



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TM 141585

**ANALISA REDUKSI GETARAN DARI MEKANISME
ELEKTROMAGNETIC VIBRATION ABSORBER
(EMVA) SEBAGAI PEREDAM GETARAN DAN
PENGHASIL ENERGI LISTRIK**

**FIRAS RAHMAD HIDAYATULLAH
NRP 2114 100 104**

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

**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2018**



TUGAS AKHIR – TM141585

**ANALISA REDUKSI GETARAN DARI
MEKANISME ELEKTROMAGNETIC
VIBRATION ABSORBER (EMVA) SEBAGAI
PEREDAM GETARAN DAN PENGHASIL
ENERGI LISTRIK**

FIRAS RAHMAD HIDAYATULLAH
NRP. 2114100104

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

PROGRAM SARJANA
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH
NOPEMBER
SURABAYA 2018



FINAL PROJECT – TM141585

**ANALYSIS OF REDUCTING VIBRATION BY
ELEKTROMAGNETIC VIBRATION
ABSORBER (EMVA) MECHANISMS AS A
DAMPING VIBRATION AND ENERGY
ABSORBER**

FIRAS RAHMAD HIDAYATULLAH
NRP. 2114100104

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

BACHELOR PROGRAM
MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH
NOPEMBER
SURABAYA 2018

ANALISA REDUKSI GETARAN DARI MEKANISME
ELEKTROMAGNETIC VIBRATION ABSORBER (EMVA) SEBAGAI
PEREDAM GETARAN DAN PENGHASIL ENERGI

TUGAS AKHIR

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

Oleh:

FIRAS RAHMAD HIDAYATULLAH

NRP. 021114 40000 104

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Wiwiek Hendrowati, ST, MT (Pembimbing)
NIP. 197004121997032003
2. Dr. Harus Laksana Guntur, ST, M.Eng (Penguji I)
NIP. 197505111999031001
3. Ari Kurriawan Saputra, S.T., M.T. (Penguji II)
NIP.198504012015041001
4. Aida Annisa Amin Daman, ST, MT (Penguji III)
NIP. 198907052015042005

SURABAYA

JULI, 2018

ANALISA REDUKSI GETARAN DARI MEKANISME ELEKTROMAGNETIC VIBRATION ABSORBER (EMVA) SEBAGAI PEREDAM GETARAN DAN PENGHASIL ENERGI LISTRIK

Nama : Firas Rahmad Hidayatullah
NRP : 0211144000104
Dosen Pembimbing : Dr. Wiwiek Hendrowati, ST., MT.
Laboratorium : Vibrasi dan Sistem Dinamis

ABSTRAK

Getaran yang terjadi di sekeliling kita bervariasi sesuai konstruksi bangun mesin itu sendiri. Terdapat getaran dengan arah translasi atau rotasi. Getaran ini jika dibiarkan terus-menerus pada suatu mesin dapat mengakibatkan kerusakan pada konstruksi mesin seperti retak, keausan, fatigue, bahkan dapat mengalami patah apabila frekuensi operasi sama atau mendekati nilai frekuensi natural. Pada akhirnya efisiensi mesin berkurang. Adapun penelitian yang berkaitan dengan reduksi getaran dan penyerapan energi dari getaran salah satunya telah dilakukan oleh Faiz Imawan Dana Putra^[1] tentang rancang bangun dan simulasi dari mekanisme cantilever piezoelectric vibration absorber (CPVA). Namun energi yang diserap bernilai sangat kecil yakni 0.000054 watt. Sehingga perlu alternatif lain. Electromagnetic Vibration Absorber (EMVA) merupakan alternatif yang sangat direkomendasikan. Menggunakan diameter kawat 0,35 mm dan jumlah lilitan kumparan 4000 lilitan memberikan penghematan bahan bakar sekitar 30,79% dibandingkan dengan mesin diesel standar^[10]. EMVA akan mereduksi getaran dan menyerap energi menggunakan konsep induksi elektromagnetik yang mana seperti kita ketahui konsep induksi elektromagnetik lebih baik dalam penyerapan energi kinetik dibanding piezoelectric.

Pada penelitian tugas akhir ini, dilakukan analisa dan perancangan mekanisme peredam getaran sekaligus energy harvester dengan konsep induksi elektromagnetik yang mana perangkat ini disebut Electromagnetic Vibration Absorber (EMVA). Sistem utama yang akan dianalisa berupa plat datar yang ditumpu oleh empat buah pegas. Sistem utama pada penelitian ini diberi gaya eksitasi oleh motor yang didistribusikan dengan massa eksentrik dan pegas. Gaya eksitasi yang berlebih diteruskan ke massa absorber dan dimanfaatkan oleh sistem electrical electromagnetic untuk menghasilkan energi listrik. Penelitian ini hanya menganalisa reduksi getaran pada arah translasi, rolling, dan pitching. Arah translasi hanya sebatas pergerakan sumbu vertikal. Rolling dan pitching disebabkan perbedaan nilai konstanta pegas pada setiap pegas. Variasi frekuensi operasi pada penelitian ini mengikuti frekuensi natural pada sistem utama. Variasi lokasi EMVA hanya terbatas 2 dimensi koordinat yang mana disesuaikan dengan lokasi getaran sistem utama yang paling besar. Adapun variasi lainnya yaitu amplitudo eksitasi sebesar 0,02 m, 0,03 m, dan 0,04 m sebagai inputan getaran..

Hasil dari penelitian ini adalah rancang bangun beserta rekomendasi parameter EMVA terdiri dari massa, konstanta pegas, nilai medan magnet dan dimensi EMVA yang mana memiliki fungsi sebagai pereduksi getaran dan pengubah energi kinetik menjadi energi listrik. Sehingga, dapat diketahui energi bangkitan dan reduksi getaran dari mekanisme EMVA serta pengaruhnya terhadap letak dan amplitudo eksitasi.

Kata Kunci: Getaran, Energi Listrik, Elektromagnetic, Frekuensi, Amplitudo, Peletakan Electromagnetic Vibration Absorber (EMVA).

ANALYSIS OF REDUCTING VIBRATION BY ELEKTROMAGNETIC VIBRATION ABSORBER (EMVA) MECHANISMS AS A DAMPING VIBRATION AND ENERGY ABSORBER

Student's Name : Firas Rahmad Hidayatullah
NRP : 02111440000104
Advisory Lecturer : Dr. Wiwiek Hendrowati, ST., MT.
Department : Mechanical Engineering

The vibrations that occur around us vary according to the construction of the machine itself. There is a vibration with the direction of translation or rotation. This vibration if left continuously on a machine can result in damage to engine construction such as cracking, wear and fatigue and even breaking if the operating frequency is equal or close to the natural frequency value. In the end the engine efficiency is reduced. The research related to vibration reduction and energy absorption from one of the vibrations has been done by Faiz Imawan Dana Putra [1] about the design and simulation of cantilever piezoelectric vibration absorber (CPVA) mechanism. But the energy absorbed by CPVA is very small 0.000054 watts. So it needs another alternative in absorbing energy. Electromagnetic Vibration Absorber (EMVA) is a recommended alternative. EMVA reduces vibration and absorbs energy using the concept of electromagnetic induction. Using a 0.35 mm wire diameter and coil winding amount of 4000 windings alone provides 30.79% fuel savings compared to standard diesel engines [10]. So it can be seen that the concept of electromagnetic induction is better in the absorption of kinetic energy than piezoelectric.

In this final project, analyzing and designing dynamic vibration mechanism of adsorber and energy harvester with electromagnetic induction concept which is called

Electromagnetic Vibration Absorber (EMVA). The main system to be analyzed is a flat plate supported by four springs. The main system in this study was given an excitation force by a motor that was distributed with eccentric mass and springs into vibrations. The vibrations in the main system are absorbed by the absorber mass and utilized by EMVA into electrical energy. This study only analyzes vibration reduction in translational, rolling, and pitching directions. The direction of translation is limited to the movement of the vertical axis. The direction of rolling and pitching is due to the difference in stiffness constant value on each spring. Operation frequency variation in this study used range 1 rad / s up to 100 rad / s. The variation of the EMVA point of contact is only limited to 2 dimensional coordinates which is adjusted to the largest main system vibration location. The other variation is the excitation amplitude of 0.02 m, 0.03 m, and 0.04 m as the vibration input.

The results obtained from this research are the point of placing EMVA on the main system which has the largest vibration reduction. The largest vibration reduction occurred at number six with a vibration reduction rician of 64% translational direction (10.6763 m / s² to 3.8837 m / s²), -175% rolling direction (4.9433 rad / s² to 13,5702 rad / s²), and 20% pitching direction 25.3822 rad / s² to 20.1988 rad / s²). In addition, the highest energy harvesting in number three with a voltage of 7.5452 volt and power generation 8.9232 watts

Keywords: *Vibration, Electric Energy, Elektromagnetic, Frequency, Amplitudo, Location of EMVA..*

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Wr. Wb.

Syukur alhamdulillah atas kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan segala nikmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul:

**“ANALISA REDUKSI GETARAN DARI MEKANISME
ELEKTROMAGNETIC VIBRATION ABSORBER(EMVA)
SEBAGAI PEREDAM GETARAN DAN PENGHASIL
LISTRIK ”**

sebagai salah satu syarat kelulusan Program Sarjana Departemen Teknik Mesin FTI Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya.

Tugas Akhir ini dapat terselesaikan dengan baik berkat bantuan dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan ucapan terima kasih dan penghargaan kepada:

1. Bapak Bambang Pramujati ST, MSc.Eng, Ph.D selaku Ketua Departemen dan Bapak Dr. Bambang Sudarmanta, S.T., M.T selaku Sekretaris Departemen Teknik Mesin FTI-ITS yang telah memberikan dukungan dan motivasi selama perkuliahan hingga terselesaikannya Tugas Akhir ini.
2. Bapak Dr. Bambang Arip Dwiyantoro, ST., M.Eng. selaku Kaprodi Sarjana Departemen Teknik Mesin FTI-ITS yang telah memberikan dukungan dan motivasi
3. Bapak Dr. Wiwiek Hendrowati, ST., MT. selaku Dosen Pembimbing yang telah memberikan motivasi dan pengarahan dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.
4. Bapak Dr. Harus Laksana Guntur, ST., M.Eng., Ibu Aida Annisa Amin Daman, ST., MT., dan Bapak Ari Kurniawan Saputra, ST., M.Eng. selaku dosen penguji yang telah memberikan saran dan pengarahan dalam Tugas Akhir ini.
5. Bapak Dr. Eng. Unggul Wasiwitono, S.T., M.Eng., Sc, sebagai dosen wali selama penulis kuliah di Departemen Teknik Mesin FTI-ITS.

6. Ayah, Ibu dan keluarga besar saya yang telah banyak mendukung dan memberi semangat saya dalam menjalani masa perkuliahan.
7. Teman-teman mahasiswa Astika, Luthfi, Faiz, Dhisa, Dhika, Nira dan teman-teman lab vibrasi serta seluruh mahasiswa Mesin 2014 serta keluarga M-57 (yang tidak dapat saya sebutkan satu persatu) yang telah banyak mendukung baik dari doa maupun tindakan yang telah memberi semangat saya saat menjalani perkuliahan.
8. Semua pihak yang telah memberikan dukungan dan ilmu kepada penulis dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.

Apabila dalam penulisan laporan Tugas Akhir ini ada kekurangan, kami mohon kritik dan saran demi penyempurnaan laporan Tugas Akhir di masa yang akan datang. Semoga laporan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi semua pihak. Amin.

Surabaya, 31 Juli 2018

Penulis

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan	4
1.5 Manfaat	4
BAB II DASAR TEORI DAN TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Dasar Teori	5
2.1.1 <i>Multi Degree of Freedom</i>	5
2.1.2 <i>Response of a Damped Sistem Under the Harmonic Motion of the Base</i>	6
2.1.3 <i>Damped Dynamic Vibration Absorber</i>	7
2.1.4 Elektromagnetik	8
2.2 Penelitian Terdahulu	15
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	25
3.1 Tahapan Penelitian	25
3.2 Metode Pengerjaan Penelitian	26
3.2.1 Studi Literatur	26
3.2.2 Identifikasi Masalah	27
3.2.3 Rancangan Sistem	27
3.2.4 Permodelan Dinamis Sistem	29
3.2.5 Penentuan Parameter	49
3.2.6 Blok Diagram	52
3.2.7 Simulasi pasa Matlab Simulink	53
3.2.8 Hasil Simulasi Sesuai Kebutuhan	53
BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN	55
4.1. Hasil Rancangan	55

4.3.1. Mekanisme Sistem Utama Tanpa Penambahan EMVA	55
4.3.2. Mekanisme Sistem Utama dengan Penambahan EMVA.....	55
4.2. Hasil Perhitungan	56
4.3. Analisa Permodelan.....	59
4.3.1. Analisa Permodelan Sistem Utama Tanpa EMVA.....	59
4.3.2. Pembahasan Terkait Variasi Amplitudo Eksitasi Terhadap Respon Getaran.....	70
4.3.3. Analisa Permodelan Sistem Utama dengan EMVA.....	72
4.3.4. Pembahasan Terkai Pengaruh Variasi Titik Peletakkan EMVA pada Sistem Utama Terhadap Respon Getaran.....	97
4.3.5. Pembahasan Terkait Pengaruh Variasi Titik Peletakkan EMVA pada Sistem Utama Terhadap Nilai Tegangan yang Dibangkitkan	100
4.3.6. Analisa dan Pembahasan Terkai Pengaruh Variasi Frekuensi Operasi dan Variasi Titik Peletakkan EMVA pada Sistem Utama Terhadap Respon Getaran.....	102
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	105
5.1 Kesimpulan.....	105
5.2 Saran.....	106
DAFTAR PUSTAKA	107
LAMPIRAN.....	109

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Ilustrasi sistem undamped dengan tiga derajat kebebasan.....	5
Gambar 2.2 Base Excitation	6
Gambar 2.3 Damped dynamic vibration absorber.....	7
Gambar 2.4 Pengaruh <i>damped vibration absorber on the response of machine</i>	9
Gambar 2.5 Gerak magnet dalam kumparan	10
Gambar 2.6 Demonstrasi Hukum Lenz	11
Gambar 2.7 Penerapan Hukum Lenz pada arah arus induksi. .	12
Gambar 2.8 Kaidah tangan kanan untuk gaya pada konduktor	13
Gambar 2.9 Variabel resistor. (a) Translational. (b) Rotational.	14
Gambar 2.10 Grafik simpangan sistem utama tanpa penambahan DVA	15
Gambar 2.11 Pengaruh nilai konstanta pegas terhadap simpangan sistem utama	16
Gambar 2.12 (a) DVA pada umumnya;(b) Damper DVA terhubung sistem utama	16
Gambar 2.13 Vibration amplitude ratio pada model A (- - -) dan model B (-).....	17
Gambar 2.14 Sistem Utama Tanpa DVA	18
Gambar 2.15 Grafik perpindahan terhadap frekuensi operasi massa system utama tanpa DVA.....	19
Gambar 2.16 Grafik daya bangkitan yang dihasilkan dengan variasi frekuensi operasi.....	19
Gambar 2.17 Rancang bangun generator elektomagnetik	21
Gambar 2.18 Skema alat generator elektromagnetik.....	21
Gambar 2.19 Pengaruh perpindahan terhadap tegangan yang dibangkitkan pada generator A (a); generator B (b)	22
Gambar 2.20 Pengaruh perubahan damping factor terhadap daya bangkitan pada generator A (a);	

generator B (b)	23
Gambar 2.21 Rangkaian linier generator tiga fasa.	24
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian	25
Gambar 3.2 Sistem Utama Tanpa DVA	27
Gambar 3.3 (a) <i>EMVA</i> ; (b) Sistem utama dengan penambahan <i>EMVA</i>	28
Gambar 3.4 Skema sistem utama tanpa <i>EMVA</i>	29
Gambar 3.5 <i>Free Body Diagram</i> sistem utama tanpa <i>EMVA</i> ..	30
Gambar 3.6 <i>Free Body Diagram</i> pergerakan <i>rolling</i>	32
Gambar 3.7 <i>Free Body Diagram</i> pergerakan <i>pitching</i>	33
Gambar 3.8 Skema mekanik sistem utama dengan penambahan <i>EMVA</i>	34
Gambar 3.9 <i>Free Body Diagram</i> dengan penambahan <i>EMVA</i>	35
Gambar 3.10 <i>Free Body Diagram</i> pergerakan <i>rolling</i>	37
Gambar 3.11 <i>Free Body Diagram</i> pergerakan <i>pitching</i>	38
Gambar 3.12 <i>Free Body Diagram</i> pergerakan <i>EMVA</i>	39
Gambar 3.13 Skema sistem elektrik pada <i>EMVA</i>	40
Gambar 3.14 Fluks magnet yang ditangkap oleh loop. Magnet menjauh (a); mendekat (b).....	41
Gambar 3.15 Jarak antara loop dan magnet dengan koordinat	42
Gambar 3.16 Susunan kawat pada kumparan beberapa tumpukan dengan satu lapis.....	43
Gambar 3.17 <i>EMVA</i> penampang melintang.....	45
Gambar 4.1 Hasil pengukuran getaran bebas pegas A dengan oscilloscope	57
Gambar 4.2 Bode diagram massa sistem utama tanpa <i>EMVA</i>	61
Gambar 4.3 Distribusi simpangan maksimumam sistem utama tanpa penambahan <i>EMVA</i>	62
Gambar 4.4 Pembagian titik tinjauan meja sistem utama.....	63
Gambar 4.5 Respon percepatan (a), kecepatan (b), dan perpindahan (c) pada sistem utama tanpa penambahan <i>EMVA</i> dalam pergerakan arah trasniasi	65

Gambar 4.6	Respon percepatan (a), kecepatan (b), dan perpindahan (c) pada sistem utama tanpa penambahan <i>EMVA</i> dalam pergerakan arah <i>rolling</i>	67
Gambar 4.7	Respon percepatan (a), kecepatan (b), dan perpindahan (c) pada sistem utama tanpa penambahan <i>EMVA</i> dalam pergerakan arah <i>pitching</i>	69
Gambar 4.8	Trend line respon percepatan (a), kecepatan (b), dan perpindahan (c) pada sistem utama tanpa penambahan <i>EMVA</i> dalam pergerakan translasi, rolling, dan pitching	71
Gambar 4.9	Enam variasi titik peletakkan <i>EMVA</i>	75
Gambar 4.10	Distribusi simpangan maksimum sistem utama dengan penambahan <i>EMVA</i> di titik nomor satu...	76
Gambar 4.11	Respon percepatan pada arah translasi (a), rolling (b), dan pitching (c) dengan penambahan <i>EMVA</i> pada nomor satu dan sistem utama tanpa penambahan <i>EMVA</i>	78
Gambar 4.12	Respon tegangan saat <i>EMVA</i> diletakkan di titik nomor satu	79
Gambar 4.13	Distribusi simpangan maksimum sistem utama dengan penambahan <i>EMVA</i> di titik nomor dua ...	80
Gambar 4.14	Respon percepatan pada arah translasi (a), rolling (b), dan pitching (c) dengan penambahan <i>EMVA</i> pada nomor dua dan sistem utama tanpa penambahan <i>EMVA</i>	81
Gambar 4.15	Respon tegangan saat <i>EMVA</i> diletakkan di titik nomor dua	82
Gambar 4.16	Distribusi simpangan maksimum sistem utama dengan penambahan <i>EMVA</i> di titik nomor tiga ...	83

Gambar 4.17	Respon percepatan pada arah translasi (a), rolling (b), dan pitching (c) dengan penambahan EMVA pada nomor tiga dan sistem utama tanpa penambahan EMVA.....	85
Gambar 4.18	Respon tegangan saat EMVA diletakkan di titik nomor tiga.....	86
Gambar 4.19	Distribusi simpangan maksimum sistem utama dengan penambahan EMVA di titik nomor empat	87
Gambar 4.20	Respon percepatan pada arah translasi (a), rolling (b), dan pitching (c) dengan penambahan EMVA pada nomor empat dan sistem utama tanpa penambahan EMVA.....	88
Gambar 4.21	Respon tegangan saat EMVA diletakkan di titik nomor empat	89
Gambar 4.22	Distribusi simpangan maksimum sistem utama dengan penambahan EMVA di titik nomor lima ..	90
Gambar 4.23	Respon percepatan pada arah translasi (a), rolling (b), dan pitching (c) dengan penambahan EMVA pada nomor lima dan sistem utama tanpa penambahan EMVA.....	92
Gambar 4.24	Respon tegangan saat EMVA diletakkan di titik nomor lima	93
Gambar 4.25	Distribusi simpangan maksimum sistem utama dengan penambahan EMVA di titik nomor enam.	94
Gambar 4.26	Respon percepatan pada arah translasi (a), rolling (b), dan pitching (c) dengan penambahan EMVA pada nomor enam dan sistem utama tanpa penambahan EMVA.....	95
Gambar 4.27	Respon tegangan saat EMVA diletakkan di titik nomor enam	96
Gambar 4.28	Pengaruh variasi titik penambahan EMVA terhadap respon sistem utama	97

Gambar 4.29 Pengaruh variasi titik penambahan EMVA terhadap energi bangkitan.....	101
Gambar 4.30 Respon perpindahan massa EMVA pada variasi titik peletakkan.....	101
Gambar 4.31 Pengaruh penambahan EMVA di variasi titik terhadap frekuensi natural	103

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Parameter generator elektromagnetik	22
Tabel 3.1 Hasil survey parameter penelitian	33
Tabel 4.1 Hasil perhitungan parameter	58
Tabel 4.2 Nilai RMS respon sistem utama pada arah translasi.	66
Tabel 4.3 Nilai RMS respon sistem utama pada arah <i>rolling</i> ...	68
Tabel 4.4 Nilai RMS respon sistem utama pada arah <i>pitching</i> .	70
Tabel 4.5 Hasil pengukuran dan studi literatur	74
Tabel 4.6 Pengaruh penambahan EMVA di titik satu terhadap respon sistem utama (RMS)	78
Tabel 4.7 Pengaruh penambahan EMVA di titik dua terhadap respon sistem utama (RMS)	82
Tabel 4.8 Pengaruh penambahan EMVA di titik tiga terhadap respon sistem utama (RMS)	85
Tabel 4.9 Pengaruh penambahan EMVA di titik empat terhadap respon sistem utama (RMS)	89
Tabel 4.10 Pengaruh penambahan EMVA di titik lima terhadap respon sistem utama (RMS)	92
Tabel 4.11 Pengaruh penambahan EMVA di titik enam terhadap respon sistem utama (RMS)	96
Tabel 4.12 Pengaruh penambahan EMVA di variasi titik terhadap energi bangkitan (RMS)	100
Tabel 4.13 Dampak variasi titik dan respon getaran massa EMVA	102
Tabel 4.14 Dampak variasi titik peletakan EMVA dan frekuensi operasi terhadap respon getaran	102
Tabel 4.15 Dampak variasi titik peletakan EMVA terhadap reduksi respon getaran pada frekuensi operasi 40,0904 rad/s	103

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Getaran yang terjadi di sekeliling kita bervariasi sesuai konstruksi bangun mesin itu sendiri. Terdapat getaran yang menyebar dan terdapat pula getaran yang hanya satu arah. Namun jika diamati lebih lanjut getaran cenderung ke arah translasi dan rotasi seperti padaudukan mesin bubut, mesin cooling fan, dan sejenisnya. Getaran yang terjadi pada suatu mesin dapat mengakibatkan kerusakan pada konstruksi mesin seperti retak, keausan, *fatigue*, bahkan dapat mengalami patah apabila frekuensi operasi sama atau mendekati nilai frekuensi natural mesin tersebut. Jika getaran ini dibiarkan akan berdampak pada umur penggunaan mesin akibatnya perlu dilakukan perawatan lebih rutin sehingga biaya operasional meningkat karena perlu mengganti suku cadang atau mesin seutuhnya. Oleh karenanya meredam atau menghilangkan getaran dinilai sangat penting. Penambahan *Dynamic Vibration Absorber* (DVA) pada mesin yang bekerja salah satu solusinya. DVA yang dimaksud yakni memasang suatu massa dengan konstanta kekakuan dan konstanta redaman tertentu pada alat yang mengalami getaran. Tujuan dari pemasangan DVA adalah menyerap energi kinetik getaran yang berlebih serta merubah frekuensi natural dari suatu sistem. Energi kinetik yang diserap melalui DVA dapat ditransformasi menjadi energi listrik.

Melihat dari banyaknya kerusakan pada permesinan yang diakibatkan oleh getaran maka telah dilakukan penelitian untuk mencari respon dari getaran yang diinginkan. Beberapa penelitian telah dilakukan salah satunya oleh Faiz Imawan Dana Putra^[1] tentang rancang bangun dan simulasi dari mekanisme *cantilever piezoelectric vibration absorber* (CPVA). CPVA merupakan suatu mekanisme dari sistem DVA yang mampu mereduksi getaran dan menambahkan *cantilever piezoelectric* sebagai pebangkit energi listrik yang diakibatkan oleh getaran. Pada penelitian terdahulu didapatkan hasil respon getaran ketika tanpa penambahan CPVA

untuk percepatan didapatkan dari simulasi adalah nilai 37 rad/s^2 arah rotasi dan 40 m/s^2 arah translasi. Hasil respon getaran dengan penambahan CPVA pada jarak 10 cm dari titik pusat massa dengan input frekuensi natural sistem sebesar 6,4 Hz didapatkan nilai respon percepatan sebesar $1,86 \text{ rad/s}^2$ arah rotasi dan $3,8 \text{ m/s}^2$ arah translasi. Selain itu daya yang diserap oleh *cantilever piezoelectric* yakni pada simulasi 0.000054 watt. Dari penjabaran penelitian terdahulu maka dapat disimpulkan bahwa masih terdapat kekurangan dibuktikan dengan hasil penyerapan daya sangat kecil.

Menilai *cantilever piezoelectric* yang kurang optimal dalam menyerap energi maka diperlukan alternatif lain. Konsep induksi elektromagnetik merupakan salah satu alternatif. Induksi elektromagnetik merupakan gejala timbulnya gaya gerak listrik di dalam suatu kumparan/konduktor bila terdapat perubahan fluks magnetik pada konduktor tersebut atau bila kumparan/konduktor bergerak relatif melintasi medan magnetik. Konsep induksi elektromagnetik mampu mengkonversi energi gerak menjadi energi listrik dengan performa lebih baik dibanding *cantilever piezoelectric* dan tentunya dapat diterapkan pada DVA. Kemampuan *cantilever piezoelectric* menyerap energi terhitung kecil yakni 244×10^{-10} F. Berbeda dengan kemampuan induksi elektromagnetik yang mampu menyerap energi kinetik lebih besar. Menggunakan diameter kawat 0,35 mm dan jumlah lilitan kumparan 4000 lilitan memberikan penghematan bahan bakar sekitar 30,79% dibandingkan dengan mesin diesel standar^[10]. Sesuai studi literatur didapatkan hipotesa bahwa kemampuan induksi elektromagnetik dalam menyerap energi kinetik pada getaran lebih baik dibandingkan *cantilever piezoelectric*.

Penerapan konsep induksi elektromagnetik pada DVA disebut sebagai *Elektromagnetik Vibration Adsorber (EMVA)*. *EMVA* merupakan pengembangan dari DVA yang mana massa utama pada sistem DVA memiliki sifat feromagnetik. Lalu, pada sisi luar dari *case* DVA diberi lilitan kawat tembaga yang nantinya sebagai penghantar listrik. Proses penyerapan energi listrik terjadi akibat massa utama DVA bergetar relatif terhadap kumparan

sekaligus menginduksi medan magnet pada kumparan sehingga terjadi perubahan fluks. Perubahan fluks sepanjang waktu pada kumparan menciptakan gaya gerak listrik (ggl) dan arus listrik pada kumparan. Penyerapan energi kinetik menjadi energi listrik pada sistem *EMVA* memberikan gaya redaman sehingga *EMVA* tergolong sebagai *damped DVA*. Pada penelitian ini variasi yang diberikan antara lain jarak penempatan alat *EMVA* pada simulator getaran (0 cm, 10 cm, dan 20 cm) terhadap sumbu X dan Y dari titik pusat massa utama alat simulator getaran, variasi amplitudo dan variasi frekuensi. Diharapkan setelah mengganti CPVA dengan *EMVA* diperoleh penyerapan getaran sistem utama dan energi kinetik yang lebih optimal.

1.2 Rumusan Masalah

Dari latar belakang diatas dapat dirumuskan permasalahan pada penelitian ini adalah;

1. Bagaimana memodelkan sistem dinamis dari simulator getaran dengan mekanisme *EMVA*?
2. Bagaimana pengaruh variasi amplitudo yang digunakan terhadap respon getaran yang dihasilkan?
3. Bagaimana pengaruh perubahan frekuensi kerja terhadap getaran yang dihasilkan oleh sistem utama?
4. Bagaimana pengaruh perubahan peletakan *EMVA* dari titik tengah massa utama terhadap getaran yang diredam?

1.3 Batasan Masalah

Adapaun batasan masalah yang digunakan agar penelitian dapat berjalan secara fokus dan terarah serta dapat mencapai tujuan yang diinginkan, antara lain sebagai berikut:

1. Energi yang diukur hanya ke arah vertikal.
2. Defleksi pada meja diabaikan.
3. Sumber energi getaran di tengah plat datar dan konstan
4. Gaya eksitasi sebagai input getaran yang terjadi merupakan sinusoidal.
5. Gaya yang ditimbulkan oleh lingkungan kecuali berasal dari motor diabaikan

1.4 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah

1. Mendapatkan pemodelan sistem dinamis dari simulator getaran dengan mekanisme *EMVA*
2. Mengetahui pengaruh variasi amplitudo yang digunakan terhadap respon getaran yang dihasilkan
3. Mengetahui pengaruh perubahan frekuensi kerja terhadap getaran yang dihasilkan oleh sistem utama
4. Mengetahui pengaruh perubahan peletakan *EMVA* dari titik tengah massa utama terhadap getaran yang diredam

1.5 Manfaat

Manfaat dari penelitian adalah:

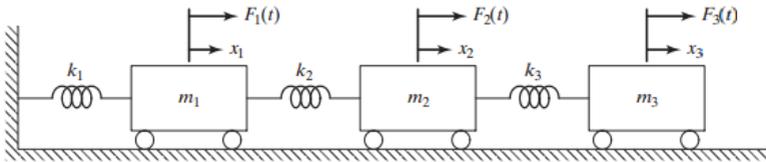
1. Mengenalkan konsep DVA dan jenis *energi harvesting*
2. Menjadikan laporan penelitian ini sebagai referensi terkait penelitian elektromagnetik..
3. Menciptakan sumber energi listrik alternatif.

BAB II DASAR TEORI & TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Dasar Teori

2.1.1 *Multi Degree of Freedom (MDoF)*

Pada umumnya di dunia nyata suatu sistem terdiri dari dua atau lebih derajat kebebasan yang disebut juga *Multi Degree of Freedom (MDoF)*. Pada sistem mekanik *multi degree of freedom* sering menggunakan Hukum Newton kedua untuk membuat persamaan gerak. Jumlah derajat kebebasan yang semakin banyak memiliki penyelesaian aljabar yang kompleks. Sehingga perlu diselesaikan dalam bentuk matriks. Permodelan sistem MDoF dengan tiga derajat kebebasan dan tiga gaya eksitasi diilustrasikan pada gambar 2.1 sebagai berikut.



Gambar 2.1 Ilustrasi sistem undamped dengan tiga derajat kebebasan ^[6].

Dari ilustrasi pada gambar 2.1 didapatkan matriks dari persamaan gerak untuk setiap massa sesuai Hukum Newton kedua.

$$M_i x_i + K_i x_i = \sum_j F_{ij} \quad (2.1)$$

Persamaan 2.2 terdiri atas $j=1$, $j=2$, dan $j=3$ maka dapat ditulis dalam bentuk matriks:

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

Sehingga dengan mensubstitusi persamaan 2.3 ke persamaan 2.2 didapatkan persamaan:

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

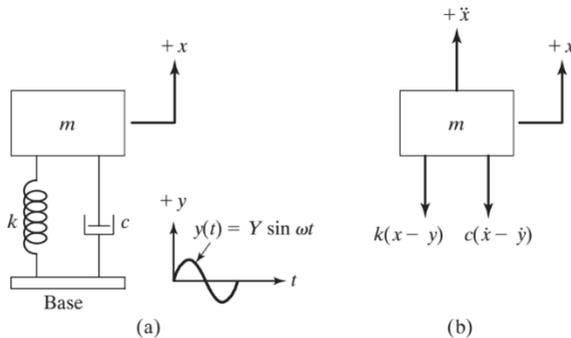
2.1.2 Response of a Damped System Under the Harmonic Motion of the Base

Terkadang *base* atau landasan dari sistem pegas-massa-peredam mengalami gerak harmonik, seperti ditunjukkan pada Gambar. 2.2 (a). Yang mana $y(t)$ sebagai perpindahan landasan dan $x(t)$ merupakan perpindahan massa dari posisi *equilibrium* statis pada saat waktu t tertentu. Sehingga perubahan panjang pegas dinyatakan $x - y$ dan kecepatan relatif antara dua ujung peredam adalah $\dot{x} - \dot{y}$. Dari *free body diagram* ditunjukkan pada Gambar. 2.2(b), kita memperoleh persamaan gerak:

$$m\ddot{x} + c(\dot{x} - \dot{y}) + k(x - y) = 0 \quad (2.4)$$

Jika $y(t) = Y \sin \omega t$, Eq (2.4) menjadi

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = ky + c\dot{y} = kY \sin \omega t + c\omega Y \cos \omega t = A \sin(\omega t - \alpha) \quad (2.5)$$



Gambar 2.2 Base Excitation^[6]

Dimana $A = Y\sqrt{k^2 + (c\omega)^2}$ dan $\alpha = \tan^{-1} \left[-\frac{c\omega}{k} \right]$. Ini menunjukkan bahwa pemberian gaya eksitasi pada landasan setara dengan memberikan gaya harmonik dengan sejumlah A kepada massa. Respon *steady-state* dari massa, $x_p(t)$ dapat dinyatakan dengan,

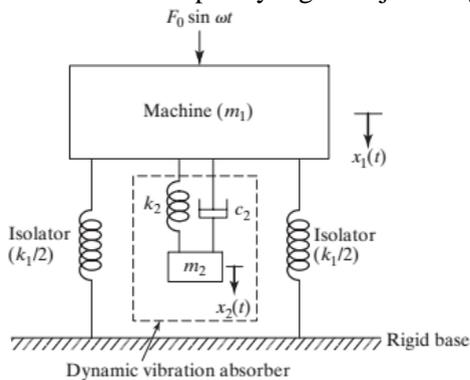
$$x_p(t) = \frac{Y\sqrt{k^2+(c\omega)^2}}{[(k-m\omega^2)^2+(c\omega)^2]^{1/2}} \sin(\omega t - \phi_1 - \alpha) \quad (2.6)$$

Dimana

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

2.1.3 Damped Dynamic Vibration Absorber

Dynamic Vibration Absorber adalah perangkat mekanik yang digunakan untuk mengurangi atau meminimalisir getaran yang tidak diinginkan. DVA pada umumnya digunakan untuk mesin yang beroperasi dengan kecepatan konstan, karena DVA diatur untuk satu frekuensi tertentu. Jenis *damped DVA* merupakan salah satu jenis DVA. *Damped DVA* memiliki kemampuan menghilangkan puncak resonansi dalam grafik respon dari mesin tetapi dua puncak baru muncul maka mesin memiliki nilai amplitudo yang besar sebagai puncak pertama selama *start-up* dan *stopping*. Amplitudo mesin dapat dikurangi dengan menambahkan *damped vibration absorber* seperti yang ditunjukkan gambar 2.3.



