pegas penunjuk,  $K_1$  adalah konstanta pegas utama,  $K_a$  adalah konstanta pegas massa *absorber* 1 dan  $K_2$  adalah konstanta pegas massa *absorber* 2. Ditampilkan contoh perhitungan konstanta pegas  $K_0$  di bawah ini dengan menggunakan rumus Hukum Hooke pada persamaan 4.1. Tabel data pengujian  $K_0$  pada tabel 4.2. Grafik lineratitas pengujian  $K_0$  pada gambar 4.4.

$$F = k \cdot \Delta X \quad (4.1)$$

Data pengujian  $K_0$

Panjang awal pegas  $x_1 = 0,13 \text{ m}$

Panjang akhir pegas  $x_2 = 0,1164 \text{ m}$

Selisih panjang pegas  $= 0,0139 \text{ m}$

Berat beban  $= 0,201 \text{ Kg}$

Gaya  $= 1,9781 \text{ N}$

Maka didapat nilai

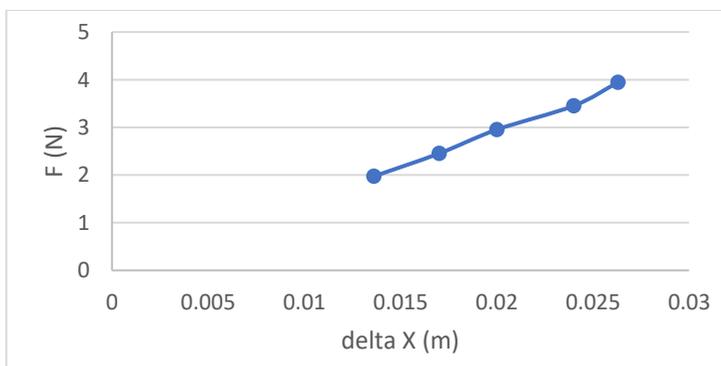
$$1,9781 \text{ N} = k \cdot 0,0139 \text{ m}$$

$$k = 144,986 \text{ N/m}$$

Dari hasil pengujian tersebut, didapat nilai rata-rata  $K_0$  adalah  $146 \text{ N/m}$ , nilai  $K_1$  total adalah  $9202 \text{ N/m}$ , nilai  $K_2$  adalah  $2655 \text{ N/m}$ , dan nilai  $K_3$  adalah  $1553 \text{ N/m}$ .

Tabel 4.2 Data hasil pengujian konstanta pegas  $K_0$

$X_1$ (m)	$X_2$ (m)	Delta X	M (Kg)	F (N)	K (N/m)
0,13	0,1164	0,0139	0,201	1,97181	144,986
0,13	0,113	0,017	0,25	2,4525	144,2647
0,13	0,11	0,02	0,301	2,95281	147,6395
0,13	0,106	0,024	0,352	3,45312	143,88
Rata-rata $K_0$					146,1438



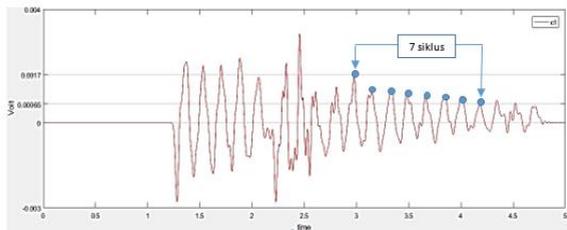
Gambar 4.4 Grafik Hubungan Gaya dan Regangan Pegas  $K_0$

d. Konstanta *damping* ( $C_0$ ,  $C_1$ ,  $C_a$  dan  $C_2$ )

Nilai konstanta *damping* telah ditentukan dengan melakukan pengujian pada sistem utama dan pada CPDVA. Pengujian dilakukan dengan memasang *probe accelerometer* pada komponen dan diberi simpangan awal, lalu diamati penurunan logaritmik respon getarannya.

$C_0$  adalah konstanta *damping* penunjuk,  $C_1$  adalah konstanta *damping* utama,  $C_a$  adalah konstanta *damping* massa *absorber* 1 dan  $C_2$  adalah konstanta *damping* massa *absorber* 2. Pengujian metode *logarithmic decrement* ditampilkan di bawah ini untuk *damper*  $C_1$  dengan perhitungan konstanta *damper* pada persamaan 4.2. Tampilan plot data yang telah di proses *filtering and smoothing* dengan MATLAB pada gambar 4.5 di bawah. Data pengujian pada tabel 4.3 di bawah.

$$C = \frac{1}{\pi} m \sqrt{\frac{k}{m} \frac{1}{n}} \ln \left( \frac{x_1}{x_{n+1}} \right)$$



Gambar 4.5 Hasil Pengujian damper  $C_1$  yang telah di filtering dan smoothing MATLAB

Data pengujian :

$$n = 7$$

$$x_n = 0,0017$$

$$x_{n+1} = 0,00065$$

$$k = 9202 \text{ N/m}$$

$$m = 6,4 \text{ Kg}$$

maka nilai  $C$

$$C = \frac{1}{\pi} 6,4 \sqrt{\frac{9202}{6,4} \frac{1}{7}} \ln \left( \frac{0,0017}{0,00065} \right)$$

$$C = 10,61 \text{ Ns/m}$$

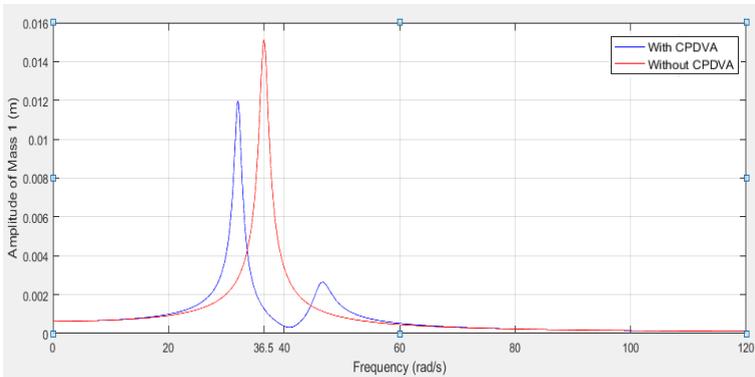
Tabel 4.3 Data hasil pengujian konstanta pegas  $C_1$ 

	Volt $_1$ (n)	Volt $_2$ (n+1)	Siklus (n)	Massa (Kg)	Konstanta Pegas (K)	C (Ns/m)
$C_1$	0,0017	0,00065	7	6,4	9202	10,61
	0,0068	0,0032	6	6,4	9202	9,7
	0,0064	0,00028	7	6,4	9202	9,12
	Rata rata $C_1$					

Data hasil pengujian lain untuk  $C_0$ ,  $C_1$ ,  $C_a$ , dan  $C_2$  dapat dilihat pada lampiran. Dari pengujian dapat diketahui bahwa nilai konstanta *dampner* yang digunakan  $C_0$ ,  $C_1$ ,  $C_a$ , dan  $C_2$  adalah 1,8 Ns/m, 9,8 Ns/m, 2,47 Ns/m, dan 3,47 Ns/m. Data nilai parameter riil hasil pengujian secara keseluruhan ditunjukkan pada tabel 4.4 di bawah. *Bode diagram* baru dengan nilai parameter riil dengan jumlah *piezoelectric* 4 buah dan amplitudo 4 cm pada gambar 4.6.

Tabel 4. 4 Parameter penelitian riil hasil pengujian

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Massa Utama	$M_1$	7	Kg
Massa Absorber 1	$M_a$	0.35	Kg
Massa Absorber 2	$M_{a_2}$	0.525	Kg
Koefisien Pegas Penujuk	$K_0$	146	N/m
Koefisien Pegas Utama	$K_1$	9202	N/m
Koefisien Pegas Absorber 1	$K_a$	2655	N/m
Koefisien Pegas Absorber 2	$K_2$	1553	N/m
Koefisien Redaman Penunjuk	$C_0$	1,8	N.s/m
Koefisien Redaman Utama	$C_1$	9,8	N.s/m
Koefisien Redaman Absorber 1	$C_a$	2,47	N.s/m
Koefisien Redaman Absorber 2	$C_2$	3,47	N.s/m



Gambar 4.6 Bode diagram sistem utama tanpa CPDVA dan dengan CPDVA parameter riil

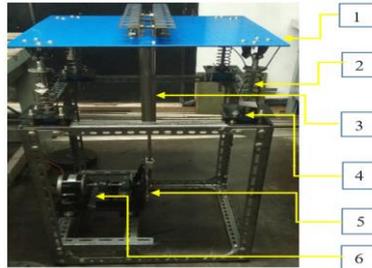
Pada grafik di atas, garis yang berwarna merah adalah respon massa utama tanpa CPDVA, dan garis biru adalah respon massa utama dengan CPDVA. Nilai frekuensi natural tanpa CPDVA menjadi 36,5 rad/s. Untuk sistem dengan CPDVA menghasilkan 3 frekuensi natural yaitu pada 32 rad/s, 46,4 rad/s, dan 115,6 rad/s. Dari grafik dapat diketahui bahwa dengan parameter riil, reduksi pada frekuensi natural sistem tanpa CPDVA tidak dapat maksimal karena nilai amplitudo sistem dengan CPDVA terendah bukan pada frekuensi natural sistem tanpa CPDVA. Dengan tambahan CPDVA pada frekuensi 36,5 rad/s, respon amplitudo perpindahan sistem utama dapat direduksi dari 0,015 m menjadi 0,001 m.

## 4.2 Perancangan Sistem

Perancangan sistem yang telah dilakukan diantaranya adalah sistem utama sebagai komponen yang akan direduksi getarannya dan sistem *Cantilever Piezoelectrci Double Vibration Absorber* (CPDVA) sebagai pereduksi getaran dan penghasil listrik. Sistem dirancang dan dibuat di laboratorium Teknik Mesin ITS. Beberapa komponen seperti pegas, *linear bushing*, motor DC, dan lainnya didapat dari pembelian pada beberapa toko komponen.

### 4.2.1 SisteSm Utama

Tampilan sistem utama yang telah dirancang dapat dilihat pada gambar 4.7.



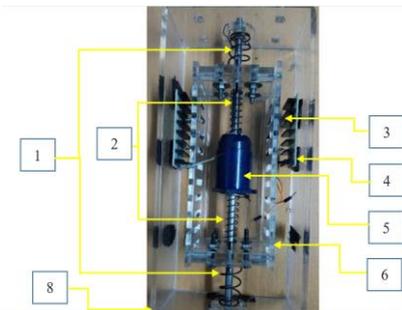
Gambar 4.7 Sistem utama

Keterangan:

- |    |                |    |                       |
|----|----------------|----|-----------------------|
| 1. | Massa utama    | 4. | <i>Linear Bushing</i> |
| 2. | Pegas          | 5. | <i>Disc motor</i>     |
| 3. | Pegas Penunjuk | 6. | Motor DC              |

### 4.2.2 *Cantilever Piezoelectric Double Vibration Absorber (CPDVA)*

Tampilan CPDVA yang telah dirancang dapat dilihat pada gambar 4.8.



Gambar 4.8 CPDVA tampak depan

Keterangan :

- |   |                         |   |                         |
|---|-------------------------|---|-------------------------|
| 1 | Pegas <i>absorber 1</i> | 2 | Pegas <i>absorber 2</i> |
|---|-------------------------|---|-------------------------|

- |   |                       |   |                |
|---|-----------------------|---|----------------|
| 3 | PZT <i>cantilever</i> | 7 | Poros Pengarah |
| 4 | PCB                   | 8 | <i>Case</i>    |
| 5 | Massa Absorber 2      |   |                |
| 6 | Massa Absorber 1      |   |                |

Material penyusun CPDVA yaitu:

7. *Case*

Dimensi panjang x lebar x tinggi 8 cm x 13 cm x 30 cm.

8. *Coil pegas absorber*

Dari data pengujian parameter yang dijabarkan pada sub bab 4.1.2, didapat nilai konstanta pegas *absorber* 1 ( $K_2$ ) = 2648 N/m, dan nilai konstanta pegas *absorber* 2 ( $K_3$ ) = 1553 N/m.

9. *Massa absorber*

Massa *absorber* 1 ( $M_1$ ) berat 0.35 Kg. Massa *absorber* 2 ( $M_2$ ) berat 0.525 Kg.

