

Pemodelan dan Analisa Reduksi Respon Getaran Translasi pada Sistem Utama dan Energi Listrik yang Dihasilkan oleh Mekanisme *Dynamic Vibration Absorber* Metode *Cantilever Piezoelectric* (CPVA)

W. Rachma Efendy dan W. Hendrowati

Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia

e-mail: wiewiek@me.its.ac.id

Abstrak —Getaran banyak terjadi pada mesin-mesin di industri. Salah satu solusi untuk mereduksi getaran berlebih adalah dengan menambahkan *Dynamic Vibration Absorber* (DVA). Prinsip kerja dari *Dynamic Vibration Absorber* adalah penambahan massa *absorber* dan pegas pada sistem utama. DVA akan mereduksi getaran sistem utama dengan menghasilkan getaran yang arahnya berlawanan dengan arah getar dari sistem utama. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Pachpute [1], penggunaan DVA telah terbukti dapat mereduksi getaran dari sistem utama yang dioperasikan di frekuensi natural secara signifikan. Dalam penelitian Tugas Akhir ini telah dirancang sebuah mekanisme alat *vibration absorber* dan *energy harvesting* metode *Cantilever Piezoelectric Vibration Absorber* (CPVA). Sistem utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah plat datar yang ditopang oleh empat pegas. Plat tersebut akan menerima gaya eksitasi dari pegas dibawahnya yang dihubungkan dengan massa eksentris pada motor DC. Koefisien pegas yang digunakan untuk menumpu plat datar memiliki nilai yang sama, yaitu sebesar 300 N/m. Sehingga eksitasi yang terjadi pada plat datar hanya ke arah translasi. 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. Dari simulasi yang telah dilakukan, daya bangkitan dan nilai persentase reduksi terbesar dari CPVA terjadi ketika sistem dioperasikan di frekuensi naturalnya, yaitu sebesar $3.52E-7$ watt dan 20.36%. Selain itu, dari simulasi juga didapatkan karakteristik CPVA dengan memvariasikan jumlah *piezoelectric*, didapatkan rentang jumlah *piezoelectric* optimum adalah 1400 hingga 2400 buah. Pada rentang tersebut, daya bangkitan dan persentase reduksi perpindahan massa utama terbesar yang dapat dicapai CPVA sebesar $5.78E-7$ watt dan 22.75%.

Kata Kunci— *Dynamic Vibration Absorber* (DVA), *cantilever piezoelectric*, persentase reduksi, amplitudo, massa eksentris, frekuensi, jumlah *piezoelectric*, *energy density*.

I. PENDAHULUAN

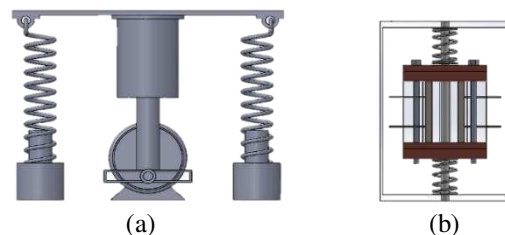
Pada umumnya DVA dimanfaatkan untuk melakukan reduksi getaran pada arah translasi yang terjadi pada sistem utama. Getaran dari sistem utama yang diteruskan ke massa *absorber* merupakan suatu energi kinetik yang dapat dimanfaatkan. Salah satu cara untuk memanen energi listrik dari getaran tersebut adalah menggunakan *cantilever piezoelectric*. Energi kinetik dari

perpindahan massa *absorber* dapat diubah menjadi energi listrik ketika *cantilever piezoelectric* mengalami lendutan dan menerima tegangan tarik atau tekan. Beberapa studi telah menunjukkan bahwa penggunaan *cantilever piezoelectric* untuk memanen energi kinetik dari eksitasi hanya mampu menghasilkan daya pada ukuran miliwatt. Hal ini menunjukkan bahwa perlunya sebuah mekanisme baru yang dapat memaksimalkan potensi defleksi dari *cantilever piezoelectric*.

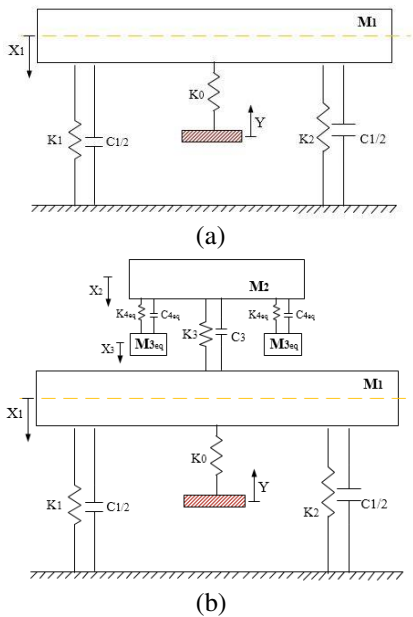
Penelitian ini membahas mekanisme peredaman getaran berlebih dan pemanfaatan energi kinetik yang terbuang dalam skala laboratorium. Untuk menggambarkan getaran yang disimulasikan, maka dirancanglah simulator getaran yang dapat merepresentasikan getaran dari sistem utama.