Gambar 2.3 *Damped dynamic vibration absorber*^[6]

Persamaan gerak dari kedua massa dinyatakan sebagai berikut :

$$m_1 \ddot{x}_1 + k_2(x_1 - x_2) + c_2(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) = F_0 \sin \omega t \quad (2.7)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + k_2(x_2 - x_1) + c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) = 0 \quad (2.8)$$

Dengan asumsi penyelesaian menjadi

$$x_j(t) = X_j e^{i\omega t}, \quad j = 1, 2 \quad (2.9)$$

Penyelesaian *steady state* dari persamaan 2.22 dan 2.23 dinyatakan

$$X_1 = \frac{F_0(k_2 - m_2\omega^2 + ic_2\omega)}{[(k_1 - m_1\omega^2)(k_2 - m_2\omega^2) - m_2k_2\omega^2] + i\omega c_2(k_1 - m_1\omega^2 - m_2\omega^2)}$$

$$X_2 = \frac{X_1(k_2 + i\omega c_2)}{(k_2 - m_2\omega^2 + i\omega c_2)} \quad (2.10)$$

Dimana :

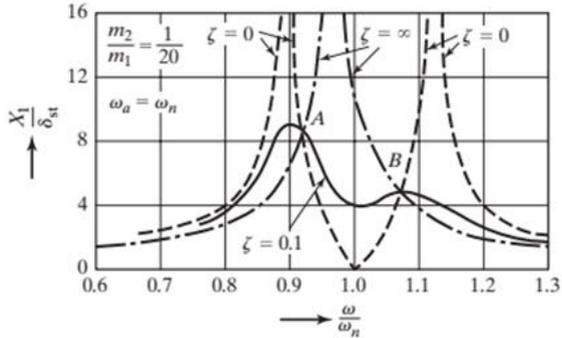
$$\begin{aligned} \mu &= m_2/m_1 = \text{Mass ratio} = \text{Absorber mass / main mass} \\ \delta_{st} &= F_0/k_1 = \text{Static deflection of the sistem} \\ \omega_a^2 &= k_2/m_2 = \text{Square of natural frekuensi of the absorber} \\ \omega_n^2 &= k_1/m_1 = \text{Square of natural frekuensi of main mass} \\ f &= \omega_2/\omega_1 = \text{Ratio of natural frekuensi} \\ g &= \omega/\omega_n = \text{forced frekuensi ratio} \\ c_c &= 2m_2\omega_n = \text{Critical damping constant} \\ \zeta &= c_2/c_c = \text{Damping ratio} \end{aligned}$$

Nilai X_1 dan X_2 dapat dinyatakan sebagai

$$\frac{X_1}{\delta_{st}} = \left[\frac{(2\zeta g)^2 + (g^2 - f^2)^2}{(2\zeta g)^2 (g^2 - 1 + \mu g^2)^2 + \{\mu f^2 g^2 - (g^2 - 1)(g^2 - f^2)\}^2} \right]^{1/2} \quad (2.11)$$

$$\frac{X_2}{\delta_{st}} = \left[\frac{(2\zeta g)^2 + f^4}{(2\zeta g)^2 (g^2 - 1 + \mu g^2)^2 + \{\mu f^2 g^2 - (g^2 - 1)(g^2 - f^2)\}^2} \right]^{1/2} \quad (2.12)$$

Persamaan 2.26 Menunjukkan nilai amplitudo getaran dari massa utama merupakan fungsi dari $\mu, f, g,$ dan ζ . Grafik untuk $\left| \frac{X_1}{\delta_{st}} \right|$ terhadap *forced frekuensi ratio* $g = \omega/\omega_n$ ditunjukkan pada gambar 2.5 Dengan $f = 1, \mu = 1/20$ dan variasi nilai ζ .



Gambar 2.4 Pengaruh *damped vibration absorber on the response of machine*^[6]

Jika redaman sama dengan nol ($c_2 = \zeta = 0$), maka resonansi terjadi pada dua frekuensi resonansi tak teredam dari sistem. Hal ini ditunjukkan pada gambar 2.4. Ketika redaman menjadi tidak terhingga ($\zeta = \infty$), kedua massa, m_1 dan m_2 , bekerja bersamaan, dan sistem seolah-olah menjadi 1-DOF dengan massa $(m_1 + m_2) = (21/20)m$ dan kekakuannya k_1 . Dalam kasus ini, resonansi terjadi dengan $X_1 \rightarrow \infty$ pada

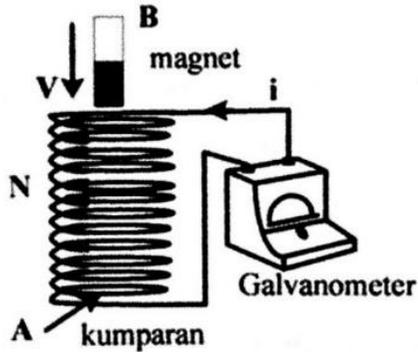
$$g = \frac{\omega}{\omega_n} = \frac{1}{\sqrt{1 + \mu}} = 0.9759$$

sehingga puncak X_1 menjadi tak terhingga untuk $c_2 = 0$ dan $c_2 = \infty$, daerah antara batas atas dan bawah, puncak X_1 bernilai minimum.

2.1.4 Elektromagnetik

Hukum kekekalan energi menyatakan bahwa energi tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan, tetapi energi dapat diubah dari suatu bentuk ke bentuk lain. Oleh sebab itu energi memiliki wujud bermacam-macam dan disesuaikan dengan kebutuhan. Dalam penyesuaian kebutuhan bentuk energi perlu adanya pengubah. Salah satu pengubah energi yang sering diterapkan yakni konsep induksi elektromagnetik. Mengubah energi mekanik menjadi energi listrik atau sebaliknya merupakan salah satu tujuan dari dilakukannya induksi elektromagnetik.

2.1.4.1. Tegangan yang Dihasilkan oleh Linier Generator



Gambar 2.5 Gerak magnet dalam kumparan^[3]

Michael Faraday (1791-1867) membuat hipotesis bahwa medan magnet dapat menimbulkan gaya gerak listrik. Gaya gerak listrik (ggl) induksi yang timbul antara ujung-ujung suatu loop penghantar berbanding lurus dengan laju perubahan fluks magnetik yang dilingkupi oleh loop penghantar. Maka sesuai gambar 2.5 dapat dinyatakan oleh rumus sebagai berikut

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.13)$$

karena $\Phi = \vec{B} \cdot \vec{A}$, maka

$$e = -N \frac{d(\vec{B} \cdot \vec{A})}{dt}$$

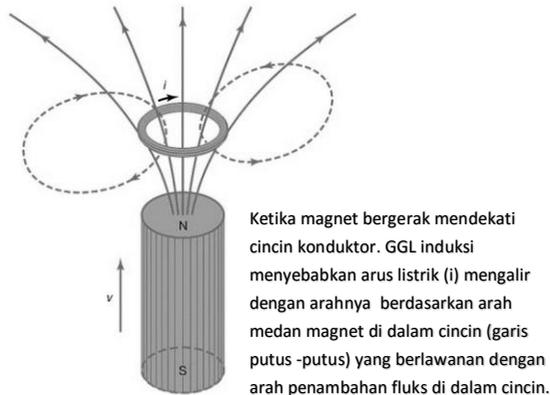
$$e = -N \cdot \frac{dB}{dt} \cdot A \cdot \cos \theta \quad (2.14)$$

karena vektor luas penampang kumparan dan vektor medan magnet saling berhimpitan maka.

$$e = -N \cdot \frac{dB}{dt} \cdot A \quad (2.15)$$

2.1.4.2. Menentukan Arah Arus Listrik yang Disebabkan oleh Gaya Gerak Listrik

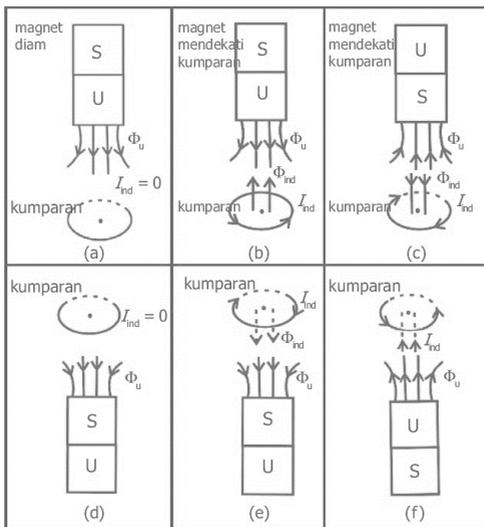
Fisikawan Rusia Heinrich Friedrich Emil Lenz (1804-1865) menyatakan bahwa GGL induksi menciptakan sebuah arus listrik yang mana arah medan magnetnya berlawanan dengan arah perubahan fluks magnet. Pernyataan tersebut sering juga dikenal sebagai Hukum Lenz. Arah dari ggl dilustrasikan gambar 2.6



Gambar 2.6 Demonstrasi Hukum Lenz^[4]

Mendorong salah satu kutub batang magnet permanen mendekati kawat kumparan seperti halnya induksi arus listrik pada kumparan yang mana arus listrik tersebut membentuk medan magnet di sekitar kumparan sehingga kumparan tersebut menyerupai magnet. Hukum Lenz mengindikasikan arah arus listrik induksi. Karena masing-masing kutub pada magnet saling menolak, maka Hukum Lenz menyatakan bahwa ketika kutub utara batang magnet mendekati kumparan, arus listrik induksi mengalir dengan jalur seperti membuat bagian kumparan yang terdekat menjadi kutub utara dan medan magnetnya berlawanan dengan batang magnet. Lain halnya menarik batang magnet ke atas dari kumparan, arus listrik terinduksi berlawanan arah dengan arus listrik sebelumnya dan sisi kumparan terdekat menjadi kutub selatan untuk memproduksi gaya dorong magnet agar batang

magnet di dalam kumparan terdorong keluar kumparan. Lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 2.7



Gambar 2.7 Penerapan Hukum Lenz pada arah arus induksi [4]

2.1.4.3. Gaya Redaman pada EMVA yang Disebabkan oleh Induksi Elektromagnetik

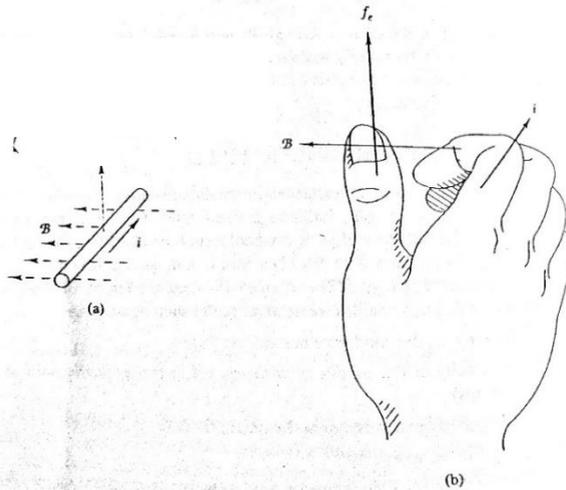
Gaya pada sebagian kecil dari panjang kawat (dl) menghantarkan arus listrik (i) dalam medan magnetik dengan kerapatan fluks B adalah

$$df_c = i (dl \times B) \tag{2.16}$$

Dalam pengaplikasiannya, kawat konduktor tegak lurus terhadap medan magnetik atau sirkular konduktor pada radial medan magnetik. Di permasalahan lain, sebagian panjang dl tegak lurus terhadap kerapatan fluks yang *uniform* B . Lalu persamaan disederhanakan sebagai berikut

$$f_c = B \cdot l \cdot i \tag{2.17}$$

Dimana arah gaya tegak lurus terhadap kawat dan medan magnetik.



Gambar 2.8 Kaidah tangan kanan untuk gaya di konduktor ^[4]

Arah gaya dapat ditentukan dengan kaidah tangan kanan seperti yang telah diilustrasikan oleh gambar 2.8 Ibu jari menunjukkan arah gaya, ujung jari yang lain menunjukkan arah medan magnet, persendian jari menunjukkan arah arus listrik.

2.1.4.4. Permeabilitas Magnet

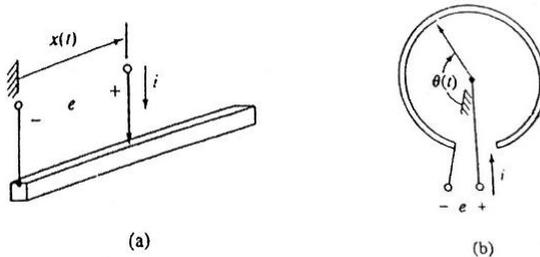
Permeabilitas merupakan tingkatan magnetisasi bahan dalam merespon secara linear terhadap kuat medan magnet. Menurut satuan internasional, permeabilitas hampa udara memiliki nilai $4\pi \times 10^{-7} \text{ TmA}^{-1}$ atau $12,57 \times 10^{-7} \text{ TmA}^{-1}$ (Tipler, 2002). Nilai permeabilitas bahan magnet tidak konstan, dimana sebagian besar tergantung pada besarnya kekuatan magnetisasi yang dikenakan padanya. Besar permeabilitas suatu bahan magnet selalu diperbandingkan terhadap permeabilitas hampa udara, dimana perbandingan tersebut disebut dengan permeabilitas relatif (Wangsness, 1979). Nilai dari permeabilitas relatif dapat ditentukan sebagaimana yang dinyatakan dalam persamaan 2.18.

$$\mu_r = \frac{\mu_{\text{bahan}}}{\mu_0} \quad (2.18)$$

dengan μ_{bahan} , μ_r , dan μ_0 berturut-turut merupakan variabel dari permeabilitas bahan, permeabilitas relatif dari material, dan permeabilitas udara vakum. Permeabilitas relatif udara lingkungan yakni 1.05. Sehingga dapat dinyatakan permeabilitas udara vakum tidak jauh berbeda permeabilitas udara.

2.1.4.5. Hambatan Pada Kumparan

Kita dapat mengontrol variabel hambatan menggunakan gerak begitu juga dengan gerakan kontak elektron terus menerus atau membuka tutup rangkaian listrik. Karena *resistor* tidak dapat menyimpan energi, pada metode elektrik kopel dan bagian mekanik dari suatu sistem, dalam kontras untuk kopel menggunakan magnet dan medan elektrik, tanpa melibatkan gaya mekanik yang tergantung oleh variabel elektrik.



Gambar 2.9 Variabel resistor. (a) Translational, (b) Rotational.^[4]

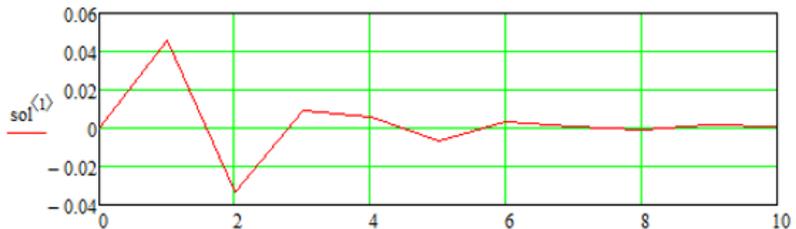
Pada gambar 2.9 (a) Konduktor material memiliki *resistivity* ρ dan luas penampang A . Salah satu ujung terminal berkedudukan tetap. Terminal yang lain terkadang disebut *wiper* bergerak bebas selama terhubung oleh batang konduktor dengan baik. Tidak terdapat hambatan ketika kedua terminal berada pada titik kontak. Hambatan per satuan panjang adalah ρ/A , maka hambatan sebesar

$$R = \left[\frac{\rho}{A} \right] x(t) \quad (2.19)$$

Dimana $x(t)$, perpindahan *wiper* dapat bervariasi dengan waktu. Persamaan rotasional untuk perangkat pada gambar 2.9 (b) Hambatan antara dua terminal merupakan fungsi satuan sudut $\theta(t)$, yang mana orientasi sudut *wiper* terhadap terminal tetap.

2.2. Penelitian Terdahulu

Mereduksi getaran pada suatu sistem sangatlah penting. Selain mengurangi resiko kerusakan juga menambah umur dari alat tersebut. Terdapat penelitian terkait penurunan getaran pada suatu sistem. Salah satunya penelitian oleh Cathlea Selly Ersandi^[2]. Penelitian tersebut meneliti terkait pengaruh variasi variabel DVA (massa, nilai kekakuan pegas, dan konstanta redaman) terhadap besar simpangan pada getaran mesin ignitor cooling fan yang mana dinyatakan sebagai sistem utama yang ditinjau.

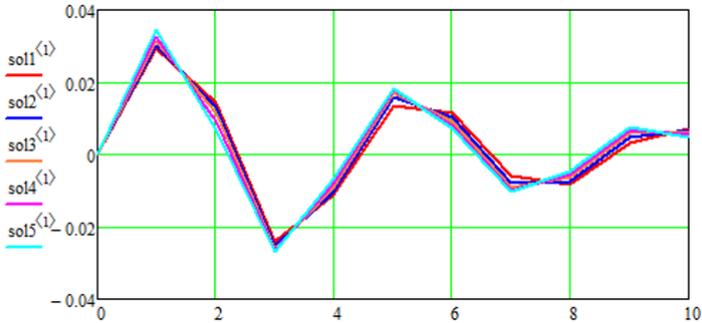


Gambar 2.10 Grafik simpangan sistem utama tanpa penambahan DVA^[2]

Perlu dilakukan pengukuran simpangan pada sistem utama tanpa penambahan DVA sebagai pembandingan hasil reduksi penambahan DVA. Massa mesin yang digunakan 505,5 kg dan Massa rotor 31 lbs (14,06 kg) serta putaran rotor 3000 rpm (314 rad/s) dan eksentrisitas mesin 0,051 mm ($5,1 \times 10^{-5}$ m). Didapatkan nilai simpangan tertinggi yakni 0,046 m dari gambar 2.10.

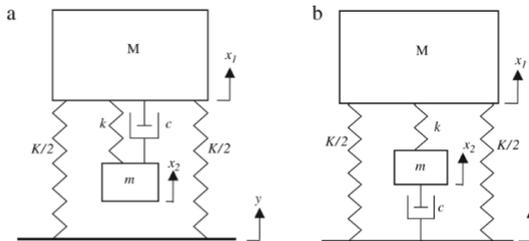
Setelah dilakukan pengukuran simpangan pada sistem utama tanpa penambahan DVA. Dilakukan pengukuran simpangan pada sistem utama dengan ditempelnya DVA. Variasi variabel DVA dengan konstanta pegas 3000 N/m, konstanta redaman 400N.s/m

dan massa 500 kg menghasilkan simpangan sistem utama 0,029 m seperti yang diilustrasikan oleh sol 1 pada gambar 2.11 Sehingga melihat perubahan simpangan sistem utama dari 0,046 m menjadi 0,029 m dapat disimpulkan bahwa DVA dapat mereduksi getaran.



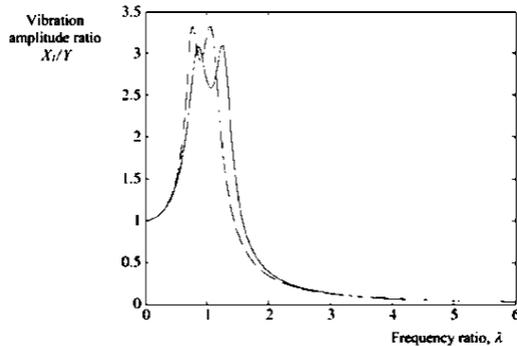
Gambar 2.11 Pengaruh nilai konstanta pegas terhadap simpangan sistem utama^[2]

Dalam menyempurnakan desain DVA itu sendiri. W.O.Wong^[8] mencoba melakukan penelitian yakni mencari desain rancang bangun DVA yang paling optimal dalam mereduksi getaran sistem utama. Terdapat dua desain yang diusulkan sesuai ilustrasi pada gambar 2.12



Gambar 2.12 (a) DVA pada umumnya; (b) Damper DVA terhubung sistem utama^[8]

Desain yang telah dirancang pada gambar 2.12 disimulasikan. Didapatkan hasil simulasi pada gambar 2.13



Gambar 2.13 Vibration amplitude ratio pada model A (- - -) dan model B (-)^[8]

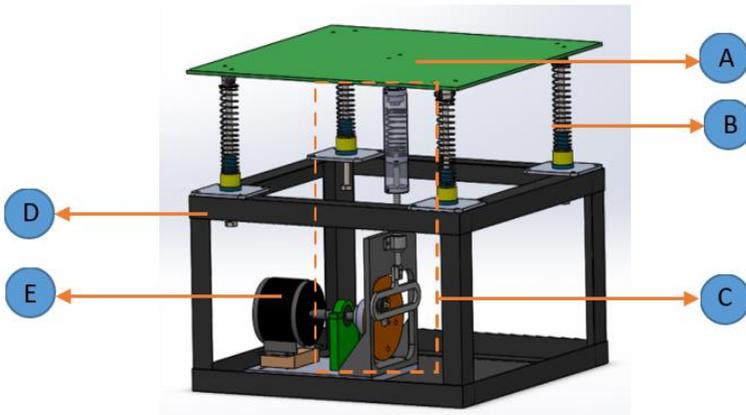
Dapat disimpulkan bahwa rancang bangun DVA model B lebih baik dibanding model A dalam menyerap getaran. Maka DVA model B sangat direkomendasikan.

Sebenarnya getaran sistem utama yang diserap oleh DVA menggetarkan sistem DVA itu sendiri. Sehingga pada saat suatu sistem hanya terdiri dua derajat kebebasan yakni tinjauan massa sistem utama dan massa sistem DVA maka seiring getaran sistem utama berkurang akan mempengaruhi getaran pada sistem DVA yang bertambah. Bertambahnya getaran pada DVA merupakan kerugian energi dari suatu sistem itu sendiri sebab energi yang disalurkan ke sistem utama tidak sepenuhnya berguna dan mayoritas energi yang terbuang berada di sistem DVA. Melihat terdapat kerugian energi maka perlu komponen penyerap energi. Salah satu alternatifnya yakni pemasangan *piezoelectric* di DVA.

Sesuai lansiran dari tugas akhir Faiz Imawan Danaputra^[1]. Yang mana penelitiannya terkait reduksi getaran dan *energy harvesting* menggunakan *piezoelectric* pada DVA (CPVA). Dilakukan simulasi dengan massa utama yakni 6,7 kg dan massa CPVA yang terdiri dari massa absorber 0,878 kg dan massa satu piezoelektrik yakni 0,0006 kg. Lalu masing-masing pegas dalam satu pasang pada sistem utama memiliki nilai konstanta pegas yang

berbeda yakni 4659,98 N/m dan 7163,34 N/m. Konstanta pegas pada CPVA adalah 1492,37 N/m. Selain itu konstanta redaman pada sistem utama yakni 1,4 N.s/m dan 0,76 N.s/m. CPVA memiliki konstanta redaman 2,55 N.s/m.

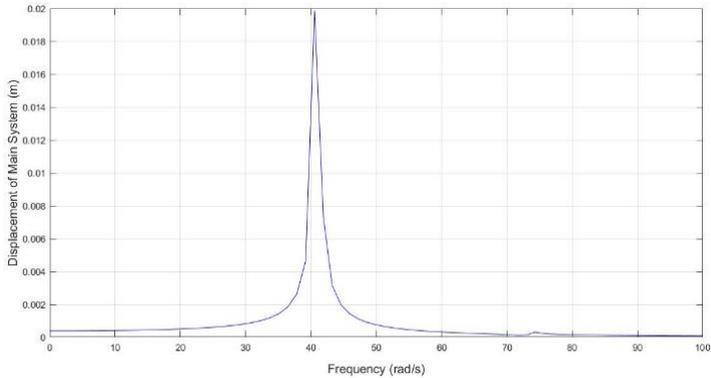
Penelitian ini menggunakan rancang bangun prototipe dari suatu sistem mekanik dudukan mesin perkakas. Rancang bangun sistem mekanik dudukan mesin perkakas disebut juga rancang bangun sistem utama. Mekanisme sistem utama memiliki empat suspensi sebagai perwakilan dudukan pada mesin perkakas. Sedangkan meja mewakili badan mesin. Karena getaran pada umumnya terjadi akibat adanya gaya eksitasi di *center of gravity* maka terdapat mekanisme penggerak yang terdiri dari *scotch yoke* dan batang logam lalu dihubungkan pada titik *center of gravity* meja. Pada penelitian ini mekanisme sistem utama akan dianalisa respon dan reduksi perpindahannya. Sistem utama memiliki dimensi yakni 500x500x800 mm³. CPVA dipasang di bagian atas meja sistem utama sebagai redaman getaran sistem utama.



Gambar 2.14 Sistem Utama Tanpa DVA^[1]

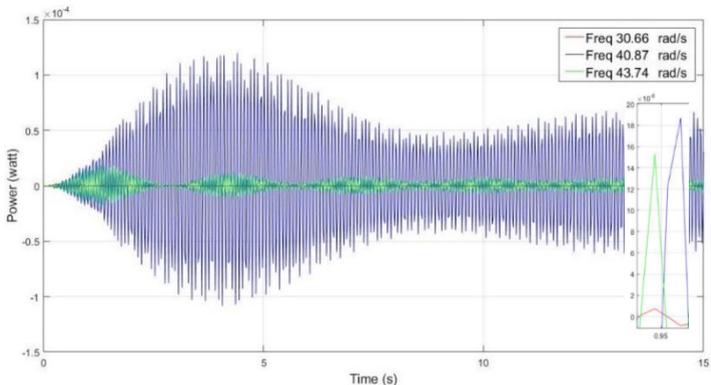
Keterangan:

- | | | | |
|---|---------------------|---|--------|
| A | Meja | D | Rangka |
| B | Suspensi Meja | E | Motor |
| C | Mekanisme Penggerak | | |



Gambar 2.15 Grafik perpindahan terhadap frekuensi operasi sistem utama tanpa DVA^[1]

Karena dilakukan peninjauan terhadap dua pergerakan yakni translasi dan rotasi. Pada gambar 2.15 dapat diketahui bahwa dua perpindahan yang paling tinggi terjadi pada frekuensi operasi 40.87 dan 73.76 rad/s atau pada frekuensi natural pertama dan kedua dari massa utama. Bila dilakukan pengujian *energy harvesting* menggunakan piezoelectric pada DVA didapatkan energi yang dibangkitkan oleh piezoelectric sebagai berikut

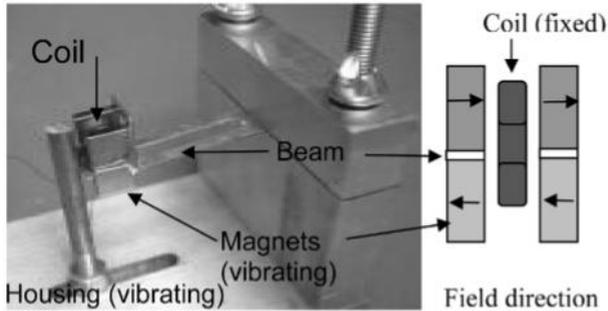


Gambar 2.16 Grafik daya bangkitan yang dihasilkan dengan variasi frekuensi operasi^[1]

Dari grafik daya bangkitan di atas, dapat diketahui pengaruh frekuensi operasi yang diberikan ke sistem terhadap daya yang dapat dihasilkan. Simulasi tersebut dilakukan dengan menggunakan jumlah piezoelektrik sebanyak 2200 dan CPVA diletakkan dengan jarak 0.2 m dari titik pusat massa utama. Berdasarkan gambar 2.16 dapat diketahui bahwa dengan digunakannya frekuensi natural pertama sistem utama sebelum diberi penambahan CPVA sebagai frekuensi operasi, yaitu sebesar 40.87 rad/s, maka CPVA mampu menghasilkan daya yang lebih besar dibandingkan dengan frekuensi operasi lainnya

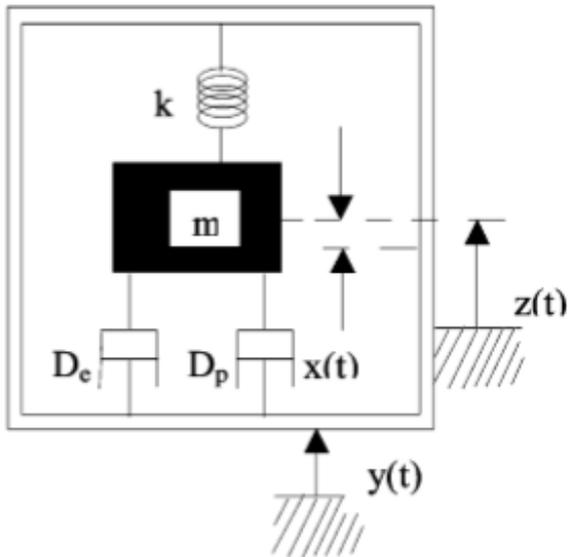
Resonansi frekuensi natural CPVA dan frekuensi operasi meningkatkan daya yang diserap oleh piezoelectric. Namun resonansi frekuensi tidak akan mempengaruhi daya yang dibangkitkan secara signifikan jika kemampuan komponen penyerap energi terlalu kecil. Sesuai lansiran pada penelitian terdahulu bahwa kemampuan satu piezoelectric dalam menyerap energi hanya 244×10^{-10} F. Melihat kemampuan piezoelectric yang cukup kecil dalam menyerap energi maka jumlah piezoelectric ditambahkan atau mencari alternatif lain.

Agar daya yang dibangkitkan cukup besar maka perlu penambahan piezoelectric hingga ribuan. Ribuan piezoelectric yang digunakan memiliki dimensi yang cukup besar dan jika dimplementasikan tidak akan setara dengan dimensi rancang bangun sistem DVA. Maka perlu alternatif lain dalam menyerap energi dari getaran. Konsep elektromagnetik merupakan salah satu alternatif yang dapat digunakan dalam menyerap energi getaran. Beberapa penelitian DVA konsep elektromagnetik telah dilakukan dan desain yang digunakan oleh masing-masing pengujian berbeda-beda. Salah satu pengujian yang telah dilakukan dalam menggunakan konsep elektromagnetik yakni *Optimization of an Electromagnetic Energy Harvesting Device* oleh Chitta Ranjan Saha^[7] yang mana dalam konsepannya beliau memanfaatkan perubahan jumlah fluks magnet terhadap jarak. Konsep yang digunakan sejenis dengan penelitian saya saat ini. Adapun gambaran terkait alat dapat dilihat pada gambar 2.17



Gambar 2.17 Rancang bangun generator elektromagnetik^[7]

Sehingga didapatkan skema alat lebih sederhana



Gambar 2.18 Skema alat generator elektromagnetik^[7]

Kemudian diilustrasikan dalam persamaan gerak

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + D_p \frac{dx}{dt} + kx = F_o \sin \omega t - F_{em} \quad (2.20)$$

dan persamaan untuk gaya redaman yang terjadi akibat terjadi penyerapan energi oleh induksi elektromagnetik

$$F_{em} = \left(N \frac{d\varphi}{dx} \right)^2 \frac{1}{R_c + R_l + j\omega L} \frac{dx}{dt} = D_{em} \frac{dx}{dt} \quad (2.21)$$

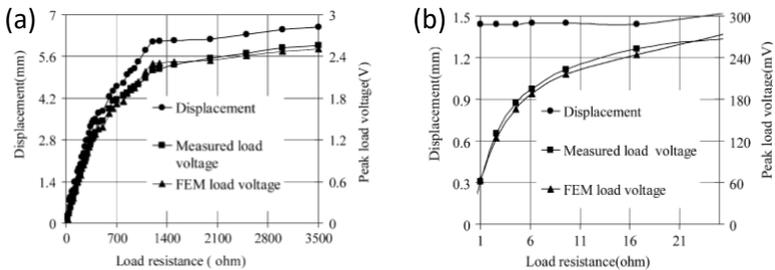
Sehingga daya yang dibangkitkan

$$P_{avg} = \frac{1}{T} \int_0^T D_{em} \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 dt = D_{em} \frac{F_o^2}{2(D_p + D_{em})^2}. \quad (2.22)$$

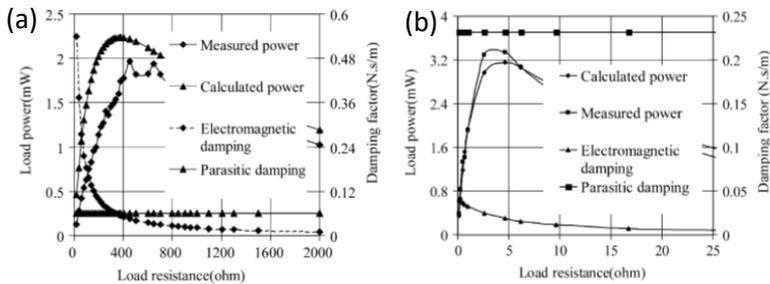
Tabel 2.1 Parameter generator elektromagnetik

Parameters	Generator-A	Generator-B
Moving mass (kg)	0.0428	0.025
Magnet size (mm)	15 x 15 x 5	10 x 10 x 3
Beam frequency (Hz)	13.11	84
Acceleration (m/s ²)	0.78	7.8
Magnet and coil gap (mm)	1.25	1.5
Coil outer diameter (mm)	28.5	13.3
Coil inner diameter (mm)	5	2
Coil thickness (mm)	7.5	7
Coil turns	850	300
Coil resistance (ohm)	18	3.65

Menggunakan penurunan persamaan 2.20 ;2.21 dan 2.22 serta parameter yang telah didapatkan hasil simulasi untuk generator elektromagnetik sebagai berikut



Gambar 2.19 Pengaruh perpindahan terhadap tegangan yang dibangkitkan pada (a) generator A; (b) generator B^[7]

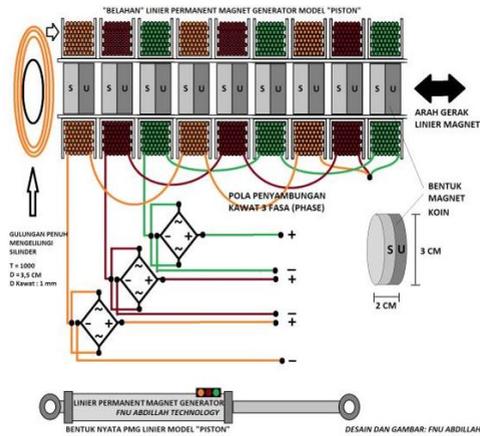


Gambar 2.20 Pengaruh perubahan *damping factor* terhadap daya bangkitan pada (a) generator A; (b) generator B^[7]

Perubahan nilai hambatan pada gambar 2.19 dan gambar 2.20 mempengaruhi besarnya gaya redaman elektromagnetik dan pada akhirnya mempengaruhi respon getaran serta daya yang dibangkitkan. Terlihat pada grafik bahwa hambatan paling baik pada generator A sekitar 400 ohm hingga 800 ohm karena perpindahan mengalami perubahan gradien serta daya yang dihasilkan paling optimal. Begitupula evaluasi untuk generator B dengan hambatan sekitar 4 ohm hingga 8 ohm.

Melihat terdapat daya bangkitan dengan elektromagnetik lebih besar dibandingkan daya bangkitan piezoelectric. Saya lebih optimis bahwa elektromagnet lebih baik dibandingkan piezoelectric. Namun menurut saya pada penelitian Chitta Ranjan Saha masih memiliki kekurangan. Perpindahan pada sistem penelitian Chitta Ranjan Saha memiliki keterbatasan. Oleh karena itu, perlu dilakukan modifikasi desain. Desain generator dengan skema pada pengujian oleh Lenz merupakan salah satu alternatif. Pasalnya massa DVA dapat bergerak lebih leluasa.

Adapun penelitian terdahulu yang mendukung desain penelitian saya yakni penelitian terkait ‘Kajian Teknis Gejala Magnetisasi pada Linear Generator untuk Alternatif Pembangkit Listrik’ dilakukan oleh Wahyudianto Bagus Nugroho^[5]. Pada penelitiannya dilakukan pengujian dengan prototype linear generator yang seperti yang telah diilustrasikan oleh gambar 2.21.



