



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TM 141585

# PERANCANGAN ULANG *ELECTRODYNAMIC SHAKER* UNTUK PENGUJIAN DINAMIS SAMPEL PLAT KAP (*ENGINE HOOD*) MOBIL

ALVIBRIONASIS ASEPTIS DHENINTA  
NRP 2113 100 030

Dosen Pembimbing  
Dr. Harus Laksana Guntur, ST., M.Eng.

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







TUGAS AKHIR – TM141585

**PERANCANGAN ULANG *ELECTRODYNAMIC*  
*SHAKER* UNTUK PENGUJIAN DINAMIS SAMPEL  
PLAT KAP (*ENGINE HOOD*) MOBIL**

ALVIBRIONASIS ASEPTIS DHENINTA  
NRP. 2113100030

Dosen Pembimbing:  
Dr. Harus Laksana Guntur, ST., M.Eng.

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



FINAL PROJECT – TM141585

**REDESIGN ELECTRODYNAMIC SHAKER FOR  
DYNAMIC TESTING OF SAMPLE PLATE (ENGINE  
HOOD) CARS**

ALVIBRIONASIS ASEPTIS DHENINTA  
NRP. 2113100030

Advisory Lecturer  
Dr. Harus Laksana Guntur, ST., M.Eng.

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

**PERANCANGAN ULANG *ELECTRODYNAMIC*  
SHAKER UNTUK PENGUJIAN DINAMIS SAMPEL  
PLAT KAP (*ENGINE HOOD*) MOBIL**

**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 :

**ALVIBRIONASIS ASEPTIS DHENINTA**  
NRP. 2113 100 030

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Eng. Harus Laksana Guntur, S.T., M.Eng (Pembimbing)  
NIP. 197505111999031001
2. Dr. Wiwiek Hendrowati, S.T., M.T. (Penguji I)  
NIP. 197004121997032003
3. Moch. Solichin, S.T., M.T. (Penguji II)  
NIP. 198908172015041003
4. Aida Annisa Amin Daman, S.T., M.T. (Penguji III)  
NIP. 198907052015042005

**SURABAYA**

**NOVEMBER, 2017**

# **PERANCANGAN ULANG *ELECTRODYNAMIC SHAKER* UNTUK PENGUJIAN DINAMIS SAMPEL PLAT KAP (*ENGINE HOOD*) MOBIL**

**Nama Mahasiswa** : Alvibrionasis Aseptis Dheninta  
**NRP** : 2113100030  
**Jurusan** : Teknik Mesin FTI-ITS  
**Dosen Pembimbing** : Dr. Harus Laksana Guntur  
S.T., M. Eng.

## **Abstrak**

*Perkembangan dalam dunia industri khususnya di bidang Sains dan Teknologi memberikan banyak perubahan dalam kehidupan manusia salah satunya pada dunia otomotif dimana diketahui banyak sekali jenis dan tampilan mobil. Acuan pengembangan dalam suatu mobil ada pada bentuk bodinya, bentuk bodi yang aerodinamis dapat mengurangi hambatan aerodinamika dan mengoptimalkan kinerja mesin serta stabilitas kendaraan. Aspek aerodinamika ini sangat didukung dari bentuk bagian kap (engine hood) mobil yang merupakan bagian dari bodi mobil yang sangat menentukan besarnya gaya hambat karena letaknya yang berada di bagian depan. Selain karena gaya aerodinamis, interaksi mobil dan jalan dapat memicu terjadinya kegagalan pada bagian kap mobil seperti terjadi bending. Kegagalan tersebut dapat dihindari dengan melakukan analisa karakteristik dinamis pada bagian kap mobil dan dilakukan modal testing menggunakan electrodynamic shaker. Pemilihan electrodynamic shaker yang sesuai adalah hal sangat penting untuk mendapatkan data modal testing dengan akurasi tinggi.*

*Pada tugas akhir ini, dilakukan perancangan ulang electrodynamic shaker untuk mengetahui respon dinamis sampel plat kap mobil berdasarkan parameter dan karakteristik dinamis. Rancangan electrodynamic shaker yang dibuat, disesuaikan agar respon perpindahan yang diterima oleh sampel plat kap mobil*

*kurang dari atau sama dengan defleksi maksimum yang dapat diterima sampel plat kap saat ditinjau peak value-nya. Electrodynamic shaker yang dirancang memiliki sistem translasi dan simulasi dilakukan menggunakan input sinusoidal. Perancangan electrodynamic shaker yang digunakan, diutamakan pada fungsi atau fenomena dinamis, sehingga dalam tugas akhir ini akan dicari nilai konstanta stiffness dari electrodynamic shaker dan konstanta redaman yang sesuai untuk pengujian sampel plat kap dengan spesifikasi tertentu. Input arus yang digunakan adalah sebesar 12.5 A dengan frekuensi listrik sebesar 50Hz. Pada tugas akhir ini pula, dilakukan variasi nilai arus yaitu sebesar 7, 9 dan 11 A. Selain itu, variasi juga dilakukan pada material objek uji yakni menggunakan AISI Steel 1008 dan Aluminium 7075-0 dengan dimensi ukuran yang berbeda.*