II. URAIAN PENELITIAN

Mekanisme keseluruhan rancangan bermula ketika plat datar menerima gaya eksitasi dari pegas dibawahnya yang dihubungkan dengan massa eksentrik pada motor DC. Selanjutnya eksitasi dari massa utama tersebut akan diserap oleh massa *absorber* yang dihubungkan oleh pegas. Eksitasi dari massa *absorber* dimanfaatkan oleh *cantilever piezoelectric* dengan cara mengubah energi kinetik menjadi energi listrik. Pada penelitian ini, dilakukan analisa dengan variasi amplitudo massa eksentrik, kecepatan putaran motor dan jumlah *cantilever piezoelectric* yang digunakan. Dari penelitian ini didapat pengaruh amplitudo sumber eksitasi sistem utama, kecepatan putaran motor dan jumlah *cantilever piezoelectric* terhadap reduksi getaran dari sistem utama serta energi bangkitan yang dihasilkan.



Gambar 1. Model analisa dari (a) sistem utama sebagai simulator getaran dan (b) CPVA

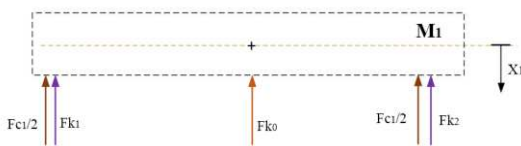


Gambar 2. Gambar model dinamis dari sistem utama (a) tanpa ditambahkan CPVA dan (b) dengan ditambahkan CPVA.

Keterangan gambar:

- | | |
|--------------------------------------|--|
| M_1 : Massa sistem utama | K_0 : Koefisien pegas dari massa eksentrik |
| M_2 : Massa absorber | K_1 : Koefisien pegas 1 di massa 1 |
| M_3 : Massa Piezoelectric | K_2 : Koefisien pegas 2 di massa 1 |
| X_1 : Displacement massa 1 | K_3 : Koefisien pegas di massa 2 |
| X_2 : Displacement massa 2 | K_4 : Koefisien pegas di massa 3 |
| X_3 : Displacement massa 3 | C_1 : Koefisien redaman 1 di massa 1 |
| Y : Amplitudo dari massa eksentrik | C_3 : Koefisien redaman 3 di massa 2 |

Gambar 3 dibawah ini merupakan *free body diagram* dari massa sistem utama (M_1). Dari gambar tersebut dapat dilihat vektor-vektor gaya yang bekerja pada M_1 . Displacement yang terjadi masa sistem utama hanya pada arah translasi karena nilai koefisien pegas 1 dan 2 adalah sama.



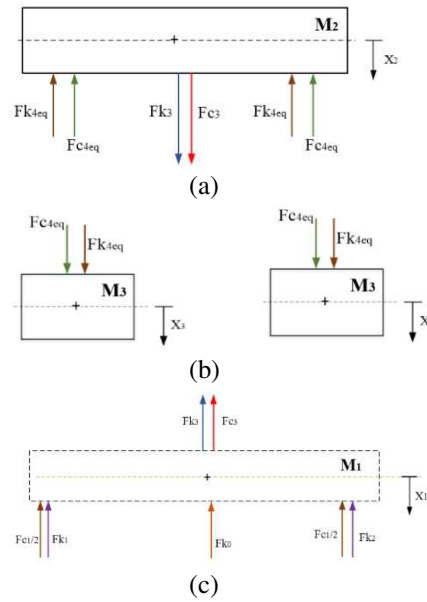
Gambar 3. *Free body diagram* sistem utama tanpa CPVA.

Persamaan gerak translasi sistem utama

$$\begin{aligned} \sum F &= M_1 \ddot{x}_1 \\ -F_{c1} - F_{k1} - F_{k2} - F_{k0} &= M_1 \ddot{x}_1 \\ -c_1 \dot{x}_1 - k_1 x_1 - k_2 x_1 - k_0(x_1 - y) &= M_1 \ddot{x}_1 \\ M_1 \ddot{x}_1 + c_1 \dot{x}_1 + k_1 x_1 + k_2 x_1 + k_0 x_1 - k_0 y &= 0 \\ M_1 \ddot{x}_1 + c_1 \dot{x}_1 + (k_0 + k_1 + k_2) x_1 &= k_0 y \end{aligned}$$

Gambar 4 dibawah ini merupakan *free body diagram* dari sistem utama yang telah ditambahkan dengan *Cantilever Piezoelectric Vibration Absorber (CPVA)*. FBD dari massa utama (M_1) yang telah dipengaruhi oleh pegas dari massa absorber (F_{k3}) ditampilkan pada gambar 4(c). FBD dari massa absorber (M_2) yang telah dipengaruhi 2 buah *cantilever piezoelectric* yang telah diekuivalenkan

ditampilkan pada gambar 4(a). Sedangkan FBD dari massa *cantilever piezoelectric* yang telah diekuivalenkan ditampilkan pada gambar 4(b).



Gambar 4. *Free body diagram* (a) massa absorber, (b) massa piezoelectric, dan (c) massa utama saat sistem utama ditambahkan dengan CPVA.