Gambar 2.21 Rangkaian linier generator tiga fasa. ^[5]

Terdapat persamaan pendukung pada penelitian ini salah satunya nilai medan magnet pada suatu titik di udara,

$$B_g = B_r \left(\frac{t_m}{t_m + \mu_r g} \right) \quad (2.23)$$

Dimana, t_m : Ketebalan magnet (m)

B_g : Kerapatan fluks udara (T)

B_r : Kerapatan fluks sisa pada magnet (T)

g : Jarak udara magnet ke penangkap fluks (m)

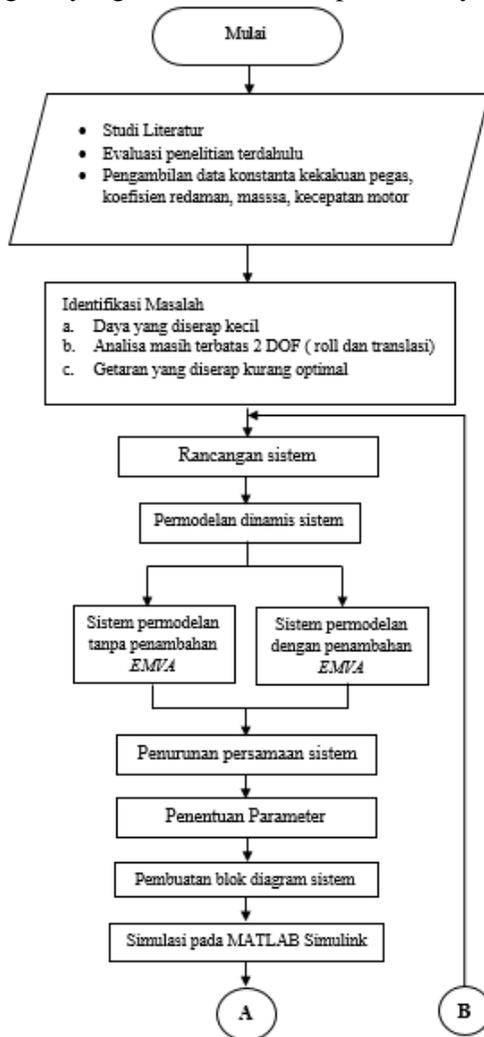
μ_r : Permeabilitas relatif udara ($1 \approx 5$)

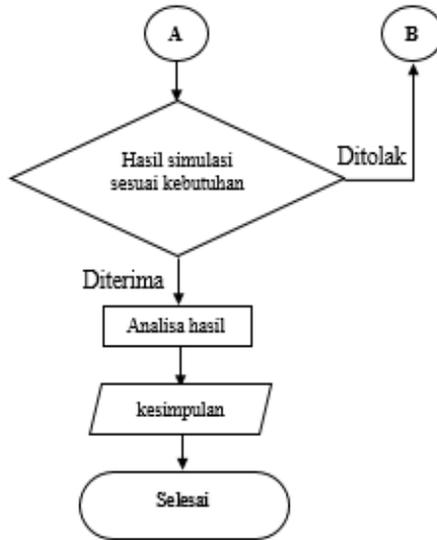
Adapun hasil dari penelitian ini adalah rekomendasi untuk penelitian selanjutnya. Diantaranya, Jenis magnet yang digunakan paling baik adalah magnet induksi dengan 100 lilitan yaitu pada voltase 6 volt dapat mengkasikan fluks magnet 23.8 weber, desain magnet permanen untuk translator menghasilkan fluks yang lebih sedikit dibandingkan dengan besar fluks yang dihasilkan oleh magnet induksi, daya yang dibutuhkan untuk translator dengan magnet induksi lebih besar tergantung keluaran arus dan voltase yang digunakan, sedangkan daya keluarannya tergantung pada konstruksi stator yang dirancang dengan airgap tertentu.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Tahapan Penelitian

Langkah-langkah yang dilakukan dalam penelitian yakni





Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.2. Metode Pengerjaan Penelitian

Metode pengerjaan penelitian tugas akhir ini telah dijelaskan secara garis besar oleh gambar 3.1. Penelitian ini terdiri dari beberapa tahap dan perlu dilakukan pemahaman terhadap metode-metode agar memperoleh hasil diinginkan.

3.2.1. Studi Literatur

Sebagai tahap awal sebelum melakukan proses penelitian tugas akhir ini perlu dilakukan pengumpulan referensi-referensi yang biasa disebut studi literatur. Referensi ini nantinya digunakan sebagai penunjang dalam analisa permodelan *Electromagnetic Vibration Absorber (EMVA)*. Referensi itu juga berguna untuk menambah wawasan pengetahuan serta menjadi landasan dalam membahas permasalahan. Selain itu studi literatur diharapkan dapat mengembangkan penelitian yang sudah ada. Adapun media untuk mencari studi literatur yakni diperoleh dari berbagai macam jurnal ilmiah, buku maupun penelitian terdahulu.

3.2.2. Identifikasi Masalah

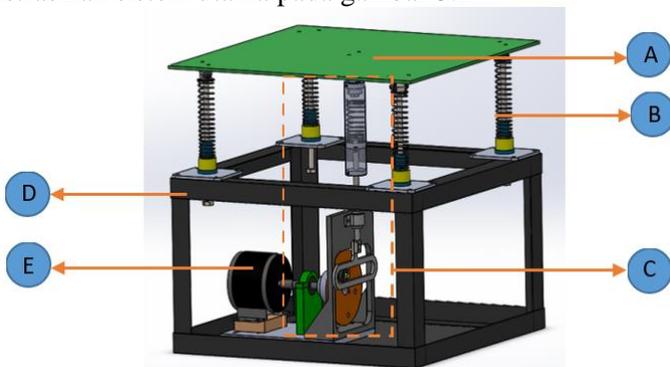
Permasalahan yang melatar belakangi Tugas Akhir ini diangkat dari penelitian terdahulu oleh Imam Safei^[1] dan Faiz Imawan Danaputra^[2]. Terdapat kekurangan pada penelitian sebelumnya yaitu hasil simulasi dan eksperimen memiliki perbedaan yang cukup besar, energi yang diserap oleh CPVA masih terbilang kecil serta analisa penelitian terbatas dalam dua derajat kebebasan yakni translasi dan *rolling*. Maka diperlukan perbaikan rangka dan mencari alternatif lain sebagai pengganti CPVA salah satunya *EMVA*. Selain itu penelitian ini perlu dilakukan analisa dalam arah translasi, *rolling* dan *pitching*.

3.2.3. Rancangan Sistem

Gambaran prototipe sebagai perwakilan sistem mekanik di kehidupan sehari-hari sangatlah perlu. Sebab sistem di keadaan sesungguhnya sangat kompleks dan perlu disederhanakan agar yang hal-hal yang tidak diperlukan tidak mengganggu analisa.

3.2.3.1. Rancang Bangun Sistem Utama Tanpa *EMVA*

Penelitian ini menggunakan sistem utama yang digunakan pula pada penelitian Faiz Imawan Danaputra yang telah dijelaskan pada tinjauan pustaka di sub-bab penelitian terdahulu. Dilustrasikan sistem utama pada gambar 3.2



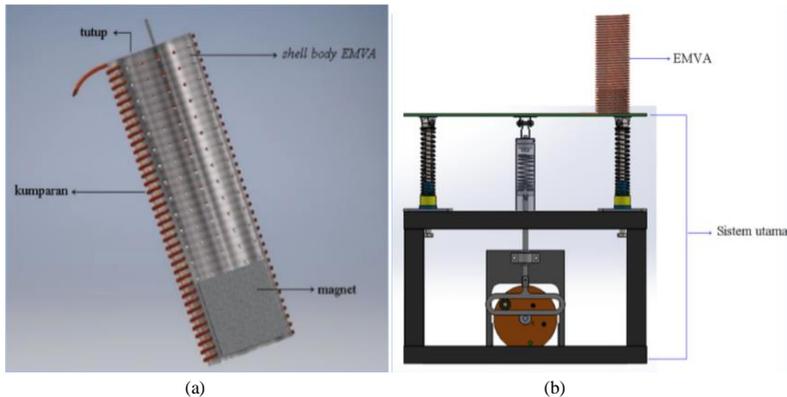
Gambar 3.2 Sistem Utama Tanpa DVA

Keterangan:

- A Meja
- B Suspensi Meja
- C Mekanisme Penggerak
- D Rangka
- E Motor

3.2.3.2. Rancang Bangun Mekanisme *Electromagnetic Vibration Absorber*

Mekanisme *Electromagnetic Vibration Absorber (EMVA)* memiliki fungsi untuk mereduksi getaran massa sistem utama serta menyerap energi dengan menggunakan konsep elektromagnetik. Sebagaimana fungsi mekanisme *EMVA* maka *EMVA* dirancang dengan kemampuan penyerapan getaran dan energi yang optimal. Oleh karena itu massa dari sistem mekanisme *EMVA* disesuaikan dengan teori yang ada serta memiliki sifat magnetik. Lalu selongsong *EMVA* dirancang agar medan magnet dari massa *EMVA* tidak menghalangi induksi pada lilitan kumparan. *EMVA* memiliki dimensi diameter 45 mm dan tinggi 100 mm yang terdiri dari massa absorber yang memiliki sifat magnetik, pegas, selongsong, serta kumparan tembaga sebagai penangkap energi kinetik menjadi energi listrik dan sebagai redaman sistem mekanik *EMVA*. Nantinya *EMVA* ditempel di atas meja sesuai gambar 3.3.



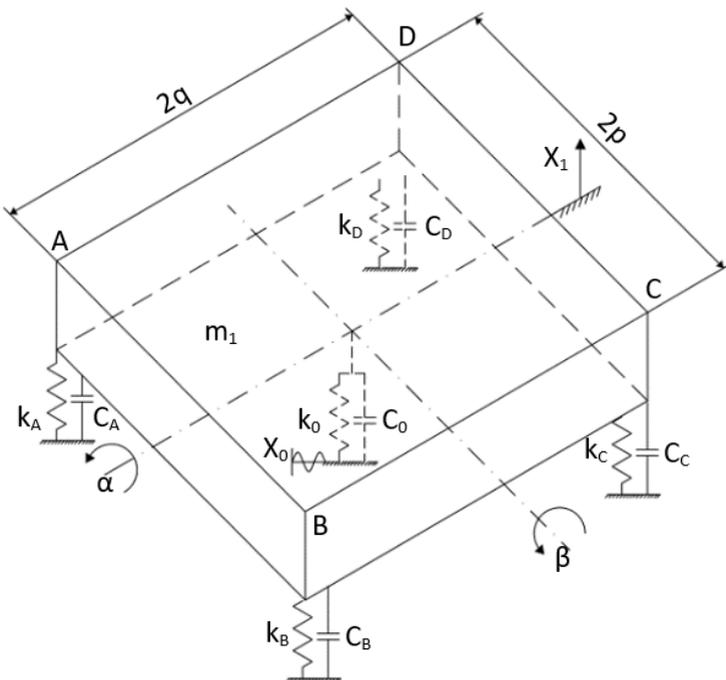
Gambar 3.3 (a) *EMVA*; (b) Sistem utama dengan penambahan *EMVA*.

3.2.4. Permodelan Dinamis Sistem

Dalam proses simulasi perlu dilakukan penurunan persamaan. Dimana hasil penurunan persamaan digunakan sebagai permodelan dari sistem di lapangan. Penurunan persamaan didapat dari fenomena-fenomena yang kemungkinan terjadi seperti getaran, gaya redaman, atau elektromagnetik pada sistem. Jumlah penurunan persamaan disesuaikan dengan kebutuhan.

3.2.4.1. Penurunan Persamaan Gerak Sistem Utama Tanpa Penambahan EMVA

Sebelum dilakukan penurunan rumus. Perlu dilakukan peninjauan pada instalasi sistem. Berikut skema dari Sistem Utama Tanpa Penambahan EMVA yang telah di;ustrasikan gambar 3.4.



Gambar 3.4 Skema sistem utama tanpa EMVA

Keterangan:

m_1 : massa utama

c_o : konstanta redaman eksitasi

c_i : konstanta redaman m_1 pada titik i

x_o : *displacement* eksitasi disk

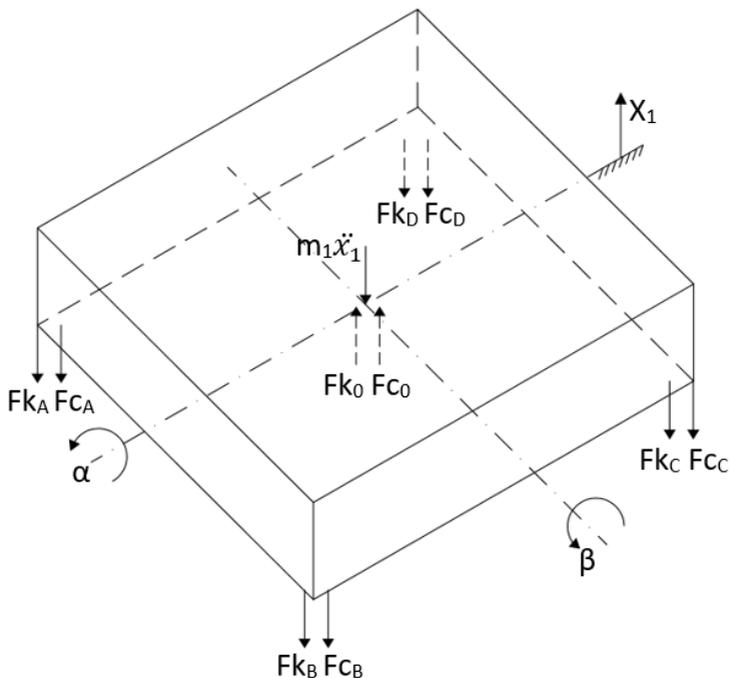
x_1 : *displacement* massa utama (m_1)

k_o : konstanta pegas eksitasi

k_i : konstanta pegas m_1 pada titik i

i : A, B, C, atau D

Sesuai Ilustrasi pada gambar 3.4 didapatkan skema sistem pada gambar 3.5 agar lebih mudah dalam memodelkan maka diperlukan penggambaran *Free Body Diagram*



Gambar 3.5 *Free Body Diagram* sistem utama tanpa EMVA.

Keterangan:

Fk_o : Gaya eksitasi pegas dari mekanisme penggerak (N)

Fc_o : Gaya eksitasi redaman dari mekanisme penggerak (N)

Fk_i : Gaya pegas dari massa utama (m_1) pada titik i (N)

Fci : Gaya redaman dari massa utama (m_1) pada titik i (N)

I : A, B, C, atau D

Dimana masing-masing gaya eksitasi pada m_1

$$Fk_o = k_o(x_0 - x_1) \qquad Fk_C = k_C(x_1 + p\alpha + q\beta)$$

$$Fc_o = c_o(\dot{x}_0 - \dot{x}_1) \qquad Fc_C = c_C(\dot{x}_1 + p\dot{\alpha} + q\dot{\beta})$$

$$Fk_A = k_A(x_1 - p\alpha - q\beta) \qquad Fk_D = k_D(x_1 - p\alpha + q\beta)$$

$$Fc_A = c_A(\dot{x}_1 - p\dot{\alpha} - q\dot{\beta}) \qquad Fc_D = c_D(\dot{x}_1 - p\dot{\alpha} + q\dot{\beta})$$

$$Fk_B = k_B(x_1 + p\alpha - q\beta) \qquad Fc_B = c_B(\dot{x}_1 + p\dot{\alpha} - q\dot{\beta})$$

Terdapat perbedaan pada nilai konstanta pegas dan nilai konstanta redaman pada setiap titik (titik A, B, C dan D) sehingga sistem utama tanpa EMVA memiliki 3 gerakan yakni translasi, *rolling*, *pitching* dan memiliki tiga derajat kebebasan.

- Pergerakan translasi

Pergerakan translasi yang dimaksud yakni translasi ke arah vertikal searah dengan X_1

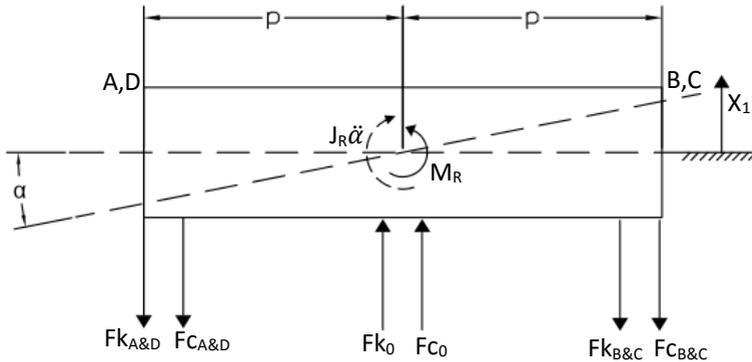
$$\begin{aligned} \uparrow + \sum Fx_1 &= m_1 \ddot{x}_1 \\ Fk_o + Fc_o - Fk_A - Fc_A - Fk_B - Fc_B - Fk_C - Fc_C \\ &\quad - Fk_D - Fc_D = m_1 \ddot{x}_1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} k_o(x_0 - x_1) + c_o(\dot{x}_0 - \dot{x}_1) - k_A(x_1 - p\alpha - q\beta) \\ - c_A(\dot{x}_1 - p\dot{\alpha} - q\dot{\beta}) - k_B(x_1 + p\alpha - q\beta) \\ - c_B(\dot{x}_1 + p\dot{\alpha} - q\dot{\beta}) - k_C(x_1 + p\alpha + q\beta) \\ - c_C(\dot{x}_1 + p\dot{\alpha} + q\dot{\beta}) - k_D(x_1 - p\alpha + q\beta) \\ - c_D(\dot{x}_1 - p\dot{\alpha} + q\dot{\beta}) = m_1 \ddot{x}_1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& m_1 \ddot{x}_1 + (k_A + k_B + k_C + k_D + k_o) x_1 \\
& - (k_A - k_B - k_C + k_D) p \alpha - (k_A + k_B - k_C - k_D) q \beta \\
& + (c_A + c_B + c_C + c_D + c_o) \dot{x}_1 - (c_A - c_B - c_C + c_D) p \dot{\alpha} \\
& - (c_A + c_B - c_C - c_D) q \dot{\beta} = k_o x_o + c_o \dot{x}_o \quad (3.1)
\end{aligned}$$

- Pergerakan *Rolling*

Arah pergerakan rotasi berputar pada titik tengah garis AB sebagai sumbu putar. Perputarannya berlawanan dengan arah jarum jam sesuai gambar 3.6



Gambar 3.6 Free Body Diagram pergerakan rolling

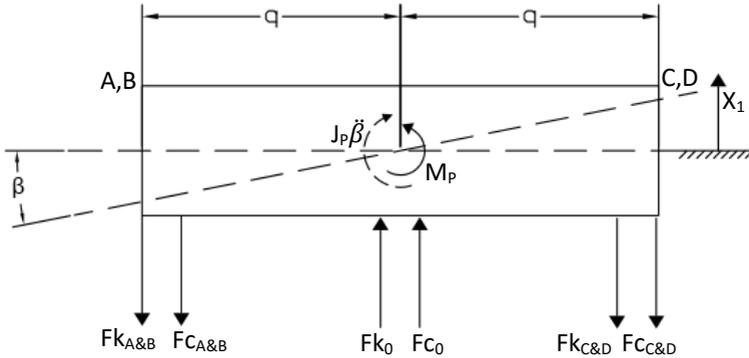
Didapatkan penurunan rumus untuk pergerakan *rolling*

$$\begin{aligned}
\curvearrowright M_R &= J_R \ddot{\alpha} \\
Fk_A p + Fc_A p - Fk_B p - Fc_B p - Fk_C p \\
- Fc_C p + Fk_D p + Fc_D p &= J_R \ddot{\alpha} \\
k_A (x_1 - p \alpha - q \beta) p + c_A (\dot{x}_1 - p \dot{\alpha} - q \dot{\beta}) p \\
- k_B (x_1 + p \alpha - q \beta) p - c_B (\dot{x}_1 + p \dot{\alpha} - q \dot{\beta}) p \\
- k_C (x_1 + p \alpha + q \beta) p - c_C (\dot{x}_1 + p \dot{\alpha} + q \dot{\beta}) p \\
+ k_D (x_1 - p \alpha + q \beta) p + c_D (\dot{x}_1 - p \dot{\alpha} + q \dot{\beta}) p &= J_R \ddot{\alpha}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& J_R \ddot{\alpha} - (k_A - k_B - k_C + k_D) p x_1 \\
& + (k_A + k_B + k_C + k_D) p^2 \alpha + (k_A - k_B + k_C - k_D) p q \beta \\
& - (c_A - c_B - c_C + c_D) p \dot{x}_1 + (c_A + c_B + c_C + c_D) p^2 \dot{\alpha} \\
& + (c_A - c_B + c_C - c_D) p q \dot{\beta} = 0 \quad (3.2)
\end{aligned}$$

- Pergerakan *Pitching*

Pergerakan beputar dengan sumbu putar pada titik tengah garis BC dengan arah CCW sesuai gambar 3.7



Gambar 3.7 Free Body Diagram pergerakan *pitching*

Didapatkan penurunan rumus untuk pergerakan *pitching* sistem utama tanpa penambahan EMVA sebagai berikut

$$\begin{aligned}
\curvearrowright M_P &= J_P \ddot{\beta} \\
Fk_A q + Fc_A q + Fk_B q + Fc_B q - Fk_C q - Fc_C q \\
- Fk_D q - Fc_D q &= J_P \ddot{\beta} \\
k_A(x_1 - p\alpha - q\beta)q + c_A(\dot{x}_1 - p\dot{\alpha} - q\dot{\beta})q \\
+ k_B(x_1 + p\alpha - q\beta)q + c_B(\dot{x}_1 + p\dot{\alpha} - q\dot{\beta})q \\
- k_C(x_1 + p\alpha + q\beta)q - c_C(\dot{x}_1 + p\dot{\alpha} + q\dot{\beta})q \\
- k_D(x_1 - p\alpha + q\beta)q - c_D(\dot{x}_1 - p\dot{\alpha} + q\dot{\beta})q &= J_P \ddot{\beta}
\end{aligned}$$

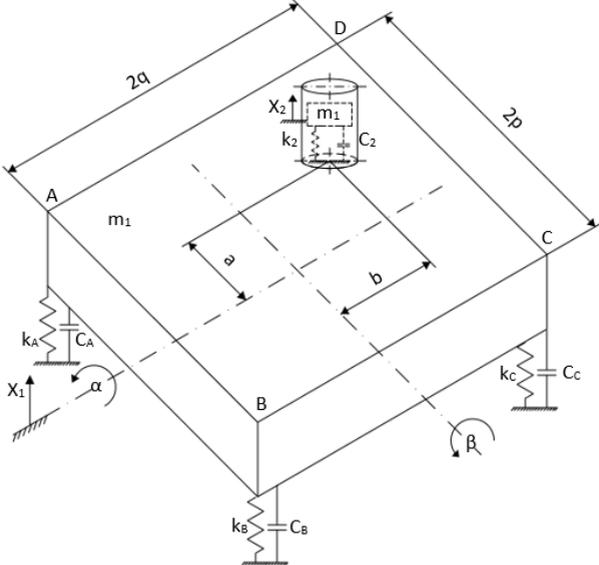
$$\begin{aligned}
 & J_P \ddot{\beta} - (k_A + k_B - k_C - k_D) q x_1 \\
 & + (k_A - k_B + k_C - k_D) p q \alpha + (k_A + k_B + k_C + k_D) q^2 \beta \\
 & - (c_A + c_B - c_C - c_D) q \dot{x}_1 + (c_A - c_B + c_C - c_D) p q \dot{\alpha} \\
 & + (c_A + c_B + c_C + c_D) q^2 \dot{\beta} = 0 \tag{3.3}
 \end{aligned}$$

Persamaan (3.1), (3.2), dan (3.3) disubstitusikan ke matriks 3x3

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} (c_A + c_B + c_C + c_D + c_o) & -(c_A - c_B - c_C + c_D)p & -(c_A + c_B - c_C - c_D)q \\ -(c_A - c_B - c_C + c_D)p & (c_A + c_B + c_C + c_D)p^2 & (c_A - c_B + c_C - c_D)pq \\ -(c_A + c_B - c_C - c_D)q & (c_A - c_B + c_C - c_D)pq & (c_A + c_B + c_C + c_D)q^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \end{Bmatrix} \\
 & + \begin{bmatrix} (k_A + k_B + k_C + k_D + k_o) & -(k_A - k_B - k_C + k_D)p & -(k_A + k_B - k_C - k_D)q \\ -(k_A - k_B - k_C + k_D)p & (k_A + k_B + k_C + k_D)p^2 & (k_A - k_B + k_C - k_D)pq \\ -(k_A + k_B - k_C - k_D)q & (k_A - k_B + k_C - k_D)pq & (k_A + k_B + k_C + k_D)q^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ \alpha \\ \beta \end{Bmatrix} \\
 & + \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & J_P & 0 \\ 0 & 0 & J_P \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{\alpha} \\ \ddot{\beta} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} k_o x_o + c_o \dot{x}_o \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \tag{3.4}
 \end{aligned}$$

3.2.4.2. Penurunan Persamaan Gerak Sistem Utama dengan Penambahan EMVA

3.2.4.2.1. Sistem Mekanik



Gambar 3.8 Skema mekanik sistem utama dengan EMVA

Keterangan:

m_1 : massa utama

m_2 : massa *EMVA*

x_0 : perpindahan eksitasi disk

x_1 : perpindahan massa utama (m_1)

x_2 : perpindahan massa *EMVA* (m_2)

c_0 : konstanta redaman eksitasi

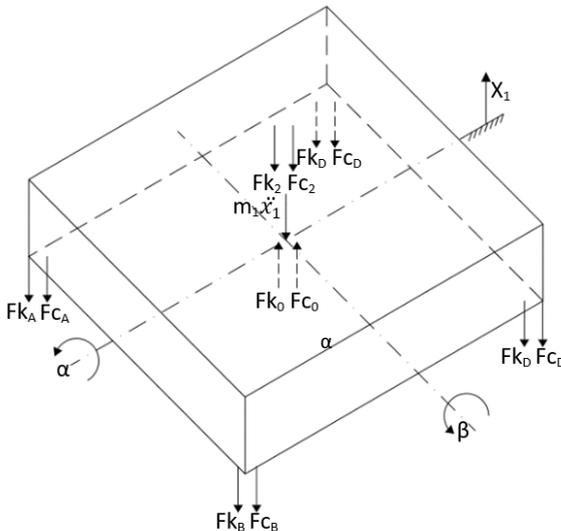
c_1 : konstanta redaman m_1 pada titik i

c_2 : konstanta redaman m_2

k_0 : konstanta pegas eksitasi

k_2 : konstanta pegas m_2

k_i : konstanta pegas m_1 pada titik i ; i: A, B, C, atau D



Gambar 3.9 Free Body Diagram dengan penambahan *EMVA*

Keterangan:

$$Fk_o = k_o(x_0 - x_1)$$

$$F_c_o = c_o(\dot{x}_0 - \dot{x}_1)$$

$$Fk_A = k_A(x_1 - p\alpha - q\beta)$$

$$F_c_A = c_A(\dot{x}_1 - p\dot{\alpha} - q\dot{\beta})$$

$$Fk_B = k_B(x_1 + p\alpha - q\beta)$$

$$F_c_B = c_B(\dot{x}_1 + p\dot{\alpha} - q\dot{\beta})$$

$$Fk_C = k_C(x_1 + p\alpha + q\beta)$$

$$F_c_C = c_C(\dot{x}_1 + p\dot{\alpha} + q\dot{\beta})$$

$$Fk_D = k_D(x_1 - p\alpha + q\beta)$$

$$F_c_D = c_D(\dot{x}_1 - p\dot{\alpha} + q\dot{\beta})$$

$$Fk_2 = k_2(x_1 - a\alpha + b\beta - x_2)$$

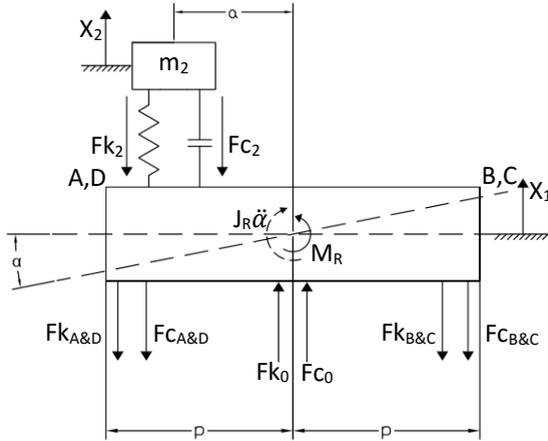
$$F_c_2 = c_2(\dot{x}_1 - a\dot{\alpha} + b\dot{\beta} - \dot{x}_2)$$

Penambahan *EMVA* pada sistem utama berdampak pada jumlah gerakan yang perlu ditinjau. Terdapat empat gerakan yang perlu ditinjau. Tiga gerakan oleh sistem utama yakni translasi, *rolling* dan *pitching*, serta satu gerakan oleh *EMVA* yakni translasi.

- Pergerakan Translasi
Pergerakan translasi yang dimaksud yakni pergerakan ke arah vertikal oleh massa *EMVA*.

$$\begin{aligned} & \uparrow + \sum Fx_1 = m_1 \ddot{x}_1 \\ Fk_o + Fc_o - Fk_A - Fc_A - Fk_B - Fc_B - Fk_C - Fc_C - Fk_D \\ & - Fc_D - Fk_2 - Fc_2 = m_1 \ddot{x}_1 \\ \\ & k_o(x_o - x_1) + c_o(\dot{x}_o - \dot{x}_1) - k_A(x_1 - p\alpha - q\beta) \\ & - c_A(\dot{x}_1 - p\dot{\alpha} - q\dot{\beta}) - k_B(x_1 + p\alpha - q\beta) \\ & - c_B(\dot{x}_1 + p\dot{\alpha} - q\dot{\beta}) - k_C(x_1 + p\alpha + q\beta) \\ & - c_C(\dot{x}_1 + p\dot{\alpha} + q\dot{\beta}) - k_D(x_1 - p\alpha + q\beta) \\ & - c_D(\dot{x}_1 - p\dot{\alpha} + q\dot{\beta}) - k_2(x_1 - a\alpha + b\beta - x_2) \\ & - c_2(\dot{x}_1 - a\dot{\alpha} + b\dot{\beta} - \dot{x}_2) = m_1 \ddot{x}_1 \\ \\ & m_1 \ddot{x}_1 - k_2 x_2 + (k_A + k_B + k_C + k_D + k_2 + k_o)x_1 \\ & - ((k_A - k_B - k_C + k_D)p + ak_2)\alpha \\ & - ((k_A + k_B - k_C - k_D)q - bk_2)\beta - c_2 \dot{x}_2 \\ & + (c_A + c_B + c_C + c_D + c_2 + c_o)\dot{x}_1 \\ & - ((c_A - c_B - c_C + c_D)p + ac_2)\dot{\alpha} \\ & - ((c_A + c_B - c_C - c_D)q - bc_2)\dot{\beta} = k_o x_o + c_o \dot{x}_o \quad (3.5) \end{aligned}$$

- Pergerakan Rolling
Sejenis dengan sistem utama tanpa penambahan *EMVA*. Hanya saja terdapat pengaruh gaya redaman dan gaya pegas dari *EMVA* dalam menentukan pergerakan Rolling.



Gambar 3.10 Free Body Diagram pergerakan rolling

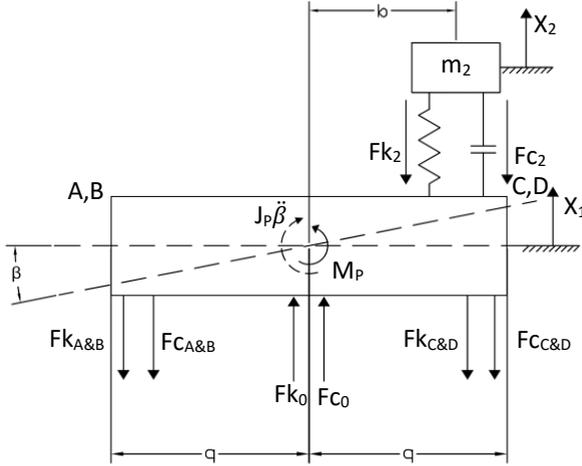
$$\curvearrowright M_R = J_R \ddot{\alpha}$$

$$Fk_A p + Fc_A p - Fk_B p - Fc_B p - Fk_C p - Fc_C p + Fk_D p + Fc_D p + Fk_2 a + Fc_2 a = J_R \ddot{\alpha}$$

$$\begin{aligned} & k_A(x_1 - p\alpha - q\beta)p + c_A(\dot{x}_1 - p\dot{\alpha} - q\dot{\beta})p \\ & - k_B(x_1 + p\alpha - q\beta)p - c_B(\dot{x}_1 + p\dot{\alpha} - q\dot{\beta})p \\ & - k_C(x_1 + p\alpha + q\beta)p - c_C(\dot{x}_1 + p\dot{\alpha} + q\dot{\beta})p \\ & + k_D(x_1 - p\alpha + q\beta)p + c_D(\dot{x}_1 - p\dot{\alpha} + q\dot{\beta})p \\ & + k_2(x_1 - a\alpha + b\beta - x_2)a + c_2(\dot{x}_1 - a\dot{\alpha} + b\dot{\beta} - \dot{x}_2)a = J_R \ddot{\alpha} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & J_R \ddot{\alpha} + k_2 a x_2 - ((k_A - k_B - k_C + k_D)p + k_2 a)x_1 \\ & + ((k_A + k_B + k_C + k_D)p^2 + k_2 a^2)\alpha \\ & + ((k_A - k_B + k_C - k_D)pq - k_2 ab)\beta + c_2 a x_2 \\ & - ((c_A - c_B - c_C + c_D)p + c_2 a)\dot{x}_1 \\ & + ((c_A + c_B + c_C + c_D)p^2 + c_2 a^2)\dot{\alpha} \\ & + ((c_A - c_B + c_C - c_D)pq - c_2 ab)\dot{\beta} = 0 \end{aligned} \quad (3.6)$$

- Pergerakan Pitching

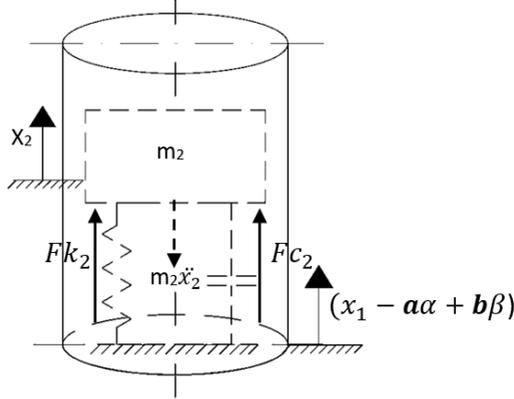


Gambar 3.11 Free Body Diagram pergerakan pitching

$$\begin{aligned} \overset{\curvearrowleft}{+} M_P &= J_P \ddot{\beta} \\ Fk_A q + Fc_A q + Fk_B q + Fc_B q - Fk_C q - Fc_C q \\ &- Fk_D q - Fc_D q - Fk_2 b - Fc_2 b = J_P \ddot{\beta} \\ &k_A(x_1 - p\alpha - q\beta)q + c_A(\dot{x}_1 - p\dot{\alpha} - q\dot{\beta})q \\ &+ k_B(x_1 + p\alpha - q\beta)q + c_B(\dot{x}_1 + p\dot{\alpha} - q\dot{\beta})q \\ &- k_C(x_1 + p\alpha + q\beta)q - c_C(\dot{x}_1 + p\dot{\alpha} + q\dot{\beta})q \\ &- k_D(x_1 - p\alpha + q\beta)q - c_D(\dot{x}_1 - p\dot{\alpha} + q\dot{\beta})q \\ &- k_2(x_1 - a\alpha + b\beta - x_2)b - c_2(\dot{x}_1 - a\dot{\alpha} + b\dot{\beta} - \dot{x}_2)b = J_P \ddot{\beta} \\ &J_P \ddot{\beta} - k_2 b x_2 - ((k_A + k_B - k_C - k_D)q - k_2 b)x_1 + \\ &((k_A - k_B + k_C - k_D)pq + k_2 ab)\alpha \\ &+ ((k_A + k_B + k_C + k_D)q^2 + k_2 b^2)\beta - c_2 b \dot{x}_2 \\ &- ((c_A + c_B - c_C - c_D)q - c_2 b)\dot{x}_1 \\ &+ ((c_A - c_B + c_C - c_D)pq + c_2 ab)\dot{\alpha} \\ &+ ((c_A + c_B + c_C + c_D)q^2 + c_2 b^2)\dot{\beta} = 0 \end{aligned} \quad (3.7)$$

- Pergerakan *EMVA*

Pergerakan massa *EMVA* yang ditinjau merupakan gerakan translasi arah vertikal. Karena *EMVA* ditempelkan pada massa utama (m_1) maka terdapat *base motion*



Gambar 3.12 Free Body Diagram pergerakan *EMVA*

Sehingga dengan meresultan gaya maka didapatkan persamaan gerak sebagai berikut

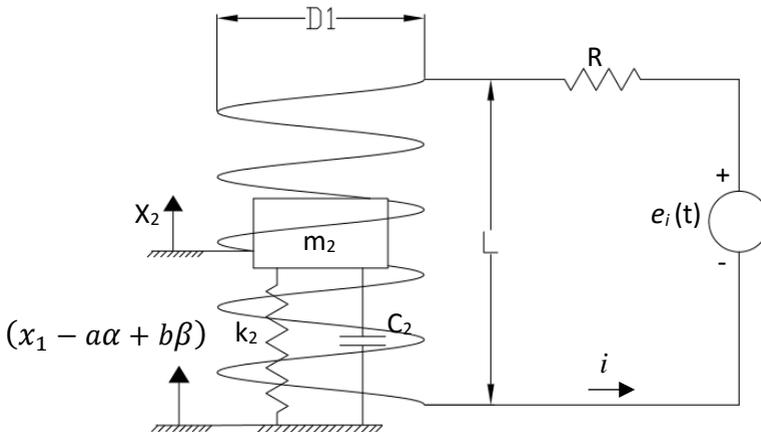
$$\begin{aligned}
 \uparrow + \sum Fx_2 &= m_2 \ddot{x}_2 \\
 Fk_2 + Fc_2 &= m_2 \ddot{x}_2 \\
 k_2(x_1 - a\alpha + b\beta - x_2) + c_2(\dot{x}_1 - a\dot{\alpha} + b\dot{\beta} - \dot{x}_2) &= m_2 \ddot{x}_2 \\
 m_2 \ddot{x}_2 - k_2 x_1 + k_2 a\alpha - k_2 b\beta + k_2 x_2 - c_2 \dot{x}_1 + \\
 c_2 a\dot{\alpha} - c_2 b\dot{\beta} + c_2 \dot{x}_2 &= 0 \quad (3.8)
 \end{aligned}$$