*Dari analisa yang telah dilakukan, didapatkan ukuran tebal dari flexible support sebesar 0.00635 m (0.25 in) dengan nilai konstanta stiffness electrodynamic shaker sebesar 3500 N/m dimana material yang dipergunakan adalah jenis rubber. Besar nilai konstanta redaman yang didapatkan adalah sebesar 2356 Ns/m, dimana besar nilai redaman tersebut mewakili keseluruhan dari sistem electrodynamic shaker. Nilai redaman tersebut tidak hanya diakibatkan oleh nilai viscous damping yang ada pada gap antara moving element yang ditempati oleh coil dan magnet saja, namun juga adanya pengaruh dari redaman lain berupa dissipated energy yang berasal dari sistem listrik maupun mekanis.*

**Kata Kunci : *Electrodynamic Shaker, Engine Hood, Aerodinamis, Modal Analysis, Peak Value, Respon Dinamis***

# **REDESIGN ELECTRODYNAMIC SHAKER FOR DYNAMIC TESTING OF SAMPLE PLATE (ENGINE HOOD) CARS**

**Name** : Alvibrionasis Aseptis Dheninta  
**NRP** : 2113100030  
**Department** : Mechanical Engineering FTI-ITS  
**Advisory Lecturer** : Dr. Harus Laksana Guntur S.T.,  
M. Eng.

## ***Abstract***

*Developments in the industrialized world, especially in the fields of science and technology provides a lot of changes in people's lives, one of which on the automotive world by which is known a lot of types and appearance of the car. One of The reference of the development in a car is in the shape of the body, the shape of the bodywork's aerodynamics can reduce aerodynamics drag and optimize engine performance and vehicle stability. Aspects of aerodynamics is highly supported from forms part of the engine hood of the cars that are part of the car body which largely determine the magnitude of drag due to its location which is in the front of the car. In addition to aerodynamic interaction, The interaction of the car and the road could trigger the occurrence of failure on the hood of the car as going on bending. These failures can be avoided by performing a dynamic characteristic analysis on the hood of the car and carried out using electrodynamic shaker modal testing. The selection of electrodynamic shaker that fit is very important to get the data with high accuracy.*

*In this final task, redesign of electrodynamic shakers is happen to find out the dynamic response of a sample license plate car hood based on dynamic parameters and characteristics. The design of electrodynamic shakers are made to response displacement of plate samples received by the hood of the car is less than or equal to the maximum deflection of acceptable*

*sample plate hood when reviewed his peak value. The Designed Electrodynamic shaker is having translation system and simulation that using sinusoidal inputs. The design of electrodynamic shakers are used, preferably on a function or a dynamic phenomenon, so this final project will find for the value of the constant stiffness of electrodynamic shaker and damping constants corresponding to test sample plate hood with certain specifications. The current input used is A 12.5 with a frequency of 50 Hz electricity. in this final task, the current value variation done varies to 7, 9 and 11 A. In addition, the variations are also carried out on the test object using material AISI Steel and 1008 Aluminium 7075-0 with different size of dimensions.*

*From the analysis that has been performed, the obtained size thickness of flexible support of 0.00635 m (0.25 in) with an electrodynamic shaker stiffness constants of 3500 N/m where the material used is a type of rubber. The amount of damping constants obtained are of 2356 Ns/m, where the value represents the overall attenuation of electrodynamic shaker systems. The values of damping are not only caused by viscous damping value that exists in the gap between the moving element occupied by coil and magnet, but also there is the influence of other form of damping dissipated energy which comes from the electrical system as well as mechanical.*

***Keywords : Electrodynamic Shakers, Engine Hood, Aerodynamic, Modal Analysis, Peak Value, The Dynamic Response***

## KATA PENGANTAR

Syukur Alhamdulillah saya panjatkan kehadiran Allah SWT atas segala karunia-Nya, sehingga penulisan Tugas Akhir ini dapat diselesaikan dengan baik. Tugas Akhir ini merupakan persyaratan untuk memperoleh gelar sarjana teknik bidang studi Vibrasi dan Sistem Dinamis jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Penulis sangat menyadari bahwa keberhasilan penulisan Tugas Akhir ini tidak lepas dari dukungan dan bantuan dari berbagai pihak. Melalui kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu dan mendukung baik secara moril maupun materiil, antara lain :

1. Orang tua tercinta, Bapak Siswo Utomo dan Ibu Juminah, yang senantiasa memberi dukungan, semangat dan doa sehingga penulis mampu menyelesaikan perkuliahan di Teknik Mesin. Terimakasih karena telah menjadi bapak dan ibu terbaik bagi penulis.
2. Saudara penulis, Kakak Alvibrionasis Mayprafitra Rachmadhani dan Mba Leny Karmila yang selalu mendoakan dan memberi semangat penulis untuk segera menyelesaikan studinya.
3. Dr. Harus Laksana Guntur, S.T., M.Eng. selaku dosen pembimbing Tugas Akhir yang telah membimbing dan memberikan arahan yang bermanfaat dalam penulisan Tugas Akhir ini.
4. Dr. Wiwiek Hendrowati, S.T., M.T., Moch. Solichin, S.T., M.T., dan Aida Annisa A.D., ST., MT. selaku dosen penguji yang telah memberikan saran dan kritik yang bermanfaat kepada penulis tentang Tugas Akhir ini.
5. Alief Wikarta, ST., M.Sc.Eng. Ph.D., selaku dosen wali yang telah membimbing penulis selama empat tahun perkuliahan.