10. Poros pengarah

Poros pengarah bahan aluminium dengan panjang 34 cm.

11. *Cantilever piezoelectric*

*Piezoelectric* sebagai komponen penghasil listrik serta menjadi nilai massa dan konstanta pegas *absorber* tambahan untuk massa *absorber* 1.

12. Sirkuit *piezoelectric*

### 4.3 Analisa dan Pembahasan

Analisa dilakukan mengenai proses dan hasil dari pemodelan simulasi software MATLAB dan dari data eksperimen. Kedua metode tersebut dianalisa dan dibahas hasil masing-masing sehingga didapat karakteristik respon yang diinginkan.

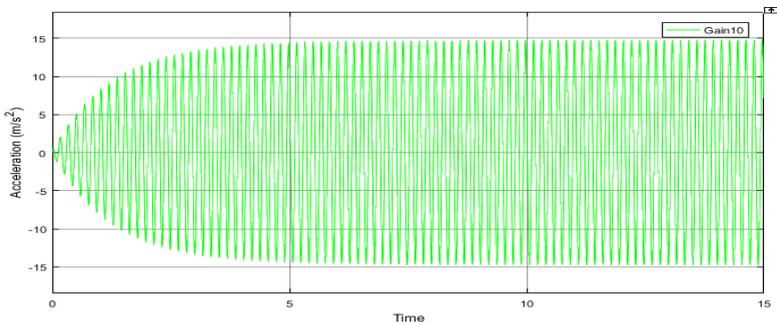
#### 4.3.1 Analisa Pemodelan

Pemodelan dengan software MATLAB adalah dengan menjalankan simulasi blok diagram yang telah dibuat pada Simulink. Simulasi dilakukan pada sistem utama tanpa CPDVA dan pada sistem utama dengan CPDVA. Dari hasil pemodelan berupa grafik tersebut dapat diketahui karakteristik respon sistem.

Grafik dan pembahasan hasil pemodelan akan dibandingkan dengan hasil eksperimen nantinya.

#### 4.3.1.1 Pemodelan Sistem Utama tanpa CPDVA

Simulasi yang pertama dilakukan adalah pada sistem utama tanpa CPDVA. Simulasi pada Simulink MATLAB menunjukkan respon sistem utama terhadap waktu ditampilkan dan dianalisa pada subbab ini. Variasi yang dilakukan adalah variasi frekuensi dan amplitudo. Berikut akan ditunjukkan hasil simulasi sistem utama tanpa CPDVA pada variasi frekuensi 36,5 rad/s amplitudo 3 cm pada gambar 4.9.

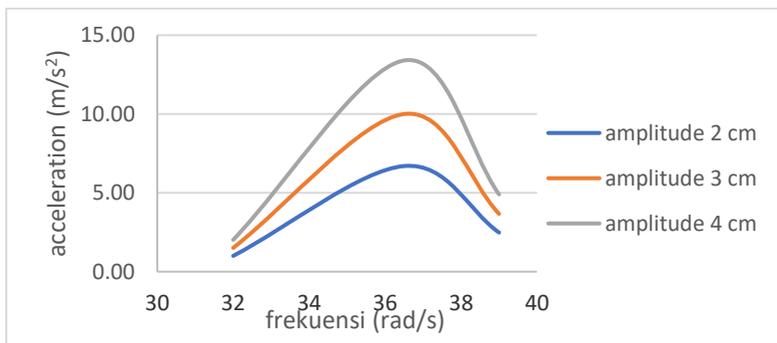


Gambar 4.9 Respon percepatan sistem utama tanpa CPDVA pada frekuensi 36,5 rad/s dan amplitudo 3 cm hasil simulasi

Gambar 4.9 diatas adalah grafik hasil simulasi respon percepatan massa utama tanpa CPDVA pada frekuensi operasi 36,5 rad/s dengan amplitudo 3 cm. Respon percepatan dari sistem utama mencapai *steady* setelah 6 detik dan memiliki nilai *root mean square* (RMS) setelah *steady* adalah 10 m/s<sup>2</sup>. Saat frekuensi 36,5 rad/s tersebut adalah frekuensi natural sistem utama tanpa CPDVA, dimana respon percepatan mencapai maksimum. Respon keseluruhan untuk sistem tanpa CPDVA terdapat pada tabel 4.5.

Tabel 4.5 RMS respon percepatan sistem utama tanpa CPDVA hasil simulasi

Frekuensi (rad/s)	Amplitudo (cm)		
	2	3	4
	Acc (m/s <sup>2</sup> )	Acc (m/s <sup>2</sup> )	Acc (m/s <sup>2</sup> )
32	1	1,51	2,02
36,5	6,7	10	13,4
39	2,48	3,67	4,9



Gambar 4.10 Grafik RMS respon percepatan sistem utama tanpa CPDVA terhadap frekuensi variasi amplitudo hasil simulasi

Gambar 4.10 adalah grafik hasil simulasi RMS respon percepatan sistem utama tanpa CPDVA terhadap frekuensi dengan variasi amplitudo 2 cm, 3 cm, dan 4 cm. Tren grafik tersebut adalah parabolik yaitu awalnya naik sampai maksimum lalu turun, dengan nilai maksimum pada frekuensi 36,5 rad/s. Hal tersebut karena frekuensi 36,5 rad/s tersebut adalah frekuensi natural sistem utama tanpa CDPVA sehingga respon massa menjadi maksimum. Dari grafik dapat diketahui bahwa semakin besar amplitudo, maka respon percepatan sistem utama juga semakin tinggi. Hal tersebut karena pada amplitudo tinggi, maka sistem menerima gaya eksitasi yang lebih besar. Respon tertinggi pada amplitudo 4 cm. Nilai

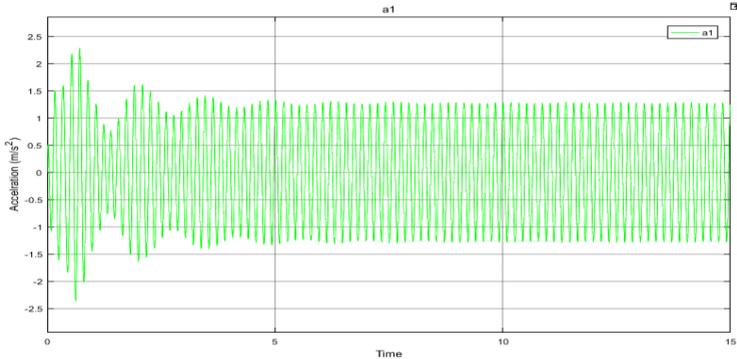
RMS respon percepatan pada amplitudo 4 cm dan frekuensi 36,5 rad/s adalah 13,4 m/s<sup>2</sup>.

#### 4.3.1.2 Pemodelan Sistem Utama dengan CPDVA

Pemodelan selanjutnya adalah terhadap sistem utama dengan tambahan CPDVA. Pemodelan dengan simulasi telah dilakukan dan didapat respon getaran untuk masing-masing variasi eksperimen. Respon getaran sistem utama yang akan dianalisa adalah respon percepatan massa utama dan voltase bangkitan.

##### 4.3.1.2.1 Respon Percepatan

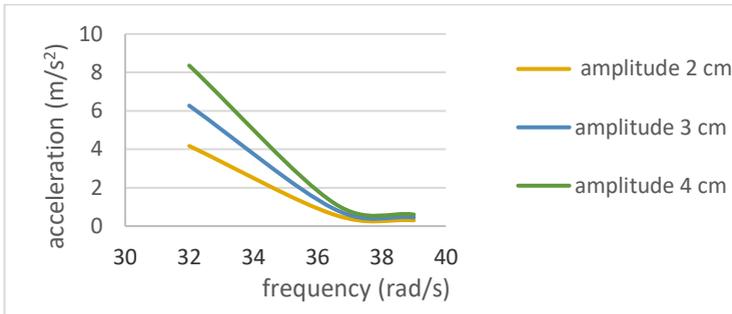
Pemodelan pada respon percepatan sistem utama akan dijabarkan pada subbab ini. Variasi yang dilakukan adalah variasi frekuensi, amplitudo dan jumlah *piezoelectric*. Respon percepatan sistem utama dengan CPDVA hasil simulasi pemodelan pada variasi frekuensi 36,5 rad/s, amplitudo 3 cm, dan 8 buah pada gambar 4.11.



Gambar 4.11 Respon percepatan sistem utama dengan CPDVA pada frekuensi 36,5 rad/s, amplitudo 3 cm, dan *piezoelectric* 8 buah hasil simulasi

Gambar 4.11 adalah grafik hasil simulasi respon percepatan sistem utama dengan CPDVA pada frekuensi operasi 36,5 rad/s, amplitudo 3 cm dan jumlah *piezoelectric* 8 buah. Respon

percepatan dari sistem utama tersebut mencapai *steady* setelah 6 detik dengan nilai RMS adalah  $0,9 \text{ m/s}^2$ . Dibandingkan dengan respon sistem tanpa CPDVA pada frekuensi  $36,5 \text{ rad/s}$  tersebut, respon sistem dengan CPDVA mengalami penurunan daripada sistem tanpa CPDVA. Penurunan respon percepatan  $9,1 \text{ m/s}^2$ .



Gambar 4.12 Grafik RMS respon percepatan sistem utama dengan CPDVA pada piezoelectric berjumlah 8 buah terhadap frekuensi variasi amplitudo hasil simulasi

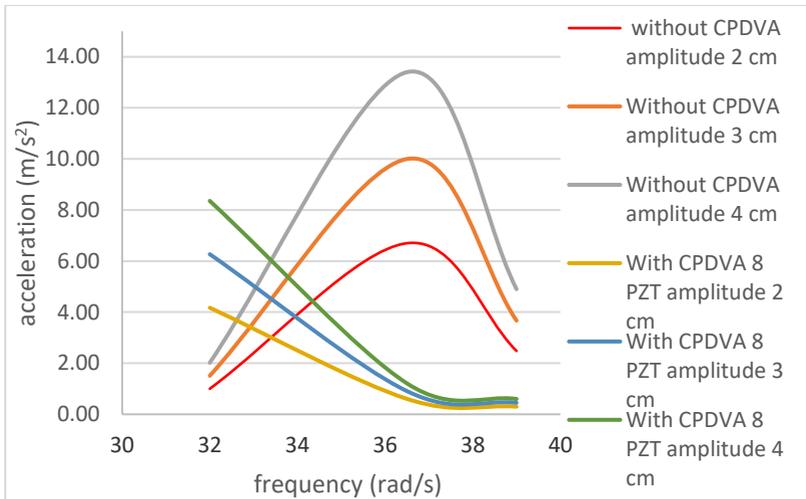
Gambar 4.12 diatas adalah grafik hasil simulasi RMS respon percepatan sistem utama dengan CPDVA pada jumlah *piezoelectric* 8 buah dengan variasi amplitudo 2 cm, 3 cm, dan 4 cm. Dari grafik tersebut dapat diketahui bahwa semakin besar amplitudo, maka respon percepatan sistem utama juga semakin tinggi. Hal tersebut karena pada amplitudo tinggi, maka sistem menerima gaya eksitasi yang tinggi pula dari pegas penunjuk. Respon tertinggi adalah pada amplitudo 4 cm. Dari grafik tersebut juga dapat diketahui bahwa semakin tinggi frekuensi, maka respon percepatan sistem yang dihasilkan semakin kecil. Hal tersebut karena gerakan sistem terbesar adalah pada frekuensi natural sistem utama dengan CPDVA yaitu pada  $32 \text{ rad/s}$ . Respon percepatan terbesar dihasilkan pada frekuensi  $32 \text{ rad/s}$  tersebut. Untuk grafik respon percepatan terhadap

frekuensi dengan variasi amplitude pada jumlah *piezoelectric* lainnya terdapat di lampiran.