Persamaan (3.1), (3.2), dan (3.3) disubstitusikan ke matriks 4x4

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} (c_A + c_B + c_C + c_D + c_2 + c_0) & -(c_A p - c_B p - c_C p + c_D p + c_2 a) & -(c_A q + c_B q - c_C q - c_D q - c_2 b) & -c_2 \\ -(c_A p - c_B p - c_C p + c_D p + c_2 a) & (c_A p^2 + c_B p^2 + c_C p^2 + c_D p^2 + c_2 a^2) & (c_A p q - c_B p q + c_C p q - c_D p q - c_2 a b) & c_2 a \\ -(c_A q + c_B q - c_C q - c_D q - c_2 b) & (c_A p q - c_B p q + c_C p q - c_D p q - c_2 a b) & (c_A q^2 + c_B q^2 + c_C q^2 + c_D q^2 + c_2 b^2) & -c_2 b \\ -c_2 & c_2 a & c_2 b & c_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{x}_2 \end{Bmatrix} \\
 + & \begin{bmatrix} (k_A + k_B + k_C + k_D + k_2 + k_0) & -(k_A p - k_B p - k_C p + k_D p + k_2 a) & -(k_A q + k_B q - k_C q - k_D q - k_2 b) & -k_2 \\ -(k_A p - k_B p - k_C p + k_D p + k_2 a) & (k_A p^2 + k_B p^2 + k_C p^2 + k_D p^2 + k_2 a^2) & (k_A p q - k_B p q + k_C p q - k_D p q - k_2 a b) & k_2 a \\ -(k_A q + k_B q - k_C q - k_D q - k_2 b) & (k_A p q - k_B p q + k_C p q - k_D p q - k_2 a b) & (k_A q^2 + k_B q^2 + k_C q^2 + k_D q^2 + k_2 b^2) & -k_2 b \\ -k_2 & k_2 a & -k_2 b & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ \alpha \\ \beta \\ x_2 \end{Bmatrix} \\
 + & \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & J_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{\alpha} \\ \ddot{\beta} \\ \ddot{x}_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} k_0 x_0 + c_0 \dot{x}_0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3.9)
 \end{aligned}$$

3.2.4.2.2. Sistem Elektrikal

Selain *EMVA* mampu mereduksi getaran sistem utama. *EMVA* juga mampu menyerap energi dari getaran pada massa *EMVA*. Hasil perubahan energi getaran ke energi listrik tidak selalu sama karena gerakan yang berulang-ulang. Perubahan nilai energi yang dihasilkan oleh *EMVA* dipengaruhi oleh kecepatan serta posisi massa utama. Selain itu pada sistem elektrikal terdapat beberapa komponen yang menghantarkan listrik dan mengurangi nilai energi maksimum yang dihasilkan. Sehingga perlu dilakukan penurunan rumus untuk sistem elektrikal. Berikut skema sistem elektrikal



Gambar 3.13 Skema sistem elektrikal pada *EMVA*

Keterangan:

- | | |
|-------------------------------------|--|
| R : Hambatan dalam kawat | $e_i(t)$: GGL induksi |
| L : Panjang kumparan | i : Arus listrik |
| D1: Diameter kumparan | C_2 : konstanta redaman <i>EMVA</i> |
| m_2 : Massa magnet | X_2 : perpindahan magnet |
| k_2 : konstanta pegas <i>EMVA</i> | $(x_1 - a\alpha + b\beta)$: Base motion |

Dari skema sistem pada gambar 3.13 dapat diketahui bahwa timbulnya gaya gerak listrik (ggl) disebabkan oleh perubahan

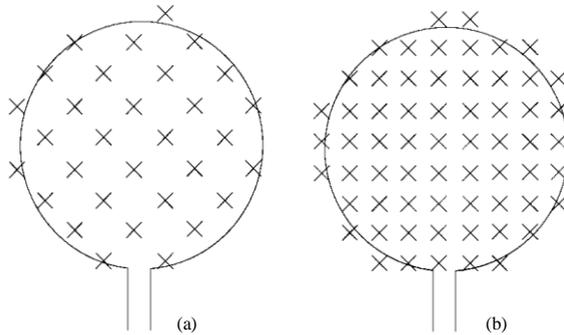
fluks. Hubungan gaya gerak listrik dan perubahan jumlah fluks magnet per satuan waktu telah ditunjukkan oleh persamaan 2.13

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.13)$$

Berbeda dengan motor atau dinamo yang memanfaatkan perubahan luas penampang kumparan. EMVA memanfaatkan perubahan jumlah fluks setaip satuan jarak dan satuan waktu. Sehingga jika persamaan $\Phi = \vec{B} \cdot \vec{A}$ disubstitusikan,

$$e = -N \frac{dB}{dt} \cdot A \quad (2.15)$$

Perubahan nilai medan magnet terhadap satuan waktu diawali dengan penurunan rumus terhadap magnet yang diam. Semakin jauh magnet terhadap loop maka semakin sedikit pula jumlah garis fluks magnet yang ditangkap loop.



Gambar 3.14 Fluks magnet yang ditangkap oleh loop. Magnet menjauh (a); mendekat (b)

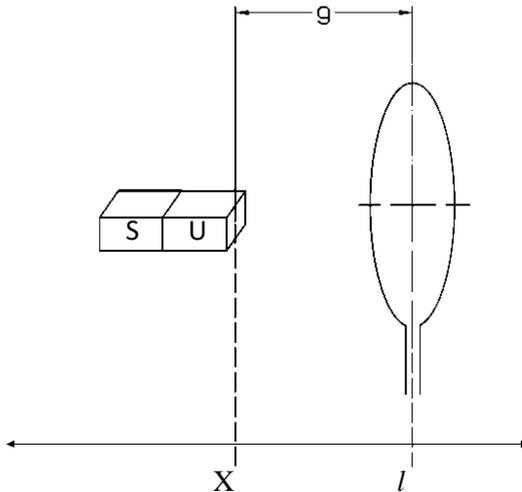
Dalam menghitung nilai medan magnet pada jarak tertentu di udara dapat menggunakan persamaan 2.23

$$B_g = B_r \left(\frac{t_m}{t_m + \mu_r g} \right) \quad (2.23)$$

Dimana, t_m : Ketebalan magnet (m)
 B_g : Kerapatan fluks udara (T)
 B_r : Kerapatan fluks sisa pada magnet (T)
 g : Jarak udara magnet ke penangkap fluks (m)
 μ_r : Permeabilitas relatif udara ($\approx 1,05$)

Jarak merupakan besaran vektor sehingga relatif terhadap kedudukan. Namun persamaan 2.23 tidak memiliki variabel yang mewakili kedudukan. Selain itu pada persamaan 2.23 diketahui jarak harus selalu bernilai positif maka perlu diberi tanda mutlak untuk nilai jarak. Sehingga didapatkan persamaan

$$B_g = B_r \left(\frac{t_m}{t_m + \mu_r |l - x|} \right) \quad (3.10)$$



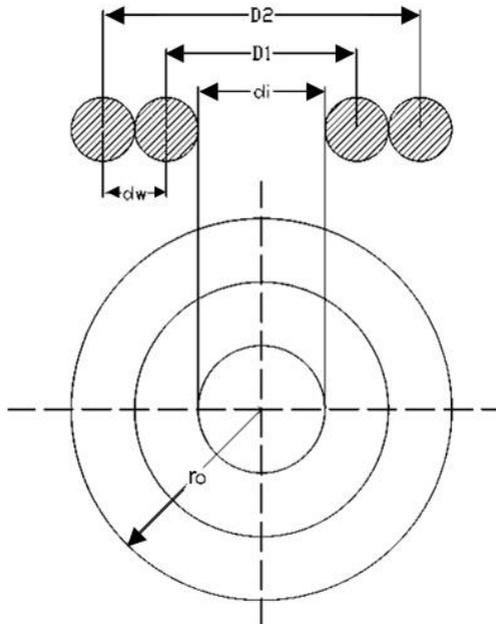
Gambar 3.15 Jarak antara loop dan magnet dengan koordinat.

Karena perubahan nilai medan magnet disebabkan oleh perubahan posisi setiap waktunya maka sesuai gambar 3.15.

$$\frac{dB_{1 \text{ lapis}}}{dt} = \frac{d\left(B_r \left(\frac{t_m}{t_m + \mu_r |l - x|}\right)\right)}{dt}$$

$$\frac{dB_{1 \text{ lapis}}}{dt} = \frac{d\left(B_r \left(\frac{t_m}{t_m + \mu_r |l - x|}\right)\right)}{dt} \frac{dx}{dx}$$

$$\frac{dB_{1 \text{ lapis}}}{dt} = \frac{\mu_r (l - x) B_r t_m}{|l - x|(t_m + \mu_r |l - x|)^2} \frac{dx}{dt} \quad (3.11)$$



Gambar 3.16 Susunan kawat pada kumparan beberapa tumpukan dengan satu lapis

Dari gambar 3.16 diperoleh bahwa setiap lapisan kumparan memiliki luas yang berbeda-beda dan pada generator linier luas kumparan yang ditembus medan magnet selalu konstan.

$$\sum_{i=1}^Z A_i = \sum_{i=1}^Z \pi \frac{D_i^2}{4} \quad (3.12)$$

Jika: $D_1 = d_i + d_w$ $D_2 = d_i + 2d_w$ $D_3 = d_i + 3d_w$

Maka,

$$\sum_{i=1}^3 A_i = \sum_{i=1}^3 \pi \frac{D_i^2}{4}$$

$$A_1 + A_2 + A_3 = \frac{\pi}{4} (d_i^2 + 2d_i d_w + d_w^2 + d_i^2 + 4d_i d_w + 4d_w^2 + d_i^2 + 6d_i d_w + 9d_w^2)$$

Karena memiliki pola deret aritmatika dan kuadrat. Sehingga sigma dapat digantikan dengan

$$\sum_{i=1}^Z A_i = \frac{\pi}{4} \left(Z d_i^2 + (Z + Z^2) d_i d_w + \frac{Z(Z+1)(2Z+1)}{6} d_w^2 \right) \quad (3.13)$$

Substitusi persamaan 3. dan persamaan 3. pada persamaan 2.15

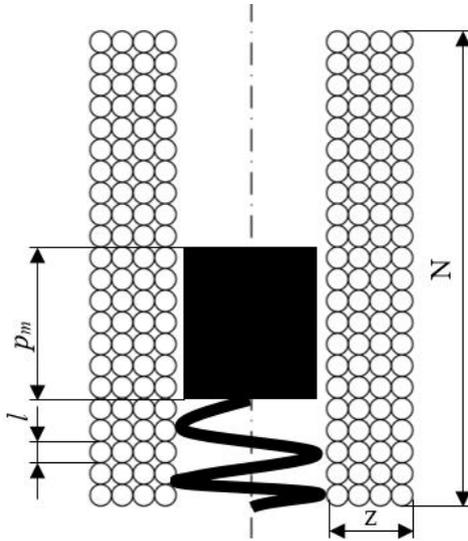
$$e = - \frac{dB_1 \text{ lapis}}{dt} \frac{\pi}{4} \left(Z d_i^2 + (Z + Z^2) d_i d_w + \frac{Z(Z+1)(2Z+1)}{6} d_w^2 \right)$$

$$e = - \frac{\mu_r (l-x) B_r t_m}{|l-x|(t_m + \mu_r |l-x|)^2} \frac{dx}{dt} \frac{\pi}{4} \left(Z d_i^2 + (Z + Z^2) d_i d_w + \frac{Z(Z+1)(2Z+1)}{6} d_w^2 \right) \quad (3.14)$$

Persamaan 3.14 hanya mewakili 1 susun kumpuran dengan beberapa lapisan. Beberapa susun kumpuran dengan beberapa lapisan diwakilkan dalam persamaan 3.15

$$e = -N \frac{\mu_r (l-x) B_r t_m}{|l-x|(t_m + \mu_r |l-x|)^2} \frac{dx}{dt} \frac{\pi}{4} \left(Z d_i^2 + (Z + Z^2) d_i d_w + \frac{Z(Z+1)(2Z+1)}{6} d_w^2 \right) \quad (3.15)$$

Nilai N dapat ditentukan dengan melihat gambar 3.17



Gambar 3.17 EMVA penampang melintang.

Bagian kecil dari susunan kumparan merupakan $dN = \frac{dl}{dw}$ maka,

$$de = - \frac{dl}{dw} \frac{\mu_r (l-x) B_r t_m}{|l-x|(t_m + \mu_r |l-x|)^2} \frac{dx}{dt} \frac{\pi}{4} \left(Z d_i^2 + (Z + Z^2) d_i d_w + \frac{Z(Z+1)(2Z+1)}{6} d_w^2 \right) \quad (3.16)$$

$$\text{misal: } \epsilon = \frac{\pi}{4} \left(Z d_i^2 + (Z + Z^2) d_i d_w + \frac{Z(Z+1)(2Z+1)}{6} d_w^2 \right) \mu_r B_r t_m \quad (3.17)$$

$$de = - \frac{dl}{dw} \frac{(l-x) \epsilon}{|l-x|(t_m + \mu_r |l-x|)^2} \frac{dx}{dt} \quad (3.18)$$

atau dapat dinotasikan

$$de = - \frac{dl}{dw} \frac{|l-x| \epsilon}{(l-x)(t_m + \mu_r |l-x|)^2} \frac{dx}{dt}$$

$$\int_{e_{l_1}}^{e_{l_2}} de = - \int_{l_1}^{l_2} \frac{1}{dw} \frac{|l-x| \epsilon}{(l-x)(t_m + \mu_r |l-x|)^2} \frac{dx}{dt} dl$$

Dimana: $l \geq x, |l-x| = l-x$ $l < x, |l-x| = x-l$

tidak terjadi perubahan fluks sepanjang batang magnet

$$\int_{e_{x-p_m}}^{e_x} de = 0$$

$$\int_{e_{l_1}}^{e_{l_2}} de = - \int_{l_1}^{x-p_m} \frac{1}{dw} \frac{-(l-x)\epsilon}{(l-x)(t_m+\mu_r(x-l))^2} dx dl - \int_x^{l_2} \frac{1}{dw} \frac{(l-x)\epsilon}{(l-x)(t_m+\mu_r(l-x))^2} dx dl$$

$$\int_{e_{l_1}}^{e_{l_2}} de = \int_{l_1}^{x-p_m} \frac{1}{dw} \frac{\epsilon}{(t_m+\mu_r(x-l))^2} dx dl - \int_x^{l_2} \frac{1}{dw} \frac{\epsilon}{(t_m+\mu_r(l-x))^2} dx dl \quad (3.19)$$

Sesuai Hukum Lenz yang telah dikutip pada dasar teori maka arus listrik pada kumparan bagian bawah magnet berlawanan arah dengan arus listrik yang dibangkitkan di bagian atas magnet

$$\int_{e_{l_1}}^{e_{l_2}} de = - \int_{l_1}^{x-p_m} \frac{1}{dw} \frac{\epsilon}{(t_m+\mu_r(x-l))^2} dx dl - \int_x^{l_2} \frac{1}{dw} \frac{\epsilon}{(t_m+\mu_r(l-x))^2} dx dl \quad (3.20)$$

$$e_{total} = \frac{\epsilon}{d_w \mu_r} \dot{x} \left(- \frac{1}{(t_m+\mu_r p_m)} + \frac{1}{(t_m+\mu_r(x-l_1))} + \frac{1}{(t_m+\mu_r(l_2-x))} - \frac{1}{t_m} \right) \quad (3.21)$$

Adapun gaya hambatan akibat induksi elektromagnetik yang dirumuskan pada persamaan 2.16

$$F_c = i (l \times B) \quad (2.16)$$

Karena perkalian *cross* maka l merupakan keliling kumparan dikalikan jumlah susunan sehingga diperoleh

$$l = N \pi \left(Z d_i + \frac{(Z+Z^2)}{2} d_w \right) \quad (3.22)$$

Nilai kuat arus listrik didapat dari persamaan $e = i R$. Sehingga dengan mensubstitusikan R dengan persamaan 2.19 didapatkan kuat arus listrik pada kumparan senilai

$$i = \frac{e_{total} A}{\rho l_{konduktor}} \quad (3.23)$$

Nilai medan magnet dirumuskan sesuai dengan persamaan 3.10

$$B_g = B_r \left(\frac{t_m}{t_m + \mu_r |l - x|} \right) \quad (3.10)$$

Sehingga bila persamaan 3.21; 3.22 dan 3.10 disubstitusikan ke persamaan 2.16 didapatkan

$$F_c = N B_r \left(\frac{t_m}{t_m + \mu_r |l - x|} \right) \frac{e_{total} A}{\rho l_w} \pi \left(Z d_i + \frac{(Z+Z^2)}{2} d_w \right) \quad (3.24)$$

Karena $dN = \frac{dl}{dw}$ maka nilai sebagian kecil gaya hambatan

$$dF_c = \frac{dl}{dw} B_r \left(\frac{t_m}{t_m + \mu_r |l - x|} \right) \frac{e_{total} A}{\rho l_w} \pi \left(Z d_i + \frac{(Z+Z^2)}{2} d_w \right) \quad (3.25)$$

$$\int_{F_{l_1}}^{F_{l_2}} dF_c = \int_{l_1}^{l_2} B_r \left(\frac{t_m}{t_m + \mu_r |l - x|} \right) \frac{e_{total} A}{\rho l_w dw} \pi \left(Z d_i + \frac{(Z+Z^2)}{2} d_w \right) dl$$

Misal:

$$\delta = \frac{\epsilon A Z}{\mu_r \rho l_w d_w^2} \pi \left(d_i + \frac{(1+Z)}{2} d_w \right) \left(\frac{1}{(t_m + \mu_r (x - l_1))} - \frac{1}{(t_m + \mu_r p_m)} + \frac{1}{(t_m + \mu_r (l_2 - x))} - \frac{1}{t_m} \right) \quad (3.26)$$

$$\int_{F_{l_1}}^{F_{l_2}} dF_c = \int_{l_1}^{l_2} \dot{x} B_r \left(\frac{t_m}{t_m + \mu_r |l - x|} \right) \delta dl \quad (3.27)$$

Dimana: $l \geq x$, $|l - x| = l - x$
 $l < x$, $|l - x| = x - l$

Gaya di sekeliling batang magnet ke arah pusat lingkaran dari kumparan maka diasumsikan gaya hambatnya tidak berpengaruh. Selain itu sesuai hukum lenz, arah gaya hambatan pada bagian bawah magnet memiliki arah yang berlawanan dengan bagian atas

$$F_{C \text{ resultan}} = -\dot{x} \int_{l_1}^{x-p_m} B_r \left(\frac{t_m}{t_m + \mu_r (x-l)} \right) \delta dl + \int_x^{l_2} B_r \left(\frac{t_m}{t_m + \mu_r (l-x)} \right) \delta dl \quad (3.28)$$

$$F_{C \text{ resultan}} = \frac{\dot{x} B_r t_m \delta}{\mu_r} \ln \left(\frac{t_m + \mu_r p_m}{t_m + \mu_r (x - l_1)} \cdot \frac{t_m + \mu_r (l_2 - x)}{t_m} \right) \quad (3.29)$$

Dari persamaan 3.28 didapatkan koefisien redaman akibat induksi elektromagnetik dengan persamaan

$$C = \frac{B_r t_m \delta}{\mu_r} \ln \left(\frac{t_m + \mu_r p_m}{t_m + \mu_r (x - l_1)} \cdot \frac{t_m + \mu_r (l_2 - x)}{t_m} \right) \quad (3.30)$$

Dimana untuk persamaan 3.21; 3.26; 3.29 dan 3.30 didefinisikan $x = (x_1 - a\alpha + b\beta - x_2)$

Keterangan:

- R : Resistor elektromagnetik (ohm)
- ρ : Massa jenis kawat kumparan ($\frac{kg}{m^3}$)
- l : Panjang kawat kumparan (m)
- A : Luas penampang kawat kumparan (m^3)
- d_w : Diameter kawat kumparan (m)
- e : Tegangan bangkitan (volt)
- B : Medan magnet (tesla)
- \dot{x} : Kecepatan magnet ($\frac{m}{s}$)
- i : Kuat arus listrik (*Ampere*)
- x : Displacement translasi *absorber* (m)
- Z : Jumlah tumpukan kumparan
- N : Jumlah susunan kumparan
- p_m : Panjang batang magnet (m)
- t_m : Diameter magnet (m)
- d_i : Diameter dalam kumparan (m)
- l : Koordinat kumparan (m)
- g : Jarak antara magnet dengan kumparan (m)
- μ_r : Permeabilitas relatif udara
- F_C : Gaya hambatan akibat induksi elektromagnetik (N)
- C : Konstanta redaman elektromagnetik ($\frac{N.s}{m}$)

3.2.5. Penentuan Parameter

Penentuan Parameter sangat diperlukan pada tahap simulasi. Agar hasil simulasi mendekati dengan hasil eksperimen. Parameter yang diperlukan pada penelitian ini yakni massa, konstanta kekakuan pegas, konstanta redaman, dimensi *EMVA*, serta frekuensi operasi alat yang akan digunakan. Parameter-parameter tersebut ditentukan dengan metode yang berbeda-beda. Metode yang akan digunakan antara lain sebagai berikut

3.2.4.1. Mengukur Massa Sistem Utama (M_1)

Sistem utama merupakan tempat terjadinya getaran dan bagian yang menerima gaya eksitasi sebagai sumber getaran. Massa sistem utama pada penelitian ini terdiri dari komponen yakni batang penyangga plat datar, plat datar, *coil*, dan *casing* dari mekanisme *EMVA* yang terhubung dengan plat datar. Maka massa total dari sistem utama yang akan dianalisa.

$$M_1 = M_{batang\ penyangga\ plat} + M_{plat\ datar} + M_{casing\ EMVA} + M_{coil} \quad (3.31)$$

Setelah melakukan perancangan sistem utama dan pengukuran dimensi maupun massa komponen dari sistem utama. Maka dapat diperoleh massa total sistem utama (M_1).

3.2.4.2. Mengukur Momen Inersia

Pada dasarnya setiap gerakan memiliki gaya inersia. Gaya inersia memiliki nilai berbeda-beda tergantung bentuk gerakan dan dimensinya. Pergerakan *rolling* dan *pitching* merupakan bilangan vektor dengan satuan sudut. Pergerakan dengan satuan sudut memiliki gaya inersia yang mana didapatkan dari perkalian momen inersia dikalikan percepatan sudut. Momen inersia untuk plat datar dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$J = \frac{1}{12} M_1 (a^2 + b^2) \quad (3.32)$$

Keterangan: a : tebal plat
b : lebar plat

Momen inersia untuk gerakan *rolling* dan *pitching* memiliki nilai yang sama sebab dimensi meja yakni 500x500x6 mm³. Sehingga nilai a yakni 0.5 m dan b yakni 0.006 m.

3.2.4.3. Menentukan Massa Sistem *EMVA* (M_2)

EMVA memiliki peran sebagai peredam getaran yang terjadi pada sistem utama, Terdapat beberapa komponen pada *EMVA* antara lain batang magnetik sebagai massa utama dari mekanisme *absorber* dan tempat dudukan batang magnetik. Sehingga massa total dari sistem *EMVA* tersebut dapat ditentukan

$$M_{EMVA} = M_{batang\ magnetik} + M_{dudukan\ batang\ magnetik} \quad (3.33)$$

Berdasarkan teori yang tertera pada buku “*Mechanical Vibrations*” oleh Rao^[6], diketahui bahwa rasio perbandingan massa *DVA* dengan massa utama agar diperoleh performa yang optimum dinyatakan dalam persamaan

$$\mu = \frac{M_{EMVA}}{M_1} = \frac{1}{20} \quad (3.34)$$

3.2.4.4. Mengukur Konstanta Kekakuan Pegas Sistem Utama dan *EMVA*

Pada pengujian ini terdapat empat buah pegas pada sistem utama dan satu pegas pada sistem *EMVA*. Konstanta kekakuan (k) pada setiap pegas memiliki nilai yang berbeda beda disesuaikan dengan kebutuhan dan ketersediaan di pasaran. Di pasaran nilai konstanta kekakuan pegas tidak diketahui. Oleh karena itu, perlu dilakukan pengukuran secara manual pada setiap pegas. Pengukuran diawali dengan memberikan beban dengan berat (F_k) tertentu pada masing masing pegas. Kemudian mengukur perubahan panjang (Δx) pada saat pegas diberi beban. Sesuai pernyataan Hukum Hooke bahwa jika gaya tarik yang diberikan

pada sebuah pegas tidak melampaui batas elastis maka pertambahan panjang pegas (Δx) berbanding lurus atau sebanding dengan gaya tariknya (F_k) maka dari data pengujian dapat diperoleh nilai konstanta kekakuan pegas dengan persamaan

$$F_k = k \cdot \Delta x \quad (3.35)$$

3.2.4.5. Mengukur Konstanta *Damping* Pegas Sistem Utama dan *EMVA*

Nilai konstanta *damping* untuk masing-masing pegas didapatkan dari perhitungan hasil uji *dampner* untuk komponen *linear bushing* motor, massa utama, serta *EMVA*. Pengujian diawali dengan pemasangan *probe accelerometer* pada ujung pegas kemudian dilakukan pembebanan. Nilai simpangan akan tampak pada osiloskop. Nilai simpangan diamati menggunakan penurunan logaritmik dari respon getarannya. Berikut ini merupakan rumus yang digunakan untuk mendapatkan nilai konstanta *damping* pada pegas disebut juga *incremental degreement*

$$c = \frac{1}{n} m \sqrt{\frac{k}{m}} \ln \left(\frac{x_1}{x_{n+1}} \right) \quad (3.36)$$

3.2.4.6. Menentukan Frekuensi Operasi pada Sistem Utama

Frekuensi operasi pada sistem utama digunakan untuk variasi frekuensi pengujian pada saat sistem utama ditambah *EMVA*. Frekuensi operasi juga berguna dalam mendesain *DVA*. Nilai frekuensi operasi sistem utama dapat ditentukan dengan mengetahui nilai frekuensi natural alat uji yang mana

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{k_2}{M_2}} \quad (3.37)$$

Pada penelitian yang dilakukan oleh Rahma, diketahui beberapa teori mengenai nilai optimum dari rasio frekuensi yang

telah dilakukan oleh Galal A. Hassaan^[9] dan Pachpute^[9]. Menurut Pachpute^[9], nilai optimum dari rasio frekuensi natural sistem utama dengan frekuensi natural *absorber* berada pada *range* 0,7 - 0,8.

3.2.4.7. Parameter Penelitian

Parameter pada sistem utama, sistem *EMVA*, serta sistem elektrik pada *EMVA* itu sendiri telah ditentukan. Parameter ini akan digunakan dalam tahap simulasi untuk mengetahui respon reduksi getaran massa utama dan energi listrik bangkitan yang dapat dihasilkan. Nilai parameter ditunjukkan pada tabel 3.1.

Tabel 3.1 Hasil survey parameter penelitian

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Massa sistem utama	m_1	6.7	<i>kg</i>
Momen Inersia sistem utama	J_R, J_P	0,1396	<i>kg.m²</i>
Massa <i>EMVA</i>	m_e	0,3350	<i>kg</i>
Diameter magnet	t_m	0,04	<i>m</i>
Pancaran medan magnet	B_r	1,2	T
Panjang magnet	p_m	0,04	<i>m</i>
Panjang kumparan	l_k	0,08	<i>m</i>
Diameter kawat kumparan	d_w	0,35	<i>mm</i>
Hambatan jenis kawat	ρ	$1,68 \times 10^{-8}$	Ωm
Jumlah lilitan	Z, N	4000	lilitan
Premeabilitas udara	μ_r	1,05	

3.2.6. Blok Diagram

Penerunan persamaan serta penentuan parameter telah dilakukan. Sehingga perlu dibuat *state variable*. Hasil *state variable* dari permodelan dinamis akan dirubah kedalam blok diagram. Blok Diagram perlu dibuat sebagai pengganti penulisan matematis penurunan persamaan pada Matlab. Penulisan Blok Diagram pada matlab menggunakan simulink. Adapun persamaan yang dituliskan dalam Blok Diagram antara lain persamaan gerak sistem utama, persamaan gerak sistem utama dengan penambahan *EMVA*, serta sistem elektrikal dari *EMVA* itu sendiri.

3.2.7. Simulasi pada Matlab Simulink

Tahap simulasi merupakan tahap pengujian pada sistem utama dan sistem utama dengan penambahan *EMVA*. Adapaun *input* yang digunakan pada tahap simulasi adalah *sinusoidal* atau harmonik yang mana diwakili oleh perpindahan dari mekanisme penggerak (x_0). Lalu *output* yang dihasilkan berupa respon gerak pada sistem utama antara lain translasi (x_1), *rolling* (α), dan *pitching* (β) terutama di daerah yang memiliki nilai simpangan getaran paling besar. Selain itu terdapat output pada sistem *EMVA* antara lain gaya gerak listrik (e) dan respon pergerakan massa *absorber* (X_2).

3.2.8. Hasil Simulasi Sesuai Kebutuhan

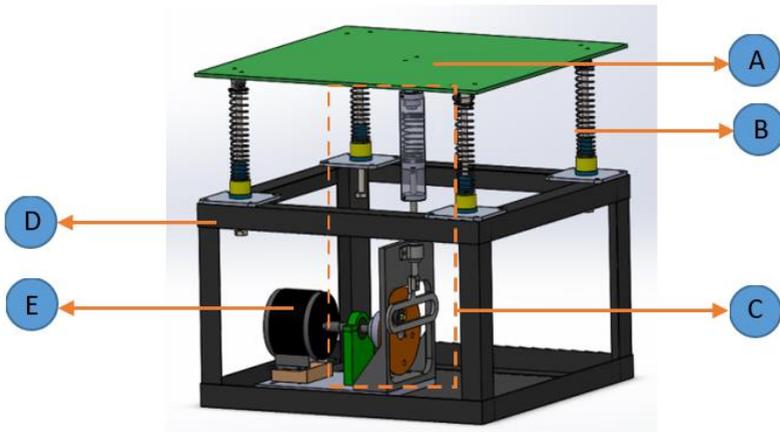
Pada proses simulasi beberapa variabel divariasikan agar menemukan variabel yang paling optimum. Variabel yang akan divariasikan yakni lokasi *EMVA* pada meja, amplitudo pada sistem penggerak, serta frekuensi operasi sistem. Analisa pada sistem utama hanya terbatas tiga pergerakan saja. Sehingga hasil simulasi getaran pada sistem utama sebatas koordinat dua dimensi yakni a dan b karena berupa plat datar. Lokasi peletakan *EMVA* disesuaikan dengan profil getaran sistem utama tanpa penambahan *EMVA* yang mana diutamakan di sekitar daerah getaran sistem utama paling besar. Variasi amplitudo mewakili variasi simpangan pada *scotch yoke* pada mekanisme penggerak. Sesuai dengan ketersediaan pada alat eksperimen maka pengujian dilakukan dengan tiga variasi amplitudo yakni 0,02m; 0,03m; dan 0,04m. Variasi frekuensi operasi lebih diutamakan di sekitar frekuensi natural sistem utama tanpa penambahan *EMVA*.

BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil Rancangan

4.1.1 Mekanisme Sistem Utama Tanpa Penambahan *EMVA*

Alat simulator yang telah dibuat memiliki bagian-bagian dengan dimensi 50cm x 50 cm x 80 cm dan terdiri dari beberapa komponen seperti meja, rangka, motor, suspensi, dan sistem penyalur daya. Yang mana telah diilustrasikan pada gambar 4.1.



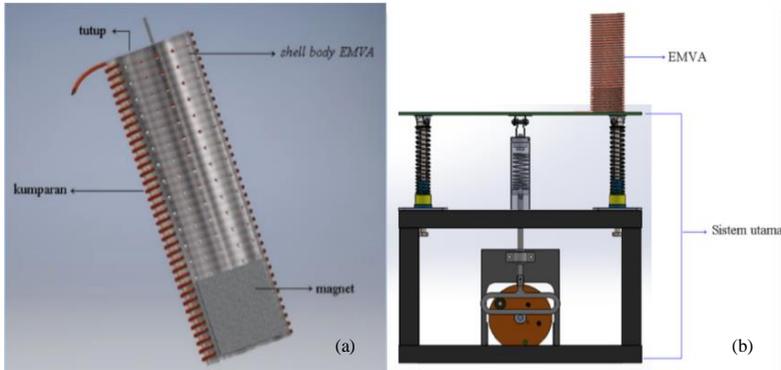
Gambar 4.1 Sistem Utama Tanpa *EMVA*^[1]

Keterangan:

- | | |
|-----------------------|----------|
| A Meja Sistem Utama | D Rangka |
| B Suspensi Meja | E Motor |
| C Mekanisme Penggerak | |

4.1.2 Mekanisme Sistem Utama dengan Penambahan *EMVA*

Pada penelitian ini, dalam mereduksi getaran dan menyerap energi getaran maka *EMVA* ditempelkan pada meja sebagaimana yang telah dijelaskan gambar 4.2. Peletakkan *EMVA* nantinya akan divariasikan di daerah yang memiliki simpangan paling besar.



Gambar 4.2 (a) EMVA; (b) Sistem utama dengan penambahan EMVA.

4.2. Hasil Perhitungan

Meja sebagai sistem utama memiliki massa 6,7 kg dan ditopang oleh empat suspensi dengan masing-masing suspensi memiliki nilai kekakuan pegas serta nilai redaman pegas yang berbeda. Sehingga pada penelitian ini terdapat tiga arah getaran yang mana yakni translasi, *rolling*, dan *pitching*. Pergerakan *rolling* dan *pitching* memiliki dimensi yang berbeda dibandingkan pergerakan translasi. Perlu menghitung nilai momen inersia meja agar pergerakan *rolling* dan *pitching* dapat ditentukan.

$$J = \frac{1}{12} M_1 (a^2 + b^2) \quad (3.32)$$

$$J = \frac{1}{12} 6,7 (0,25^2 + 0,006^2)$$

$$J = 0,1396 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Penelitian ini mensimulasi alat uji yang sudah ada sehingga hanya perlu dilakukan pengukuran ulang terkait nilai konstanta kekakuan pegas dan nilai konstanta redaman pegas. Menggunakan persamaan 3.35 didapatkan nilai konstanta kekakuan pegas.

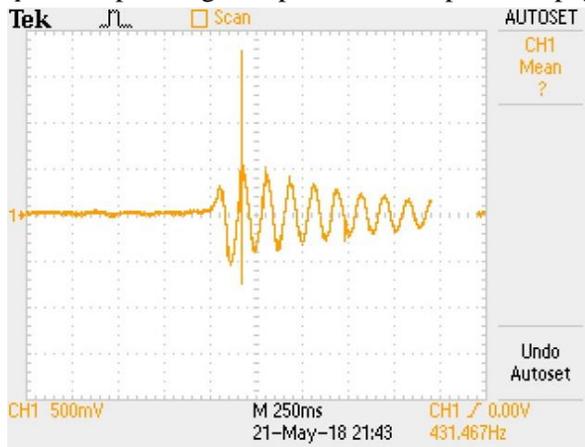
$$F_k = k_A \cdot \Delta x \quad (3.35)$$

$$k_A = \frac{F_k}{\Delta x}$$

$$k_A = \frac{(5 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2)}{0,0258 \text{ m}} = \frac{49,05 \text{ N}}{0,0258 \text{ m}} = 1896 \text{ N/m}$$

Menggunakan massa sebesar 5 kg menghasilkan perubahan panjang sebesar 2,58 cm untuk pegas A. Bila dilakukan perhitungan didapatkan nilai kekakuan pegas A sebesar 1896 N/m. Begitu pula untuk pegas B, C, D, dan batang penggerak dilakukan pengukuran dan perhitungan nilai kekakuan pegas sejenis pegas A.