6. Sege nap dosen dan karyawan Jurusan Teknik Mesin FTI ITS, atas ilmu yang telah diberikan kepada penulis selama ini.
7. Achmad Achsin Fathoni Syarief, terimakasih telah mau menjadi tempat mengeluh, mau menemani dan memberikan semangat. Terimakasih bantuan dan kebahagiaan selama masa perkuliahan. Dijaga semangatnya, ditunggu kelulusannya.
8. Amelia Tivani, teman sekosan, teman satu laboratorium, teman satu departemen terbaik, terimakasih telah mau menjadi tempat curhat selama ini.
9. Fiky Nuzulla Darsono dan Devi Maharani Kosa, kelompok *Shaky-shaky* yang telah menjadi teman seperjuangan dalam mengerjakan *Electrodynamic Shaker* virtual dan menghadapi kebimbangan selama menyelesaikan Tugas Akhir ini.
10. Harus Kids, yaitu Fiky, Ami, Devi, Sarbo, Uwi, Mba Dian, Dewani Intan dan Abiyyu, yang selalu memberi bantuan, saling memberi dukungan dan canda tawa dalam menyelesaikan Tugas Akhir.
11. Dewani Intan, teman sisa-sisa seperjuangan Harus Kids yang mau menemani penulis dalam menyelesaikan sidang dan keseluruhan tanggung jawab setelahnya.
12. M56, angkatan terbaik yang telah menemani bersama-sama kehidupan di Kampus Teknik Mesin mulai dari maba hingga sekarang.
13. Teman-teman laboratorium Vibrasi dan Sistem Dinamis 2016-2017 semester genap serta teman-teman pejuan Wisuda 117.
14. Teman-teman Departemen Umum 2014-2015, Umum HOP (Fridam, Ami, Aldi, Anang, Ucha, Rozi, Shodiq, Nashir) telah menjadi teman departemen terbaik dan penuh cerita.

15. Ariyan Karlino, yang telah banyak mengajari penulis dalam mempelajari Inventor untuk menunjang pengerjaan Tugas Akhir.
16. Segenap Mahasiswa Teknik Mesin ITS yang memberikan banyak pembelajaran selama masa perkuliahan.
17. Semua pihak yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu, yang telah banyak membantu atas terselesainya Tugas Akhir ini.

Dengan segala keterbatasan kemampuan serta pengetahuan penulis, tidak menutup kemungkinan Tugas Akhir ini jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis bersedia menerima kritik dan saran dari berbagai pihak untuk penyempurnaan lebih lanjut. Semoga hasil penulisan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi semua pihak.

Surabaya, Januari 2017

Penulis

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b>	
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b>	
<b>ABSTRAK</b> .....	i
<b>ABSTRACT</b> .....	iii
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	v
<b>DAFTAR ISI</b> .....	ix
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xiii
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xvii

### BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Manfaat.....	4

### BAB II DASAR TEORI

2.1 Sistem Getaran Derajat Kebebasan (M-DOF).....	5
2.2 <i>Damping Constant of a Parallel Plates Separated by Viscous Fluid</i> .....	7
2.3 <i>Spring Constant of a Cantilever Beam</i> .....	9
2.4 Dasar <i>Electromechanic</i> .....	9
2.4.1 Konversi Energi <i>Electromechanic</i> .....	9
2.4.2 Penghubungan oleh Medan Magnet.....	10
2.5 Desain dan Konsep dari Alat Pengujian Respon Getaran dengan Menggunakan <i>Shaker</i> .....	15
2.5.1 Prosedur Pengujian Getaran.....	16
2.5.2 Sistem <i>Shaker (Electrodynamic Shaker)</i> .....	16
2.5.2.1 Deskripsi <i>Electrodynamic Shaker</i> .....	17
2.5.2.2 Karakteristik <i>Electrodynamic Shaker</i> .....	18
2.6 Konstruksi Bodi Mobil.....	20
2.6.1 Bahan Pembuatan Bodi Kendaraan.....	23
2.7 Kajian Penelitian Terdahulu.....	26

2.8 Referensi <i>Electrodynamic Shaker</i> Menurut Katalog .....	37
--	----

### **BAB III METODOLOGI**

3.1 Metode Penelitian .....	41
3.2 Penjelasan Diagram Alir Penelitian .....	44
3.2.1 Tahap Studi Literatur .....	44
3.2.2 Pemodelan Dinamis Rancangan <i>Electrodynamic Shaker</i> .....	44
3.2.3 Penentuan Persamaan Matematis Sistem <i>Electrodynamic Shaker</i> .....	48
3.2.4 Verifikasi Nilai Konstanta <i>Stiffness Electrodynamic Shaker</i> .....	52
3.2.5 Blok Diagram Persamaan Sistem Menggunakan MATLAB Simulink dengan Variasi Input .....	53
3.2.6 Penentuan Nilai Konstanta Redaman <i>Electrodynamic Shaker</i> .....	53
3.2.7 Simulasi Menggunakan MATLAB Simulink ....	54
3.2.8 Membuat Rancangan 3D <i>Electrodynamic Shaker</i> yang Sesuai dengan Nilai Parameter dan Analisa Grafik Respon Dinamis.....	54
3.2.9 Simulasi Menggunakan Input <i>Step</i> pada MATLAB Simulink dan Analisa Grafik Respon <i>Transient</i>	55
3.2.10 Simulasi Menggunakan Variasi Arus Listrik (i) pada MATLAB Simulink dan Analisa Grafik Respon Dinamis Sistem .....	55
3.2.11 Simulasi Menggunakan Variasi Jenis Material dan Dimensinya serta Analisa Grafik Respon Dinamis Sistem.....	55
3.3 Penjabaran Proses Simulasi pada MATLAB Simulink .	55
3.4 Parameter – Parameter pada Simulasi.....	59
3.4.1 Sampel Plat Kap Mobil .....	59
3.4.2 <i>Electrodynamic Shaker</i> .....	60