Tabel 4.6 RMS respon dan reduksi sistem dengan CPDVA semua variasi hasil simulasi

Frekuensi (rad/s)	piezoelect ric (buah)	Amplitudo (cm)					
		2		3		4	
		respon (m/s <sup>2</sup> )	reduksi (%)	respon (m/s <sup>2</sup> )	reduksi (%)	respon (m/s <sup>2</sup> )	reduksi (%)
32	4	4,181	-318,1	6,28	-315,89	8,38	-318
	6	4,18	-316,8	6,275	-315,56	8,37	-314,36
	8	4,173	-317,3	6,27	-315,23	8,357	-313,71
36,5	4	0,607	90,94	0,909	90,91	1,213	90,96
	6	0,605	90,96	0,908	90,92	1,211	90,963
	8	0,604	90,99	0,9072	90,93	1,21	91,97
39	4	0,3013	87,85	0,451	87,71	0,6022	87,71
	6	0,301	87,86	0,45	87,738	0,602	87,714
	8	0,3	87,9	0,451	87,71	0,6	87,76

Dari tabel 4.6 di atas dapat diketahui bahwa reduksi respon sistem utama terbesar bernilai 90,97 % pada frekuensi 36,5 rad/s, amplitudo 4 cm, dan jumlah *piezoelectric* 8 buah. Hal tersebut menunjukkan bahwa CPDVA dapat mereduksi maksimal pada frekuensi natural sistem tanpa CDPVA. Sedangkan untuk nilai reduksi minus, sistem utama dengan CPDVA mengalami penambahan respon karena berada pada frekuensi natural sistem dengan CPDVA. Nilai penambahan respon tertinggi 318,1 % pada frekuensi 32 rad/s, amplitudo 2 cm, dan jumlah *piezoelectric* 4 buah.

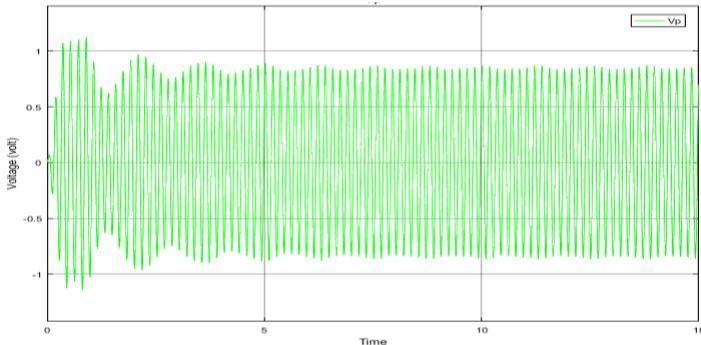


Gambar 4.13 Perbandingan grafik RMS respon percepatan sistem tanpa dan dengan CPDVA hasil simulasi

Gambar 4.13 adalah perbandingan grafik hasil simulasi RMS respon percepatan sistem utama tanpa dan dengan CPDVA pada jumlah *piezoelectric* 8 buah terhadap frekuensi variasi amplitudo. Dari grafik tersebut dapat diketahui bahwa *trendline* grafik sistem utama tanpa CPDVA adalah parabolik dengan nilai maksimum pada frekuensi 36,5  $rad/s$  dan amplitudo 4 cm. Sedangkan untuk *trendline* grafik sistem utama dengan CPDVA adalah menurun dengan nilai maksimum pada frekuensi 32  $rad/s$  dan amplitudo 4 cm. Hal tersebut dapat ditarik kesimpulan bahwa pada frekuensi natural sistem tanpa CPDVA yaitu 36,5  $rad/s$  dapat direduksi dengan adanya CPDVA. Begitu pula pada frekuensi 39  $rad/s$  dapat direduksi dengan CDPVA. Sedangkan pada frekuensi 32  $rad/s$  adalah frekuensi natural sistem dengan CPDVA, sehingga pada frekuensi tersebut sistem dengan CPDVA mengalami resonansi dan respon percepatannya lebih tinggi daripada sistem tanpa CPDVA.

#### 4.3.1.2.2 Respon Voltase

Analisa respon voltase yang dihasilkan oleh CPDVA hasil pemodelan akan dijabarkan pada subbab ini. Variasi yang dilakukan adalah variasi frekuensi, amplitudo dan jumlah *piezoelectric*. Respon voltase bangkitan sistem utama dengan CPDVA hasil simulasi pemodelan pada variasi frekuensi 36,5 rad/s, amplitudo 3 cm, dan 8 buah pada gambar 4.14.



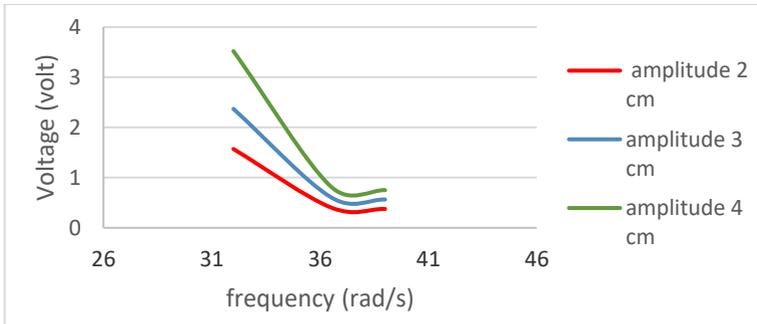
Gambar 4.14 Respon percepatan sistem utama dengan CPDVA hasil simulasi pada frekuensi 36,5 rad/s, amplitudo 3 cm, dan piezoelectric 8 buah

Gambar 4.14 adalah grafik hasil simulasi respon voltase bangkitan sistem dengan CPDVA pada frekuensi operasi 36,5 rad/s, amplitudo 3 cm dan jumlah *piezoelectric* 8 buah. Respon voltase tersebut mencapai *steady* setelah 6 detik dengan nilai RMS adalah  $0,9 \text{ m/s}^2$ . Dari grafik tersebut dapat diketahui bahwa saat frekuensi 36,5 rad/s yaitu saat frekuensi natural sistem utama tanpa CPDVA, respon sistem dengan CPDVA mengalami penurunan daripada sistem tanpa CPDVA. Penurunan respon percepatan sebesar  $9,1 \text{ m/s}^2$ . Respon voltase hasil simulasi secara keseluruhan untuk sistem dengan CPDVA terdapat pada tabel 4.7 di bawah.

Tabel 4.7 RMS Voltase bangkitan sistem dengan CPDVA semua variasi hasil simulasi

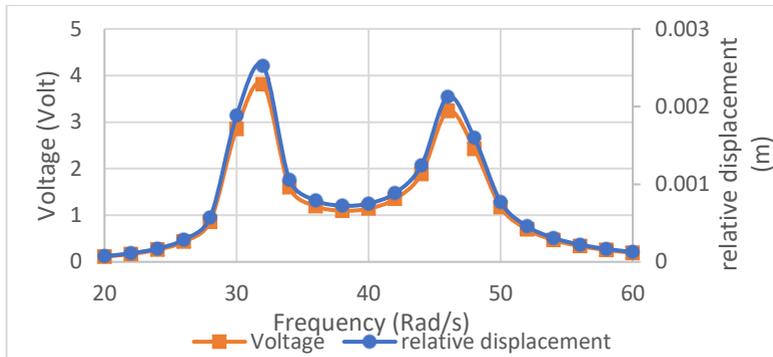
Frekuensi (rad/s)	piezoelectric (buah)	Amplitudo (cm)		
		2	3	4
		Voltase (volt)	Voltase (volt)	Voltase (volt)
32	4	1,18	1,77	2,36
	6	1,183	1,774	2,365
	8	1,57	2,37	3,52
36,5	4	0,281	0,421	0,563
	6	0,304	0,4568	0,608
	8	0,405	0,6085	0,821
39	4	0,187	0,281	0,375
	6	0,281	0,42	0,563
	8	0,375	0,563	0,75

Dari tabel 4.13 dapat diketahui bahwa RMS respon voltase bangkitan hasil eksperimen terbesar bernilai 3,52 Volt pada frekuensi 32 rad/s, amplitudo 4 cm, dan jumlah *piezoelectric* 8 buah. Pada frekuensi 32 rad/s tersebut adalah frekuensi natural sistem dengan CPDVA. Hal tersebut membuktikan bahwa CPDVA dapat menghasilkan voltase maksimal pada frekuensi natural sistem dengan CDPVA. Sedangkan RMS voltase terkecil bernilai 0,187 volt pada frekuensi 39 rad/s, amplitudo 2 cm, dan jumlah *piezoelectric* 4 buah.



Gambar 4.15 Grafik RMS voltase sistem utama dengan CPDVA jumlah piezoelectric 8 buah terhadap frekuensi variasi amplitude

Gambar 4.15 diatas adalah grafik hasil simulasi RMS voltase bangkitan sistem utama dengan CPDVA jumlah *piezoelectric* 8 buah dengan variasi amplitudo 2 cm, 3 cm, dan 4 cm. Dari grafik tersebut dapat diketahui bahwa semakin besar amplitudo maka voltase yang dihasilkan semakin besar pula. Hal tersebut disebabkan karena semakin tinggi amplitudo, maka respon perpindahan maupun kecepatan pada CPDVA tinggi serta defleksi pada *piezoelectric* juga tinggi, sehingga *piezoelectric* dapat menghasilkan listrik lebih tinggi pula. Respon tertinggi adalah pada amplitudo 4 cm. Dari grafik tersebut juga dapat diketahui bahwa semakin besar frekuensi maka voltase yang dihasilkan semakin kecil. Respon tertinggi pada frekuensi 32 rad/s. Hal tersebut menandakan bahwa saat frekuensi 32 rad/s adalah frekuensi natural sistem dengan CPDVA, sehingga saat frekuensi tersebut defleksi maksimum terjadi pada massa utama maupun pada massa *absorber*. Hal tersebut menyebabkan *piezoelectric* terdefleksi maksimum dan membuat voltase yang dihasilkan maksimum. Respon perpindahan relatif massa utama dengan massa *absorber* serta respon voltase yang dihasilkan *piezoelectric* dapat dilihat pada *bode diagram* pada gambar 4.16.



Gambar 4.16 Bode diagram perpindahan relatif dan respon voltase bangkitan

Dapat dilihat pada gambar 4.16 bahwa nilai dari masing-masing respon voltase bangkitan sebanding dengan perpindahan relatif massa utama dengan massa *absorber*. Pada frekuensi 32 rad/s perpindahan relatif massa utama dengan massa *absorber* serta respon voltase juga tinggi. Hal tersebut membuktikan bahwa pada frekuensi 32 rad/s, defleksi yang dialami *piezoelectric* tinggi pula, sehingga voltase yang dihasilkan juga tinggi.

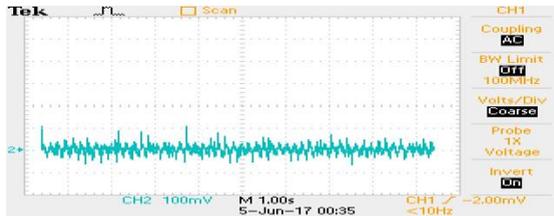
### 4.3.2 Analisa Eksperimen

Pada sub bab ini akan dijelaskan mengenai data hasil eksperimen sistem. Analisa mengenai data hasil eksperimen akan ditampilkan dan dibahas untuk mengetahui karakteristik respon sistem hasil eksperimen. Analisa hasil eksperimen kemudian dibandingkan dengan analisa hasil pemodelan simulasi MATLAB. Ditampilkan pula hasil eksperimen untuk membuktikan bahwa sistem utama bergerak translasi.

#### 4.3.2.1 Eksperimen Sistem Utama tanpa CPDVA

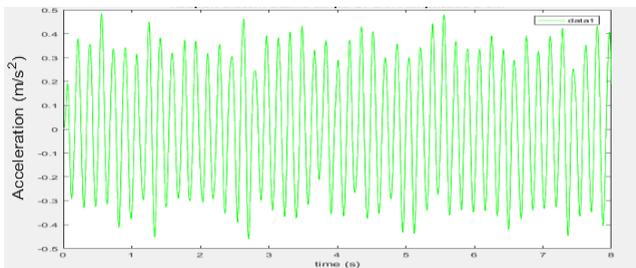
Dari eksperimen yang dilakukan terhadap sistem utama tanpa tambahan CPDVA didapat respon getaran. Respon getaran sistem utama yang akan dianalisa adalah respon percepatan massa utama. Variasi yang dilakukan adalah variasi frekuensi dan amplitudo.

Berikut akan ditunjukkan hasil eksperimen pada variasi frekuensi 36,5 rad/s amplitudo 3 cm yang terekam *oscilloscope* seperti terlihat pada gambar 4.17.