Selanjutnya dilakukan perhitungan nilai konstanta redaman. Dimana perhitungan diawali dengan pengukuran simpangan pada *osilloscope*. Didapatkan grafik pada *osilloscope* untuk pegas A.



Gambar 4.1 Hasil pengukuran getaran bebas pegas A dengan *osilloscope*

Melihat terdapat data *over shoot* dan data yang terputus maka perlu dilakukan *filtering* dan *smoothing*. Lalu dilanjutkan dengan perhitungan menggunakan *incremental degreement* yang mana persamaannya telah dijabarkan oleh persamaan 3.36.

$$c = \frac{1}{n} m \sqrt{\frac{k}{m} \frac{1}{n}} \ln \left(\frac{x_1}{x_{n+1}} \right) \quad (3.36)$$

$$c = \frac{1}{1} 0,5 \sqrt{\frac{1896}{0,5} \frac{1}{1}} \ln \left(\frac{0,32}{0,26} \right)$$

$$c = 7,940 \text{ N.s/m}$$

Pengambilan data getaran bebas pegas A pada *osilloscope* menggunakan massa sebesar 0,5 kg dan konstanta kekakuan pegas sebesar 1896 N/m. Lalu didapatkan simpangan pertama 0,32 volt dan simpangan kedua 0,26 volt. Setelah dilakukan perhitungan didapatkan konstanta redaman pegas A sebesar 7,940 N.s/m. Pengambilan dan perhitungan data untuk pegas B, C, D, dan batang penggerak memiliki proses yang sama dengan pegas A.

Dilakukan pengambilan data dan perhitungan pada pegas A, B, C, D dan batang penggerak. Didapatkan data sebagai berikut

Tabel 4.1 Hasil perhitungan parameter

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Massa sistem utama	m_1	6.7	kg
Momen Inersia sistem utama	J_R, J_P	0,1396	kg.m ²
Konstanta pegas A	k_A	1896	N/m
Konstanta pegas B	k_B	2510	N/m
Konstanta pegas C	k_C	3311	N/m
Konstanta pegas D	k_D	3956	N/m
Konstanta pegas batang penggerak	k_0	500	N/m
Massa EMVA	m_e	0,3350	kg
Redaman pegas A	C_A	7.940	N.s/m
Redaman pegas B	C_B	10,121	N.s/m
Redaman pegas C	C_C	14.404	N.s/m
Redaman pegas D	C_D	22,716	N.s/m
Redaman pegas batang penggerak	C_0	0,21	N.s/m

4.3. Analisa Permodelan

Analisa pemodelan dilakukan dalam bentuk blok diagram pada *MATLAB Simulink*. Adapun variasi variabel yang telah dilakukan dalam penelitian ini adalah frekuensi operasi, jarak peletakan *EMVA* terhadap titik pusat massa, serta amplitudo sumber getaran. Sedangkan keluaran yang didapat dari analisa tersebut adalah respon dan reduksi perpindahan massa sistem utama, peletakkan *EMVA*, gaya gerak listrik dan daya bangkitan yang mampu dihasilkan oleh sistem induksi elektromagnetik. Analisa pemodelan pada penelitian ini dilakukan dengan membandingkan hasil respon dari sistem utama tanpa penambahan *EMVA* dengan sistem utama setelah dilakukan penambahan *EMVA*

4.3.1. Analisa Permodelan Sistem Utama Tanpa *EMVA*

Sistem utama tanpa penambahan *EMVA* bergetar dengan tiga derajat kebebasan. Getaran ini meliputi pergerakan ke arah translasi, *rolling* dan *pitching*. Penyebab sistem utama memiliki tiga arah gerakan yakni masing-masing pegas yang berfungsi sebagai penopang dan suspensi mempunyai nilai konstanta kekakuan pegas dan konstanta redaman yang berbeda-beda.

Simulasi diawali dengan penurunan rumus dan dilanjutkan dengan *MATLAB Simulink*. Penurunan rumus telah dilakukan pada BAB III dan didapatkan tiga persamaan gerak (translasi, *rolling*, dan *pitching*) untuk sistem utama tanpa penambahan *EMVA*.

- Persamaan Gerak Translasi

$$\begin{aligned} & m_1 \ddot{x}_1 + (k_A + k_B + k_C + k_D + k_o)x_1 \\ & - (k_A - k_B - k_C + k_D)p\alpha - (k_A + k_B - k_C - k_D)q\beta \\ & + (c_A + c_B + c_C + c_D + c_o)\dot{x}_1 - (c_A - c_B - c_C + c_D)p\dot{\alpha} \\ & - (c_A + c_B - c_C - c_D)q\dot{\beta} = k_o x_o + c_o \dot{x}_o \end{aligned} \quad (3.1)$$

- Persamaan Gerak *Rolling*

$$\begin{aligned} & J_R \ddot{\alpha} - (k_A - k_B - k_C + k_D)p x_1 \\ & + (k_A + k_B + k_C + k_D)p^2 \alpha + (k_A - k_B + k_C - k_D)p q \beta \\ & - (c_A - c_B - c_C + c_D)p \dot{x}_1 + (c_A + c_B + c_C + c_D)p^2 \dot{\alpha} \\ & + (c_A - c_B + c_C - c_D)p q \dot{\beta} = 0 \end{aligned} \quad (3.2)$$

- Persamaan Gerak *Pitching*

$$\begin{aligned}
& J_P \ddot{\beta} - (k_A + k_B - k_C - k_D) q x_1 \\
& + (k_A - k_B + k_C - k_D) p q \alpha + (k_A + k_B + k_C + k_D) q^2 \beta \\
& - (c_A + c_B - c_C - c_D) q \dot{x}_1 + (c_A - c_B + c_C - c_D) p q \dot{\alpha} \\
& + (c_A + c_B + c_C + c_D) q^2 \dot{\beta} = 0
\end{aligned} \tag{3.3}$$

Tiga persamaan di atas disubstitusikan ke dalam matriks 3x3 untuk diolah sehingga memperoleh frekuensi natural dari sistem utama tanpa penambahan *EMVA*. Substitusi telah dilakukan dan diperoleh persamaan 3.4 sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} (c_A + c_B + c_C + c_D + c_o) & -(c_A - c_B - c_C + c_D) p & -(c_A + c_B - c_C - c_D) q \\ -(c_A - c_B - c_C + c_D) p & (c_A + c_B + c_C + c_D) p^2 & (c_A - c_B + c_C - c_D) p q \\ -(c_A + c_B - c_C - c_D) q & (c_A - c_B + c_C - c_D) p q & (c_A + c_B + c_C + c_D) q^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \end{Bmatrix} \\
& + \begin{bmatrix} (k_A + k_B + k_C + k_D + k_o) & -(k_A - k_B - k_C + k_D) p & -(k_A + k_B - k_C - k_D) q \\ -(k_A - k_B - k_C + k_D) p & (k_A + k_B + k_C + k_D) p^2 & (k_A - k_B + k_C - k_D) p q \\ -(k_A + k_B - k_C - k_D) q & (k_A - k_B + k_C - k_D) p q & (k_A + k_B + k_C + k_D) q^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ \alpha \\ \beta \end{Bmatrix} \\
& + \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & J_R & 0 \\ 0 & 0 & J_P \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{\alpha} \\ \ddot{\beta} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} k_o x_o + c_o \dot{x}_o \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}
\end{aligned} \tag{3.4}$$

Persamaan 3.4 disebut juga persamaan fundamental. Namun dalam mencari nilai frekuensi natural dari suatu sistem tidak memperhitungkan gaya eksitasi dan gaya redaman sehingga

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} (k_A + k_B + k_C + k_D + k_o) & -(k_A - k_B - k_C + k_D) p & -(k_A + k_B - k_C - k_D) q \\ -(k_A - k_B - k_C + k_D) p & (k_A + k_B + k_C + k_D) p^2 & (k_A - k_B + k_C - k_D) p q \\ -(k_A + k_B - k_C - k_D) q & (k_A - k_B + k_C - k_D) p q & (k_A + k_B + k_C + k_D) q^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ \alpha \\ \beta \end{Bmatrix} \\
& + \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & J_R & 0 \\ 0 & 0 & J_P \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{\alpha} \\ \ddot{\beta} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}
\end{aligned} \tag{4.1}$$

Sehingga diperoleh persamaan fundamental baru yang dilanjutkan dengan mensubstitusikan ke persamaan karakteristik

$$\begin{aligned}
& |[K] - \lambda[M]| = 0 \\
& \left| \begin{bmatrix} (k_A + k_B + k_C + k_D + k_o) & -(k_A - k_B - k_C + k_D) p & -(k_A + k_B - k_C - k_D) q \\ -(k_A - k_B - k_C + k_D) p & (k_A + k_B + k_C + k_D) p^2 & (k_A - k_B + k_C - k_D) p q \\ -(k_A + k_B - k_C - k_D) q & (k_A - k_B + k_C - k_D) p q & (k_A + k_B + k_C + k_D) q^2 \end{bmatrix} - \right. \\
& \left. \lambda \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & J_R & 0 \\ 0 & 0 & J_P \end{bmatrix} \right| = \begin{Bmatrix} k_o x_o + c_o \dot{x}_o \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}
\end{aligned} \tag{4.2}$$

Setelah mensubstitusikan parameter yang tertera pada tabel 3.1 dan tabel 4.1 ke dalam persamaan 4.2 diperoleh

$$\begin{aligned} & \left| \begin{bmatrix} 11673 & -6,2 & 572,2 \\ -6,2 & 466,92 & -50,36 \\ 572,2 & -50,36 & 466,92 \end{bmatrix} - \lambda \begin{bmatrix} 6,7 & 0 & 0 \\ 0 & 0,03492 & 0 \\ 0 & 0 & 0,03492 \end{bmatrix} \right| = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \\ & \left| \begin{bmatrix} 11673 - 6,7\lambda & -6,2 & 572,2 \\ -6,2 & 466,92 - 0,03492\lambda & -50,36 \\ 572,2 & -50,36 & 466,92 - 0,03492\lambda \end{bmatrix} \right| = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (4.3)$$

Dilakukan determinan terhadap persamaan 4.3 dan dilanjutkan dengan pemfoktaran, sehingga didapatkan nilai lamda

$$\lambda_1 = 1607,24$$

$$\lambda_2 = 3093,15$$

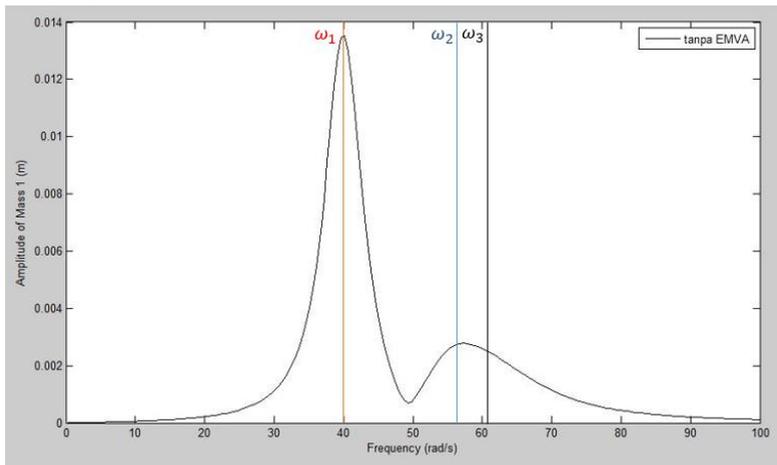
$$\lambda_3 = 3805,88$$

Dimana, $\lambda = \omega^2$ maka diperoleh nilai frekuensi natural sistem utama tanpa penambahan *EMVA*

$$\omega_1 = \sqrt{1607,24} = 40,0904 \text{ rad/s}$$

$$\omega_2 = \sqrt{3093,15} = 55,6161 \text{ rad/s}$$

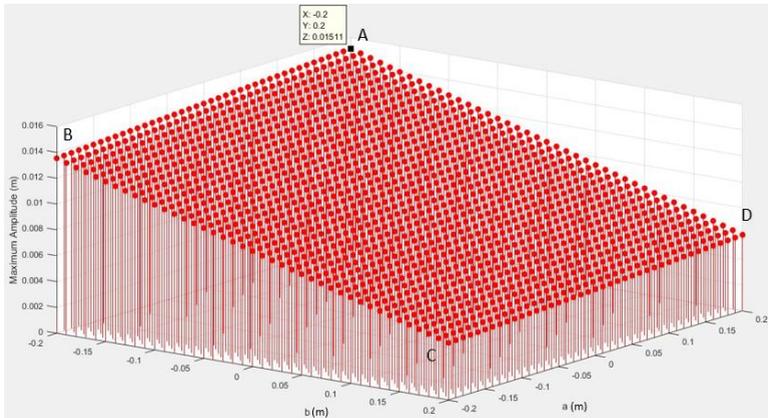
$$\omega_3 = \sqrt{3805,88} = 61,6918 \text{ rad/s}$$



Gambar 4.2 Bode diagram massa sistem utama tanpa *EMVA*

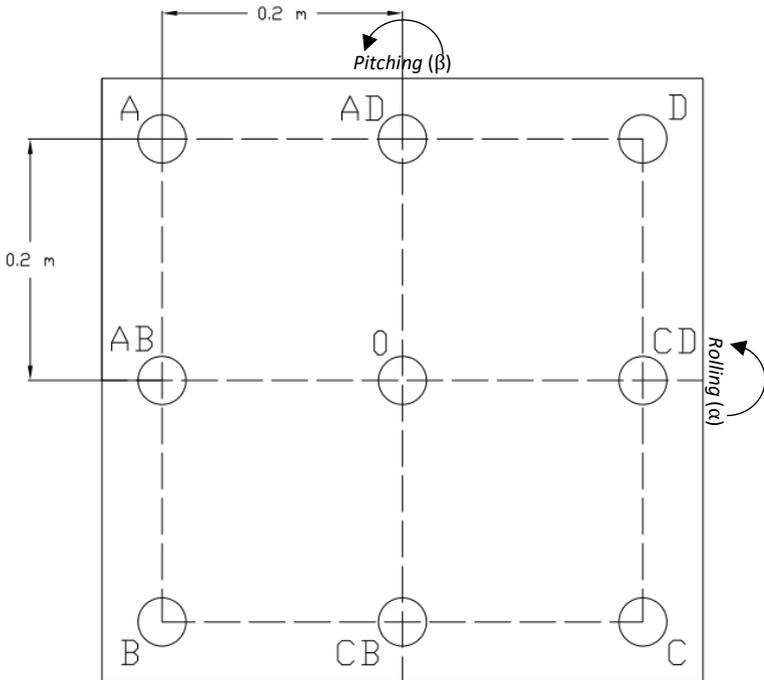
Perhitungan secara manual merupakan salah satu cara menentukan frekuensi natural dalam suatu sistem. Masih terdapat cara lain yang lebih mudah yakni menggunakan MATLAB. Adapun hasil dari simulasi MATLAB berupa bode diagram yang telah ditampilkan oleh gambar 4.2. Dapat dilihat dari hasil simulasi maupun perhitungan secara manual menyatakan sistem utama tanpa *EMVA* memiliki tiga frekuensi natural yakni 40,0904 rad/s, 55,6161 rad/s, dan 61,6918 rad/s. Selain itu Frekuensi natural pertama memiliki simpangan paling besar yakni mendekati 1,4 cm.

Karena frekuensi natural pertama memiliki simpangan terbesar maka perlu dilakukan analisa kembali terkait titik bagian pada meja sistem utama yang mengalami getaran terbesar sebab getaran tidak selalu berada di tengah plat datar sistem utama melainkan dapat juga terjadi di daerah pinggir. Telah dilakukan simulasi terkait simpangan meja sistem utama dalam frekuensi operasi 40,0904 rad/s. Diperoleh distribusi simpangan maksimum



Gambar 4.3 Distribusi simpangan maksimum sistem utama tanpa penambahan *EMVA*

Agar mempermudah analisa maka meja sistem utama dibagi menjadi 9 titik tinjauan sesuai ilustrasi gambar 4.4



Gambar 4.4 Pembagian titik tinjauan meja sistem utama

Merujuk pada gambar 4.3 diperoleh hasil sebagai berikut

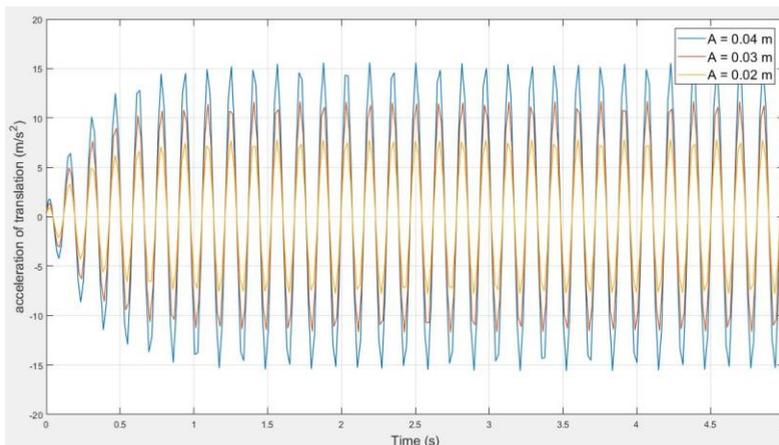
A = 15,11 mm	AB = 14,32 mm
B = 13,54 mm	AD = 10,5 mm
C = 4,453 mm	CB = 8,956 mm
D = 5,892 mm	CD = 5,145 mm

Dapat dilihat bahwa seiring titik tinjauan mendekati pegas yang memiliki nilai konstanta kekakuan terkecil maka simpangan semakin besar didaerah tersebut. Ini disebabkan pegas yang memiliki nilai konstanta terkecil mudah tertarik atau tertekan. Oleh karenanya perlu dilakukan reduksi getaran di daerah tersebut.

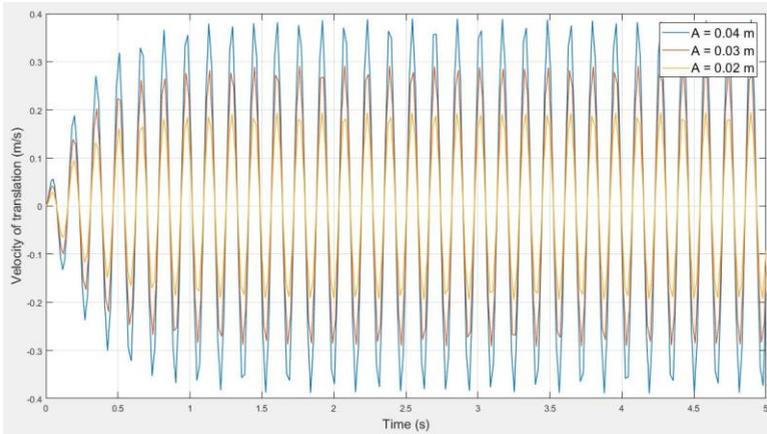
4.3.1.1 Analisa Respon Translasi Mekanisme Sistem Utama Tanpa *EMVA*

Dalam menganalisa respon massa sistem utama tanpa penambahan *EMVA* selalu disesuaikan dengan metodologi percobaan. Pada penelitian ini dilakukan variasi amplitudo dari eksitasi getaran atau disebut juga sumber getaran. Variasi tersebut diberikan dalam rangka untuk mengetahui pengaruh variasi amplitudo yang digunakan terhadap respon getaran yang dihasilkan serta sebagai data acuan untuk membandingkan data respon sistem utama tanpa *EMVA* dengan data sistem utama yang ditambahkan *EMVA*. Adapun variasi amplitudo sesuai metodologi percobaan terdiri dari 0,02 m; 0,03 m; dan 0,04 m.

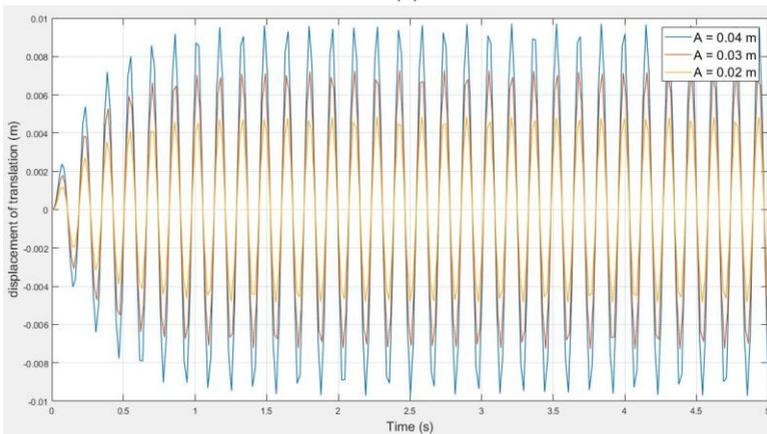
Setelah dilakukan simulasi diperoleh data yaitu berupa respon percepatan, kecepatan, dan perpindahan yang secara berturut-turut dapat dilihat pada gambar 4.5(a), 4.5(b), dan 4.5(c). Adapun respon yang diperoleh merupakan hasil simulasi dengan tinjauan arah gerak translasi. Pada gambar 4.5(a), 4.5(b), dan 4.5(c) terdapat tiga warna yakni jingga, ungu, dan biru secara berturut-turut merupakan perwakilan dari hasil respon dengan variasi amplitudo 0,02 m; 0,03 m; 0,04 m



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.5 Respon percepatan (a), kecepatan (b), dan perpindahan (c) pada sistem utama tanpa penambahan *EMVA* dalam pergerakan arah translasi

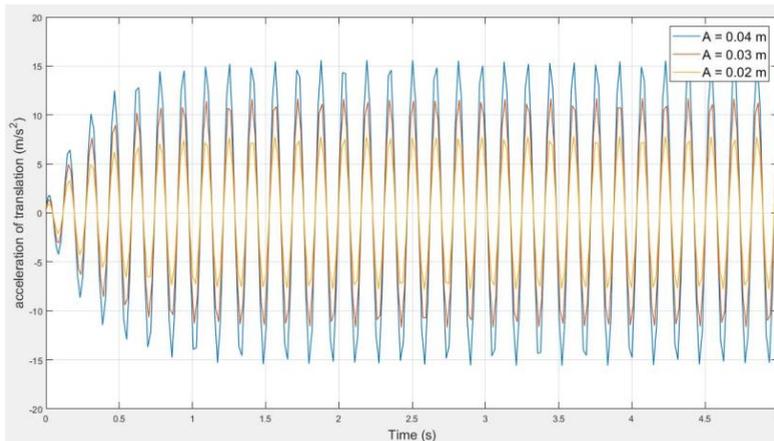
. Dapat dianalisa dengan melihat grafik bahwa semakin meningkatnya amplitudo eksitasi maka respon getaran pada arah translasi memiliki nilai simpangan yang semakin bertambah.

Tabel 4.2 Nilai RMS respon sistem utama pada arah translasi

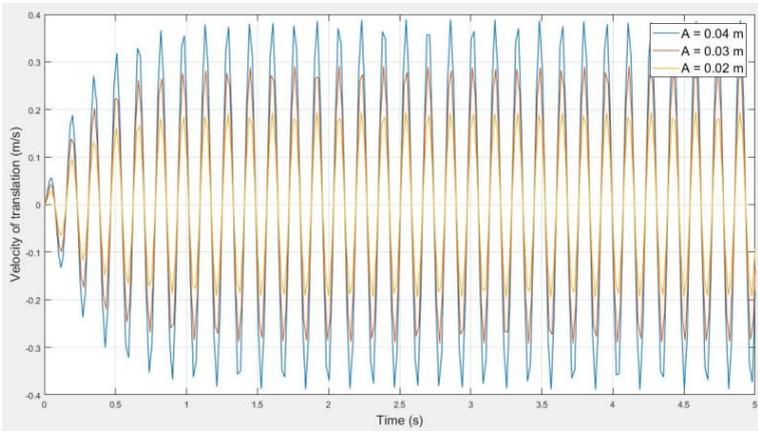
Pergerakan	A (m)	Percepatan (m/s ²)	Kecepatan (m/s)	Perpindahan (m)
Translasi	0,02	5,3426	0,1338	0,0033
	0,03	8,0124	0,2005	0,0050
	0,04	10.6763	0,2673	0,0066

4.3.1.2 Analisa Respon *Rolling* Mekanisme Sistem Utama Tanpa EMVA

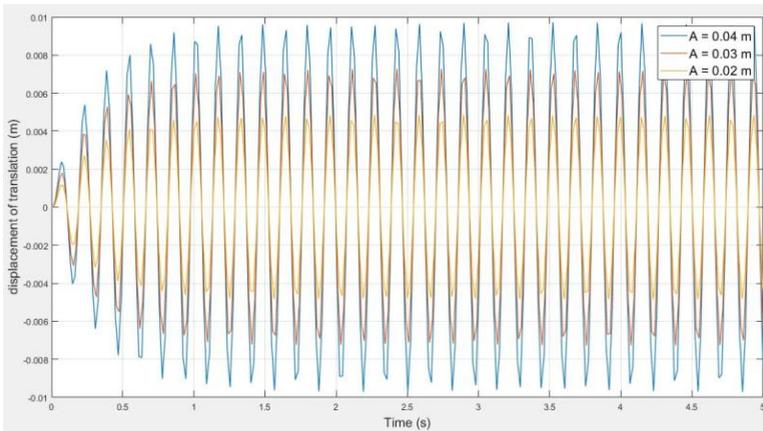
Nilai konstanta kekakuan pegas yang berbeda-beda pada setiap pegas di titik A, B, C, dan D menimbulkan pergerakan sistem utama tidak hanya terbatas pada gerak arah translasi. Terdapat gerakan ke arah *rolling* maupun *pitching*. Maka perlu dilakukan analisa terkait respon *rolling*. Tiga variabel yang dianalisa pada respon *rolling* yakni respon percepatan sudut, kecepatan sudut, serta perpindahan sudut secara berturut-turut ditampilkan oleh gambar 4.6(a), 4.6(b), dan 4.6(c). Seperti analisa sebelumnya untuk warna jingga, merah, dan biru secara berturut-turut mewakili respon getaran dengan variasi amplitudo 0,02m; 0,03m; dan 0,04m



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.6 Respon percepatan (a), kecepatan (b), dan perpindahan (c) pada sistem utama tanpa penambahan *EMVA* dalam pergerakan arah *rolling*

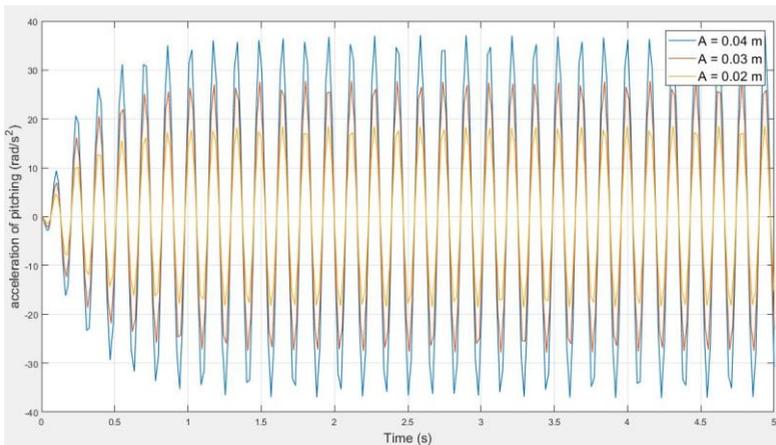
Bertambahnya amplitudo eksitasi diiringi oleh bertambahnya nilai simpangan pada respon getaran. Itulah analisa yang dapat dilihat dari bentuk grafik pada gambar 4.6. Bahkan dapat menjadi dua kalipat dari simpangan sebelumnya.

Tabel 4.3 Nilai RMS respon sistem utama pada arah *rolling*

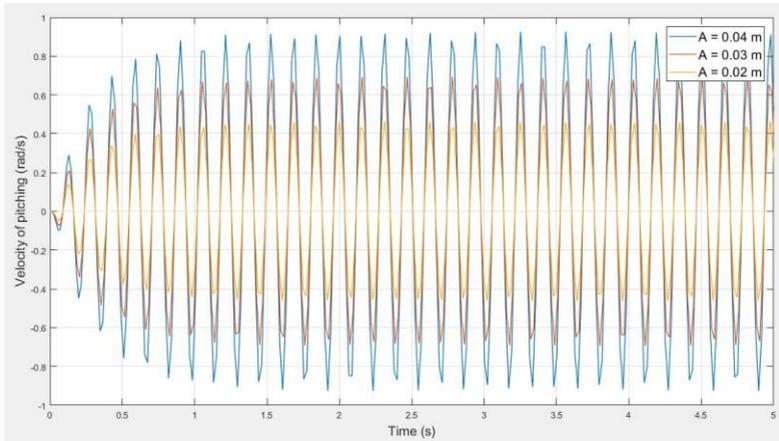
Pergerakan	A (m)	Percepatan (m/s ²)/(rad/s ²)	Kecepatan (m/s)/(rad/s)	Perpindahan (m)/(rad)
Rolling	0,02	2,4741	0,0617	0,0015
	0,03	3,7114	0,0924	0,0023
	0,04	4,9433	0,1233	0,0031

4.3.1.3 Analisa Respon *Pitching* Mekanisme Sistem Utama Tanpa EMVA

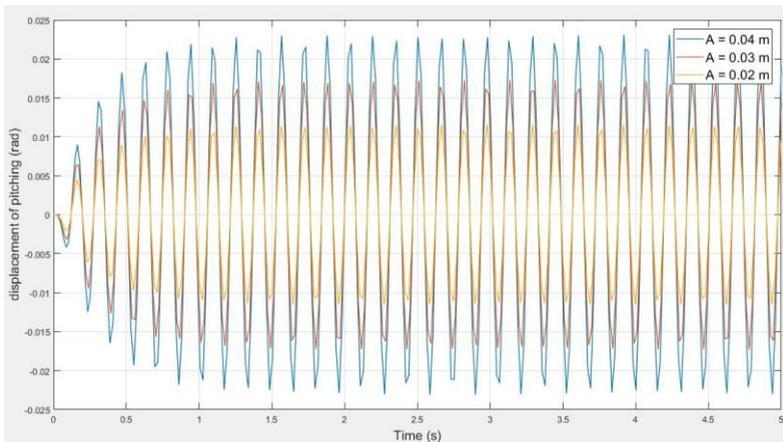
Pergerakan *pitching* merupakan salah satu gerakan rotasi yang terjadi pada sistem utama. Penyebab terjadi gerakan *pitching* sama dengan penyebab terjadinya gerakan *rolling*. Sehingga sama halnya dengan gerakan *rolling* untuk gerakan *pitching* perlu dilakukan analisa terkait respon getaran. Terdapat tiga respon getaran yang dianalisa yakni respon percepatan sudut, respon kecepatan sudut serta respon perpindahan sudut. Secara berturut-turut ketiga respon tersebut ditampilkan pada gambar 4.7(a), 4.7(b), dan 4.7 (c) dimana garis yang berwarna jingga, ungu, dan biru mewakili respon dengan amplitudo 0,02m; 0,03m; 0,04m.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.7 Respon percepatan sudut (a), kecepatan sudut (b), dan perpindahan sudut (c) pada sistem utama tanpa penambahan *EMVA* dalam pergerakan *pitching*.

Pada gambar 4.7(a), 4.7(b) serta 4.7(c) terjadi peningkatan nilai simpangan respon getaran seiring dengan bertambahnya nilai dari variasi amplitudo eksitasi. Peningkatan nilai simpangan respon

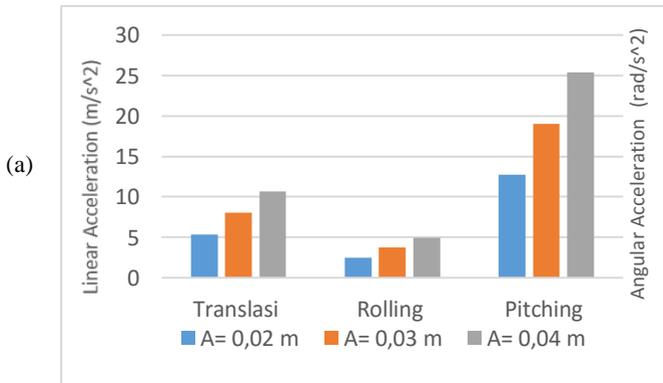
getaran tidak signifikan yakni setara peningkatan variasi amplitudo eksitasi. Jika nilai amplitudo eksitasi ditingkatkan 1,5 kali dari sebelumnya maka simpangan respon getaran yang terjadi memiliki nilai 1,5 kali dari simpangan respon getaran sebelumnya.

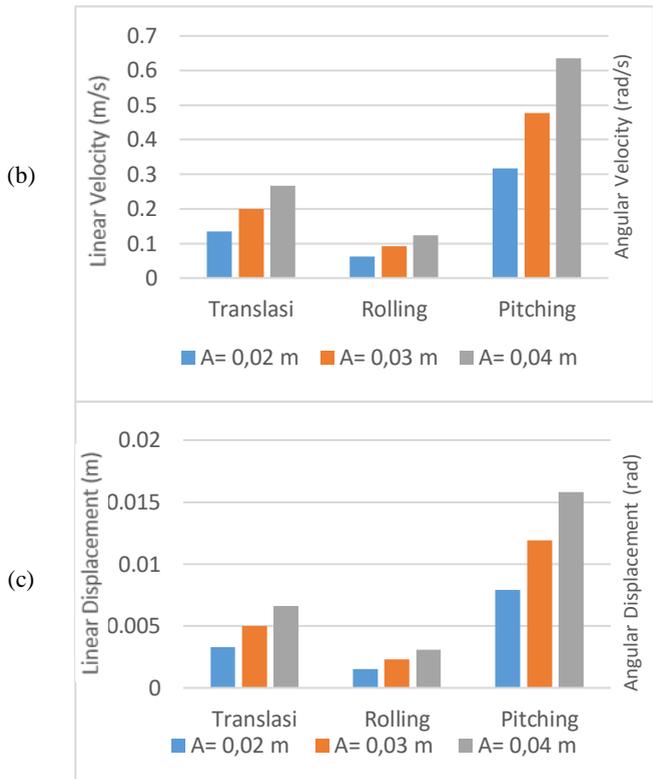
Tabel 4.4 Nilai RMS respon sistem utama pada arah *pitching*

Pergerakan	A (m)	Percepatan (rad/s ²)	Kecepatan (rad/s)	Perpindahan (rad)
<i>Pitching</i>	0,02	12,7026	0,3178	0,0079
	0,03	19,0518	0,4762	0,0119
	0,04	25,3822	0,6351	0,0158

4.3.2. Pembahasan Terkait Variasi Amplitudo Eksitasi Terhadap Respon Getaran

Setelah dilakukan analisa pada sistem utama tanpa penambahan *EMVA* dengan *mEMV* Ariesikan amplitudo eksitasi diperoleh respon percepatan, respon kecepatan serta respon perpindahan dari getaran dengan arah translasi, *rolling* dan *pitching*. Getaran pada arah translasi terjadi akibat batang penggerak yang terhubung scotch yoke dalam arah translasi. Sedangkan getaran dengan arah *rolling* dan *pitching* terjadi karena nilai konstanta kekakuan dan konstanta redaman pada setiap pegas yang menopang sistem utama memiliki nilai yang berbeda-beda seperti telah dijelaskan sebelumnya.





Gambar 4.8 Trend line respon percepatan (a), kecepatan (b), dan perpindahan (c) pada sistem utama tanpa penambahan *EMVA* dalam pergerakan translasi, *rolling*, dan *pitching*.

Pada grafik percepatan, kecepatan, dan perpindahan dapat dilihat bahwa seiring nilai amplitudo eksitasi semakin bertambah selalu diikuti oleh kenaikan nilai respon getaran dalam percepatan, kecepatan maupun perpindahan. Selain itu perbandingan nilai amplitudo eksitasi yang paling besar dan lebih kecil memiliki nilai yang sama dengan perbandingan respon getaran pada nilai amplitudo eksitasi paling besar dan nilai amplitudo eksitasi lebih kecil. Sebagai contoh amplitudo eksitasi 0,04 m dibanding

amplitudo eksitasi 0,02 m memperoleh perbandingan 2 kali lipat dan begitu pula perbandingan respon percepatan sudut arah *rolling* pada amplitudo eksitasi 0,04 m yang mana bernilai 4,9433 rad/s² dengan amplitudo eksitasi 0,02 m yang memiliki nilai percepatan sudut sebesar 2,4741 rad/s² berkisar 2 kali lipat. Nilai perbandingan yang sama dapat dijelaskan oleh persamaan

$$x_0 = A \sin \omega t$$

Variabel A (amplitudo) dan x_0 (perpindahan eksitasi) berbanding lurus sehingga kenaikannya linier dimana gradien atau perbandingannya sama. Begitu juga untuk percepatan dan kecepatan. Bila persamaan 4.4 diturunkan terhadap t (waktu) maka diperoleh persamaan

$$v_0 = A\omega \sin \omega t$$

$$a_0 = A\omega^2 \sin \omega t$$

Dari persamaan 4.5 dan 4.6 dapat dinyatakan bahwa v_0 (kecepatan eksitasi) dan a_0 (percepatan eksitasi) berbanding lurus dalam fungsi linier dengan nilai amplitudo eksitasi. Selanjutnya dari perpindahan eksitasi, kecepatan eksitasi serta percepatan eksitasi diteruskan oleh batang penggerak dalam bentuk gaya. Tanpa langsung gaya tersebut berbanding lurus dengan amplitudo eksitasi dan mendorong meja sistem utama. Meja sistem utama bergetar terhadap arah translasi, *rolling* dan *pitching* akibat gaya tersebut. Sehingga percepatan, kecepatan, dan perpindahan pada sistem utama berbanding lurus dengan amplitudo eksitasi secara linier.