Dari analisa gaya diatas maka dapat dibuat persamaan matematis sebagai berikut :

a. Persamaan gerak translasi sistem utama

$$\begin{aligned} \sum F &= M_1 \ddot{x}_1 \\ -F_{c1} - F_{c3} - F_{k1} - F_{k2} - F_{k0} - F_{k3} &= M_1 \ddot{x}_1 \\ -c_1 \dot{x}_1 - c_3(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - k_1 x_1 - k_2 x_1 - k_0(x_1 - y) - k_3(x_1 - x_2) &= M_1 \ddot{x}_1 \\ M_1 \ddot{x}_1 + c_1 \dot{x}_1 + c_3 \dot{x}_1 - c_3 \dot{x}_2 + k_1 x_1 + k_2 x_1 + k_0 x_1 - k_0 y + k_3 x_1 - k_3 x_2 &= 0 \\ M_1 \ddot{x}_1 + (c_1 + c_3) \dot{x}_1 - c_3 \dot{x}_2 + (k_0 + k_1 + k_2 + k_3) x_1 - k_3 x_2 &= k_0 y \\ M_1 \ddot{x}_1 &= -(c_1 + c_3) \dot{x}_1 + c_3 \dot{x}_2 - (k_0 + k_1 + k_2 + k_3) x_1 + k_3 x_2 + k_0 y \end{aligned}$$

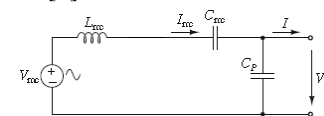
b. Persamaan gerak translasi massa absorber

$$\begin{aligned} \sum F &= M_2 \ddot{x}_2 \\ F_{k3} + F_{c3} - F_{k4eq} - F_{c4} &= M_2 \ddot{x}_2 \\ M_2 \ddot{x}_2 - k_3(x_1 - x_2) - c_3(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_4eq(x_2 - x_3) + \Gamma.n.Vp &= 0 \\ M_2 \ddot{x}_2 - k_3 x_1 + k_3 x_2 - c_3 \dot{x}_1 + c_3 \dot{x}_2 + k_4eq x_2 - k_4eq x_3 + \Gamma.n.Vp &= 0 \\ M_2 \ddot{x}_2 = k_3 x_1 - (k_3 + k_4eq) x_2 + c_3 \dot{x}_1 - c_3 \dot{x}_2 + k_4eq x_3 - \Gamma.n.Vp &= 0 \end{aligned}$$

c. Persamaan gerak translasi massa piezoelectric

$$\begin{aligned} \sum F &= M_3 eq \ddot{x}_3 \\ F_{k4eq} + F_{c4} &= M_3 eq \ddot{x}_3 \\ M_3 eq \ddot{x}_3 - k_4eq(x_2 - x_3) - \Gamma.n.Vp &= 0 \\ M_3 eq \ddot{x}_3 - k_4eq x_2 + k_4eq x_3 - \Gamma.n.Vp &= 0 \\ M_3 eq \ddot{x}_3 = k_4eq x_2 - k_4eq x_3 + \Gamma.n.Vp & \end{aligned}$$

Gambar 5 dibawah ini merupakan diagram sirkuit kelistrikan dari material *piezoelectric*. Material *piezoelectric* menghasilkan energi listrik apabila terjadi defleksi pada material tersebut. Energi listrik tersebut terdiri dari voltase, arus listrik, dan daya bangkitan. Voltase bangkitan dari energi listrik pada mekanisme ini dapat dirumuskan seperti dibawah ini [3]:



Gambar 5 Diagram sirkuit elektromagnetik *cantilever piezoelectric*

$$V_p = \frac{3d_{31} E_p w p t}{4c} x_p \tag{1}$$

dimana :

- V_p = Voltase bangkitan *piezoelectric* (Volt)
- d_{31} = Voltage constant (C/N)
- E_p = Modulus elastisitas (N/m²)

- w_p = Lebar *piezoelectric* (m)
- t = Tebal *piezoelectric* (m)
- c = *Piezoelectric capacitance* (Farad)
- x_p = Defleksi *piezoelectric* (m)

Sedangkan arus bangkitan dari *piezoelectric* pada mekanisme kali ini dapat dirumuskan dengan:

$$V_{mc} = L_{mc} \frac{dI_{mc}}{dt} + R_{mc} I_{mc} + \frac{1}{C_{mc}} \int I_{mc} dt + V_p \quad (2)$$

$$I_{mc} = \frac{1}{L_{mc}} (V_{mc} - R_{mc} I_{mc} - \frac{1}{C_{mc}} \int I_{mc} dt - V_p) \quad (3)$$

dimana:

$$V_{mc} = \frac{F_i}{r}, L_{mc} = \frac{M}{r^2}, R_{mc} = \frac{d_p}{r^2}, C_{mc} = \frac{r^2}{k_p}$$

dengan :

- M = Massa (Kg)
- d_p = Konstanta *damping piezoelectric* (Ns/m)
- k_p = Konstanta pegas ekuivalen *piezoelectric* (N/m)
- C_p = kapasitansi *piezoelectric* (Farad)

Sehingga daya bangkitan dari *piezoelectric* dapat dirumuskan dengan :

$$P = V_p I_{mc} \quad (4)$$

dimana :

- P = Daya bangkitan *piezoelectric* (Watt)
- I_{mc} = Arus bangkitan *piezoelectric* (Ampere)

Parameter-parameter untuk pemodelan pada gambar 2 diperoleh dari berbagai sumber diantaranya dari data referensi sebelumnya.