Gambar 4.17 Oscilloscope sistem utama tanpa CPDVA frekuensi 36,5 rad/s amplitudo 3 cm

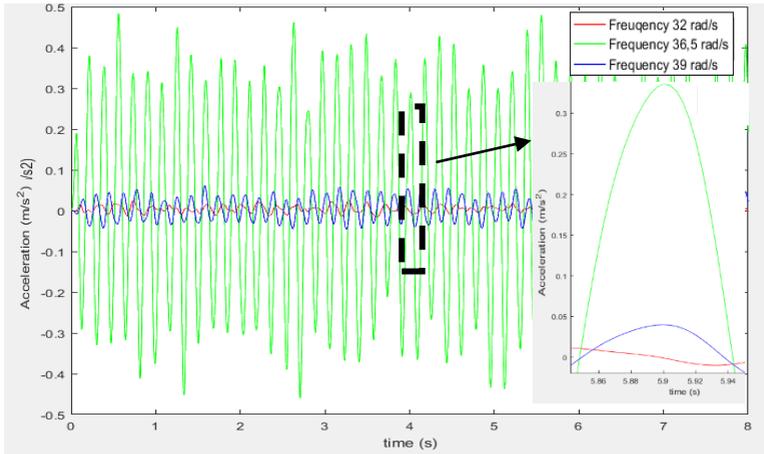
Dari data hasil yang direkam oleh *oscilloscope*, maka selanjutnya dilakukan proses *filtering* kemudian dilakukan *smoothing* data untuk memperhalus grafik hasil pengujian. Selanjutnya akan dilakukan RMS (*root mean square*) pada data hasil *filtering* dan *smoothing* untuk melihat seberapa besar respon yang mampu dihasilkan dari mekanisme ini. Grafik hasil *filtering* dan *smoothing* pada gambar 4.18. Nilai RMS pada pengujian tersebut adalah  $0,2538 \text{ m/s}^2$ .



Gambar 4.18 Grafik respon sistem tanpa CPDVA frekuensi 36,5 rad/s amplitudo 3 cm hasil eksperimen yang di filtering dan smoothing

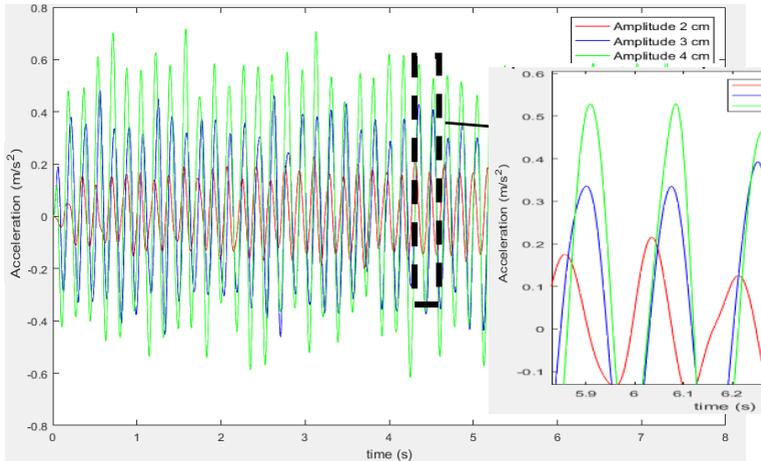
Eksperimen berikutnya adalah sistem tanpa CPDVA dengan variasi yang dilakukan adalah amplitudo 3 cm dengan frekuensi 32

rad/s dan 39 rad/s. Berikut akan ditunjukkan hasil eksperimen sistem tanpa CPDVA variasi frekuensi pada gambar 4.19.



Gambar 4.19 Grafik sistem tanpa CPDVA amplitudo 3 cm variasi frekuensi hasil eksperimen

Gambar 4.19 diatas adalah grafik hasil eksperimen respon percepatan sistem utama tanpa CPDVA pada amplitudo 3 cm dengan variasi frekuensi operasi 32 rad/s, 36,5 rad/s, dan 39 rad/s. Dari grafik tersebut dapat diketahui bahwa semakin besar frekuensi maka respon sistem utama tidak semakin tinggi, namun terdapat nilai maksimum saat frekuensi tertentu. Respon tertinggi pada frekuensi 36,5 rad/s yaitu frekuensi natural sistem utama dengan nilai RMS respon yaitu  $0,4078 \text{ m/s}^2$ .



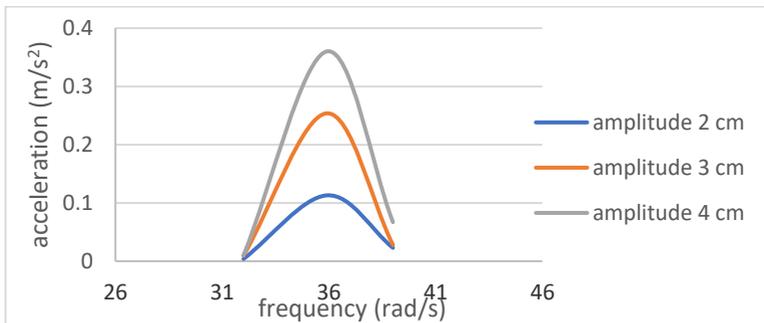
Gambar 4.20 Grafik sistem tanpa CPDVA frekuensi 36,5 rad/s hasil eksperimen variasi amplitudo

Gambar 4.20 adalah grafik hasil eksperimen respon percepatan sistem utama tanpa CPDVA pada frekuensi 36,5 rad/s dengan variasi amplitudo 2 cm, 3 cm, dan 4 cm. Dari grafik tersebut dapat diketahui bahwa semakin besar amplitudo, maka respon sistem utama semakin tinggi. Respon tertinggi pada amplitudo 4 cm dengan nilai RMS respon yaitu  $0,36 \text{ m/s}^2$ . Data RMS hasil pengujian masing-masing variasi ditunjukkan pada tabel 4.8 di bawah.

Tabel 4.8 RMS Respon Sistem Utama tanpa CPDVA Hasil Eksperimen

Frekuensi (rad/s)	Amplitudo (cm)		
	2	3	4
	Acc ( $\text{m/s}^2$ )	Acc ( $\text{m/s}^2$ )	Acc ( $\text{m/s}^2$ )
32	0,0039	0,0096	0,01
36,5	0,113	0,2538	0,36
39	0,023	0,0279	0,067

Dari tabel 4.8 di atas dapat diketahui bahwa RMS respon sistem utama tanpa CPDVA terbesar bernilai  $0,36 \text{ m/s}^2$  pada frekuensi  $36,5 \text{ rad/s}$ , dan amplitudo  $4 \text{ cm}$ . Nilai RMS respon sistem utama terkecil adalah  $0,0039 \text{ m/s}^2$  pada frekuensi  $32 \text{ rad/s}$  dan amplitudo  $2 \text{ cm}$ .



Gambar 4.21 Grafik RMS respon sistem utama tanpa CPDVA terhadap frekuensi variasi amplitudo hasil eksperimen

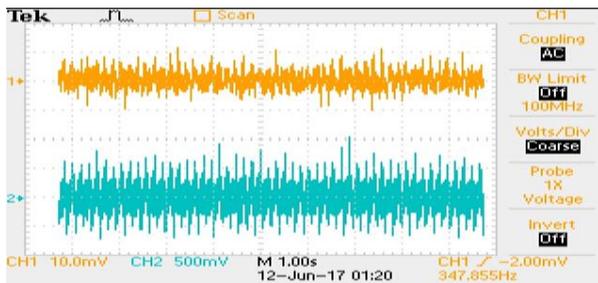
Gambar 4.21 diatas adalah grafik hasil eksperimen RMS respon percepatan sistem utama tanpa CPDVA terhadap frekuensi dengan variasi amplitudo  $2 \text{ cm}$ ,  $3 \text{ cm}$ , dan  $4 \text{ cm}$ . Dari grafik tersebut dapat diketahui bahwa semakin besar amplitudo, maka respon percepatan sistem utama juga semakin tinggi sesuai teori dan pemodelan. Hal tersebut karena pada amplitudo tinggi, maka sistem menerima gaya eksitasi yang lebih besar. Respon tertinggi pada amplitudo  $4 \text{ cm}$ . Dari grafik tersebut juga dapat diketahui bahwa dengan nilai maksimum respon pada frekuensi  $36,5 \text{ rad/s}$  untuk semua variasi amplitudo.

#### 4.3.2.2 Eksperimen Sistem Utama dengan CPDVA

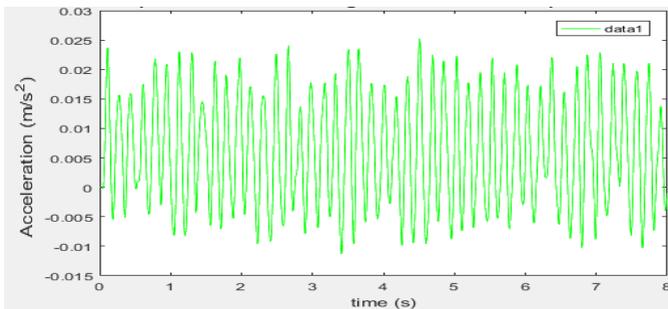
Eksperimen terhadap sistem utama dengan tambahan CPDVA telah dilakukan dan didapat respon getaran untuk masing-masing variasi eksperimen. Respon getaran sistem utama yang akan dianalisa adalah respon percepatan massa utama dan voltase yang dihasilkan.

#### 4.3.2.2.1 Respon Percepatan

Respon percepatan sistem utama akan dijabarkan pada subbab ini. Variasi yang dilakukan adalah variasi frekuensi, amplitudo dan jumlah *piezoelectric*. Berikut akan ditunjukkan hasil eksperimen pada variasi frekuensi 36,5 rad/s, amplitudo 3 cm, dan 8 buah *piezoelectric* yang terekam *oscilloscope* seperti terlihat pada gambar 4.22 di bawah. Grafik yang berwarna kuning adalah respon *accelerometer probe*, dan warna biru adalah *voltage probe*.



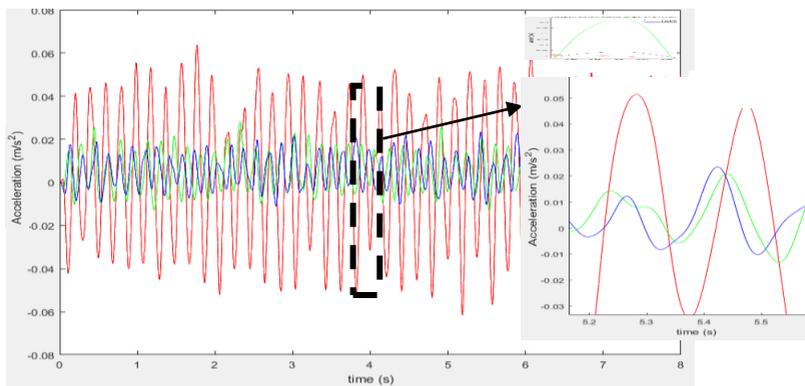
Gambar 4.22 Hasil rekam oscilloscope sistem utama tanpa CPDVA frekuensi 36,5 rad/s, amplitudo 3 cm, dan jumlah piezoelectric 8 buah



Gambar 4.23 Grafik sistem dengan CPDVA frekuensi 36,5 rad/s, amplitudo 3 cm, dan 8 buah piezoelectric hasil eksperimen yang telah di filtering dan smoothing

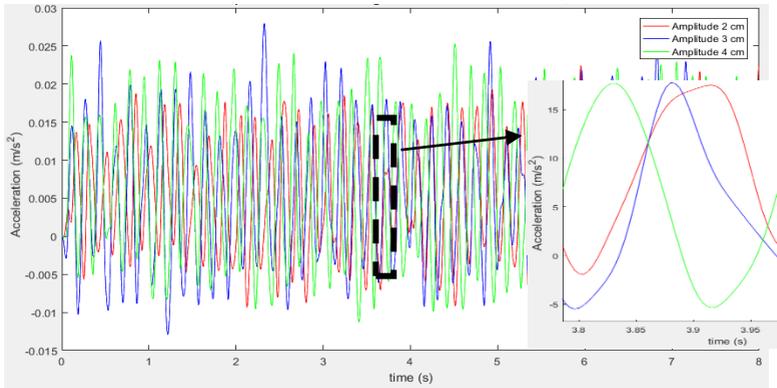
Grafik 4.23 di atas adalah grafik hasil *smoothing* dan *filtering* eksperimen sistem dengan CPDVA frekuensi 36,5 rad/s, amplitudo 3 cm, dan 8 buah *piezoelectric*. Nilai RMS pada pengujian tersebut adalah 0,0146 m/s<sup>2</sup>.