### **BAB IV PEMODELAN SISTEM**

4.1 <i>Design of Requirement</i> .....	63
--	----

4.2 Perancangan Sistem Utama <i>Electrodynamic Shaker</i> .....	64
4.2.1 Verifikasi dan Representasi Nilai Konstanta <i>Stiffness</i> pada Perancangan Sistem <i>Electrodynamic Shaker</i> .....	65
4.2.2 Penentuan Nilai Konstanta Redaman yang Sesuai Pengujian.....	69
4.2.2.1 Analisa Visualisasi Koefisien Redaman dalam Bentuk 3D .....	72
4.2.2.2 Hasil Akhir Rancangan <i>Electrodynamic Shaker</i> untuk Pengujian Sampel Plat Kap Mobil .....	74
4.3 Analisa Respon Dinamis untuk Simulasi Pengujian.....	76
4.3.1 Respon Input <i>Sinusoidal</i> .....	76
4.3.1.1 Hasil Simulasi dan Analisa Respon .....	77
4.3.2 Respon Input <i>Step</i> .....	80
4.3.2.1 Hasil Simulasi dan Analisa Respon .....	81
4.3.3 Respon Variasi .....	84
4.3.3.1 Respon Variasi Arus pada Input <i>Sinusoidal</i> ..	85
4.3.3.2 Respon Variasi Material dan Dimensi pada Input <i>Sinusoidal</i> .....	89
4.4 <i>Electrodynamic Shaker Final Design</i> .....	92

## **BAB V KESIMPULAN DAN SARAN**

5.1 Kesimpulan.....	95
5.2 Saran .....	96

DAFTAR PUSTAKA.....	xix
LAMPIRAN .....	xxi
BIODATA PENULIS.....	xxvi

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Sistem getaran multi derajat kebebasan <sup>[2]</sup> .....	5
Gambar 2.2	<i>Free body diagram</i> multi derajat kebebasan <sup>[2]</sup> .....	5
Gambar 2.3	<i>Hysterisis loop</i> untuk material yang elastis.....	7
Gambar 2.4	Plat paralel dengan fluida <i>viscous</i> diantaranya <sup>[2]</sup> ....	8
Gambar 2.5	(a) <i>Cantilever with end force</i> (b) <i>Equivalent spring</i> <sup>[2]</sup> .....	9
Gambar 2.6	Bagan konversi energi listrik menjadi mekanis <sup>[10]</sup> .....	10
Gambar 2.7	Gaya yang dihasilkan oleh aliran arus listrik di dalam medan magnet <sup>[10]</sup> .....	11
Gambar 2.8	Aturan kaidah tangan kanan untuk gaya pada sebuah konduktor .....	12
Gambar 2.9	Arah voltase bangkitan terhadap kecepatan konduktor dalam medan magnet <sup>[10]</sup> .....	13
Gambar 2.10	Aturan kaidah tangan kanan untuk voltase terinduksi pada konduktor yang bergerak <sup>[11]</sup> .....	14
Gambar 2.11	Representasi dari sistem <i>translational mechanical</i> ; (a) alur daya Elektrikal-Mekanikal, (b) alur daya Mekanikal-Elektrikal <sup>[11]</sup> .....	14
Gambar 2.12	Susunan dasar <i>electrodynamic shaker</i> <sup>[7]</sup> .....	18
Gambar 2.13	Karakteristik percepatan ideal <i>electrodynamic shaker</i> untuk arus konstan <sup>[6]</sup> .....	19
Gambar 2.14	<i>Assembly</i> kendaraan <sup>[8]</sup> .....	21
Gambar 2.15	Konstruksi <i>composite body</i> <sup>[8]</sup> .....	22
Gambar 2.16	Konstruksi Bodi Integral ( <i>Monocoque Body</i> ) <sup>[8]</sup> .....	23
Gambar 2.17	Klasifikasi bahan untuk kendaraan <sup>[8]</sup> .....	23
Gambar 2.18	Struktur permanen magnet <i>shaker</i> <sup>[4]</sup> .....	26
Gambar 2.19	Model <i>lumped parameter</i> untuk sebuah <i>electrodynamic shaker</i> <sup>[2]</sup> .....	27
Gambar 2.20	Hasil penelitian dan respon prediksi model pada frekuensi (a) 0,1 Hz (b) 1 Hz (c) 10 Hz <sup>[4]</sup> .....	29
Gambar 2.21	<i>Set up</i> penelitian dengan sistem <i>shell-disk</i> <sup>[3]</sup> .....	30