4.3.3. Analisa Permodelan Sistem Utama dengan EMVA

Terdapat penambahan EMVA pada sistem utama berdampak pada penambahan jumlah derajat kebebasan. Derajat kebebasan untuk Sistem Utama dengan Penambahan EMVA berjumlah empat dengan rincian yakni arah gerakan translasi untuk massa sistem utama dan massa EMVA, lalu arah gerakan *rolling* dan *pitching*

untuk massa sistem utama. Namun sebelum dilanjutkan ke analisa respon dari tiga variasi perlu dilakukan analisa terhadap parameter sistem *EMVA* agar sesuai dengan teori-teori yang telah ada dan pada akhirnya dapat mereduksi getaran sistem utama dengan optimal serta menjadi rekomendasi rancang bangun *EMVA*.

Pertama, dilakukan perhitungan nilai massa *EMVA*. Sesuai teori yang telah ada yakni perbandingan massa *EMVA* dengan massa sistem utama satu berbanding dua puluh

$$\mu = \frac{M_{EMVA}}{M_1} = \frac{1}{20} \quad (3.34)$$

$$\frac{M_{EMVA}}{6,7} = \frac{1}{20}$$

$$M_{EMVA} = 0,3350 \text{ kg}$$

Dilakukan perhitungan nilai konstanta kekakuan pegas untuk *EMVA*. Hasil penelitian yang direkomendasikan oleh Galal A. Hassaan^[9] dan Pachpute^[9] menyatakan bahwa rasio frekuensi natural DVA dan sistem utama yakni 0,7 hingga 0,8. Pada penelitian ini ditetapkan rasio frekuensi natural yakni 0,75.

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{k_{eq}}{M_{EMVA}}} \quad (3.37)$$

$$\frac{\omega_1}{0,75} = \sqrt{\frac{k_2}{M_{EMVA}}}$$

$$\frac{40,0904}{0,75} = \sqrt{\frac{k_2}{0,335}}$$

$$k_2 = 957,2 \text{ N/m}$$

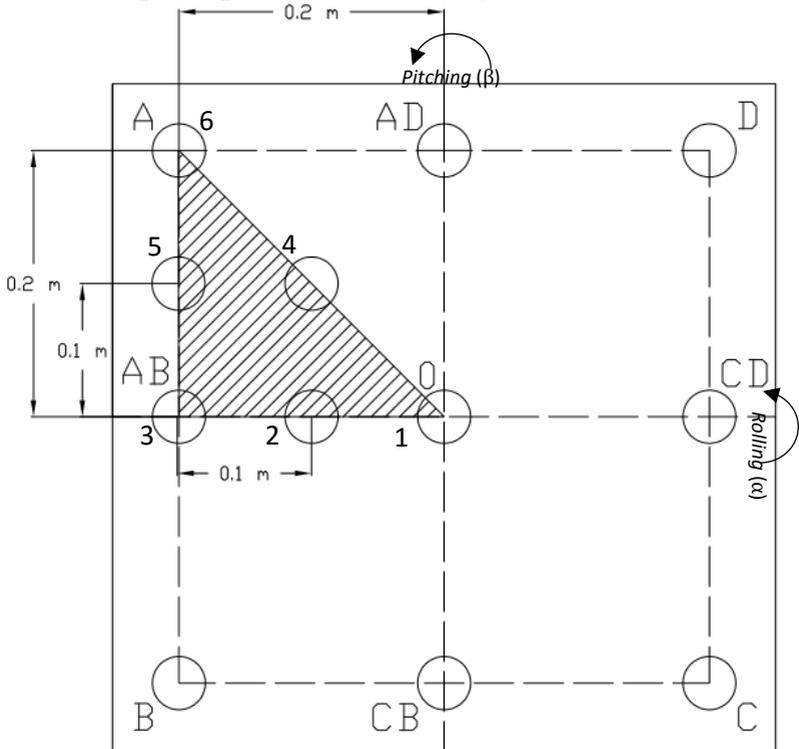
Setelah dilakukan perhitungan rancang bangun *EMVA* serta studi literatur terkait parameter bahan atau peralatan yang berada di pasaran. Maka diperoleh parameter-parameter sebagai berikut.

Tabel 4.5 Hasil pengukuran dan studi literatur.

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Massa sistem utama	m_1	6.7	kg
Momen Inersia sistem utama	J_R, J_P	0,1396	$kg.m^2$
Konstanta pegas A	k_A	1896	N/m
Konstanta pegas B	k_B	2500	N/m
Konstanta pegas C	k_C	3333	N/m
Konstanta pegas D	k_D	3955	N/m
Konstanta pegas batang penggerak	k_0	500	N/m
Massa EMVA	m_e	0,3350	kg
Diameter magnet	t_m	0,04	m
Konstanta pegas EMVA	k_2	988.6520	N/m
Pancaran medan magnet	B_r	1,2	T
Panjang magnet	p_m	0,04	m
Panjang kumparan	l_k	0,08	m
Panjang EMVA	L_{EMVA}	0.1	m
Diameter kawat kumparan	d_w	0,35	mm
Hambatan jenis kawat	ρ	$1,68 \times 10^{-8}$	Ωm
Jumlah lilitan	$Z.N$	4000	lilitan
Redaman pegas A	C_A	7.940	$N.s/m$
Redaman pegas B	C_B	10,121	$N.s/m$
Redaman pegas C	C_C	14.404	$N.s/m$
Redaman pegas D	C_D	22,716	$N.s/m$
Redaman pegas EMVA	C_{EMVA}	0,513	$N.s/m$
Premeabilitas udara	μ_r	1,05	

Parameter-parameter tersebut disubstitusikan dan dilakukan pengujian dengan *MATLAB Simulink*. Sebagaimana yang telah dijelaskan pada metodologi percobaan. Pengujian dilakukan dengan variasi amplitudo dari sumber getar yang terdiri 0.02 m, 0.03 m, dan 0.04 m. Dimana variasi amplitudo akan diterapkan pada setiap titik pengujian. Terdapat enam titik pengujian dan titik pengujian ini ditetapkan berdasarkan daerah simpangan terbesar

pada hasil simulasi sistem utama tanpa penambahan *EMVA* yang telah ditampilkan pada gambar 4.4 sebagai acuan.

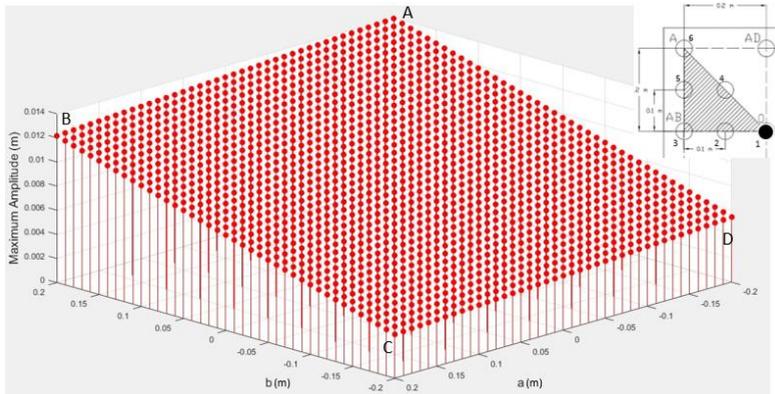


Gambar 4.9 Enam variasi titik peletakan *EMVA*

Pada hasil simulasi sebelumnya titik A memiliki simpangan terbesar yakni 15,11 mm dan diikuti oleh titik AB yang memiliki simpangan sebesar 14,32 mm. Sesuai metodologi yang ada akan dilakukan pengujian dengan memasang *EMVA* di setiap titik di keliling segitiga A-AB-O bergantian dimana jarak antar titik 0,1 m.

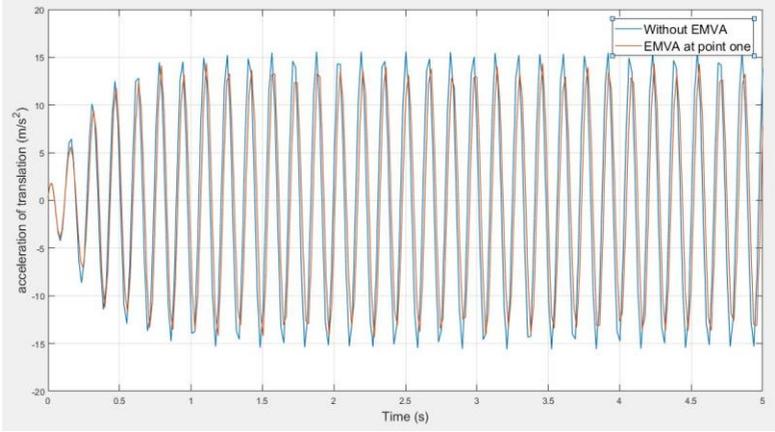
4.3.3.1. Analisa Respon Getaran Sistem Utama dan Energi Bangkitan Saat *EMVA* Berada Di Titik Nomor Satu.

Titik nomor satu berada tepat di tengah meja sistem utama. Bila *EMVA* diletakkan tepat di titik nomor satu tentunya *EMVA* hanya mendapatkan getaran dari arah translasi saja. Gambar 4.10 merupakan hasil simulasi profil permukaan sistem utama pada saat *EMVA* berada di titik nomor satu dengan amplitudo eksitasi sebesar 0,04 m dan frekuensi operasi senilai $40,0904 \text{ rad/s}^2$

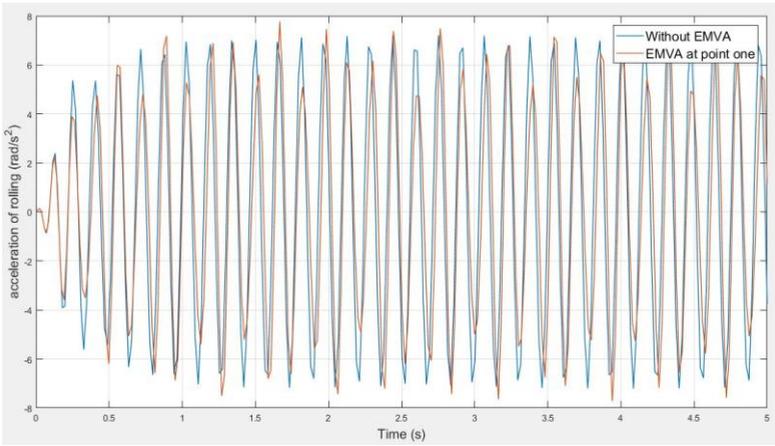


Gambar 4.10 Distribusi simpangan maksimum sistem utama dengan penambahan *EMVA* di titik nomor satu

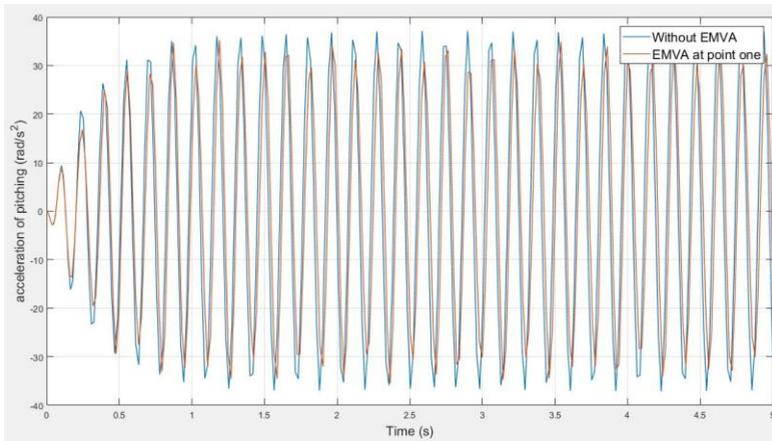
Terlihat pada gambar bahwa getaran tertinggi masih berada di titik A yakni dengan simpangan maksimum sebesar 13,74 mm. Dampak penambahan *EMVA* di titik nomor satu yakni dapat mereduksi getaran di titik A sebesar 1,37 mm. Adapun penyebab dari profil permukaan sistem utama tersebut dapat dilihat dari respon getarannya. Respon getaran yang ditinjau dibagi menjadi tiga yakni dalam arah translasi, *rolling*, dan *pitching*.



(a)



(b)



(c)

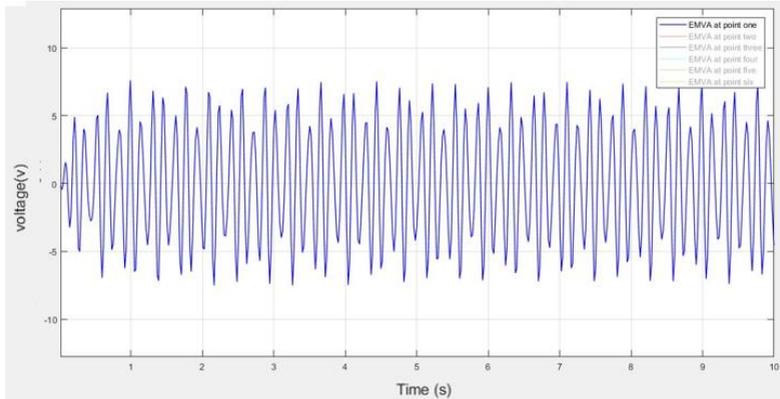
Gambar 4.11 Respon percepatan pada arah translasi (a), *rolling* (b), dan *pitching* (c) dengan penambahan *EMVA* pada nomor satu dan sistem utama tanpa penambahan *EMVA*.

Telah dilakukan simulasi terkait respon percepatan sistem utama dalam arah translasi, *rolling* dan *pitching*. Hasil dari simulasi ditampilkan oleh gambar 4.11. Pada gambar tersebut terdapat grafik berwarna merah dan biru. Warna biru mewakili respon getaran sistem utama tanpa penambahan *EMVA* dan warna merah mewakili respon getaran sistem utama dengan penambahan *EMVA* di titik satu. Dapat dilihat bahwa selain berdampak pada simpangan maksimum terdapat dampak lain. Percepatan pada arah translasi, *rolling* dan *pitching* mengalami reduksi.

Tabel 4.6 Pengaruh penambahan *EMVA* di titik satu terhadap respon sistem utama (RMS)

Pergerakan	Tanpa <i>EMVA</i> (m/s)/(rad/s ²)	<i>EMVA</i> di titik satu (m/s)/(rad/s ²)	Reduksi (%)
Translasi	10.6763	9.5002	11
<i>Rolling</i>	4.9433	4.4755	9
<i>Pitching</i>	25.3822	22.5986	11

Saat *EMVA* diletakkan pada sistem yang bergetar pastinya massa *EMVA* ikut bergetar dan menghasilkan energi listrik. Setelah *EMVA* ditambahkan pada sistem utama dan diletakkan pada titik nomor satu maka diperoleh nilai tegangan bangkitan

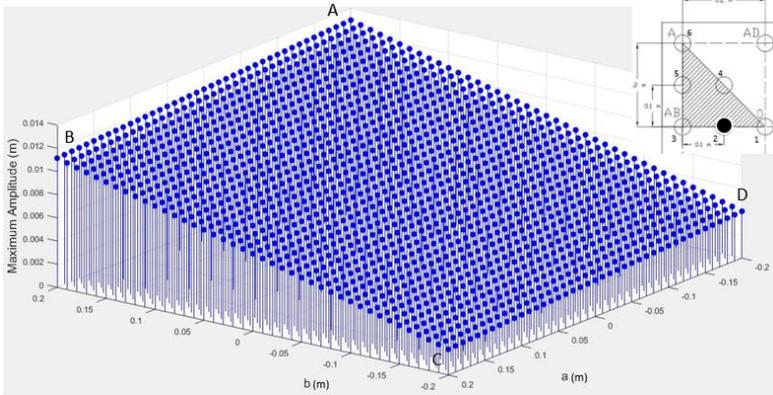


Gambar 4.12 Respon tegangan saat *EMVA* diletakkan di titik nomor satu

Dari grafik di atas diperoleh nilai tegangan bangkitan (RMS) sebesar 4.1629 volt dan jika diakumulasikan terhadap daya diperoleh daya sebesar 2.71626 watt.

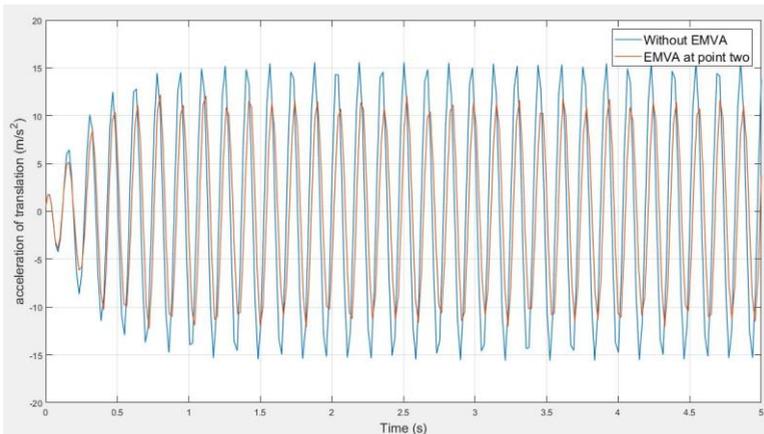
4.3.3.2. Analisa Respon Getaran Sistem Utama dan Energi Bangkitan Saat *EMVA* Berada Di Titik Nomor Dua.

Titik nomor dua berada 0,1 m disebelah kiri titik tengah meja sistem utama seperti yang telah diilustrasikan oleh gambar 4.8. Bila disesuaikan dengan koordinat pada gambar 3.8 diperoleh panjang lengan dalam arah b sebesar -0,1 m dan arah a 0 m. Nilai tersebut disubstitusikan ke dalam *MATLAB Simulink* bersama parameter-parameter yang sudah ditentukan. Dari *MATLAB Simulink* diperoleh gambar terkait distribusi simpangan maksimum.

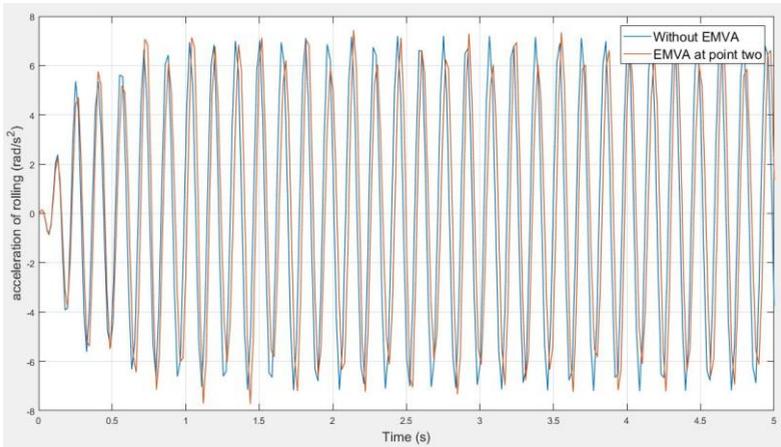


Gambar 4.13 Distribusi simpangan maksimum sistem utama dengan penambahan *EMVA* di titik nomor dua

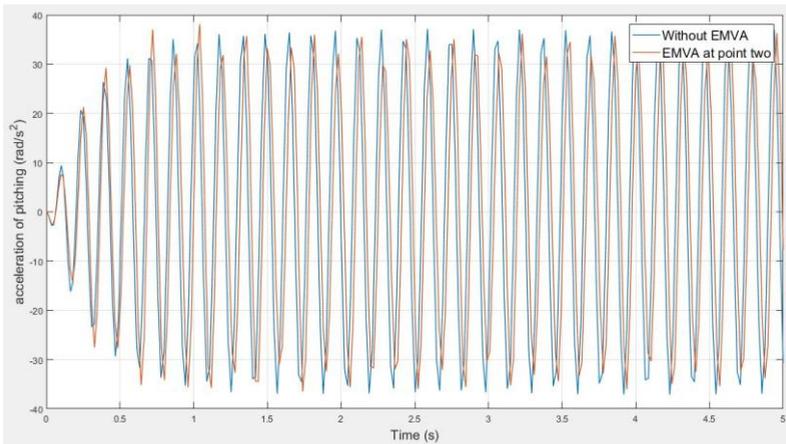
Getaran tertinggi masih berada di titik A. Meski begitu simpangan maksimum di titik A turun lebih signifikan dibanding sebelumnya. Saat *EMVA* diletakkan di titik nomor dua diperoleh nilai simpangan maksimum di titik A 12,98 mm dan terjadi reduksi simpangan sebesar 2,13 m.



(a)



(b)



(c)

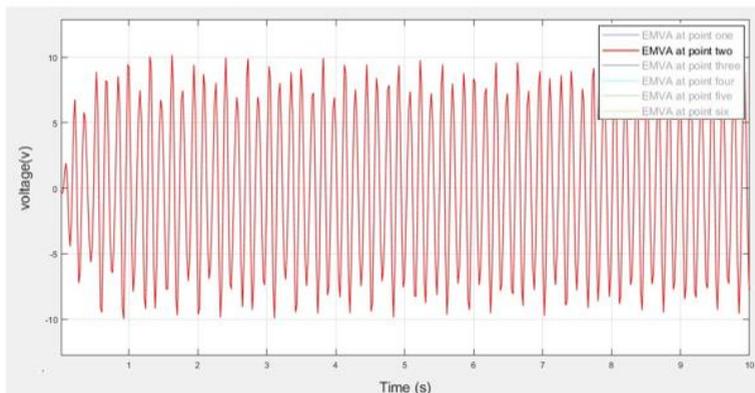
Gambar 4.14 Respon percepatan pada arah translasi (a), *rolling* (b), dan *pitching* (c). Penambahan *EMVA* pada nomor dua dan sistem utama tanpa penambahan *EMVA*.

Setelah *EMVA* diletakkan di titik nomor dua pada sistem utama terjadi perubahan terhadap respon getaran sistem utama. Perubahan tersebut diilustrasikan oleh gambar 4.13. Grafik berwarna biru menunjukkan respon getaran sistem utama tanpa penambahan *EMVA* dan warna merah menunjukkan respon getaran dari sistem utama apabila ditambahkan *EMVA* di titik nomor dua. Tampak terjadi reduksi getaran pada respon percepatan. Namun reduksi getaran untuk arah *pitching* dan *rolling* semakin rendah.

Tabel 4.7 Pengaruh penambahan *EMVA* di titik dua terhadap respon sistem utama (RMS)

Pergerakan	Tanpa <i>EMVA</i> (m/s)/(rad/s ²)	<i>EMVA</i> di titik dua (m/s)/(rad/s ²)	Reduksi (%)
Translasi	10.6763	7.9669	25
<i>Rolling</i>	4.9433	4.6943	5
<i>Pitching</i>	25.3822	23.7282	7

Selain *EMVA* didesain untuk mereduksi getaran. *EMVA* didesain untuk mengkonversi energi kinetik menjadi energi listrik menggunakan konsep induksi elektromagnetik.

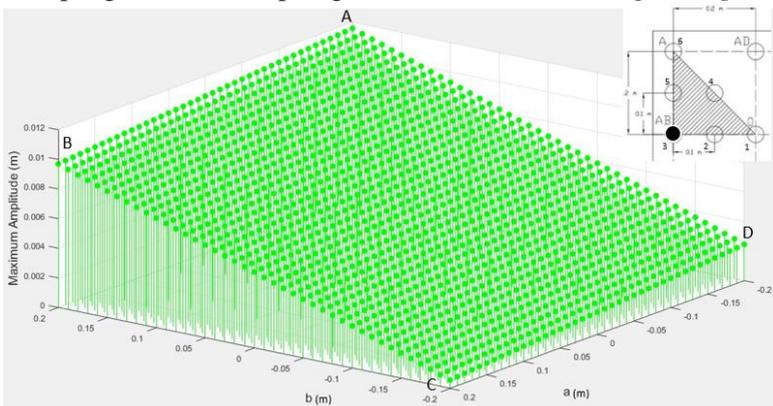


Gambar 4.15 Respon tegangan saat *EMVA* diletakkan di titik nomor dua

Dari gambar 4.15 diperoleh nilai tegangan bangkitan (RMS) sebesar 5.9984 volt atau setara dengan 5.6396 watt.

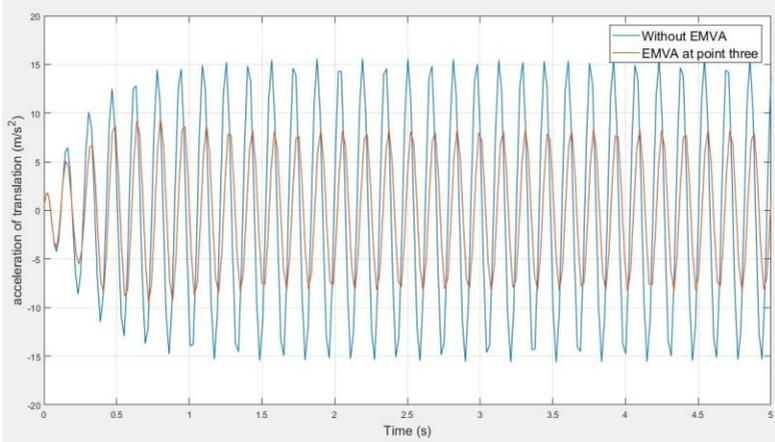
4.3.3.3. Analisa Respon Getaran Sistem Utama dan Energi Bangkitan Saat *EMVA* Berada Di Titik Nomor Tiga

Titik nomor tiga terletak pada koordinat b -0,2 m dan a 0 m. Titik nomor tiga merupakan titik lengan terjauh dari koordinat b dan bila *EMVA* diletakkan pada titik nomor tiga tentunya sangat mempengaruhi nilai respon getaran arah translasi dan *pitching*.

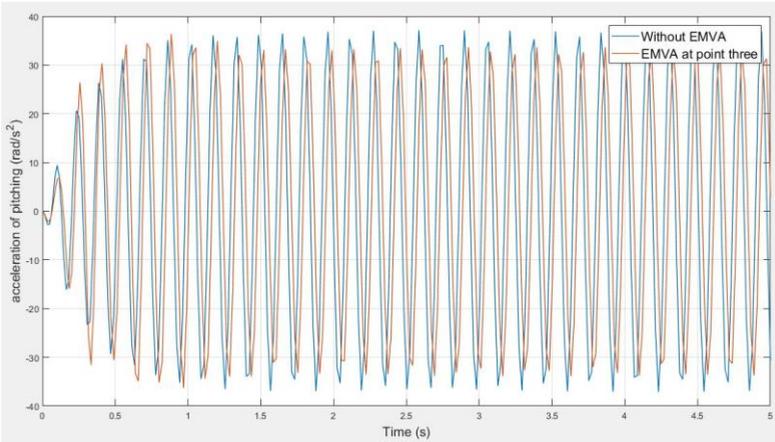


Gambar 4.16 Distribusi simpangan maksimum sistem utama dengan penambahan *EMVA* di titik nomor tiga

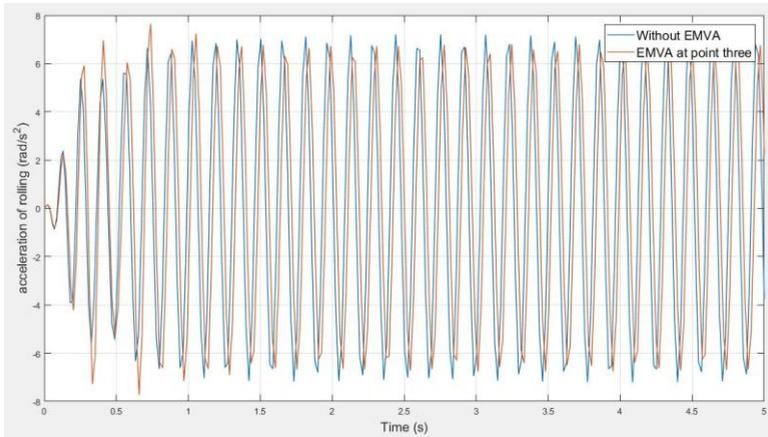
Setelah mensimulasikan sistem utama dengan penambahan *EMVA* di titik nomor tiga diperoleh grafik tiga dimensi pada gambar 4.16 terkait distribusi simpangan maksimum di sistem utama. Hasil simulasi menunjukkan bahwa terjadi reduksi getaran di titik A, B, dan D. Namun terjadi kenaikan simpangan maksimum getaran pada titik C. Kenaikan seperti ini dapat terjadi jika respon getaran pada arah *pitching* bertambah. Agar dapat menganalisa lebih dalam diperlukan grafik terkait respon percepatan sistem utama saat sistem utama ditambah *EMVA* di titik nomor tiga.



(a)



(b)



(c)

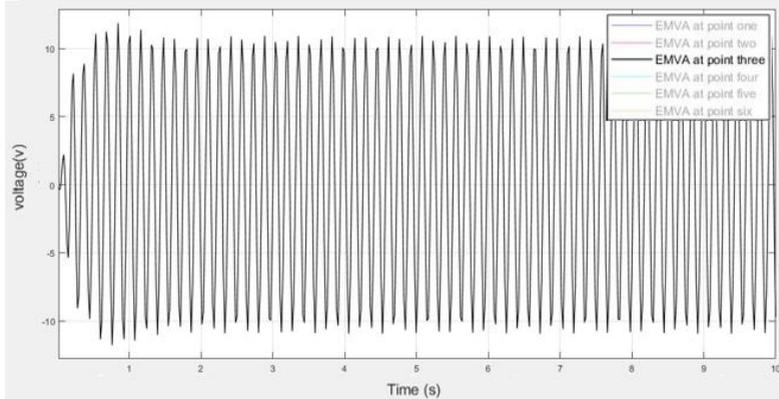
Gambar 4.17 Respon percepatan pada arah translasi (a), *rolling* (b), dan *pitching* (c) dengan penambahan *EMVA* pada nomor tiga dan sistem utama tanpa penambahan *EMVA*.

Pada gambar 4.17 terlihat garis berwarna biru menunjukkan respon percepatan sistem utama tanpa penambahan *EMVA* dan berwarna merah menunjukkan respon percepatan sistem utama dengan penambahana *EMVA* di titik nomor tiga. Dapat dilihat terjadi reduksi getaran translasi yang sangat signifikan yakni 45% dari respon getaran translasi sistem utama tanpa penambahan *EMVA*. Namun reduksi untuk arah *pitching* dan *rolling* memiliki nilai yang lebih kecil dibandingkan saat *EMVA* ditambahkan pada sistem utama dan diletakkan di titik nomor satu.

Tabel 4.8 Pengaruh penambahan *EMVA* di titik tiga terhadap respon sistem utama (RMS)

Pergerakan	Tanpa <i>EMVA</i> (m/s)/(rad/s ²)	<i>EMVA</i> di titik tiga (m/s)/(rad/s ²)	Reduksi (%)
Translasi	10.6763	5.8309	45
<i>Rolling</i>	4.9433	4.7181	5
<i>Pitching</i>	25.3822	23.4524	8

Selanjutnya dianalisa terkait tegangan yang dibangkitkan oleh *EMVA* pada saat *EMVA* diletakkan di titik nomor tiga. Adapun grafik respon tegangan dari hasil simulasi

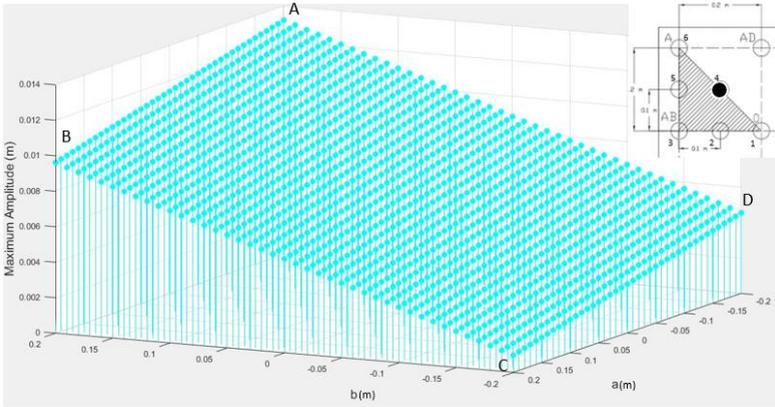


Gambar 4.18 Respon tegangan saat *EMVA* diletakkan di titik nomor tiga

Setelah dilakukan perhitungan terkait rata-rata nilai tegangan yang dibangkitkan (RMS) dilanjutkan dengan mengkonversi nilai tegangan ke besar daya yang dibangkitkan. Pada gambar 4.18 tertera nilai tegangan yang terbangkitkan saat *EMVA* diletakkan di titik nomor tiga yakni 7.5452 volt dan daya yang terbangkitkan oleh *EMVA* akibat induksi elektromagnetik sebesar 8.923204 watt.

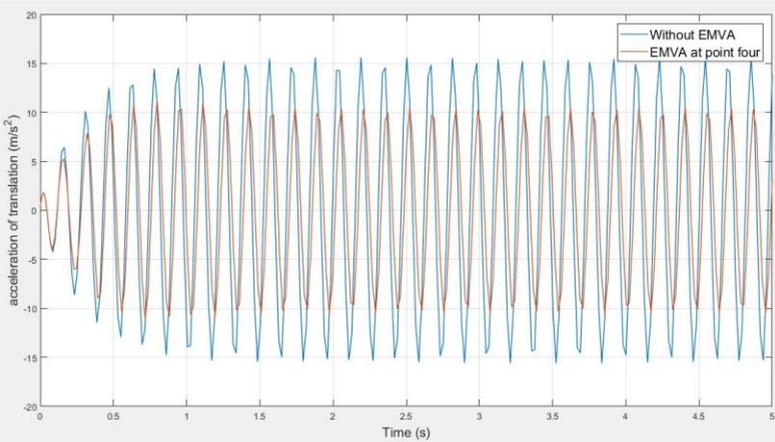
4.3.3.4. Analisa Respon Getaran Sistem Utama dan Energi Bangkitan Saat *EMVA* Berada Di Titik Nomor Empat

Variasi titik peletakkan *EMVA* di nomor dua dan tiga hanya berpengaruh signifikan terhadap getaran arah translasi dan *pitching*. Berbeda dengan titik nomor empat. Pada saat *EMVA* diletakkan di titik nomor empat maka akan mempengaruhi respon gerakan arah translasi, *rolling*, dan *pitching*. Sebab titik nomor empat berada di koordinat -0,1 m arah b dan 0,1 m pada arah a. Dimana panjang lengan a mempengaruhi respon getaran *rolling*.