Eksperimen berikutnya adalah sistem dengan CPDVA dengan variasi yang dilakukan adalah amplitudo 3 cm dengan frekuensi 32 rad/s dan 39 rad/s. Berikut akan ditunjukkan hasil eksperimen sistem tanpa CPDVA variasi frekuensi pada gambar 4.23 di bawah.



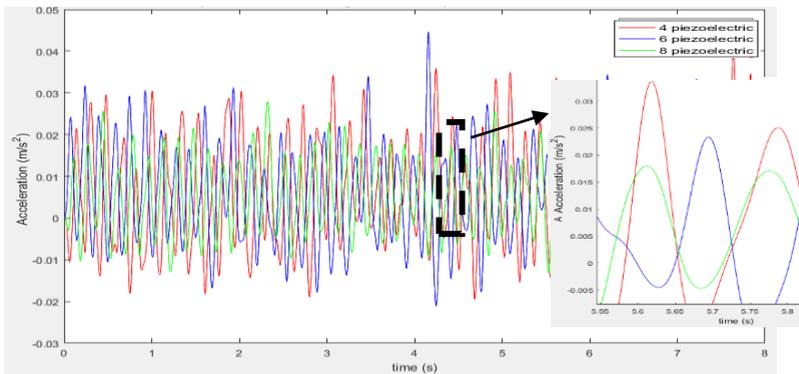
Gambar 4.24 Grafik respon percepatan sistem utama dengan CPDVA amplitudo 3 cm dan jumlah piezoelectric 8 buah variasi frekuensi hasil eksperimen

Gambar 4.24 diatas adalah grafik hasil eksperimen respon percepatan sistem utama dengan CPDVA pada amplitudo 3 cm dan jumlah *piezoelectric* 8 buah dengan variasi frekuensi operasi 32 rad/s, 36,5 rad/s, dan 39 rad/s. Dari grafik tersebut dapat diketahui bahwa semakin besar frekuensi maka respon sistem utama tidak semakin tinggi, namun terdapat nilai maksimum saat frekuensi tertentu. Respon tertinggi pada frekuensi 32 rad/s yaitu frekuensi natural sistem dengan CPDVA, dimana nilai RMS respon saat itu yaitu 0,0497 m/s<sup>2</sup>.



Gambar 4.25 Grafik respon percepatan sistem utama dengan CPDVA frekuensi 36,5 rad/s dan jumlah piezoelectric 8 buah variasi amplitudo hasil eksperimen

Gambar 4.25 diatas adalah grafik hasil eksperimen respon percepatan sistem utama dengan CPDVA pada frekuensi 36,5 rad/s dan jumlah *piezoelectric* 8 buah dengan variasi. Dari grafik tersebut dapat diketahui bahwa semakin besar amplitudo, maka respon sistem utama semakin tinggi. Respon tertinggi pada amplitudo 4 cm, dimana nilai RMS respon saat itu 0,0172 m/s<sup>2</sup>.

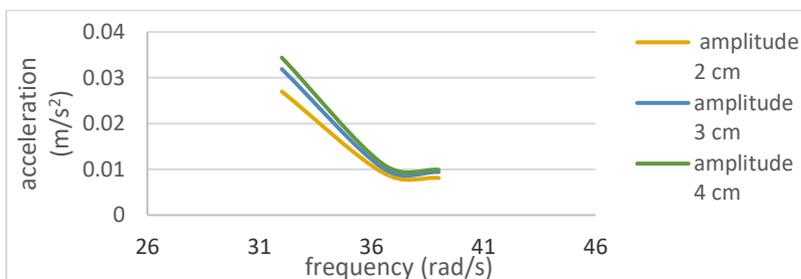


Gambar 4.26 Grafik respon percepatan sistem utama dengan CPDVA amplitudo 3 cm dan frekuensi 36,5 rad/s variasi jumlah piezoelectric hasil eksperimen

Gambar 4.26 adalah grafik hasil eksperimen respon percepatan sistem utama dengan CPDVA pada amplitudo 3 cm dan dengan frekuensi 36,5 rad/s variasi jumlah *piezoelectric*. Dari grafik tersebut dapat diketahui bahwa semakin banyak jumlah *piezoelectric*, maka respon sistem utama semakin rendah sesuai teori dan pemodelan. Respon tertinggi sistem pada jumlah *piezoelectric* 4 buah, dimana nilai RMS respon saat itu yaitu 0,0172 m/s<sup>2</sup>. Data RMS respon sistem utama dengan CPDVA hasil eksperimen semua variasi ditunjukkan pada tabel 4.9.

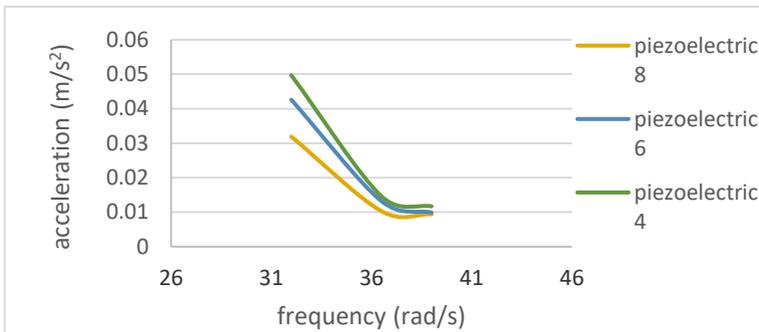
*Tabel 4.9 RMS Respon Sistem Utama dengan CPDVA 8 buah piezoelectric hasil eksperimen*

Frekuensi (rad/s)	Amplitudo (cm)		
	2	3	4
	Acc (m/s <sup>2</sup> )	Acc (m/s <sup>2</sup> )	Acc (m/s <sup>2</sup> )
32	0,0388	0,0497	0,0525
36,5	0,0104	0,0146	0,0172
39	0,0102	0,0117	0,0162



Gambar 4.27 Grafik RMS respon percepatan sistem utama dengan CPDVA pada piezoelectric berjumlah 8 buah terhadap frekuensi variasi amplitude hasil eksperimen

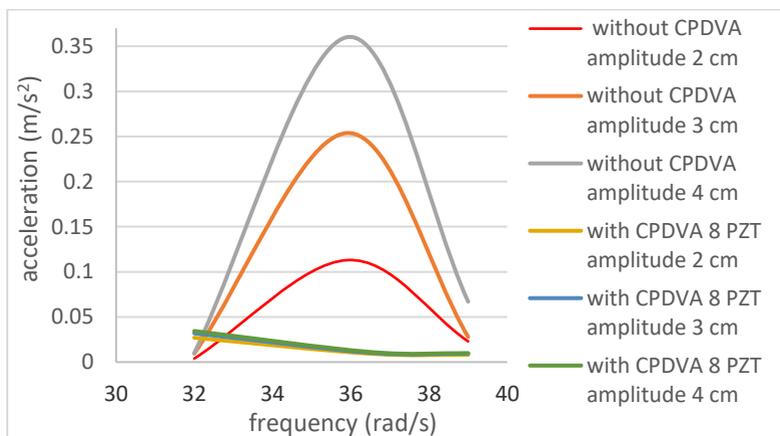
Gambar 4.27 adalah grafik hasil eksperimen RMS respon percepatan sistem utama dengan CPDVA pada jumlah *piezoelectric* 8 buah dengan variasi amplitudo 2 cm, 3 cm, dan 4 cm hasil eksperimen. Dari grafik tersebut dapat diketahui bahwa semakin besar amplitudo, maka respon percepatan sistem utama juga semakin tinggi sesuai teori dan pemodelan. Hal tersebut karena pada amplitudo tinggi, maka sistem menerima gaya eksitasi yang besar. Respon tertinggi adalah pada amplitudo 4 cm. Dari grafik tersebut juga dapat diketahui bahwa semakin tinggi frekuensi, maka respon percepatan sistem yang dihasilkan semakin kecil sesuai teori dan pemodelan. Hal tersebut karena gerakan sistem terbesar adalah pada frekuensi natural sistem utama dengan CPDVA yaitu pada 32 rad/s. Untuk grafik respon percepatan terhadap frekuensi dengan variasi amplitude pada jumlah *piezoelectric* lainnya terdapat di lampiran.



Gambar 4.28 Grafik RMS respon percepatan sistem utama dengan CPDVA pada amplitudo 3 cm terhadap frekuensi variasi jumlah *piezoelectric* hasil eksperimen

Gambar 4.28 adalah grafik hasil eksperimen RMS respon percepatan sistem utama tanpa CPDVA pada amplitudo 3 cm dengan variasi jumlah *piezoelectric* 4 buah, 6 buah, dan 8 buah. Dari grafik tersebut dapat diketahui bahwa semakin banyak jumlah *piezoelectric* yang digunakan, maka respon percepatan semakin

rendah sesuai teori dan pemodelan. Hal tersebut sesuai disebabkan semakin banyak jumlah *piezoelectric*, maka nilai konstanta pegas absorber ekuivalen ( $K_{eq}$ ) juga semakin besar sehingga respon percepatan sistem utama akan terpengaruh menjadi semakin kecil. Respon sistem tertinggi adalah pada jumlah *piezoelectric* 4 buah.



Gambar 4.29 Grafik perbandingan RMS respon percepatan sistem tanpa dan dengan CPDVA hasil eksperimen

Gambar 4.29 adalah grafik hasil eksperimen perbandingan RMS respon percepatan sistem utama tanpa dan dengan CPDVA pada jumlah *piezoelectric* 8 buah terhadap frekuensi variasi amplitudo. *Trendline* grafik sistem utama tanpa CPDVA adalah parabolik dengan nilai maksimum pada frekuensi 36,5 rad/s dan amplitudo 4 cm. Sedangkan untuk *trendline* grafik sistem utama dengan CPDVA adalah menurun dengan nilai maksimum pada frekuensi 32 rad/s dan amplitudo 4 cm. Hal tersebut dapat ditarik kesimpulan bahwa pada frekuensi natural sistem tanpa CPDVA yaitu 36,5 rad/s dapat direduksi dengan adanya CPDVA. Sedangkan pada frekuensi 32 rad/s adalah frekuensi natural sistem dengan CPDVA, sehingga pada frekuensi tersebut sistem dengan CPDVA mengalami resonansi dan respon percepatannya lebih

tinggi daripada sistem tanpa CPDVA. Nilai masing-masing RMS respon sistem utama untuk jumlah *piezoelectric* 8 buah dapat dilihat pada tabel 4.10.

Tabel 4.10 RMS respon dan reduksi sistem dengan CPDVA 8 *piezoelectric* hasil eksperimen

Frekuensi (rad/s)	Amplitudo 2 cm		Selisih respon (m/s <sup>2</sup> )	Reduksi (%)
	Respon Tanpa CPDVA (m/s <sup>2</sup> )	Respon Dengan CPDVA (m/s <sup>2</sup> )		
32	0,0039	0,027	-0,02	-592,31
36,5	0,1131	0,0093	0,1	91,77
39	0,0231	0,0081	0,01	64,78
Frekuensi (rad/s)	Amplitudo 3 cm			
	Respon Tanpa CPDVA (m/s <sup>2</sup> )	Respon Dengan CPDVA (m/s <sup>2</sup> )		
32	0,0095	0,0319	-0,022	-235,79
36,5	0,2538	0,0103	0,24	95,94
39	0,0279	0,0094	0,02	66,31
Frekuensi (rad/s)	Amplitudo 4 cm			
	Respon Tanpa CPDVA (m/s <sup>2</sup> )	Respon Dengan CPDVA (m/s <sup>2</sup> )		
32	0,01	0,0344	-0,024	-244
36,5	0,36	0,0112	0,35	96,89
39	0,067	0,0099	0,06	85,22

Dapat dilihat pada tabel 4.10 bahwa reduksi terbesar adalah pada amplitudo 4 cm dan frekuensi 36,5 rad/s. Untuk frekuensi 32 rad/s, reduksi sistem negatif yang berarti bahwa saat frekuensi tersebut sistem utama mengalami kenaikan respon percepatan getaran. Hal tersebut menandakan bahwa saat frekuensi 32 rad/s tersebut adalah frekuensi natural sistem dengan CPDVA. Data reduksi respon sistem secara keseluruhan pada tabel 4.11.