Tabel 1.
Parameter sistem utama

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Massa Sistem Utama	M_1	4	Kg
Koefisien Pegas 1 (ekuivalen)	K_1	600	N/m
Koefisien Pegas 2 (ekuivalen)	K_2	600	N/m
Koefisien Pegas <i>Exciter</i>	K_0	500	N/m
<i>Damping Ratio</i> Sistem Utama	ζ_1	0.1	-
Koefisien Redaman Batang Pengarah	C_1	17.88	N.s/m

Tabel 2.
Parameter *Cantilever Piezoelectric Vibration Absorber* (CPVA)

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Massa <i>Absorber</i>	M_{abs}	0.02	Kg
Koefisien Pegas <i>Absorber</i>	K_3	500	N/m
<i>Damping Ratio Absorber</i>	ζ_2	0.4	-
Koefisien Redaman Batang Pengarah <i>Absorber</i>	C_1	3.577	N.s/m

Tabel 3.
Parameter Material *Piezoelectric*

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Massa <i>piezoelectric</i>	M_{pzt}	6×10^{-4}	Kg
Ketebalan <i>piezoelectric</i>	t	1×10^{-3}	m
Lebar <i>piezoelectric</i>	w_{pzt}	6×10^{-4}	m
Panjang <i>piezoelectric</i>	L_{pzt}	12×10^{-3}	m
Kapasitansi	C_{pzt}	244×10^{-10}	F
Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Konstanta regangan <i>piezoelectric</i>	d_{31}	110×10^{-12}	C/N
<i>Electromechanical coupling factor</i>	k_{31}	12	%

Kontanta pegas <i>piezoelectric</i>	k_{pzt}	$5,75 \times 10^7$	N/m
Modulus Young	E	3×10^9	N/m ²

Dari simulasi pemodelan ini didapatkan respon *displacement* dari sistem dan *energy density* dari CPVA. Pada simulasi ini digunakan variasi amplitudo *input* getaran, frekuensi operasi, dan jumlah *cantilever piezoelectric*.

III. HASIL DAN ANALISA

Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan, nilai frekuensi natural dari sistem dengan variasi jumlah *piezoelectric* dapat dilihat pada Tabel 4 dibawah ini. Berdasarkan Tabel 4, penambahan CPVA dapat menggeser nilai frekuensi natural dari sistem utama.

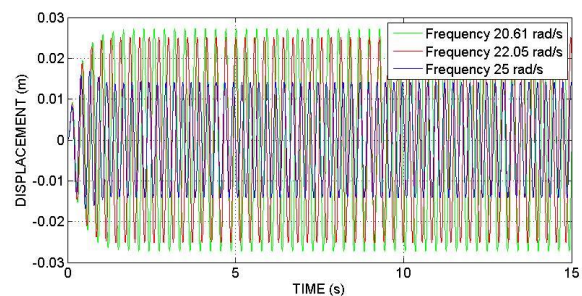
Tabel 4.
Parameter Material *Piezoelectric*

Jumlah PZT (n)	M_3 (n x 0.0006) Kg	M_2 (0.02 + M_3) Kg	Frekuensi natural sistem utama tanpa CPVA (rad/s)	Frekuensi natural sistem dengan CPVA (rad/s)	ω_{n1}	ω_{n2}	ω_{n3}
2600	1.56	1.58			5.6	21.2	87
2800	1.68	1.7	20.61		7.9	21.4	102
3000	1.8	1.82			9.7	21.5	115

3.1 Pemodelan Sistem Utama dengan CPVA (Jumlah *Piezoelectric* Tetap)

Pemodelan yang dilakukan menggunakan tiga macam variasi, yaitu variasi amplitudo eksitasi, variasi frekuensi operasi, dan variasi jumlah *piezoelectric*. Variasi amplitudo eksitasi yang digunakan dalam simulasi ini adalah 0.025 m, 0.030 m, dan 0.035 m. Sedangkan frekuensi yang digunakan adalah frekuensi natural dari sistem utama, yaitu sebesar 20.61 rad/s. Frekuensi selanjutnya adalah frekuensi panen yang bersumber dari penelitian Galal [2], dimana frekuensi panen berada pada rasio frekuensi operasi-DVA (ω_f / ω_{abs}) sebesar 1.07, sehingga didapatkan frekuensi panen sebesar 22.05 rad/s. Frekuensi terakhir adalah frekuensi lembah, frekuensi ini merupakan frekuensi yang berada di luar rentang rasio frekuensi resonansi. Berdasarkan grafik *transmissibility* resonansi yang bersumber dari buku "Mechanical Vibrations" oleh Rao [4], *range* frekuensi resonansi adalah 0.9 - 1.1, sehingga frekuensi yang dianggap memenuhi adalah senilai 25 rad/s. Jumlah *piezoelectric* yang digunakan adalah sebanyak 2600, 2800, dan 3000 buah.