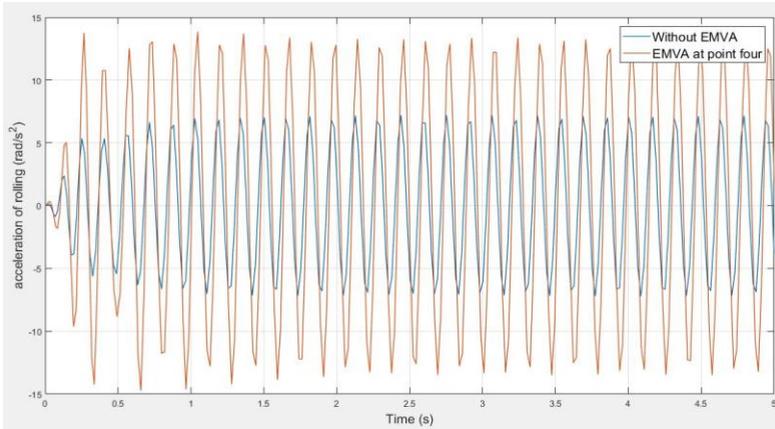


Gambar 4.19 Distribusi simpangan maksimum sistem utama dengan penambahan *EMVA* di titik nomor empat

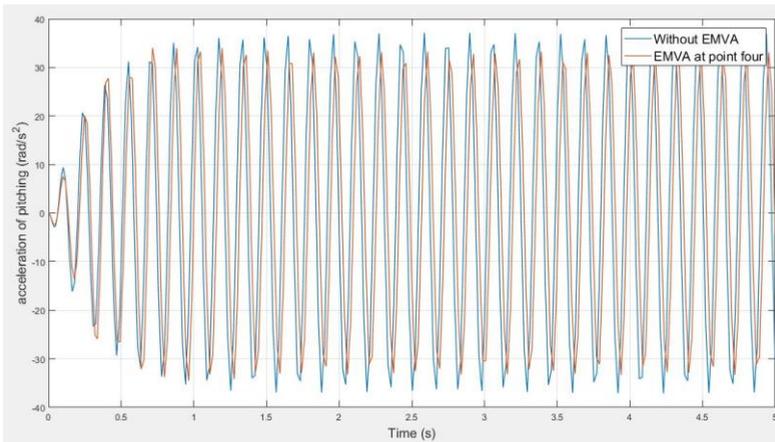
Sesuai gambar 4.19 bila *EMVA* diletakkan di titik nomor empat maka distribusi simpangan maksimum tidak jauh beda dengan *EMVA* diletakkan di titik nomor dua. Respon getaran paling besar tetap dimiliki oleh titik A senilai 12,9 mm. Adapun penyebabnya dapat dianalisa dari respon gerak sistem utama



(a)



(b)



(c)

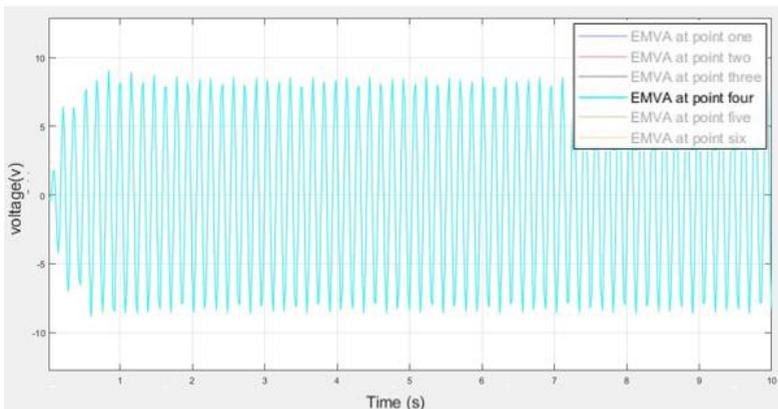
Gambar 4.20 Respon percepatan pada arah translasi (a), *rolling* (b), dan *pitching* (c) dengan penambahan *EMVA* pada nomor empat dan sistem utama tanpa penambahan *EMVA*.

Pada gambar grafik tampak garis berwarna biru dimana garis tersebut mewakili respon percepatan sistem utama tanpa penambahan *EMVA*. Sedangkan garis berwarna merah mewakili

respon percepatan dari sistem utama dengan penambahan *EMVA* di titik nomor empat. Tampak pada grafik respon percepatan arah translasi dan *pitching* terjadi reduksi getaran. Reduksi getaran pada arah translasi dan *pitching* tidak berbeda jauh dengan reduksi getaran sistem utama pada saat ditambah *EMVA* di titik nomor dua. Selain terjadi reduksi getaran, tampak pula respon percepatan getaran yang semakin membesar. Respon percepatan *rolling* merupakan respon percepatan getaran yang membesar pada saat *EMVA* diletakkan di nomor empat. Membesarnya respon percepatan *rolling* dapat mencapai dua kali lipat dibandingkan respon getaran sistem utama tanpa penambahan *EMVA*.

Tabel 4.9 Pengaruh penambahan *EMVA* di titik empat terhadap respon sistem utama (RMS)

Pergerakan	Tanpa <i>EMVA</i> (m/s)/(rad/s ²)	<i>EMVA</i> di titik empat (m/s)/(rad/s ²)	Reduksi (%)
Translasi	10.6763	7.268	32
<i>Rolling</i>	4.9433	9.3293	-89
<i>Pitching</i>	25.3822	22.9956	9

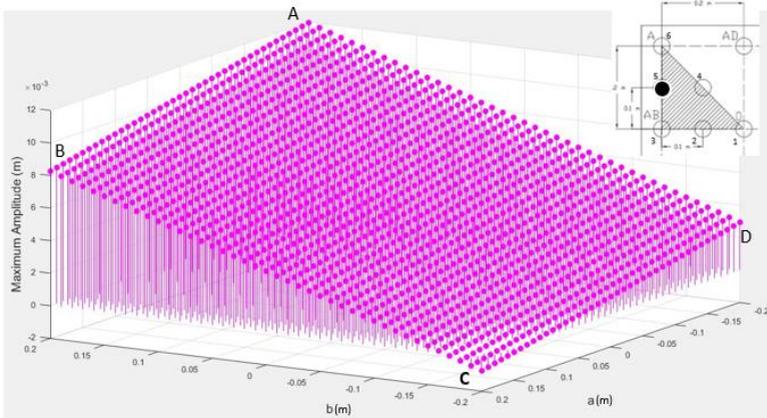


Gambar 4.21 Respon tegangan saat *EMVA* diletakkan di titik nomor empat

Tegangan yang dibangkitkan oleh *EMVA* di titik nomor empat pada sistem utama tidak berbeda jauh dengan *EMVA* yang diletakkan di nomor dua pada sistem utama. Adapun nilai tegangan terbangkitkan sebesar 5,9127 volt setara dengan 5,479627 watt

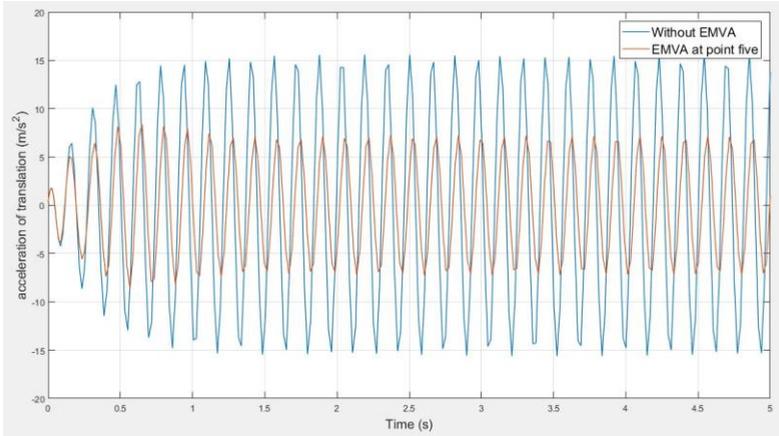
4.3.3.5. Analisa Respon Getaran Sistem Utama dan Energi Bangkitan Saat *EMVA* Berada Di Titik Nomor Lima

Titik nomor lima terletak pada koordinat -0,2 m arah b dan 0,1 m arah a. Panjang lengan b yang begitu besar dapat mempengaruhi respon getaran dalam arah *pitching* secara signifikan. Sedangkan arah *rolling* akan terpengaruhi namun tidak signifikan dibanding titik sebelumnya.

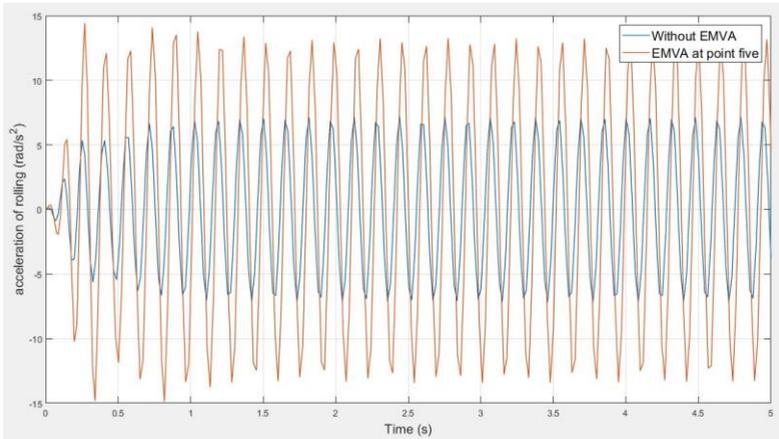


Gambar 4.22 Distribusi simpangan maksimum sistem utama dengan penambahan *EMVA* di titik nomor lima

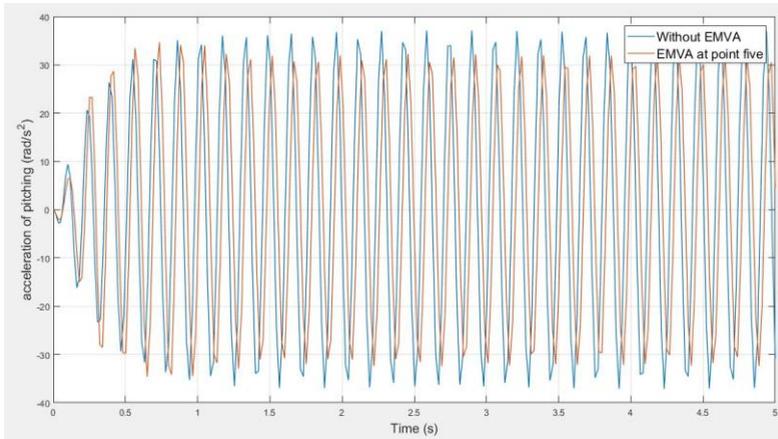
Saat *EMVA* diletakkan di titik nomor lima dari sistem utama. Dari gambar 4.22 diperoleh titik A memiliki simpangan maksimum sebesar 11,49 mm. Itu mengindikasikan bahwa titik A mengalami reduksi simpangan maksimum yang cukup besar dibandingkan simpangan maksimum di titik A sebelum terdapat penambahan *EMVA* pada sistem utama yakni 15,11 mm.



(a)



(b)



(c)

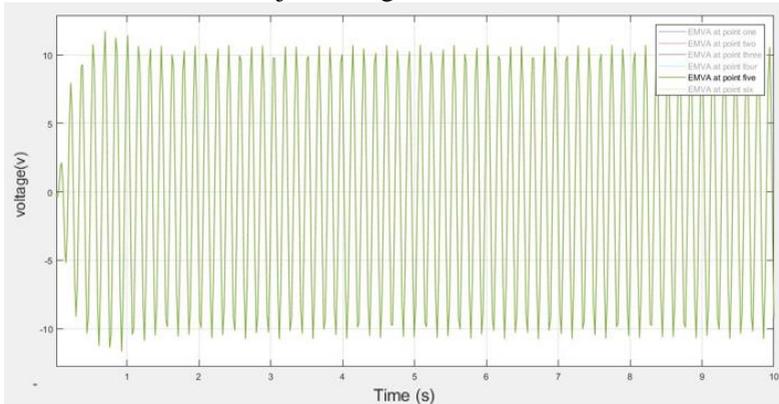
Gambar 4.23 Respon percepatan pada arah translasi (a), *rolling* (b), dan *pitching* (c) dengan penambahan *EMVA* pada nomor lima dan sistem utama tanpa penambahan *EMVA*.

Garis berwarna biru pada grafik di atas menggambarkan respon percepatan sistem utama tanpa penambahan *EMVA*. Sedangkan garis berwarna merah menggambarkan respon percepatan sistem utama dengan penambahan *EMVA* di titik nomor lima. Terlihat bahwa reduksi getaran sistem utama pada arah translasi dan *pitching* lebih baik dibandingkan variasi titik peletakan *EMVA* sebelumnya. Walaupun lebih baik dalam mereduksi getaran pada arah translasi dan *pitching*. Respon percepatan pada *rolling* masih tidak jauh berbeda dengan penambahan *EMVA* di titik empat.

Tabel 4.10 Pengaruh penambahan *EMVA* di titik lima terhadap respon sistem utama (RMS)

Pergerakan	Tanpa <i>EMVA</i> (m/s)/(rad/s ²)	<i>EMVA</i> di titik lima (m/s)/(rad/s ²)	Reduksi (%)
Translasi	10.6763	5.0835	52
<i>Rolling</i>	4.9433	9.2907	-88
<i>Pitching</i>	25.3822	22.4554	12

Getaran yang terjadi pada sistem utama mendorong massa *EMVA* dan dikonversikan menjadi energi listrik.

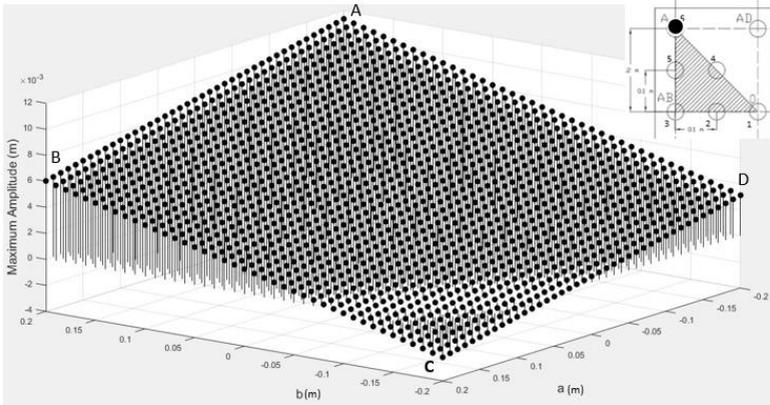


Gambar 4.24 Respon tegangan saat *EMVA* diletakkan di titik nomor lima

Dari gambar 4.24 diketahui pada saat *EMVA* diletakkan di titik nomor lima. *EMVA* mampu menghasilkan tegangan bangkitan (RMS) sebesar 7.4189 volt dan daya bangkitan 8.62697 watt.

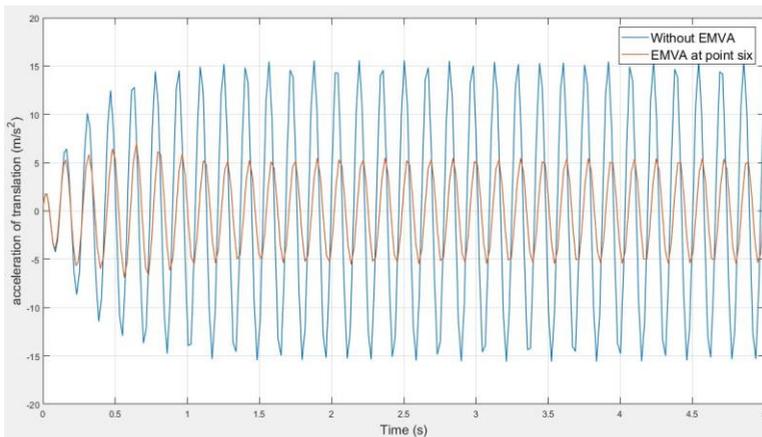
4.3.3.6. Analisa Respon Getaran Sistem Utama dan Energi Bangkitan Saat *EMVA* Berada Di Titik Nomor Enam

Sebagaimana yang telah diketahui pada penelitian ini bahwa sistem utama dibagi menjadi enam titik pengujian peletakkan *EMVA*. Sebelumnya telah dilakukan analisa terkait hasil pengujian pada lima titik peletakkan. Selanjutnya dilakukan pengujian di titik peletakkan *EMVA* nomor enam. *EMVA* diletakkan pada titik koordinat -0,2 m sumbu b dan 0,2 m sumbu a. Titik nomor enam merupakan titik terjauh dari titik tengah. Sehingga memungkinkan untuk memberikan pengaruh yang signifikan terhadap respon getaran sistem utama pada arah translasi, *rolling* dan *pitching*.

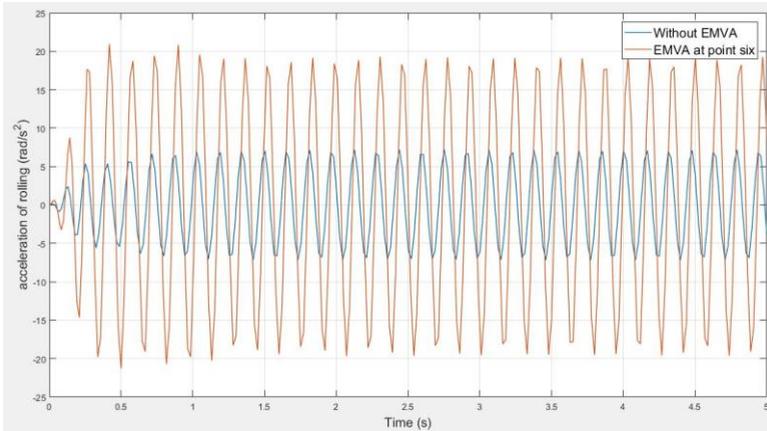


Gambar 4.25 Distribusi simpangan maksimum sistem utama dengan penambahan *EMVA* di titik nomor enam

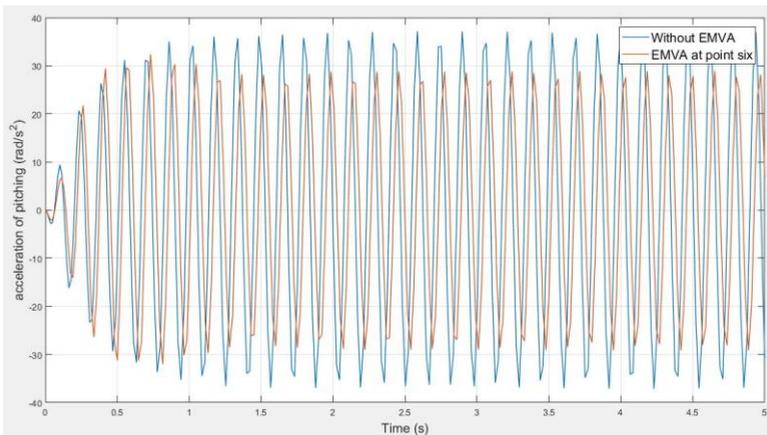
Tampak terjadi reduksi simpangan maksimum pada sistem utama yang signifikan. Dikatakan signifikan karena titik A yang memiliki simpangan maksimum tertinggi dan tereduksi oleh *EMVA* hingga 10,98 mm dibandingkan tanpa penambahan *EMVA* 15,11 mm.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.26 Respon percepatan pada arah translasi (a), *rolling* (b), dan *pitching* (c) dengan penambahan *EMVA* pada nomor lima dan sistem utama tanpa penambahan *EMVA*.

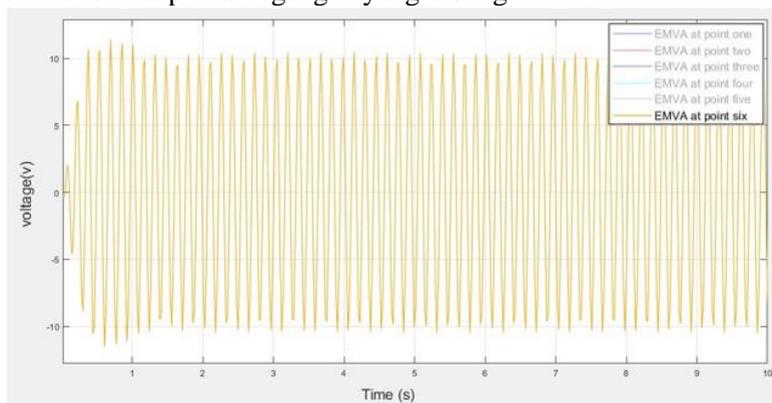
Sesuai *legend* pada gambar 4.26 diketahui bahwa grafik berwarna biru mewakili sistem utama tanpa penambahan *EMVA* dan sedangkan grafik berwarna merah mewakili sistem utama dengan

penambahan *EMVA* di titik nomor enam. Pengaruh diletakkannya *EMVA* di titik nomor enam sistem utama sangat tampak. Terjadi reduksi pada respon percepatan translasi maupun *pitching* yang lebih signifikan dibanding hasil variasi pengujian titik peletakkan *EMVA* sebelum-sebelumnya. Dinyatakan seperti itu karena reduksi getaran pada arah translasi saja lebih 60 persen dari sistem utama tanpa penambahan *EMVA*. Namun dilain pihak respon percepatan pada getaran arah *rolling* menjadi dua kali lipat dari respon percepatan *rolling* pada saat sistem utama tanpa *EMVA*.

Tabel 4.11 Pengaruh penambahan *EMVA* di titik enam terhadap respon sistem utama (RMS)

Pergerakan	Tanpa <i>EMVA</i> (m/s)/(rad/s ²)	<i>EMVA</i> di titik empat (m/s)/(rad/s ²)	Reduksi (%)
Translasi	10.6763	3.8837	64
<i>Rolling</i>	4.9433	13.5702	-175
<i>Pitching</i>	25.3822	20.1988	20

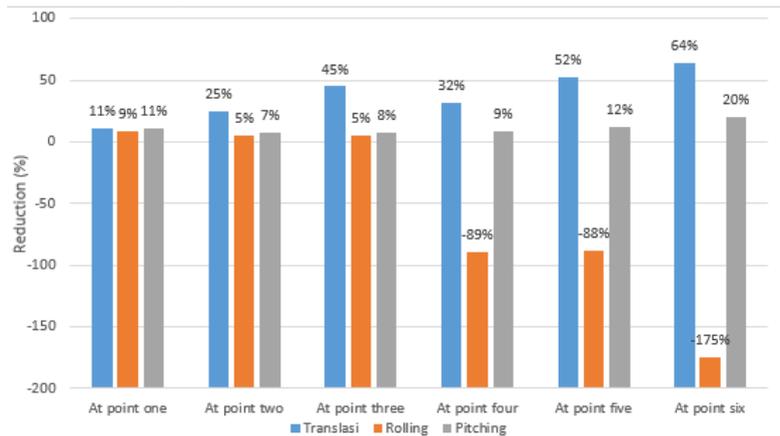
Perlu dilakukan analisa terkait pengaruh titik letak *EMVA* di sistem utama terhadap nilai tegangan yang dibangkitkan.



Gambar 4.27 Respon tegangan saat *EMVA* diletakkan di titik nomor enam

Saat *EMVA* ditambahkan pada sistem utama dan diletakkan di titik nomor enam tentunya mempengaruhi reduksi respon getaran di sistem utama serta nilai tegangan bangkitan dari sistem elektrikal *EMVA*. Adapun pengaruh terhadap nilai tegangan bangkitan (RMS) yang diperoleh yakni 7.2339 volt atau setara 8.2026 watt.

4.3.4. Pembahasan Terkait Pengaruh Variasi Titik Peletakkan *EMVA* pada Sistem Utama Terhadap Respon Getaran



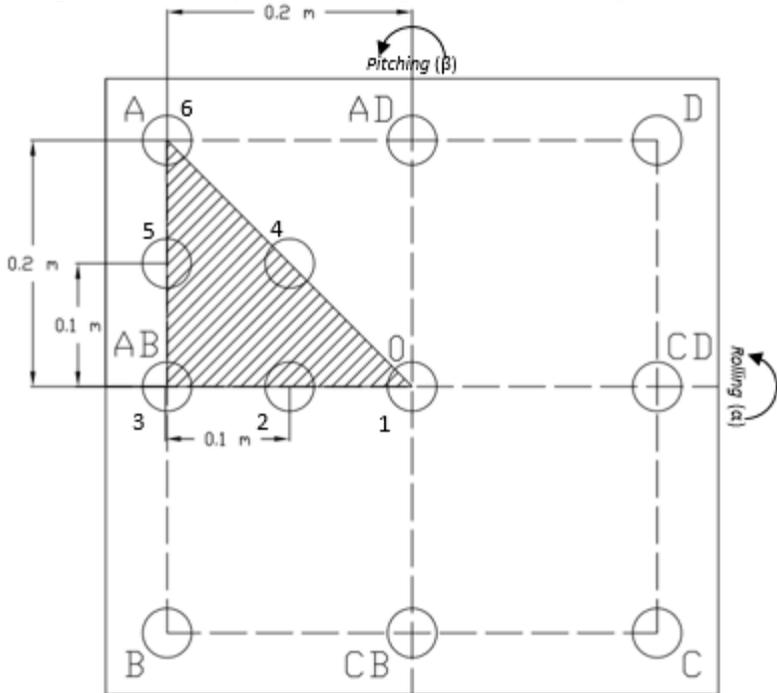
Gambar 4.28 Pengaruh variasi titik penambahan *EMVA* terhadap respon sistem utama

Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa reduksi getaran pada arah translasi semakin meningkat apabila jarak *EMVA* terhadap titik tengah sistem utama semakin jauh. Pernyataan ini dibuktikan dengan seiring dilakukan pengujian titik satu (0 m, 0 m), titik dua (-0,1m ; 0 m), dan titik tiga (-0,2 m ; 0 m) terjadi penurunan respon percepatan. Lalu pada saat *EMVA* diletakkan di titik empat yang terjadi adalah peningkatan respon percepatan. Titik empat memiliki koordinat -0,1 m pada arah b dan 0,1 pada arah a. Maka jarak titik empat menjadi $0,1\sqrt{2}$ m dari titik tengah. Dapat dikatakan titik empat lebih jauh dari titik tengah dibanding titik dua namun lebih dekat dibanding titik tiga. Selanjutnya pada variasi

titik lima dan enam terjadi penurunan respon percepatan hingga mampu mereduksi getaran 64%. Adapun penyebab semakin tereduksinya getaran pada arah translasi bukan hanya jarak dari titik tengah. Melainkan *EMVA* semakin mendekati getaran terbesar. Apabila *EMVA* diletakkan di titik getaran terbesar pada sistem utama maka akan terjadi *base motion* yang cukup besar pada sistem *EMVA* dan getaran dari *base motion* tersebut dilawan oleh gaya dari massa, gaya kekakuan maupun gaya redaman dari sistem *EMVA*. Nantinya gaya dari sistem *EMVA* menjadi gaya eksitasi bagi sistem utama dan sistem utama tereduksi getarannya.

Selain berpengaruh terhadap respon getaran arah translasi, peletakkan *EMVA* juga berpengaruh terhadap respon getaran arah *pitching*. Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa fenomena yang terjadi pada getaran arah translasi kurang lebih sama dengan fenomena yang terjadi pada getaran arah *pitching*. Kesamaannya yakni semakin menjauh peletakkan *EMVA* maka getaran tersebut semakin tereduksi. Perbedaannya terletak pengaruh panjang lengan b. Pada saat *EMVA* diletakkan di titik nomor tiga yang terjadi *EMVA* mereduksi respon getaran arah *pitching* lebih besar dibandingkan *EMVA* diletakkan di titik nomor dua. Tetapi saat *EMVA* diletakkan di titik nomor empat yang terjadi reduksi getaran arah *pitching* lebih besar dibanding nomor tiga. Selanjutnya semakin peletakkan *EMVA* mendekati nomor enam yang terjadi reduksi getaran pada arah *pitching* semakin besar. Penyebab terjadinya penambahan reduksi getaran pada arah *pitching* seiring bertambahnya panjang lengan b adalah gaya eksitasi pada sistem utama yang ditimbulkan oleh gaya kekakuan *EMVA* serta gaya redaman *EMVA* dikali panjang lengan b semakin bertambah. Adapun penyebab nilai reduksi getaran pada arah *pitching* bertambah seiring letak *EMVA* mendekati pegas yang memiliki nilai kekakuan terkecil yakni gaya redaman dan gaya kekakuan pegas dari *EMVA* menjadi gaya eksitasi bagi sistem utama. Gaya eksitasi semakin membesar dampaknya seiring mendekati nilai kekakuan terkecil.

Berbeda dengan getaran pada arah translasi dan *pitching*. Semakin *EMVA* diletakkan mendekati pegas dengan nilai kekakuan terkecil maka nilai reduksi getaran pada arah *rolling* semakin berkurang bahkan respon getaran pada arah *rolling* dapat menjadi lebih besar. Dapat dilihat percepatan *rolling* direduksi paling maksimum pada saat *EMVA* diletakkan dititik nomor satu. Alasan semakin besarnya resepon getaran pada arah *rolling* seiring *EMVA* diletakkan mendekati pegas dengan nilai kekakuan terkecil yakni gaya eksitasi pada sistem utama yang berasal dari *EMVA* menghasilkan torsi yang berlebih pada sumbu *rolling*.



Gambar 4.9 Enam variasi titik peletakkan *EMVA* secara bergantian

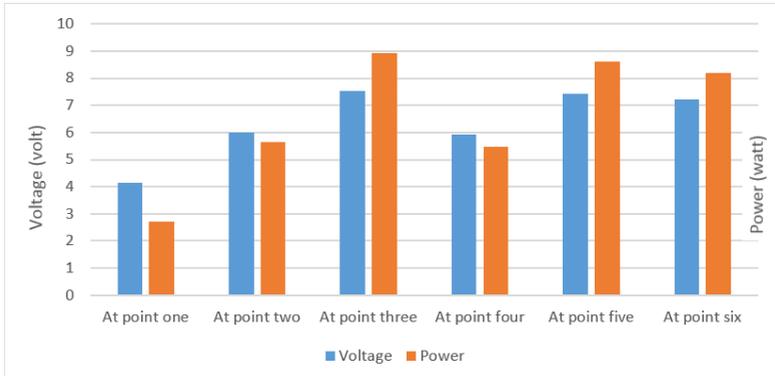
Sebagaimana kita ketahui nilai kekakuan pegas titik A, B, C, dan D yakni secara berturut-turut 1896 N/m, 2500 N/m, 3333 N/m dan 3956 N/m. Bila dilihat dari arah *rolling* atau dari sisi AB maka titik A berhimpit dengan D dan titik B berhimpit dengan C. Diperoleh nilai kekakuan A dan D 5852 N/m sedangkan nilai kekakuan B dan C 5833 N/m. Dapat dilihat perbedaan nilai kekakuan pada ruas AD tidak berbeda jauh dengan nilai kekakuan pada ruas BC sehingga getaran untuk arah *rolling* sangat kecil. Bila sistem utama ditambah *EMVA* tentunya nilai gaya eksitasi dari *EMVA* berlebih sehingga semakin mendorong sistem utama dan getaran membesar

Melihat dari hasil pengujian variasi titik peletakkan *EMVA* diperoleh peletakkan *EMVA* di nomor enam sebagai reduksi getaran paling maksimum dengan nilai reduksi getaran pada arah translasi sebesar 64%, pada arah *rolling* -175%, dan pada arah *pitching* 20%. Walaupun getaran arah *rolling* membesar. Nilai percepatan *rolling* yang pada mulanya 4.94 rad/s² hanya menjadi 13.57 rad/s² dan tidak lebih besar dibandingkan percepatan getaran arah *pitching* yang pada mulanya 25.38 rad/s² menjadi 20.2 rad/s².

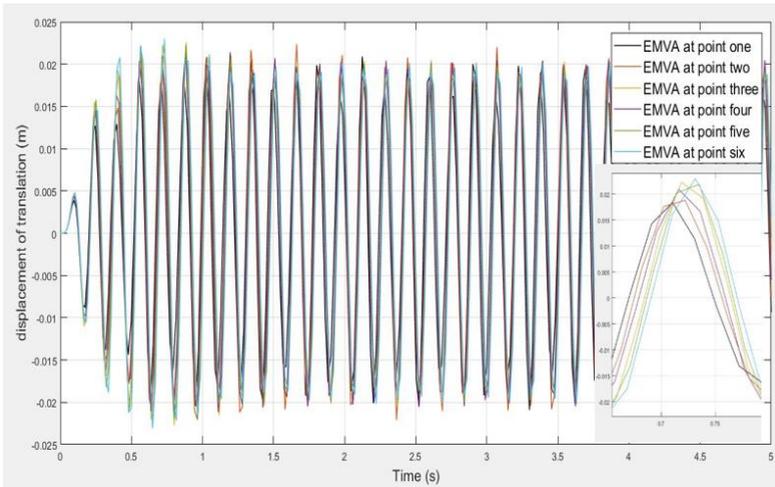
4.3.5. Pembahasan Terkait Pengaruh Variasi Titik Peletakkan *EMVA* pada Sistem Utama Terhadap Nilai Tegangan yang Dibangkitkan.

Tabel 4.12 Pengaruh penambahan *EMVA* di variasi titik terhadap energi bangkitan (RMS)

Variasi Titik	Titik Satu	Titik Dua	Titik Tiga	Titik Empat	Titik Lima	Titik Enam
Tegangan (Volt)	4,163	5,998	7,545	5,913	7,419	7,234
Daya (Watt)	2,716	5,640	8,923	5.480	8.627	8.203



Gambar 4.29 Pengaruh variasi titik penambahan *EMVA* terhadap energi bangkitan



Gambar 4.30 Respon perpindahan massa *EMVA* pada variasi titik peletakkan

Tabel 4.13 Dampak variasi titik dan respon getaran massa *EMVA*

Variasi Titik	Titik Satu	Titik Dua	Titik Tiga	Titik Empat	Titik Lima	Titik Enam
Perpindahan massa <i>EMVA</i> RMS (cm)	1,27	1,38	1,40	1,39	1,39	1,38

Bila diperhatikan gambar 4.29 dan gambar 4.30, seiring bertambahnya panjang lengan b maka nilai tegangan yang dibangkitkan semakin besar. Sedangkan seiring bertambahnya panjang lengan a maka nilai tegangan semakin menurun. Fenomena ini disebabkan getaran arah *rolling* pada sistem utama tanpa penambahan *EMVA* cenderung kecil. Saat diberi *EMVA* sepanjang a kurang menggetarkan sistem mekanik *EMVA* melainkan *EMVA* mendorong sistem utama agar semakin bergetar pada arah *rolling*. Berbeda dengan getaran arah *pitching* pada sistem utama tanpa penambahan *EMVA* yang mana memiliki percepatan sudut sangat besar. Jika ditambahkan *EMVA* maka *EMVA* menyerap getaran dari arah *pitching* pada sistem utama. Getaran pada sistem mekanik *EMVA* dikonversikan menjadi tegangan listrik melalui proses induksi elektromagnetik. Adapun titik peletakan *EMVA* pada sistem utama yang terbaik dalam menyerap energi kinetik dari getaran yakni titik nomor tiga.

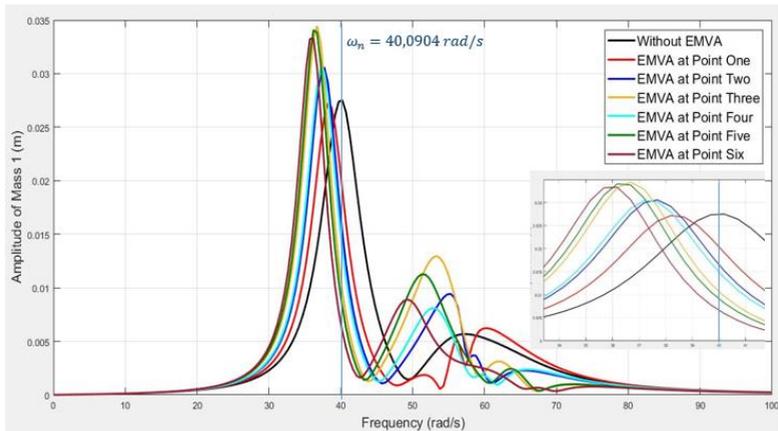
4.3.6. Analisa dan Pembahasan Terkait Pengaruh Variasi Frekuensi Operasi dan Variasi Titik Peletakan *EMVA* pada Sistem Utama Terhadap Respon Getaran

Tabel 4.14 Dampak variasi titik peletakan *EMVA* dan frekuensi operasi terhadap respon getaran

Variasi Titik	Titik Satu	Titik Dua	Titik Tiga	Titik Empat	Titik Lima	Titik Enam
Frekuensi Natural (rad/s)	38,53	37,74	36,77	37,45	36,52	35,94

Tabel 4.15 Dampak variasi titik peletakan *EMVA* terhadap reduksi respon getaran pada frekuensi operasi 40,0904 rad/s

Variasi Titik	Titik Satu	Titik Dua	Titik Tiga	Titik Empat	Titik Lima	Titik Enam
Reduksi Getaran Pada Frekuensi Operasi 40 rad/s (%)	11	25	45	32	52	64



Gambar 4.31 Pengaruh penambahan *EMVA* di variasi titik terhadap frekuensi natural

Penambahan *EMVA* pada sistem utama merubah sistem mekanik dari 3 derajat kebebasan menjadi empat derajat kebebasan. Perubahan sistem mekanik tidak hanya terjadi bila ditambah komponen saja tetapi juga dapat terjadi bila salah satu komponen dipindahkan. Dapat dilihat semakin *EMVA* mendekati pegas yang memiliki nilai kekakuan terkecil maka frekuensi natural dari sistem semakin bergeser ke kiri atau dapat dikatakan nilainya semakin kecil. Sehingga reduksi getaran juga semakin lebih besar bila dioperasikan dalam frekuensi 40,0904 rad/s² (frekuensi natural sistem utama tanpa *EMVA*).