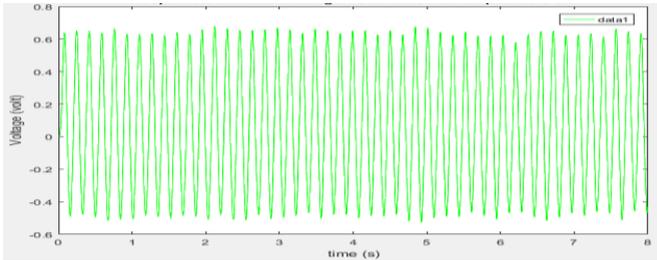
Tabel 4.11 RMS Respon dan reduksi sistem dengan CPDVA semua variasi hasil eksperimen

Frekuensi (rad/s)	piezoelectric (buah)	Amplitudo (cm)					
		2		3		4	
		respon (m/s <sup>2</sup> )	reduksi (%)	respon (m/s <sup>2</sup> )	reduksi (%)	respon (m/s <sup>2</sup> )	reduksi (%)
32	4	0,0388	-894,87	0,0497	-423,16	0,0525	-425
	6	0,035	-797,44	0,0426	-348,42	0,0462	-362
	8	0,027	-592,31	0,0319	-235,79	0,0344	-244
36,5	4	0,0104	90,8	0,0146	94,25	0,0172	95,23
	6	0,0099	91,24	0,0132	94,8	0,0159	95,59
	8	0,0093	91,77	0,0103	95,94	0,0112	96,89
39	4	0,0102	55,65	0,0117	58,06	0,0162	75,82
	6	0,0095	58,7	0,0099	64,52	0,0149	77,76
	8	0,0081	64,78	0,0094	66,31	0,0099	85,22

Dari tabel 4.11 dapat diketahui bahwa reduksi respon sistem utama terbesar bernilai 96,89 % pada frekuensi 36,5 rad/s, amplitudo 4 cm, dan jumlah *piezoelectric* 8 buah. Pada frekuensi 36,5 rad/s tersebut adalah frekuensi natural sistem tanpa CPDVA. Hal tersebut membuktikan bahwa CPDVA dapat mereduksi maksimal pada frekuensi natural sistem tanpa CDPVA. Sedangkan untuk nilai reduksi minus, sistem utama dengan CPDVA mengalami respon maksimal karena berada pada frekuensi natural sistem dengan CPDVA. Nilai penambahan respon tertinggi 894,87 % pada frekuensi 32 rad/s, amplitudo 2 cm, dan jumlah *piezoelectric* 4 buah.

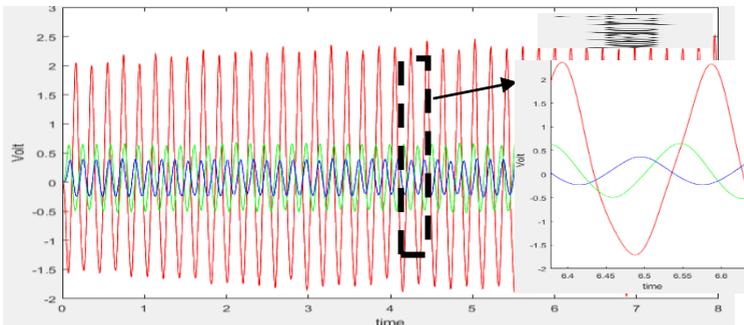
#### 4.3.2.2.2 Respon Voltase

Respon voltase yang dihasilkan oleh CPDVA akan dijabarkan pada subbab ini. Berikut akan ditunjukkan hasil eksperimen pada variasi frekuensi 36,5 rad/s, amplitudo 3 cm, dan 8 buah *piezoelectric* yang telah di *smoothing* dan *filtering* terlihat pada gambar 4.29.



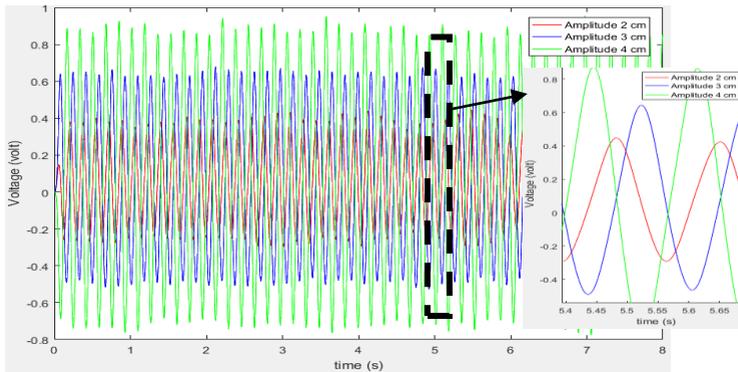
Gambar 4.30 Grafik voltase bangkitan sistem utama dengan CDPVA pada frekuensi 36,5 rad/s, amplitudo 3 cm, dan jumlah piezoelectric 8 buah hasil eksperimen

Grafik 4.30 di atas adalah hasil *smoothing* dan *filtering* eksperimen respon voltase bangkitan sistem dengan CDPVA frekuensi 36,5 rad/s, amplitudo 3 cm, dan 8 buah *piezoelectric* pada gambar di atas. Nilai RMS pada eksperimen tersebut adalah 0,395 volt.



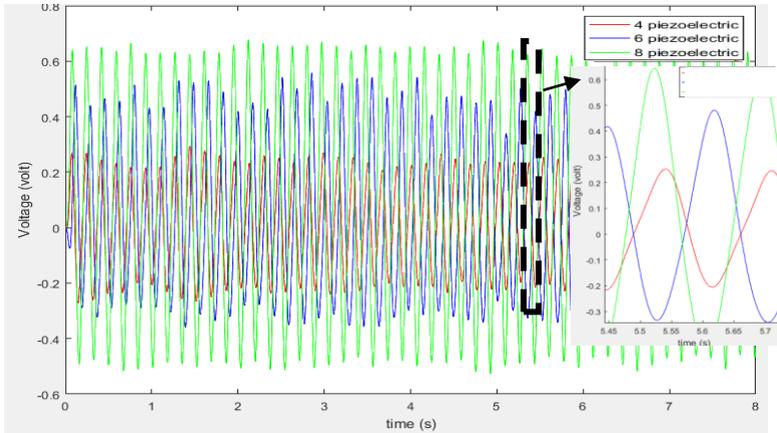
Gambar 4.31 Grafik respon voltase sistem utama dengan CDPVA jumlah piezoelectric 8 buah variasi frekuensi hasil eksperimen

Gambar 4.31 adalah grafik hasil eksperimen voltase bangkitan sistem utama dengan CPDVA pada amplitudo 3 cm dan jumlah *piezoelectric* 8 buah dengan variasi frekuensi operasi 32 rad/s, 36,5 rad/s, dan 39 rad/s. Dari grafik tersebut diketahui bahwa semakin besar frekuensi maka voltase yang dihasilkan semakin kecil. Respon tertinggi pada frekuensi 32 rad/s yaitu frekuensi natural sistem dengan CPDVA, dengan nilai RMS respon 1,3828 volt.



Gambar 4.32 Grafik respon voltase sistem utama dengan CPDVA jumlah piezoelectric 8 buah dan frekuensi 36,5 rad/s variasi amplitude hasil eksperimen

Gambar 4.32 diatas adalah grafik hasil eksperimen voltase bangkitan sistem utama dengan CPDVA pada frekuensi 36,5 rad/s dan jumlah *piezoelectric* 8 buah dengan variasi amplitudo 2 cm, 3 cm, dan 4 cm. Dari grafik tersebut diketahui bahwa semakin besar amplitudo, maka voltase yang dihasilkan semakin besar. Respon tertinggi pada amplitudo 4 cm dengan nilai RMS respon 0,554 volt.

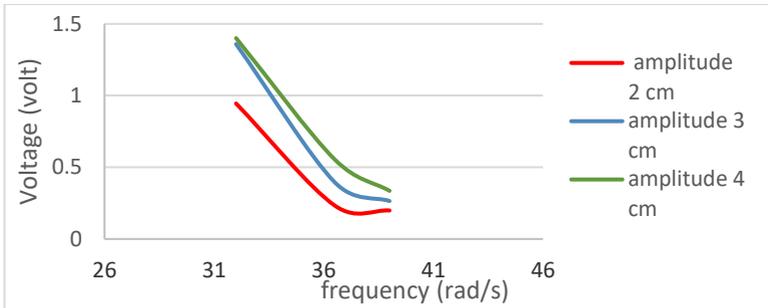


Gambar 4.33 Grafik respon voltase sistem utama dengan CPDVA amplitudo 3 cm dan frekuensi 36,5 rad/s variasi jumlah piezoelectric hasil eksperimen

Gambar 4.33 adalah grafik hasil eksperimen voltase bangkitan sistem utama dengan CPDVA pada amplitudo 3 cm dan frekuensi 36,5 rad/s variasi frekuensi operasi jumlah *piezoelectric* 4 buah, 6 buah, dan 8 buah. Dari grafik tersebut diketahui bahwa semakin banyak jumlah *piezoelectric* maka voltase yang dihasilkan semakin besar. Respon tertinggi pada jumlah *piezoelectric* 8 buah dengan nilai RMS respon 0,39 volt. Berikut data hasil eksperimen RMS voltase bangkitan sistem dengan CPDVA 8 buah *piezoelectric* masing-masing variasi ditunjukkan pada tabel 4.12 di bawah.

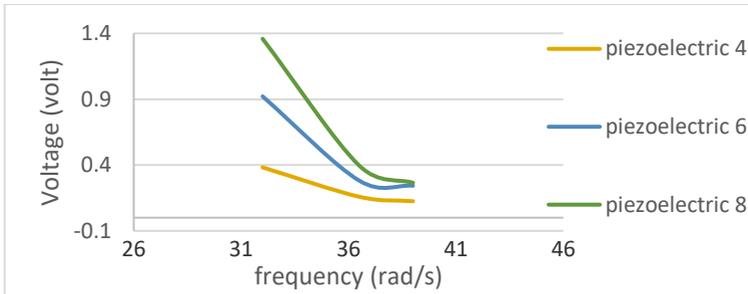
Tabel 4.12 RMS voltase sistem utama dengan CPDVA 8 buah piezoelectric hasil eksperimen

Frekuensi (rad/s)	Amplitudo (cm)		
	2	3	4
	Volt	Volt	Volt
32	0,945	13,588	14,007
36,5	0,2333	0,3957	0,5547
39	0,1987	0,264	0,336



Gambar 4.34 Grafik RMS voltase sistem utama dengan CPDVA jumlah piezoelectric 8 buah terhadap frekuensi variasi amplitudo hasil eksperimen

Gambar 4.34 diatas adalah grafik hasil eksperimen RMS voltase bangkitan sistem utama dengan CPDVA jumlah *piezoelectric* 8 buah dengan variasi amplitudo 2 cm, 3 cm, dan 4 cm. Dari grafik tersebut dapat diketahui bahwa semakin besar amplitudo maka voltase yang dihasilkan semakin besar pula sesuai teori dan pemodelan. Hal tersebut disebabkan karena semakin tinggi amplitudo, maka respon perpindahan maupun kecepatan pada CPDVA juga tinggi, sehingga *piezoelectric* dapat menghasilkan listrik lebih tinggi pula. Respon tertinggi pada amplitudo 4 cm. Dari grafik tersebut juga dapat diketahui bahwa semakin besar frekuensi maka voltase yang dihasilkan semakin kecil sesuai teori dan pemodelan. Respon tertinggi pada frekuensi 32 rad/s. Hal tersebut menandakan bahwa saat frekuensi 32 rad/s adalah frekuensi natural sistem dengan CPDVA, sehingga saat frekuensi tersebut defleksi maksimum terjadi pada *piezoelectric* dan membuat voltase yang dihasilkan maksimum. Defleksi pada *piezoelectric* tersebut disebabkan selisih amplitude perpindahan massa utama dengan *absorber* yang tinggi. Hal tersebut sesuai dengan hasil yang didapat pada pemodelan simulasi. Nilai RMS maksimum pada frekuensi 32 rad/s dan amplitudo 4 cm tersebut adalah 1,4007 volt.