3.2.1 Respon Perpindahan Massa Utama dengan CPVA Terhadap Variasi Frekuensi



Gambar 8. Grafik respon perpindahan dari massa utama yang telah ditambahkan CPVA dengan variasi frekuensi operasi.

Gambar 8 diatas merupakan grafik respon perpindahan yang ditunjukkan oleh massa utama yang telah ditambahkan dengan CPVA. Simulasi dilakukan pada amplitudo 0.025 m dan jumlah *piezoelectric* 2600 buah. Garis hijau menunjukkan respon perpindahan massa utama yang dioperasikan pada frekuensi 20.61 rad/s. Garis merah menunjukkan respon perpindahan massa utama yang dioperasikan pada frekuensi 22.05 rad/s. Sedangkan garis biru menunjukkan respon perpindahan dari massa utama yang dioperasikan pada frekuensi 25 rad/s. Dapat dilihat pada grafik bahwa respon perpindahan dari massa utama akan mengalami penurunan ketika frekuensi operasi semakin jauh dari salah satu frekuensi natural sistem, yaitu 21.2 rad/s.

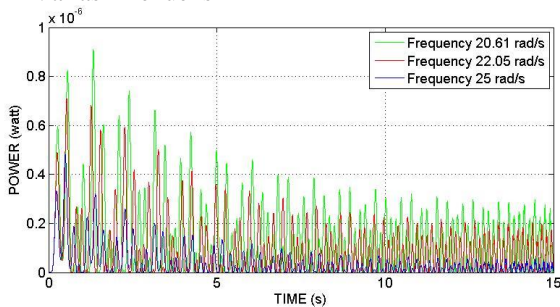
3.2.2 Respon Perpindahan Massa Utama dengan CPVA Terhadap Variasi Amplitudo



Gambar 8. Grafik respon perpindahan dari massa utama yang telah ditambahkan CPVA dengan variasi amplitudo.

Gambar 8 diatas merupakan grafik respon perpindahan yang ditunjukkan oleh massa utama yang telah ditambahkan dengan CPVA. Simulasi dilakukan pada frekuensi 20.61 rad/s dan jumlah *piezoelectric* 2600 buah. Garis biru menunjukkan respon perpindahan massa utama yang dioperasikan pada amplitudo 0.025 m. Garis merah menunjukkan respon perpindahan massa utama yang dioperasikan pada amplitudo 0.030 m. Sedangkan garis hijau menunjukkan respon perpindahan dari massa utama yang dioperasikan pada amplitudo 0.035 m. Dapat dilihat pada grafik bahwa respon perpindahan dari massa utama akan mengalami penurunan ketika amplitudo eksitasi yang diberikan juga semakin kecil.

3.2.3 Energi Listrik Bangkitan *Piezoelectric* Terhadap Variasi Frekuensi

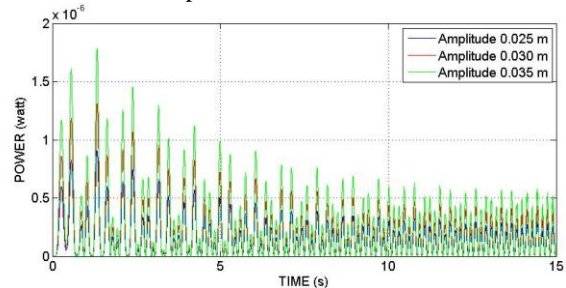


Gambar 13. Grafik energi bangkitan dari *piezoelectric* dengan variasi frekuensi operasi.

Gambar 13 diatas merupakan grafik respon perpindahan yang ditunjukkan diatas merupakan grafik energi bangkitan listrik dari *cantilever piezoelectric*. Simulasi dilakukan pada amplitudo 0.025 m dan jumlah *piezoelectric* 2600 buah. Garis hijau menunjukkan energi listrik yang dihasilkan ketika sistem dioperasikan pada frekuensi 20.61 rad/s. Garis merah menunjukkan energi listrik yang dihasilkan ketika sistem dioperasikan pada frekuensi 22.05 rad/s. Sedangkan garis biru menunjukkan energi listrik yang dihasilkan ketika sistem

dioperasikan pada frekuensi 25 rad/s. Dapat dilihat pada grafik bahwa energi bangkitan listrik akan mengalami penurunan ketika frekuensi operasi semakin jauh dari salah satu frekuensi natural sistem, yaitu 21.2 rad/s.

3.2.4 Energi Listrik Bangkitan *Piezoelectric* Terhadap Variasi Amplitudo

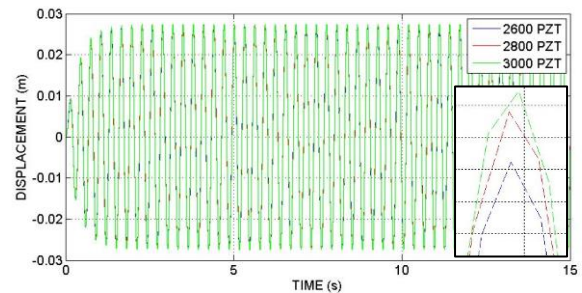


Gambar 14. Grafik energi bangkitan dari *piezoelectric* dengan variasi amplitudo.