Gambar 2.22	Model <i>shell</i> , geometri sistem koordinat dan area perpindahan <sup>[3]</sup> .....	31
Gambar 2.23	Getaran pada <i>disk</i> , dengan percepatan maksimum (a) Eksperimen dan (b) Simulasi, dengan tingkat eksitasi $0,1V^{[3]}$ .....	32
Gambar 2.24	Efek dari tingkat eksitasi <sup>[3]</sup> .....	33
Gambar 2.25	<i>Shaker</i> jenis RMS SW3707 dan <i>power amplifier</i> TGD3000.....	34
Gambar 2.26	Hasil kontrol dengan $1\text{ Hz/s}$ , $c_f = 4$ , $N_p = 1$ . (Kiri) <i>Full Range</i> , (Kanan) pembesaran 10-100 Hz .....	35
Gambar 2.27	Hasil kontrol dengan $2\text{ Hz/s}$ , $c_f = 4$ , $N_p = 1$ . (Kiri) <i>Full Range</i> , (Kanan) pembesaran 10-100 Hz .....	36
Gambar 2.28	(Kiri) Model struktur satelit yang digunakan saat pengujian; (Kanan) Simulasi struktur satelit akibat beban <i>bending</i> .....	37
Gambar 2.29	Panduan dari katalog <i>Modal Shop</i> <sup>[12]</sup> .....	37
Gambar 2.30	Spesifikasi <i>modal exciter</i> tipe 2060E dan dimensinya.....	39
Gambar 3.1	Diagram alir penyelesaian tugas akhir .....	42
Gambar 3.2	Konstruksi dasar <i>electrodynamic shaker</i> .....	45
Gambar 3.3	(a) Model 3D rancangan <i>electrodynamic shaker</i> tanpa benda uji, (b) Keterangan gambar rancangan <i>electrodynamic shaker</i> untuk pengujian sampel plat kap mobil.....	46
Gambar 3.4	(a) Model sistematis rancangan <i>electrodynamic shaker</i> untuk pengujian sampel plat kap mobil (b) Model dinamis sampel plat kap mobil pada rancangan <i>electrodynamic shaker</i> .....	47
Gambar 3.5	<i>Free body diagram</i> dari <i>exciter</i> .....	48
Gambar 3.6	<i>Free body diagram</i> dari benda uji .....	50
Gambar 3.7	<i>Free body diagram</i> dari sistem elektrik yang digunakan pada <i>electrodynamic shaker</i> .....	51
Gambar 3.8	Diagram alir tahap simulasi sistem <i>electrodynamic shaker</i> .....	58

Gambar 3.9	Gambar teknik <i>electrodynamic shaker</i> tipe 2060E <sup>[12]</sup> .....	61
Gambar 4.1	Rancangan <i>electrodynamic shaker</i> yang digunakan untuk pengujian sampel plat kap mobil.....	65
Gambar 4.2	Rancangan dimensi <i>flexible support</i> .....	66
Gambar 4.3	Hasil simulasi pada percobaan untuk penentuan tebal <i>flexible support</i> dengan variasi tebal, (a) 0.00254 m, (b) 0.00381 m, (c) 0.00508 m, (d) 0.00635 m, (e) 0.00762 m .....	69
Gambar 4.4	Respon dinamis perpindahan sampel plat kap mobil .....	72
Gambar 4.5	Hasil rancangan dimensi <i>electrodynamic shaker</i> .....	73
Gambar 4.6	(a) Gambar potongan <i>electrodynamic shaker</i> ; (b) <i>Flexible support</i> ; (c) Benda uji (sampel plat kap mobil); (d) Gambar 2D serta dimensi; (e) Keterangan bagian penyusun dari rancangan <i>Electrodynamic Shaker</i> untuk pengujian sampel plat kap mobil.....	76
Gambar 4.7	Blok Diagram Simulasi sistem utama dengan Input <i>Sinusoidal</i> .....	78
Gambar 4.8	Grafik respon dinamis (a) gaya eksitasi, (b) percepatan <i>shaker</i> , (c) percepatan plat, (d) kecepatan <i>shaker</i> , (e) kecepatan plat, (f) perpindaham <i>shaker</i> , (g) perpindahan plat dengan input <i>sinusoidal</i> .....	79
Gambar 4.9	Blok Diagram Simulasi sistem utama dengan Input <i>Step</i> .....	81
Gambar 4.10	Grafik respon dinamis (a) gaya eksitasi, (b) percepatan <i>shaker</i> , (c) percepatan plat, (d) kecepatan <i>shaker</i> , (e) kecepatan plat, (f) perpindaham <i>shaker</i> , (g) perpindahan plat dengan input <i>step</i> .....	83
Gambar 4.11	Grafik respon dinamis (a) gaya eksitasi, (b) percepatan <i>shaker</i> , (c) percepatan plat, (d) kecepatan <i>shaker</i> , (e) kecepatan plat, (f) .....	