Gambar 4.35 Grafik RMS voltase sistem utama dengan CPDVA amplitudo 3 cm terhadap frekuensi variasi jumlah piezoelectric hasil eksperimen

Gambar 4.35 adalah grafik hasil eksperimen RMS voltase bangkitan sistem utama dengan CPDVA amplitudo 3 cm dengan jumlah *piezoelectric* 4 buah, 6 buah, dan 8 buah. Dari grafik tersebut dapat diketahui bahwa semakin banyak *piezoelectric* yang digunakan, maka voltase yang dihasilkan semakin besar pula sesuai teori dan pemodelan. Hal tersebut disebabkan karena semakin banyak jumlah *piezoelectric*, maka voltase yang dihasilkan masing-masing *piezoelectric* akan bertambah sehingga nilai voltase bangkitan akan bertambah pula. Respon voltase tertinggi pada amplitudo *piezoelectric* 8 buah dengan nilai 14,007 volt. Untuk grafik voltase terhadap frekuensi dengan variasi amplitudo pada jumlah *piezoelectric* lain terdapat di lampiran. Data voltase bangkitan secara keseluruhan pada tabel 4.13.

Tabel 4.13 RMS Voltase bangkitan sistem dengan CPDVA semua variasi hasil eksperimen

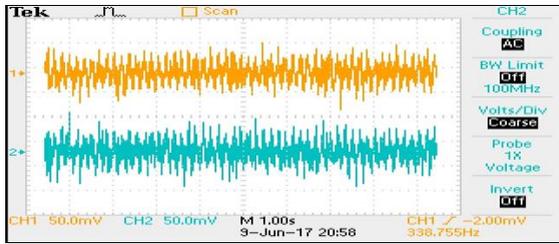
Frekuensi (rad/s)	piezoelectric (buah)	Amplitudo (cm)		
		2	3	4
		Voltase (volt)	Voltase (volt)	Voltase (volt)
32	4	0,377	0,382	0,619
	6	0,4423	0,9216	1,084

	8	0,945	1,3588	1,4007
36,5	4	0,1	0,159	0,165
	6	0,1154	0,2813	0,3256
	8	0,2333	0,3957	0,5547
39	4	0,066	0,125	0,166
	6	0,1236	0,2426	0,2866
	8	0,1987	0,264	0,336

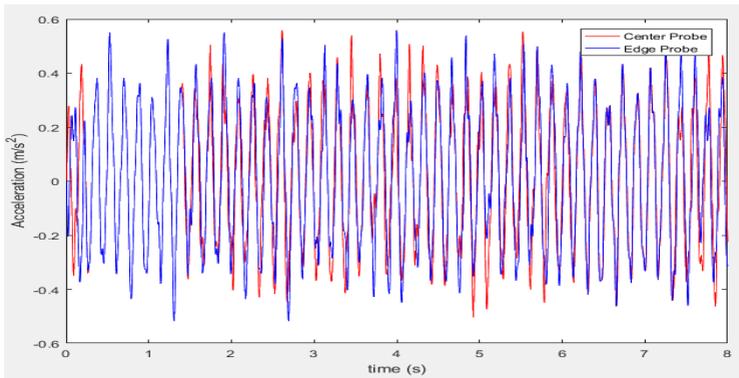
Dari tabel 4.13 di atas dapat diketahui bahwa RMS respon voltase bangkitan hasil eksperimen terbesar bernilai 1,4007 Volt pada frekuensi 32 rad/s, amplitudo 4 cm, dan jumlah *piezoelectric* 8 buah. Pada frekuensi 32 rad/s tersebut adalah frekuensi natural sistem dengan CPDVA. Hal tersebut membuktikan bahwa CPDVA dapat menghasilkan voltase maksimal pada frekuensi natural sistem dengan CDPVA. Sedangkan RMS voltase terkecil bernilai 0,066 volt pada frekuensi 39 rad/s, amplitudo 2 cm, dan jumlah *piezoelectric* 4 buah.

#### 4.3.2.3 Eksperimen Gerakan Translasi Sistem Utama tanpa CPDVA

Eksperimen untuk membuktikan bahwa sistem utama bergerak translasi dilakukan dengan meletakkan *accelerometer probe* pada titik tengah massa utama dan pada ujung salah satu sisi massa utama. Tujuan dari peletakkan tersebut adalah untuk memastikan bahwa respon sistem utama yang direkam oleh *accelerometer probe* pada titik tengah dan ujung sisi massa utama adalah sama, sehingga respon getaran dapat terbukti hanya translasi tanpa adanya rotasi. Tampilan eksperimen sistem tanpa CPDVA pada frekuensi 36,5 rad/s dan amplitudo 3 cm pada gambar 4.36 (a) *oscilloscope* dan (b) Matlab. Grafik yang berwarna kuning adalah respon *accelerometer probe* tengah, sedangkan warna biru adalah *accelerometer probe* ujung.

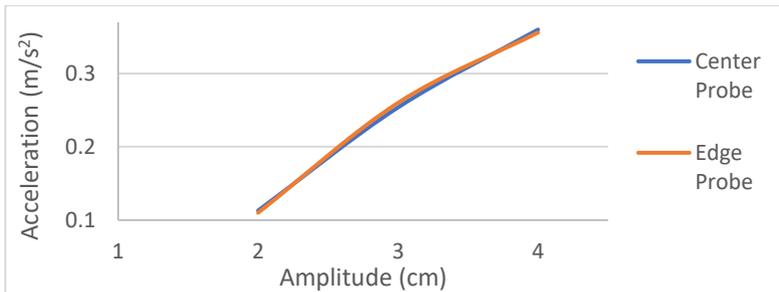


(a)



(b)

Gambar 4.36 Hasil eksperimen translasi sistem utama tanpa CPDVA pada frekuensi 36,5 rad/s dan amplitudo 3 cm (a) rekam oscilloscope (b) Matlab



Gambar 4.37 Grafik RMS translasi sistem utama tanpa CPDVA frekuensi 36,5 rad/s variasi amplitudo hasil eksperimen

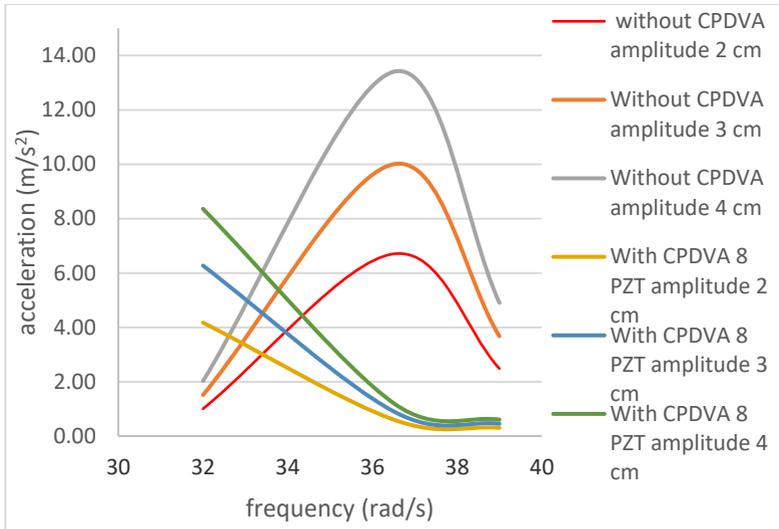
Gambar 4.37 diatas adalah grafik hasil eksperimen respon percepatan sistem utama tanpa CPDVA pada frekuensi 36,5 rad/s variasi amplitudo. Dari grafik tersebut dapat diketahui bahwa tren grafik untuk masing-masing peletakan *probe* pada tengah maupun ujung massa utama adalah sama. Kedua garis yang berimpit menandakan bahwa nilai masing-masing respon hampir sama. Data perbandingan RMS respon sistem utama untuk masing-masing peletakan *probe* pada tabel 4.14. Dari data nilai respon masing-masing peletakan *probe* dapat diketahui bahwa nilai mendekati sama besar, dimana tidak terjadi fenomena rotasi pada sistem utama. Dapat disimpulkan sistem bergetar hanya arah translasi.

#### **4.4 Perbandingan Grafik**

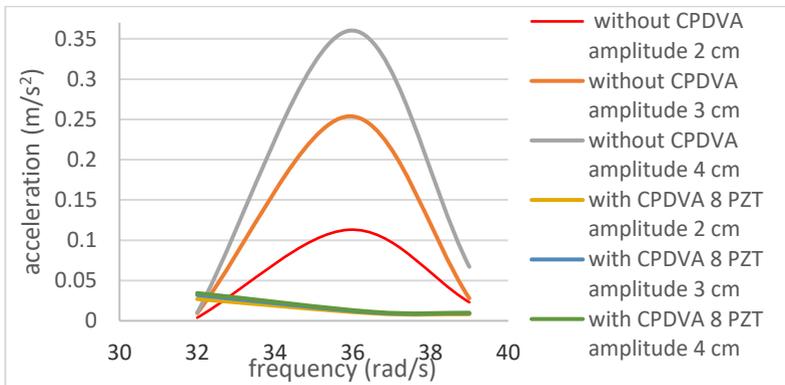
Pada subbab ini di tunjukkan perbandingan antara grafik hasil pemodelan dengan hasil eksperimen. Hasil yang telah dianalisa pada pemodelan dan eksperimen dibandingkan untuk melihat persamaan atau perbedaan tren grafik masing-masing. Tren grafik respon yang dibandingkan adalah respon reduksi percepatan dan respon voltase.

##### **4.4.1 Grafik Respon Percepatan**

Respon percepatan yang dibandingkan difokuskan untuk reduksi respon percepatan sistem. Grafik perbandingan RMS respon percepatan sistem utama tanpa dan dengan CPDVA dapat dilihat pada gambar 4.35 (a) untuk hasil pemodelan simulasi dan 4.35 (b) untuk hasil eksperimen.



(a)

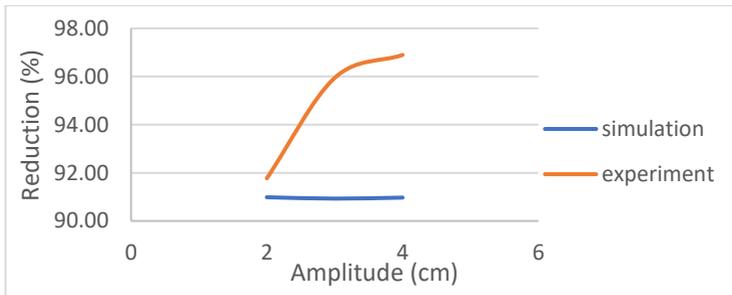


(b)

Gambar 4.38 Grafik perbandingan RMS respon percepatan sistem tanpa dan dengan CPDVA (a) hasil simulasi (b) hasil eksperimen

Pada gambar 4.38 (a) dan (b) di atas dapat diketahui bahwa tren dari masing-masing grafik hampir sama. Tren yang dimaksud adalah tren untuk RMS respon sistem tanpa CDPVA maupun

sistem dengan CPDVA baik hasil simulasi maupun hasil eksperimen. Untuk RMS respon sistem tanpa CPDVA, tren grafik sama-sama parabolik dengan nilai maksimum pada frekuensi 36,5 rad/s. Sedangkan tren grafik RMS respon sistem dengan CPDVA, masing-masing grafik simulasi maupun eksperimen juga mirip dengan nilai maksimum pada frekuensi 32 rad/s dan menurun sampai frekuensi 39 rad/s.