Gambar 14 diatas merupakan grafik energi bangkitan listrik dari *cantilever piezoelectric*. Simulasi dilakukan pada frekuensi 20.61 rad/s dan jumlah *piezoelectric* 2600 buah. Garis biru menunjukkan energi listrik yang dihasilkan ketika sistem dioperasikan pada amplitudo 0.025 m. Garis merah menunjukkan energi listrik yang dihasilkan ketika sistem dioperasikan pada amplitudo 0.030 m. Sedangkan garis hijau menunjukkan energi listrik yang dihasilkan ketika sistem dioperasikan pada amplitudo 0.035 m. Dapat dilihat pada grafik bahwa energi listrik yang dihasilkan akan mengalami penurunan ketika amplitudo eksitasi yang diberikan juga semakin kecil.

3.3 Pemodelan Sistem Utama dengan CPVA (Jumlah *Piezoelectric* Divariasikan)

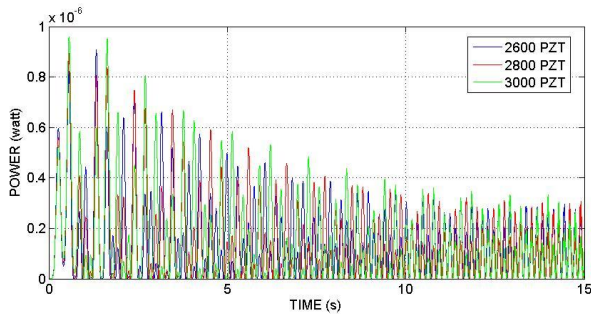
3.3.1 Respon Massa Utama dengan Variasi Jumlah *Piezoelectric*



Gambar 15. Grafik respon massa utama dengan variasi jumlah *piezoelectric*.

Gambar 15 diatas merupakan grafik respon perpindahan yang ditunjukkan oleh massa utama yang telah ditambahkan dengan CPVA. Simulasi dilakukan pada frekuensi 20.61 rad/s dan amplitudo 0.025 m. Garis biru menunjukkan respon perpindahan massa utama dengan variasi jumlah *piezoelectric* 2600 buah. Garis merah menunjukkan respon perpindahan massa utama dengan variasi jumlah *piezoelectric* 2800 buah. Sedangkan garis hijau menunjukkan respon perpindahan dari massa utama dengan variasi jumlah *piezoelectric* 3000 buah. Dapat dilihat pada grafik bahwa respon perpindahan dari massa utama akan mengalami penurunan ketika jumlah *piezoelectric* juga semakin sedikit.

3.3.2 Energi Bangkitan Listrik dengan Variasi Jumlah Piezoelectric



Gambar 16. Grafik daya bangkitan listrik dengan variasi jumlah piezoelectric.

Gambar 16 diatas merupakan grafik daya bangkitan listrik yang dihasilkan piezoelectric. Simulasi dilakukan pada frekuensi 20.61 rad/s dan amplitudo 0.025 m. Garis biru menunjukkan daya bangkitan listrik dengan variasi jumlah piezoelectric 2600 buah. Garis merah menunjukkan daya bangkitan listrik dengan variasi jumlah piezoelectric 2800 buah. Sedangkan garis hijau menunjukkan daya bangkitan listrik dengan variasi jumlah piezoelectric 3000 buah. Dapat dilihat pada grafik bahwa daya bangkitan listrik akan mengalami penurunan ketika jumlah piezoelectric semakin sedikit.

3.4 Pembahasan

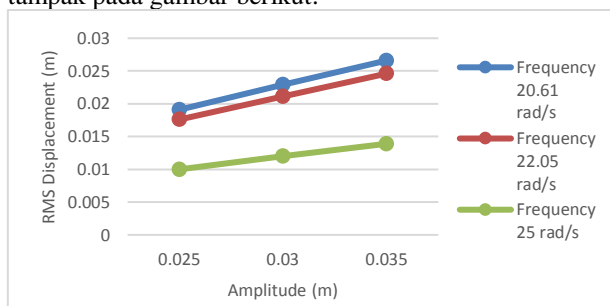
Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan, didapatkan data dan grafik sebagai berikut.

Tabel 4.