Bila dilihat dari titik puncak respon pada variasi frekuensi operasi dan reduksi respon getaran dengan frekuensi operasi $40,0904 \text{ rad/s}^2$ pada setiap sistem maka titik peletakan *EMVA* nomor enam yang terbaik. Sebab tinggi puncak pada titik peletakan *EMVA* nomor enam bernilai paling rendah dan reduksi getaran pada frekuensi operasi $40,0904 \text{ rad/s}^2$ bernilai 64%.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, diperoleh beberapa kesimpulan antara lain:

1. Telah dirancang *Electromagnetic Vibration Absorber* yang dapat mereduksi getaran pada arah translasi, *rolling*, dan *pitching* dari sistem utama dengan dimensi tinggi 100 mm dan diameter 45 mm. Mekanisme *EMVA* memiliki massa adsorber sekaligus sumber medan magnet sebesar 0,335 kg dengan bahan neodmium dan kekakuan pegas 957,2 N/m. Selain itu mekanisme *EMVA* ini berperan sebagai penghasil energi listrik dengan kumparan 4000 lilitan sepanjang tinggi *EMVA*.
2. Diketahui bahwa semakin besar nilai amplitudo eksitasi maka semakin besar pula nilai respon percepatan, kecepatan, dan perpindahan pada sistem utama. Dengan kata lain respon percepatan, kecepatan, dan perpindahan pada sistem utama berbanding lurus dengan amplitudo eksitasi secara linier.
3. Diketahui bahwa bila peletakkan *EMVA* semakin mendekati letak pegas dengan konstanta kekakuan terkecil maka reduksi respon getaran arah translasi dan *pitching* pada sistem utama semakin besar. Bila peletakkan *EMVA* semakin digeser sejajar dengan sumbu *rolling* maka reduksi getaran pada arah *rolling* semakin rendah. Sehingga untuk reduksi getaran dalam dimensi rotasi sangat dipengaruhi panjang lengan dari titik tengah. Karena panjang lengan yang terlalu besar akan mendorong sistem utama lebih bergetar dan panjang lengan yang terlalu kecil akan menahan getaran pada arah rotasi dengan torsi yang rendah.
4. Semakin frekuensi operasi mendekati nilai frekuensi natural maka semakin besar pula respon getaran. Selain itu semakin *EMVA* diletakkan mendekati pegas dengan nilai kekakuan terkecil maka frekuensi natural sistem utama semakin rendah.

5. Diketahui bahwa pada saat dilakukan variasi peletakkan *EMVA*. Diperoleh titik peletakkan *EMVA* pada sistem utama yang memiliki reduksi getaran terbesar berada di nomor enam dengan rician reduksi getaran 64% arah translasi (10.6763 m/s^2 menjadi 3.8837 m/s^2), -175% arah *rolling* (4.9433 rad/s^2 menjadi 13.5702 rad/s^2), dan 20% arah *pitching* (25.3822 rad/s^2 menjadi 20.1988 rad/s^2). Selain itu diperoleh *harvesting energy* paling tinggi di nomor tiga dengan tegangan sebesar 7.5452 volt serta daya bangkitan 8.9232 watt.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan dapat diperoleh saran untuk penelitian-penelitian selanjutnya antara lain:

1. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, disarankan untuk menganalisa *damping ratio* agar tidak terjadi *over damp* dalam mendesain *EMVA*.

DAFTAR PUSTAKA

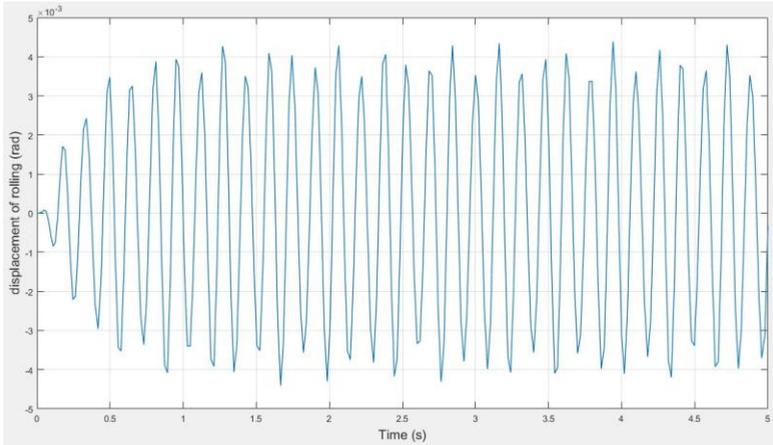
- [1] Danawan, F. I., 2017. **Pemodelan dan Analisa Reduksi Respon Getaran Translasi dan Rotasi pada Sistem Utama dan Energi Listrik yang Dibangkitkan Oleh Mekanisme Cantilever Piezoelectric Vibration Absorber (CPVA)**. Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institute Teknologi Sepuluh November, Surabaya.
- [2] Ersandi, C.S. and Susatio, Yerri. 2013. **Simulasi Aplikasi Dynamic Vibration Absorber Sebagai Peredam Getaran Pada Mesin Ignitor Cooling Fan Di PT. PJB UP Gresik**. Jurusan Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya
- [3] Fakhrudi, Y. A. 2016. **Studi Karakteristik Model Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut (PTLG) Tipe Pengungkit-Generator Linier dan Generator Rotari dengan Variasi Volume Pelampung**. *Master Thesis*.
- [4] Close, M., dkk. 2002, **Modelling and Analysis of Dynamics Systems, Third Edition**. Jhon Wiley and Sons, Inc.
- [5] Nugroho, W.B., dkk. 2014. **Kajian Teknis Gejala Magnetisasi pada Linier Generator untuk Alternatif Pembangkit Listrik**. Jurusan Teknik Sistem Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- [6] Rao, Singiresu S. 2011. **Mechanical Vibrations, Fifth Edition**. Upper Saddle River: Pearson Education, Inc.

- [7] Saha, C.R., dkk. 2006. **Optimization of an Electromagnetic Energy Harvesting Device.** Department of Electrical and Computer Science, University of Southampton, Southampton
- [8] Wong, W.O. 2006. **Optimal design of damped dynamic vibration absorber for vibration control of structure excited by ground motion.** Hongkong Polytechnic University, Hongkong
- [9] Pachpute, A.Z., Bawa, P,B. 2016. **Optimum Design of Damped Dynamic Vibration Absorber.** Imperial Journal of Interdisciplinary Research (IJIR).
- [10] Siregar, Houtman P. 2007. **Pengaruh Diameter Kawat Kumpanan Alat Penghemat Energi yang Berbasis Elektromagnetik Terhadap Kinerja Motor Diesel.** Institut Teknologi Indonesia, Jakarta

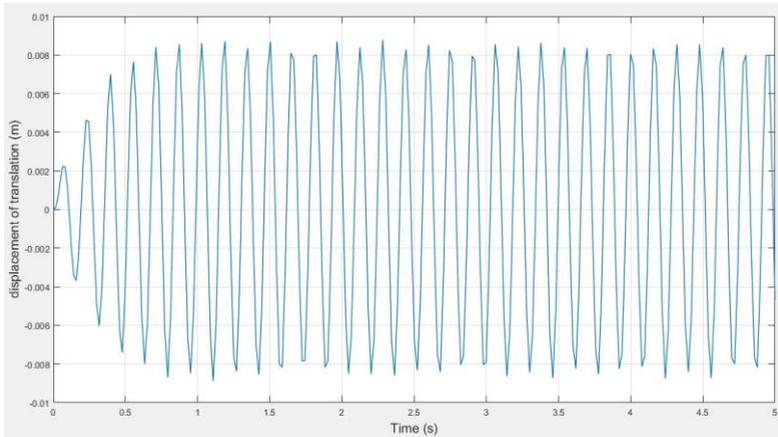
LAMPIRAN

EMVA di Titik Satu

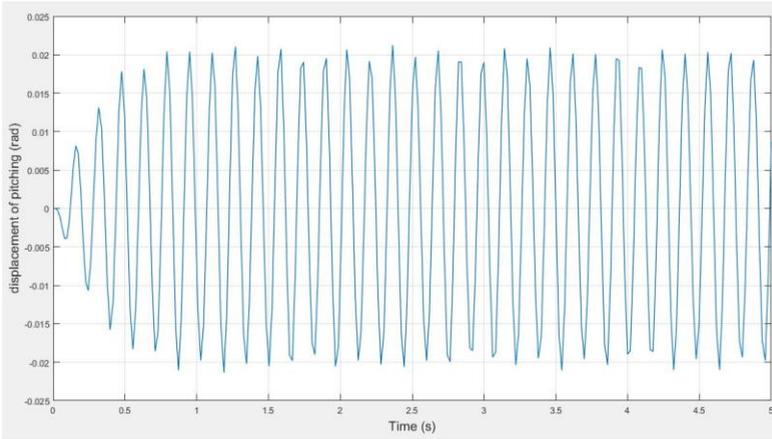
Translasi



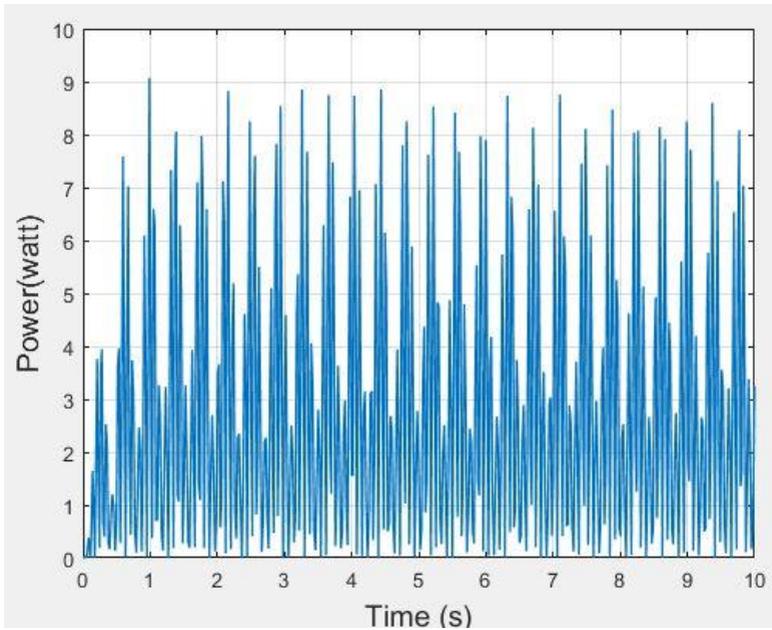
Rolling



Pitching

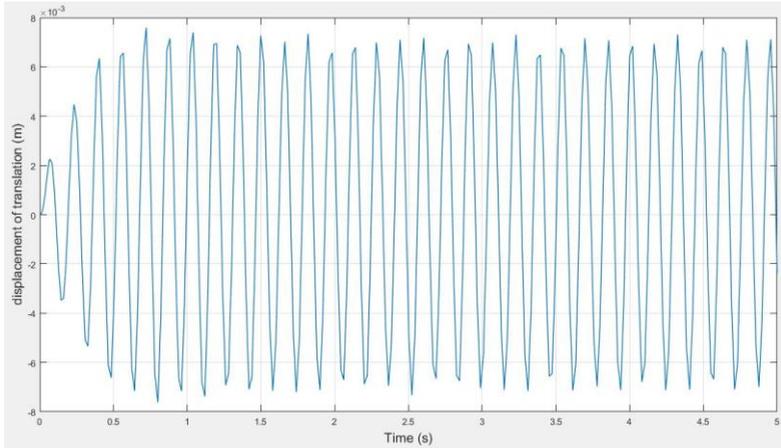


Power

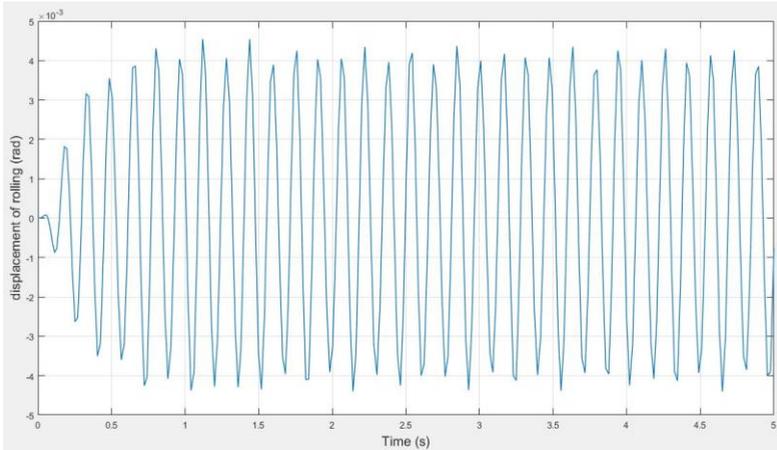


EMVA di Titik Dua

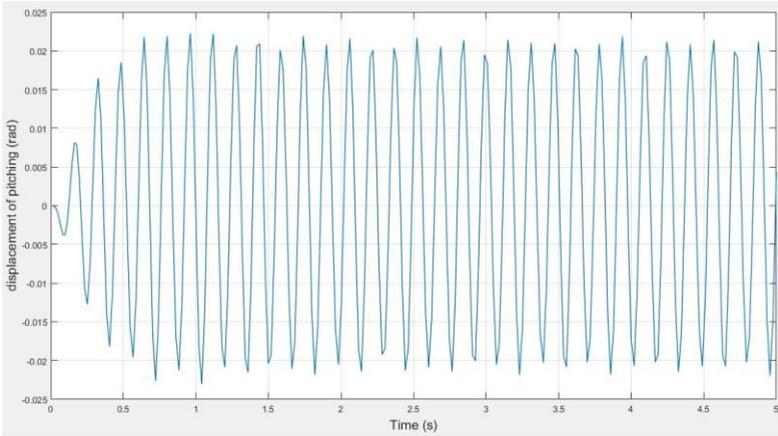
Translasi



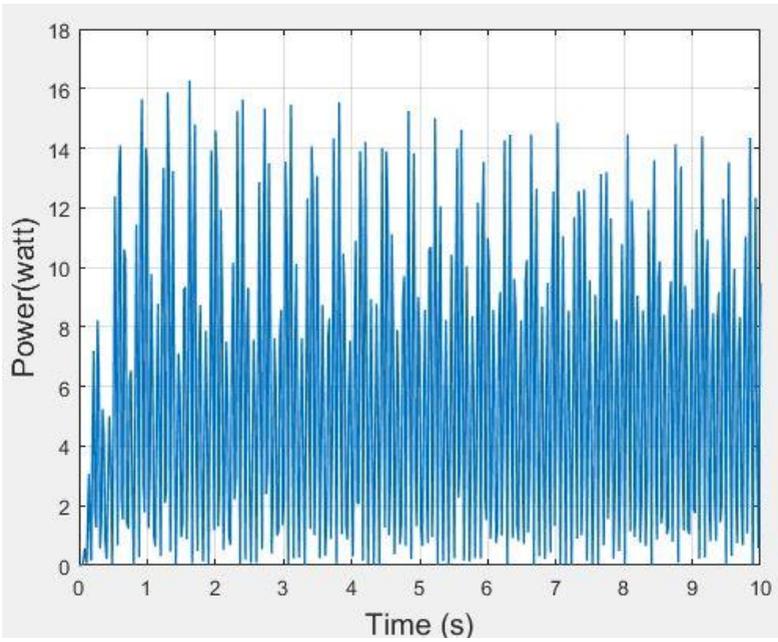
Rolling



Pitching

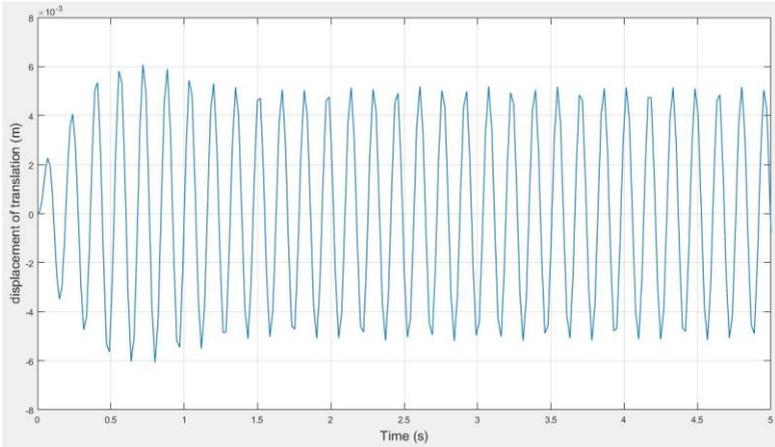


Power

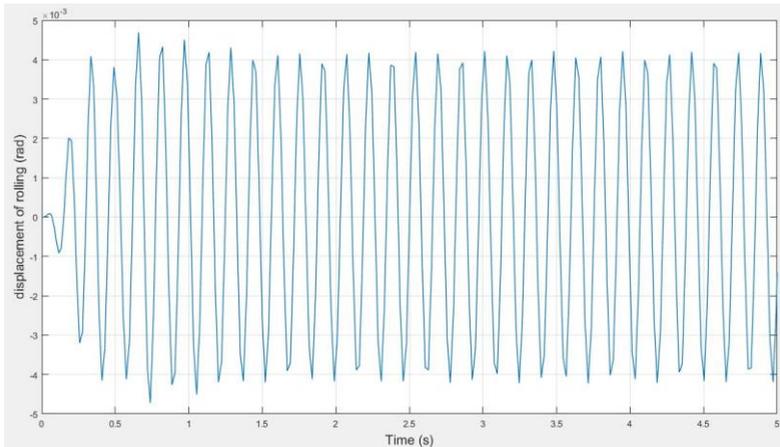


EMVA di Titik Tiga

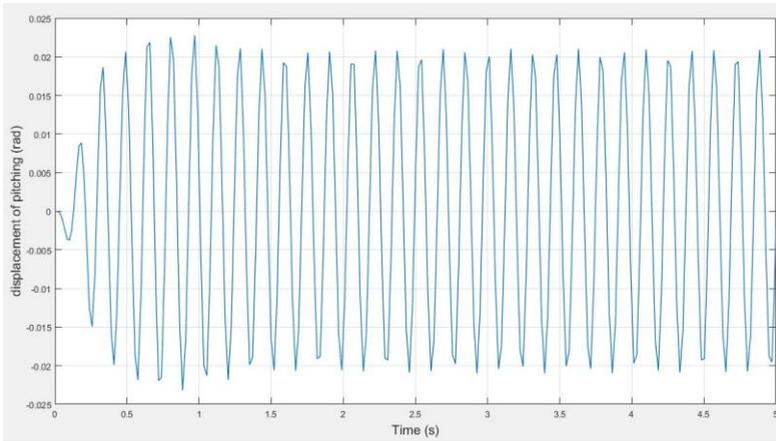
Translasi



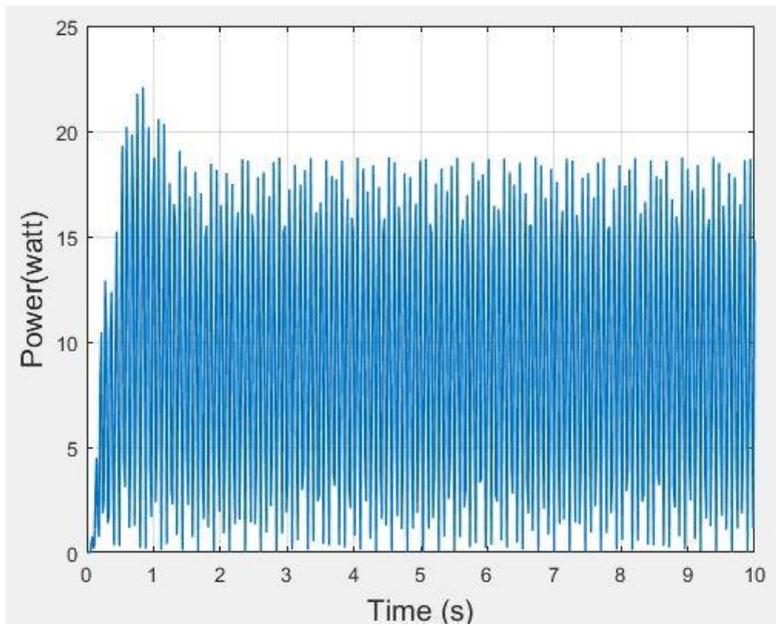
Rolling



Pitching

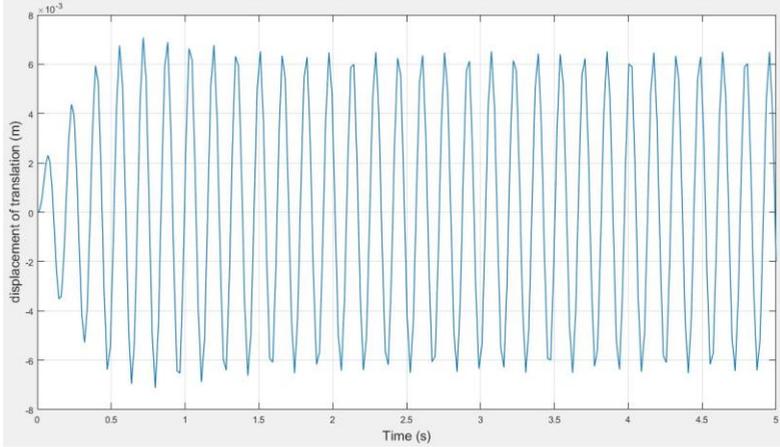


Power

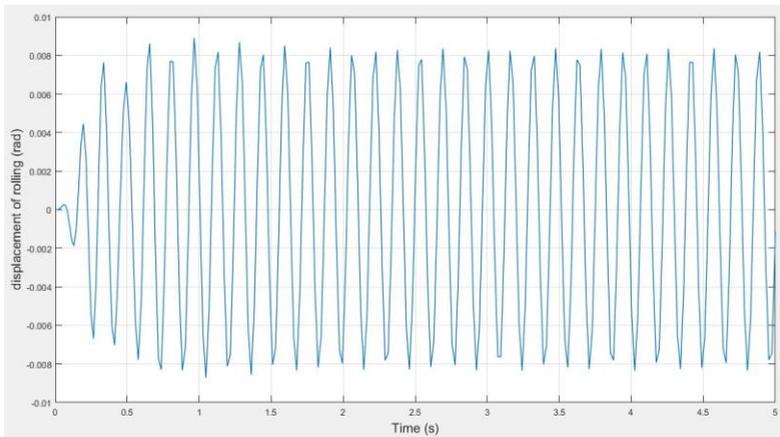


EMVA di Titik Empat

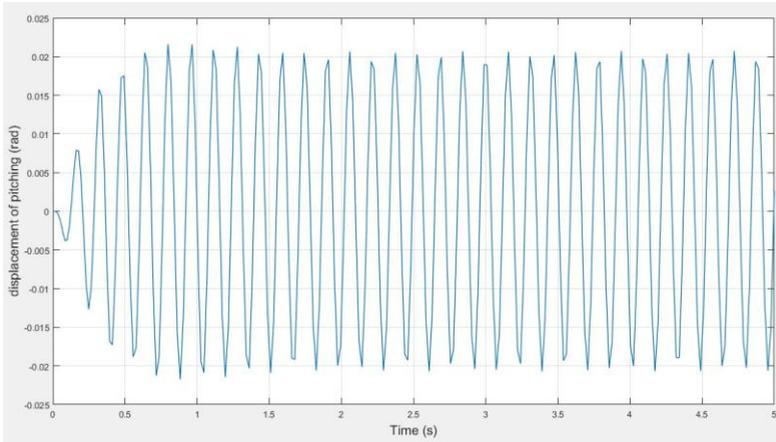
Translasi



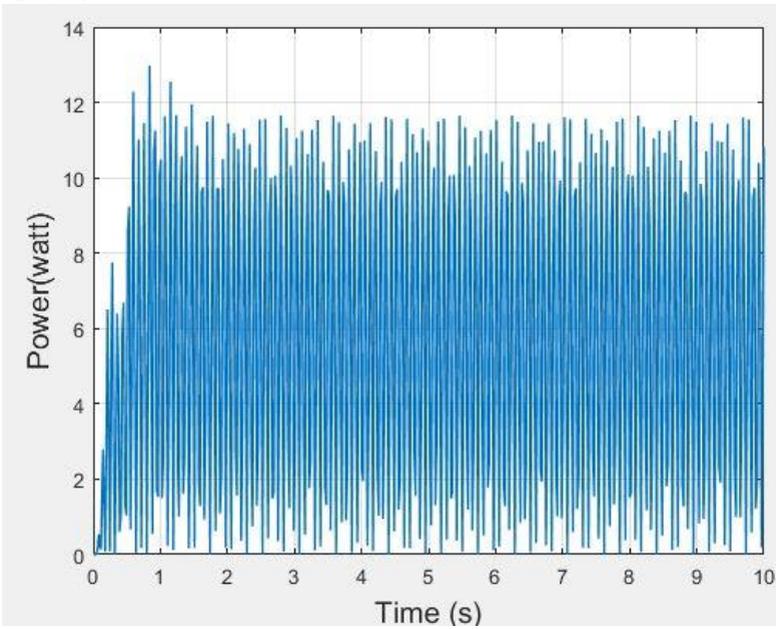
Rolling



Pitching

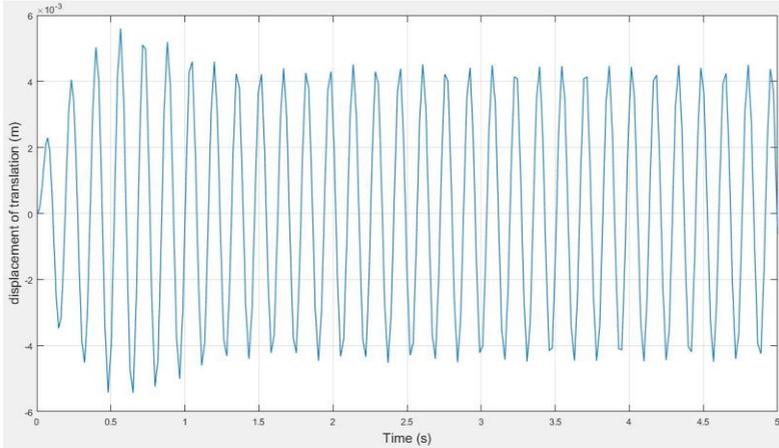


Power

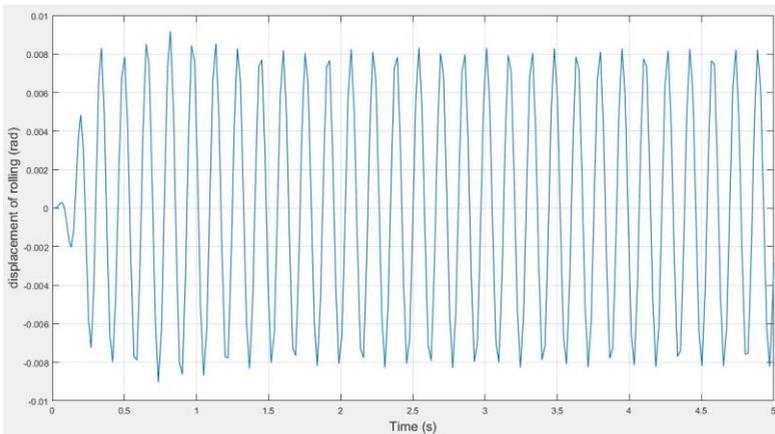


EMVA di Titik Lima

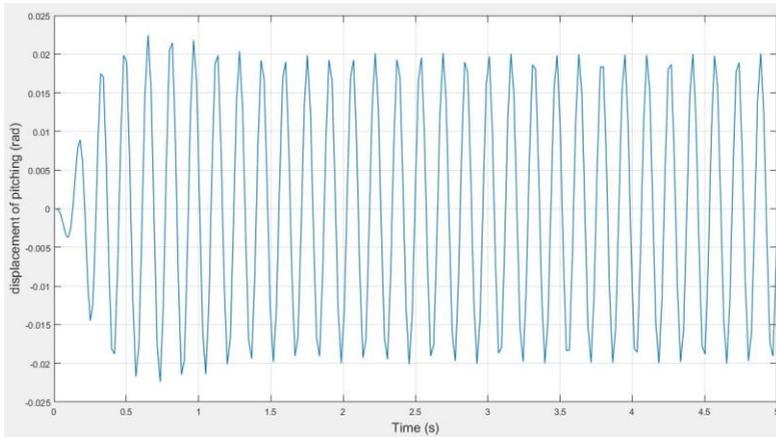
Translasi



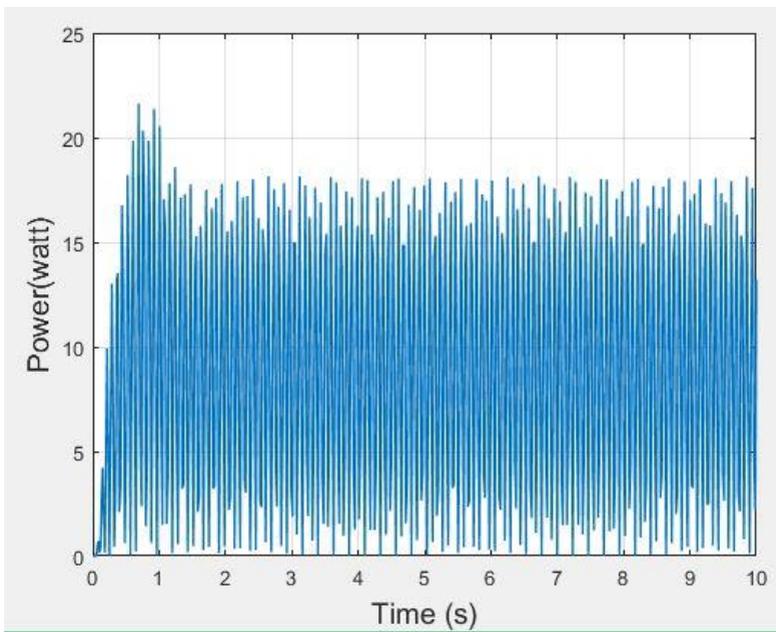
Rolling



Pitching

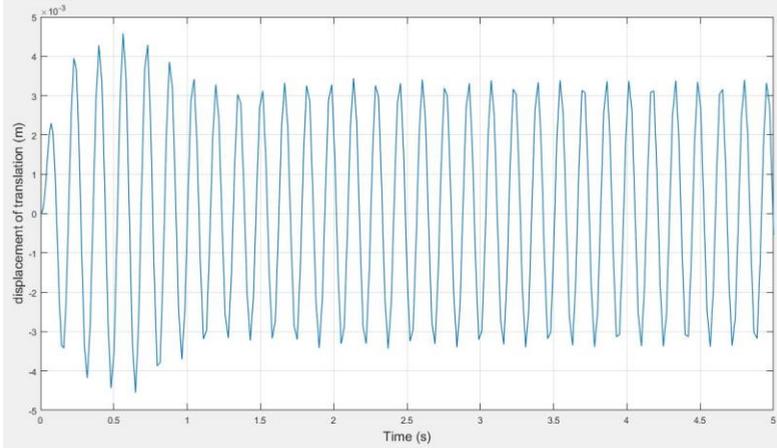


Power

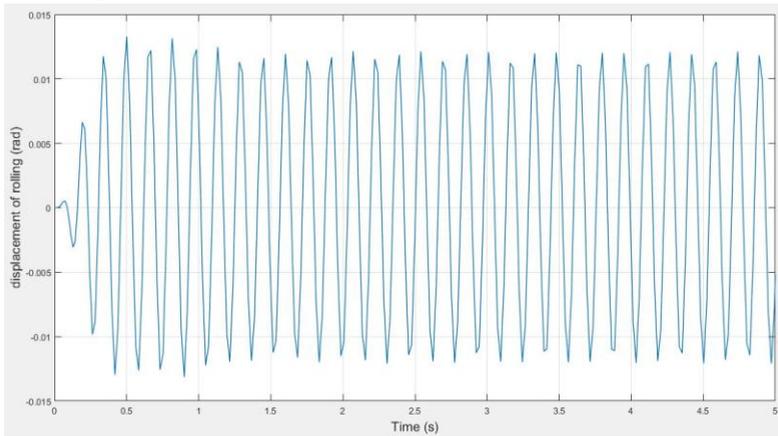


EMVA di Titik Enam

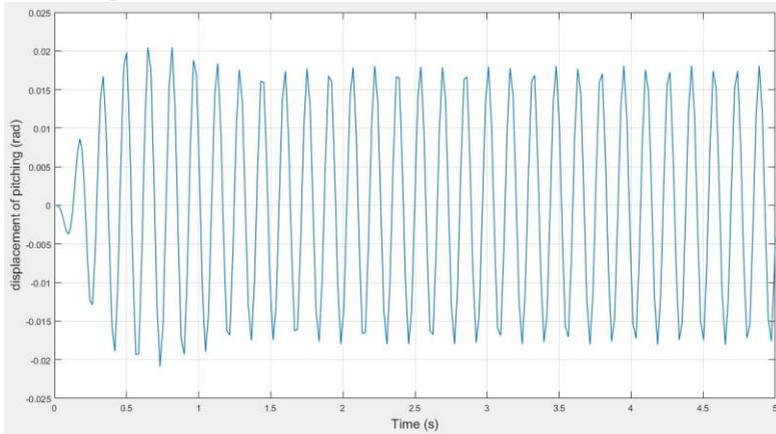
Translasi



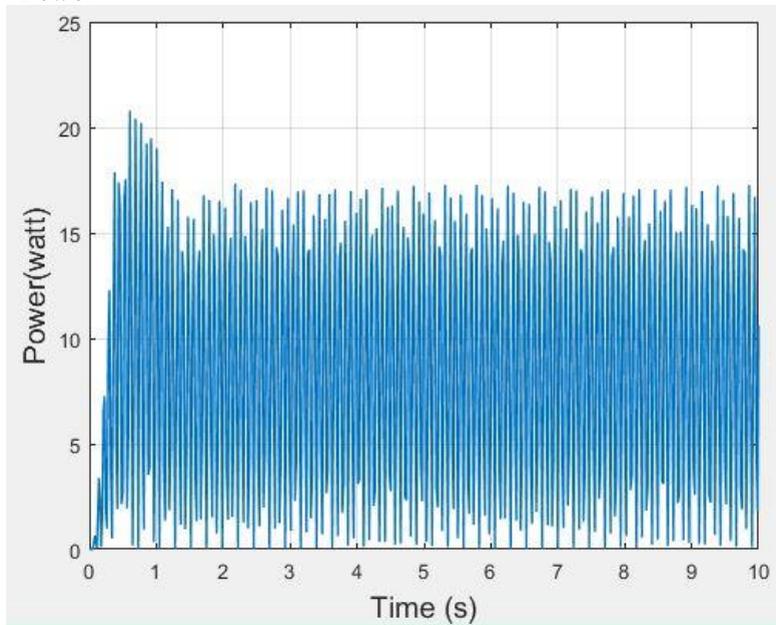
Rolling



Pitching



Power



BIODATA PENULIS



Firas Rahmad Hidayatullah atau biasa dipanggil Firas lahir di Jember 16 Nopember 1995. Penulis telah menempuh pendidikan formal di TK Dharma Wanita, SDN Sumberjati I, SMP Negeri 2 Jember, SMA Negeri 1 Jember. Kemudian penulis menempuh pendidikan S1 di Departemen Mesin ITS angkatan 2014, penulis mengambil bidang minat Desain. Penulis juga

mengikuti kegiatan organisasi yaitu sebagai Koordinator Bidang Internal UKM Bridge periode 2015-2016, Ketua UKM Bridge periode 2016-2017 dan Ketua Lembaga Minat Bakat periode 2017-2018. Selain aktif dalam organisasi penulis juga telah mengukir prestasi di berbagai ajang perlombaan dari bentuk akademis maupun non akademis, diantaranya Medali Emas PIMNAS 31 pada tahun 2017, Medali Perunggu Poster PIMNAS 2017, Juara I Rektor Cup UGM pada tahun 2016, dan Juara 3 Kejurnas Mahasiswa tahun 2016. Penulis juga aktif mengikuti kepanitiaan acara, seperti Gerigi 2015 dan Mechanical City 2014. Penulis memiliki pengalaman kerja praktek pada tahun 2017 di Pembangkit Jawa Bali Unit Gresik. Jika ingin memberikan saran, kritik, dan diskusi mengenai Laporan Tugas Akhir ini, bisa melalui email firas.rh@gmail.com

Semoga bermanfaat.