Gambar 4.39 Grafik perbandingan RMS reduksi percepatan sistem CPDVA pada frekuensi 36,5 rad/s dan 8 piezoelectric hasil simulasi dan eksperimen

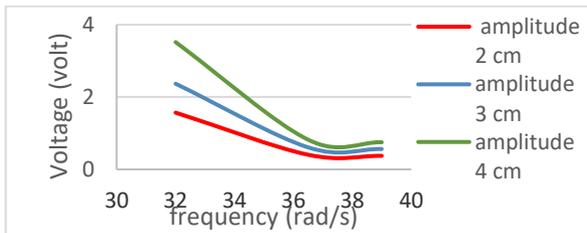
Gambar 4.39 di atas adalah grafik perbandingan reduksi sistem utama hasil simulasi dengan eksperimen. Pada grafik tersebut dapat dilihat bahwa tren grafik hasil simulasi adalah datar. Sedangkan tren grafik hasil eksperimen adalah naik. Perbedaan pada tren grafik hasil eksperimen tersebut dapat dikarenakan beberapa faktor, diantaranya adalah kondisi eksperimen yang tidak ideal dan banyaknya *noise* pada data sehingga tidak sesuai dengan grafik hasil simulasi. Data perbandingan reduksi respon sistem utama pada frekuensi 36,5 rad/s dan 8 *piezoelectric* hasil simulasi dan eksperimen pada tabel 4.15.

Tabel 4.14 RMS reduksi respon percepatan sistem pada frekuensi 36,5 rad/s dan 8 piezoelectric hasil simulasi dan eksperimen

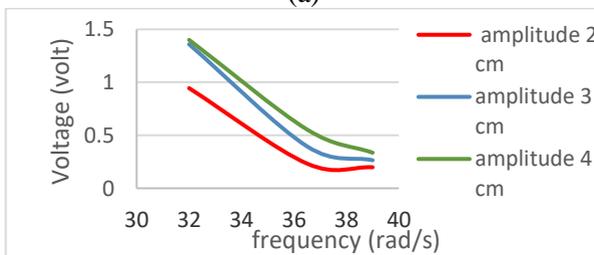
Amplitudo	Simulasi		Eksperimen	
	Reduksi (m/s <sup>2</sup> )	Reduksi (%)	Reduksi (m/s <sup>2</sup> )	Reduksi (%)
2	0,604	90,99	0,0093	91,77
3	0,9072	90,93	0,0103	95,94
4	1,21	90,97	0,0112	96,89

#### 4.4.2 Grafik Respon Voltase

Perbandingan grafik respon voltase bangkitan dijabarkan pada subbab ini. Grafik respon voltase sistem pada *piezoelectric* 8 buah pada gambar 4.40 (a) simulasi dan 4.37 (b) eksperimen.



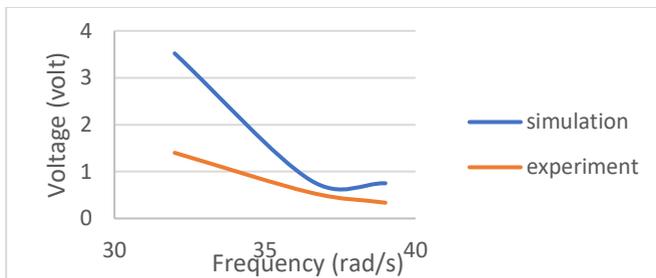
(a)



(b)

Gambar 4.40 Grafik RMS voltase sistem utama dengan CPDVA pada jumlah *piezoelectric* 8 buah terhadap frekuensi variasi amplitudo (a) hasil simulasi (b) hasil eksperimen

Grafik RMS voltase bangkitan sistem pada gambar 4.40 (a) dan (b) memiliki tren grafik yang hampir sama. Tren grafik voltase sistem dengan CPDVA hasil simulasi maupun hasil eksperimen sama-sama turun. Tren grafik menurun seiring bertambahnya frekuensi. Nilai maksimum pada frekuensi 32 rad/s, dan nilai minimum pada frekuensi 39 rad/s. Kesamaan tren kedua grafik tersebut dapat diartikan bahwa hasil simulasi sudah sesuai dengan hasil eksperimen, walaupun nilai RMS voltsae masih berbeda. Untuk mendapat simulasi yang lebih baik dan sesuai, langkah selanjutnya perlu dilakukan metode validasi lanjutan.



Gambar 4.41 Grafik perbandingan RMS voltase bangkitan sistem dengan CPDVA pada amplitudo 4 cm dan 8 piezoelectric hasil simulasi dan eksperimen

Pada gambar 4.41 di atas tersebut dapat dilihat bahwa tren grafik hasil simulasi adalah turun kemudian mendatar. Sedangkan tren grafik hasil eksperimen adalah turun. Hal tersebut berarti bahwa tren grafik pada variasi tersebut sudah hampir sama, dimana pada data RMS voltase bangkitan sistem dengan CPDVA untuk masing-masing grafik hasil simulasi maupun eksperimen adalah sama yaitu menurun. Data perbandingan reduksi respon sistem utama pada frekuensi 36,5 rad/s dan 8 *piezoelectric* hasil simulasi dan eksperimen pada tabel 4.16, sedangkan untuk variasi lainnya terdapat pada lampiran.

Tabel 4.15 RMS voltase bangkitan sistem CPDVA frekuensi 36,5 rad/s 8 piezoelectric hasil simulasi dan eksperimen

Frekuensi (rad/s)	Voltase (volt)	
	Simulasi	Eksperimen
32	3,52	1,4007
36.5	0,821	0,5547
39	0,75	0,336

Perbedaan nilai hasil simulasi dan eksperimen disebabkan beberapa faktor, yaitu:

1. Kondisi eksperimen yang tidak ideal dan banyaknya *noise*
2. Kondisi peralatan pengukuran yang belum terkalibrasi
3. Kondisi rangka sistem utama yang tidak *rigid*

Faktor-faktor di atas menyebabkan energi getaran yang terjadi tidak hanya arah tranlasi namun juga pada arah horizontal dan arah lain. Sehingga data rekam pada *oscilloscope* menjadi berkurang dan tidak sama nilainya dengan hasil simulasi. Terdapat pula faktor perbedaan nilai massa sitem dan *damper* aktual. Secara aktual massa sistem yang bergetar dan melepas energi berupa getaran tidak hanya plat massa utama namun juga rangka dan komponen lain sehingga energi getaran banyak terbuang. Sedangkan nilai konstanta *damper* sistem aktual dapat berubah karena pada proses eksperimen gesekan yang terjadi pada sistem tidak menentu.

## BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang diperoleh dari penelitian yang telah dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Telah dirancang sistem utama yang terdiri dari massa utama yang ditopang empat buah pegas dengan nilai pegas ekivalen 9202 N/m. Gaya eksitasi sistem berupa gaya pegas dengan konstanta 146 N/m yang digerakan motor pada titik berat massa utama. Dimensi sistem utama panjang x lebar x tinggi adalah 50 cm x 50 cm x 80 cm. Getaran yang terjadi pada sistem ini adalah translasi secara vertikal.
2. Telah dirancang *cantilever piezoelectric double vibration absorber* (CPDVA) dengan dimensi panjang x lebar x tinggi adalah 8 cm x 13 cm x 30 cm yang mampu menampung 800 buah *piezoelectric*. Massa *absorber* 1 bernilai 0,35 Kg, *absorber* 2 bernilai 0,525 Kg, pegas *absorber* 1 2655 N/m, pegas *absorber* 2 1553 N/m. CPDVA ini dapat mereduksi getaran translasi pada sistem utama dengan arah vertikal dan dapat menghasilkan listrik.
3. Semakin banyak jumlah *piezoelectric*, maka persentase reduksi respon percepatan sistem semakin tinggi. Hal ini disebabkan karena komponen *piezoelectric* berfungsi sebagai konstanta pegas *absorber* tambahan sehingga membuat respon sistem dengan CPDVA lebih rendah dan reduksi makin tinggi. Didapatkan pula bahwa semakin banyak jumlah *piezoelectric*, maka voltase bangkitan juga semakin tinggi. Hal ini disebabkan karena susunan seri *piezoelectric* sehingga makin banyak *piezoelectric* maka voltase bertambah.
4. Frekuensi yang menyebabkan respon sistem maksimum yaitu pada frekuensi natural, baik sistem tanpa CPDVA maupun sistem dengan CPDVA. Reduksi maksimum terjadi pada frekuensi natural sistem tanpa CPDVA. Sedangkan voltase tertinggi terdapat pada frekuensi natural sistem dengan

CPDVA, disebabkan pada frekuensi ini respon sistem menjadi maksimum sehingga defleksi *piezoelectric* besar dan voltase yang dihasilkan besar pula. Namun pada frekuensi natural sistem dengan CPDVA tersebut tidak terjadi reduksi respon getaran dan bersifat merusak sistem.

5. Semakin besar amplitudo, maka persentase reduksi respon percepatan juga semakin tinggi. Didapatkan pula bahwa semakin semakin besar amplitudo, maka voltase bangkitan juga semakin tinggi.
6. Perbandingan hasil simulasi dan eksperimen pada penelitian ini sudah hampir sama untuk tren grafik reduksi respon sistem utama dan voltase bangkitan. Namun nilai RMS untuk simulasi lebih tinggi daripada eksperimen.
7. *Cantilever piezoelectric double mass vibration absorber* dengan jumlah jumlah *piezoelectric* 8 buah optimum digunakan pada sistem utama yang beroperasi pada frekuensi natural yaitu 36,5 rad/s dan dengan amplitudo 4 cm. Pada kondisi tersebut CPDVA dapat mereduksi respon getaran sistem utama maksimum sebesar 96,89 % dan menghasilkan voltase optimum sebesar 0,554 volt.

## 5.2 Saran

Saran yang direkomendasikan dari penelitian yang sudah dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Disarankan untuk melakukan eksperimen pada kondisi yang minim gangguan dari eksternal agar *noise* pada data eksperimen tidak besar.
2. Disarankan untuk melakukan penelitian lebih lanjut untuk CPDVA ini khususnya pada metode validasi penelitian untuk mendapatkan nilai parameter simulasi yang sesuai.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Rao, Singiresu S. 2011. **Mechanical Vibrations Fifth Edition**. Amerika: Prentice Hall.
- [2] Sharma. 2006. **Studies on structural dielectric and piezoelectric properties of doped Pct ceramics**. Punjab: Universitas Deemed.
- [3] Effendy, W. Rachma. 2016. **Pemodelan dan Analisa Reduksi Respon Getaran Translasi pada Sistem Utama dan Energi Listrik yang Dihasilkan oleh Mekanisme *Dynamic Vibration Absorber* Metode *Cantilever Piezoelectric* (CPDVA)**. Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- [4] Lostari, Aini. 2015. **Studi Perbandingan Pengaruh Penambahan SDVA dan DDVA Tersusun Seri Terhadap Respon Getaran Translasi Sistem Utama**. Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- [5] Yang, Bin, et al. 2010. Hybrid energy harvester based on piezoelectric and electromagnetic mechanisms. **Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS** 9(2), 023002.
- [6] Galal, A. Hassan. 2014. Optimal Design of A Vibration Absorber-Harvester Dynamic System. **International Journal of Research in Engineering and Technology (IJRET)** 2319-1163.

***“Halaman ini sengaja dikosongkan”***

## BIODATA PENULIS



**Arif Rachman A** dilahirkan di Kediri, 13 April 1995. Terlahir sebagai anak pertama pasangan Rachmad dan Siti Sunarsih. Riwayat pendidikan penulis diawali di SDI Al-Falah pada tahun 2001-2007. Penulis melanjutkan pendidikannya di SMPN 1 Kediri pada tahun 2007-2010, kemudian melanjutkan pendidikannya di SMAN 2 Kediri pada tahun 2010-2013. Selanjutnya penulis melanjutkan pendidikan jenjang S-1 Jurusan Teknik Mesin di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya melalui jalur SNMPTN Undangan.

Semasa kuliah di ITS, penulis aktif dalam kegiatan akademik maupun organisasi, serta dalam hal karya tulis ilmiah. Penulis pernah menjadi grader Dinamika Teknik dan asisten Lab Vibrasi dan Sistem Dinamis. Dalam organisasi kemahasiswaan, penulis aktif menjadi staff Divisi R4 di Lembaga Bengkel Mahasiswa Mesin (LBMM) pada tahun 2014-2015 dan staff departemen syiar di LDK JMMI ITS pada tahun 2014-2015. Pada tahun 2014-2015 penulis berperan sebagai Ketua Departemen Dana Usaha LDJ Asshaaff. Dalam hal karya tulis, penulis aktif dalam mengikuti kegiatan perlombaan karya tulis, terutama Program Kreativitas Mahasiswa. Penulis terpilih sebagai penerima dana hibah penelitian PKM berturut-turut pada tahun 2015, 2016, dan 2017.

***“Halaman ini sengaja dikosongkan”***