Nilai RMS Perpindahan, Kecepatan, Percepatan dari Massa Utama dan Persentase Reduksi Setelah Ditambahkan CPVA

Amplitudo (m)	Frequency (rad/s)	RMS Displacement (m)	RMS Velocity (m/s)	RMS Acceleration (m/s ²)	Reduction of Displacement (%)
0.025	20.61	0,0191	0,399	8,1083	20,08
	22.05	0,0176	0,392	8,5444	7,85
	25	0,01	0,250	6,2248	-2,04
0.030	20.61	0,0229	0,479	9,7168	19,93
	22.05	0,0211	0,470	10,257	7,86
	25	0,012	0,301	7,4683	-2,56
0.035	20.61	0,0266	0,561	11,307	20,36
	22.05	0,0246	0,548	11,981	7,87
	25	0,0139	0,351	8,7106	-1,46

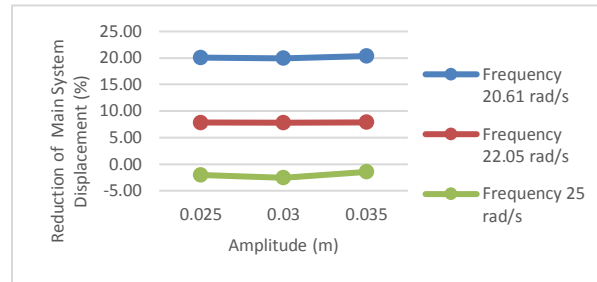
Dari data di atas maka dapat dibuat grafik seperti tampak pada gambar berikut.



Gambar 17. Grafik respon RMS perpindahan dari massa utama (X1) yang telah ditambahkan CPVA dengan variasi amplitudo.

Dari gambar 17 diatas dapat dilihat respon perpindahan dari massa utama (X₁) yang telah ditambahkan dengan CPVA dan dipengaruhi oleh amplitudo. Jumlah piezoelectric yang digunakan dalam simulasi ini adalah 2600 buah. Terlihat grafik memiliki trendline naik. Pada saat frekuensi operasi

20.61 rad/s dan amplitudo sebesar 0.025 m, maka respon X₁ yang didapatkan senilai 0.0191 m. Untuk frekuensi yang sama namun dengan amplitudo sebesar 0.03 m, didapatkan nilai X₁ sebesar 0.0229 m, sedangkan untuk amplitudo sebesar 0.035 m didapatkan nilai X₁ sebesar 0.0266 m. Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa dengan semakin besarnya nilai amplitudo yang diberikan, maka respon perpindahan massa utama juga semakin besar. Dengan semakin besarnya amplitudo eksitasi, maka nilai gaya input yang diterima oleh massa utama menjadi semakin besar, sehingga perpindahan yang terjadi pada massa utama juga semakin besar.



Gambar 18. Grafik reduksi respon perpindahan dari massa utama (X1) dengan variasi amplitudo.

Dari gambar 18 diatas dapat dilihat reduksi respon perpindahan dari massa utama yang dipengaruhi oleh amplitudo dan frekuensi. Jumlah piezoelectric yang digunakan dalam simulasi ini adalah 2600 buah. Terlihat grafik memiliki trendline yang lurus dengan nilai simpangan yang sangat kecil. Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa dengan besarnya nilai amplitudo yang diberikan tidak mempengaruhi reduksi respon perpindahan massa utama.

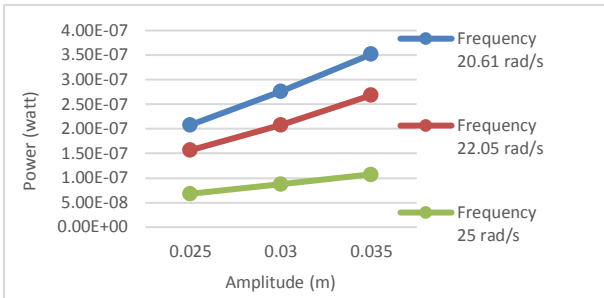
Dengan semakin besarnya amplitudo eksitasi, nilai gaya input yang diterima oleh massa utama menjadi semakin besar. Tetapi hal ini mengakibatkan timbulnya gaya lawan yang juga semakin besar dari sistem absorber, sehingga persentase reduksi perpindahan massa utama menjadi tetap. Berdasarkan teori, persentase reduksi dari perpindahan massa utama bukan ditentukan dari gaya input, melainkan frekuensi operasi dari sistem tersebut. Persentase reduksi semakin naik ketika sistem dioperasikan mendekati frekuensi natural.

Tabel 6.

Nilai Energi Listrik Bangkitan dari Piezoelectric terhadap amplitudo dan frekuensi

Amplitudo (m)	Frequency (rad/s)	RMS of Vp (volt)	RMS of I _{mc} (ampere)	RMS of Power (watt)
0.025	20.61	0,1811	1,30E-06	2,08E-07
	22.05	0,1494	1,04E-06	1,57E-07
	25	0,0738	1,06E-06	6,80E-08
0.030	20.61	0,2161	1,12E-06	2,76E-07
	22.05	0,1793	1,13E-06	2,08E-07
	25	0,0885	9,56E-07	8,73E-08
0.035	20.61	0,2501	1,19E-06	3,52E-07
	22.05	0,211	1,12E-06	2,69E-07
	25	0,1042	9,75E-07	1,08E-07