	perpindaham <i>shaker</i> , (g) perpindahan plat dengan input <i>sinusoidal</i> pada variasi arus sebesar 7A, 9A dan 11A .....	86
Gambar 4.12	Grafik nilai <i>peak</i> dari tiap respon dengan variasi arus .....	87
Gambar 4.13	Grafik respon dinamis (a) gaya eksitasi, (b) percepatan <i>shaker</i> , (c) percepatan plat, (d) kecepatan <i>shaker</i> , (e) kecepatan plat, (f) perpindaham <i>shaker</i> , (g) perpindahan plat dengan input <i>sinusoidal</i> pada variasi material dan dimensi plat uji.....	90
Gambar 4.14	Grafik besar <i>Peak Value</i> terhadap respon dinamis dengan variasi material dan dimensi plat uji .....	91
Gambar 4.15	Rancangan akhir dari <i>electrodynamic shaker</i> (a) dengan keterangan, (b) tampak atas .....	93

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Hubungan antara elemen elektris dan mekanis <sup>[4]</sup> .....	27
Tabel 2.2	Parameter model yang didapatkan dari hasil penelitian <sup>[4]</sup> .....	28
Tabel 2.3	Parameter <i>shaker</i> <sup>[3]</sup> .....	31
Tabel 2.4	Parameter <i>shell-disk</i> <sup>[3]</sup> .....	32
Tabel 2.5	Identifikasi nilai model parameter .....	35
Tabel 2.6	Spesifikasi <i>shaker</i> dengan tipe 2060E <sup>[12]</sup> .....	38
Tabel 3.1	Parameter sampel plat kap mobil .....	59
Tabel 3.2	Parameter <i>electrodynamic shaker</i> yang digunakan dalam perhitungan .....	60
Tabel 4.1	Data hasil simulasi nilai koefisien redaman <i>electrodynamic shaker</i> pada Simulink .....	72
Tabel 4.2	Data hasil respon sistem <i>electrodynamic shaker</i> dengan input <i>sinusoidal</i> .....	79
Tabel 4.3	Data hasil respon sistem <i>electrodynamic shaker</i> dengan input <i>step</i> .....	83
Tabel 4.4	Data hasil respon sistem <i>electrodynamic shaker</i> dengan variasi arus .....	87
Tabel 4.5	Data hasil respon sistem <i>electrodynamic shaker</i> dengan variasi material dan dimensi plat uji .....	90

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Perkembangan dalam dunia industri khususnya di bidang Sains dan Teknologi memberikan banyak perubahan dalam kehidupan manusia saat ini. Perkembangan yang terlihat sangat pesat yaitu dalam dunia otomotif, dimana dapat diamati banyak sekali jenis dan bentuk tampilan mobil. Salah satu acuan pengembangan suatu mobil adalah pada bentuk bodi. Bentuk bodi yang aerodinamis dapat mengurangi hambatan aerodinamika sehingga dapat mengoptimalkan tenaga mesin untuk menjadi gaya dorong pada kendaraan serta menjaga stabilitas kendaraan, oleh karena itu tinjauan mengenai aerodinamika menjadi aspek penting yang harus diperhatikan pada mobil. Umumnya susunan bodi pada kendaraan tersusun dari berbagai macam bagian dan berkesinambungan satu sama lain, seperti halnya bagian kap mobil. Bagian kap mobil ini merupakan salah satu *part* bodi yang mempunyai pengaruh lebih pada satu kesatuan bodi karena letaknya yang berada dibagian depan. Desain dari bagian kap mobil merupakan bagian bodi mobil yang sangat menentukan besarnya gaya aerodinamis, dimana desainnya harus dijaga pada kondisi tertentu agar gaya aerodinamis yang mengenai bagian tersebut dapat dialirkan dengan baik sampai ke bagian belakang<sup>[13]</sup>. Selain dipengaruhi gaya aerodinamis, interaksi antara mobil dengan jalan memicu terjadinya kegagalan pada bagian kap mobil, seperti terjadinya *bending* akibat tidak dapat menahan kondisi kontur jalan yang bermacam-macam. Hal tersebut dapat dihindari dengan melakukan analisa karakteristik dinamis pada bagian kap mobil, guna mengetahui berapa besar beban maksimal yang dapat dikenakan. Untuk melakukan analisa tersebut, maka perlu dilakukan *modal testing* menggunakan *electrodynamic shaker* pada bagian plat kap mobil. Selanjutnya agar didapatkan akurasi yang tepat dari karakteristik dinamis plat

yang digunakan, perlu dilakukan pemilihan jenis *shaker* secara spesifik.

*Electrodynamic shaker* adalah alat yang digunakan untuk melakukan uji getaran, berfungsi untuk mengetahui respon dinamis dari suatu benda uji yang dikenakan beban terhadapnya. *Output* dari sistem *electrodynamic shaker* ini berupa gaya dinamis yang nantinya akan menghasilkan respon dinamis dari objek uji. Sehingga, dapat diketahui efek adanya pembebanan yang terjadi terhadap struktur objek uji dan modal parameter yang berupa *mode shape*, faktor redaman serta frekuensi natural. Adapun, *mode shape* merupakan suatu bentuk struktur tertentu ketika bergetar pada frekuensi natural.