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



Gambar 19. Grafik daya bangkitan listrik dengan variasi amplitudo

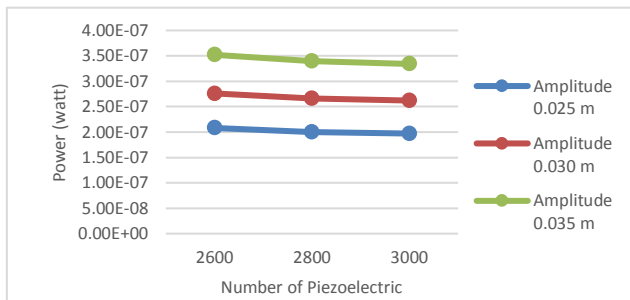
Dari gambar 19 diatas dapat dilihat daya bangkitan listrik dari *piezoelectric* yang dipengaruhi oleh amplitudo. Jumlah *piezoelectric* yang digunakan dalam simulasi ini adalah 2600 buah. Terlihat grafik memiliki trendline naik. Pada saat frekuensi operasi 20.61 rad/s dan amplitudo sebesar 0.025 m, maka daya yang didapatkan senilai 2.08E-7 watt. Untuk frekuensi yang sama namun dengan amplitudo sebesar 0.03 m, didapatkan daya senilai 2.76E-7 watt, sedangkan untuk amplitudo sebesar 0.035 m didapatkan daya sebesar 3.52E-7. Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa dengan semakin besarnya nilai amplitudo yang diberikan, maka daya bangkitan listrik juga menjadi semakin besar.

Dengan bertambahnya amplitudo eksitasi, voltase bangkitan *piezoelectric* menjadi semakin besar. Hal ini menyebabkan daya bangkitan listrik juga semakin naik.

Tabel 6. Nilai Energi Listrik Bangkitan dari *Piezoelectric* terhadap Jumlah *Piezoelectric*

Numb of PZT	Power (watt)		
	Amplitude 0.025 m	Amplitude 0.030 m	Amplitude 0.035 m
2600	2,08E-07	2,76E-07	3,52E-07
2800	2,00E-07	2,66E-07	3,40E-07
3000	1,97E-07	2,62E-07	3,34E-07

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



Gambar 20. Grafik daya bangkitan listrik dengan variasi jumlah *piezoelectric*

Dari gambar 20 diatas dapat dilihat daya bangkitan listrik yang dipengaruhi oleh jumlah *piezoelectric* dengan variasi amplitudo. Frekuensi operasi pada simulasi ini adalah 20.61 rad/s. Terlihat grafik memiliki trendline turun. Pada saat amplitudo 0.025 m, didapatkan rentang daya bangkitan yang dapat diperoleh adalah 1.97E-7 hingga 2.08E-7 watt. Ketika amplitudo 0.030 m, didapatkan rentang daya bangkitan yang dapat diperoleh adalah 2.62E-7 hingga 2.76E-7 watt. Sedangkan dengan amplitudo 0.035 m, rentang daya bangkitan yang dapat diperoleh adalah 3.34E-7 hingga 3.52E-7 watt. Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa dengan semakin banyaknya jumlah *piezoelectric* yang digunakan, maka daya bangkitan listrik menjadi semakin kecil.

Dari persamaan (1) yang telah disebutkan sebelumnya, dapat dilihat bahwa tegangan bangkitan berbanding lurus dengan defleksi material *piezoelectric* yang terjadi. Semakin banyak jumlah *piezoelectric*, defleksi material *piezoelectric* akan semakin kecil, sehingga energi listrik yang dihasilkan juga semakin kecil.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi dan analisa yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan bahwa :

1. Semakin besar amplitudo eksitasi menyebabkan perpindahan yang terjadi pada massa utama, massa absorber, dan massa *piezoelectric* juga semakin besar. Hal ini menyebabkan voltase dan daya bangkitan dari CPVA semakin bertambah. Akan tetapi persentase reduksi perpindahan massa utama memiliki nilai yang konstan.
2. 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 CPVA semakin bertambah. Daya bangkitan terbesar yang mampu dihasilkan oleh CPVA adalah 3.52E-7 watt. Selain itu, persentase reduksi perpindahan massa utama juga memiliki nilai yang semakin besar. Nilai reduksi terbesar terjadi ketika sistem dioperasikan di frekuensi naturalnya, yaitu sebesar 20.36%.
3. Semakin besar jumlah *piezoelectric* yang digunakan, menyebabkan perpindahan yang terjadi pada massa utama juga semakin besar, sehingga persentase reduksi perpindahan massa utama semakin turun. Akan tetapi, bertambahnya jumlah *piezoelectric* yang digunakan menyebabkan perpindahan massa absorber dan massa *piezoelectric* semakin kecil. Hal ini menyebabkan voltase dan daya bangkitan dari CPVA juga bertambah kecil.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Pachpute, A.Z., Bawa, P.B. 2016. *Optimum Design of Damped Dynamic Vibration Absorber – A Simulation Approach*. Imperial Journal of Interdisciplinary Research (IJIR).
- [2] Galal, A. Hassan. 2014. *Optimal Design of A Vibration Absorber-Harvester Dynamic System*. International Journal of Research in Engineering and Technology (IJRET).
- [3] Krisdianto, Andy Noven. 2011. *Studi Karakteristik Energi yang Dihasilkan Mekanisme Vibration Energy Harvesting dengan Metode Piezoelectric untuk Pembebanan Frontal dan Lateral*. Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- [4] S. Rao, Singiresu. 2004. *Mechanical Vibration*. Singapore: Prentice Hall PTR.