Berdasarkan hal yang telah diuraikan di atas, perlu dilakukan analisa lebih lanjut yaitu mengenai bagaimana melakukan perancangan ulang *electrodynamic shaker* yang khusus untuk pengujian plat kap mobil berdasarkan parameter dan karakteristik dinamisnya agar dapat diketahui respon dari objek yang diuji terhadap beban yang dikenakan. *Electrodynamic shaker* yang akan dirancang memiliki sistem translasi, dimana merupakan sistem yang cukup sederhana namun mampu memenuhi kriteria untuk pengujian *modal analysis*. Dengan sistem yang cukup sederhana tersebut, diharapkan alat ini mampu dan mudah untuk dapat direalisasikan serta tidak memakan banyak biaya dalam proses pembuatannya. Adapun, rancangan *electrodynamic shaker* tersebut memiliki besar gaya yang dapat merepresentasikan beban yang diterima oleh kap mobil.

## 1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dari tugas akhir berikut adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana desain atau rancangan dari *electrodynamic shaker* yang digunakan untuk pengujian sampel plat kap mobil ?
2. Bagaimana karakteristik dinamis dari rancangan *electrodynamic shaker* yang dirancang ?

3. Bagaimana respon *transient* dari *electrodynamic shaker* yang telah dirancang ?
4. Bagaimana pengaruh perubahan variabel kuat arus listrik (I) pada sistem elektris *electrodynamic shaker* terhadap respon dinamis *electrodynamic shaker* yang telah dirancang ?
5. Bagaimana pengaruh variasi material uji dan dimensinya terhadap respon dinamis *electrodynamic shaker* yang dirancang ?

### 1.3 Tujuan

Adapun tujuan dari tugas akhir berikut adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui bagaimana mendesain atau merancang *electrodynamic shaker* yang digunakan untuk pengujian sampel plat kap mobil.
2. Mengetahui bagaimana karakteristik dinamis dari rancangan *electrodynamic shaker* yang dirancang.
3. Mengetahui bagaimana respon *transient* dari *electrodynamic shaker* yang telah dirancang.
4. Mengetahui bagaimana pengaruh perubahan variabel kuat arus listrik (i) pada sistem elektris *electrodynamic shaker* terhadap respon dinamis *electrodynamic shaker* yang telah dirancang.
5. Mengetahui bagaimana pengaruh variasi material uji dan dimensinya terhadap respon dinamis *electrodynamic shaker* yang dirancang.

### 1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dari tugas akhir berikut adalah sebagai berikut :

1. Plat kendaraan yang digunakan selama simulasi adalah plat bagian kap, yang dianggap memiliki orientasi gerak pembebanan yang sama dengan sistem *electrodynamic shaker* yang digunakan dan yang digunakan hanyalah sampel platnya saja.

2. Plat uji dianggap sebagai massa batang yang memiliki panjang dan luasan.
3. Parameter untuk plat uji diperoleh dari jurnal.
4. Parameter untuk dimensi yang berhubungan dengan *electrodynamic shaker* yang digunakan, diperoleh dari jurnal dan katalog.
5. Perancangan sistem *electrodynamic shaker* diutamakan pada fungsi atau fenomena dinamis.
6. Magnet yang digunakan pada *electrodynamic shaker* merupakan jenis permanen magnet agar medan magnet yang dihasilkan konstan.
7. Nilai parameter elektris dapat ditentukan berdasarkan katalog dengan asumsi nilai induktansi listrik (L) dari kumparan dianggap kecil sekali (mendekati nol) sehingga tidak signifikan dan dapat diabaikan.
8. Input yang digunakan dalam simulasi yaitu berupa input *sinusoidal* dan *step*.

### **1.5 Manfaat**

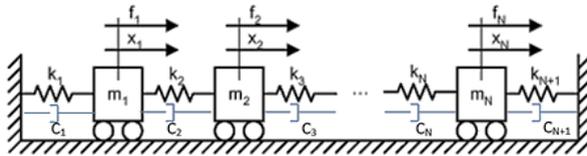
Adapun manfaat dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Memberikan informasi dan dapat dijadikan sebagai dasar acuan pengembangan rancangan *electrodynamic shaker* untuk pengujian terhadap plat kap mobil.
2. Memberikan informasi terkait langkah rancangan dan tahapan analisa dalam proses perancangan *electrodynamic shaker* yang digunakan untuk pengujian objek uji yang mempunyai spesifikasi serupa.

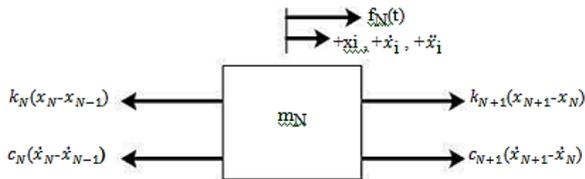
## BAB II DASAR TEORI

### 2.1. Sistem Getaran Multi Derajat Kebebasan (M-DOF)

Sistem getaran mesin dengan multi derajat kebebasan (M-DOF) adalah sistem yang digunakan untuk menentukan kedudukan massa dalam ruang yang membutuhkan banyak ( $n$ ) arah koordinat bebas. Selain getaran alami sistem, sistem juga dapat menerima getaran paksa yang disebabkan karena adanya gaya eksternal yang mengenai sistem dan dinamakan *forced vibration*. Sistem getaran tersebut dapat digambarkan seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.1<sup>[2]</sup>.



Gambar 2.1 Sistem getaran multi derajat kebebasan<sup>[2]</sup>



Gambar 2.2 *Free body diagram* multi derajat kebebasan<sup>[2]</sup>

Untuk analisa *free body diagram* multi derajat kebebasan dapat dilihat pada gambar 2.2 dan persamaan gerak dari sistem diatas untuk massa  $m_N$  dapat disederhanakan menjadi :

$$m_N \ddot{x}_N - c_N \dot{x}_{N-1} + (c_N + c_{N+1}) \dot{x}_N - C_{N+1} \dot{x}_{N+1} - k_N x_{N-1} + (k_N + k_{N+1}) x_N - k_{N+1} x_{N+1} = F_N(t) \quad (2.1)$$

Persamaan (2.1) dapat digambarkan dengan metode matriks sehingga didapatkan

$$[M]\ddot{x} + [C]\dot{x} + [K]x = \{F\} \quad (2.2)$$

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

$$[m] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & m_N \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

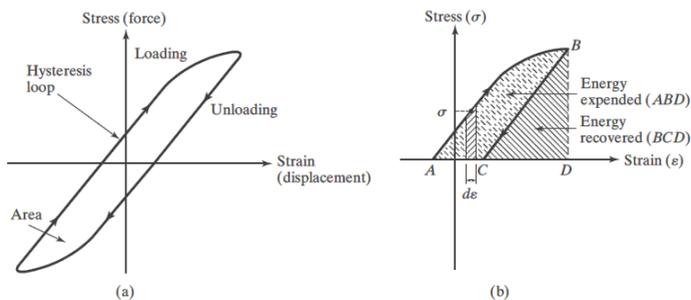
$$[c] = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -c_3 & c_3 + c_4 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -c_N & (c_N + c_{N+1}) \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$[k] = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -k_3 & k_3 + k_4 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -k_N & (k_N + k_{N+1}) \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

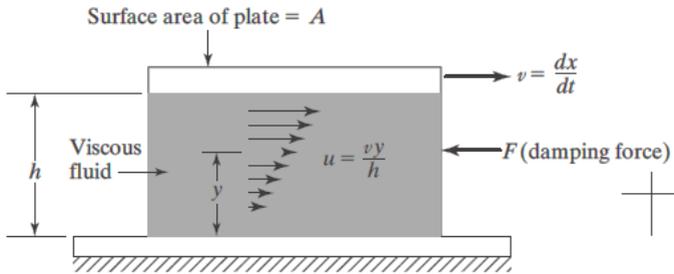
## 2.2 Damping Constant of a Parallel Plates Separated by Viscous Fluid

*Viscous damping* adalah suatu jenis mekanisme redaman yang paling umum digunakan dalam proses analisa getaran. Ketika sistem mekanis bergetar pada suatu media fluida seperti udara, gas, air, atau oli, nilai resistansi yang dihasilkan oleh fluida terhadap benda yang bergerak menyebabkan energi disipasi (dihamburkan). Pada kasus ini, jumlah energi yang terdisipasi bergantung pada banyak faktor seperti, ukuran dan bentuk dari benda yang bergetar, viskositas dari fluida, frekuensi getaran dan kecepatan getar dari benda. Pada *viscous damping*, gaya redam sebanding dengan kecepatan getar dari benda. Contoh yang khas dari *viscous damping* termasuk (1) Lapisan fluida yang ada diantara permukaan yang bergeser, (2) Aliran fluida disekitar piston dalam sebuah silinder, (3) Aliran fluida mengalir melalui suatu *orifice* (lubang) dan (4) Lapisan fluida disekitar *journal bearing*<sup>[2]</sup>.

Konstruksi dari *viscous damping* dapat dibuat dalam beberapa cara, seperti contohnya ketika suatu plat bergerak relatif terhadap plat paralel lain dengan fluida *viscous* diantara palt tersebut, menyebabkan *viscous damper* didapatkan.



Gambar 2.3 *Hysterisis loop* untuk material yang elastis<sup>[2]</sup>



Gambar 2.4 Plat paralel dengan fluida *viscous* diantaranya<sup>[2]</sup>

Seperti pada gambar 2.4 tersebut, diketahui bahwa satu plat terpasang fix dengan kondisi tetap tidak bergerak dan plat yang lain dapat bergerak dengan kecepatan  $v$  pada bidangnya sendiri. Kecepatan dari lapisan fluida yang menengah dapat diasumsikan bervariasi secara linier antara 0 dan  $v$ , seperti pada gambar 2.4. Menurut hukum Newton mengenai aliran *viscous*, tegangan geser ( $\tau$ ) dapat dihitung menggunakan rumusan

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (2.6)$$

Dimana  $du/dy = v/h$  adalah gradien kecepatan. Gaya geser atau gaya resistif yang dapat timbul karena plat yang bergerak mempunyai suatu rumusan yaitu

$$F = \tau A = \frac{\mu A v}{h} \quad (2.7)$$

Dimana  $A$  adalah luas permukaan plat yang bergerak. Dengan mengekspresikan  $F$  sebagai

$$F = c v \quad (2.8)$$

Sehingga nilai konstanta redaman  $c$  didapatkan

$$c = \frac{\mu A}{h} \quad (2.9)$$

### 2.3 Spring Constant of a Cantilever Beam

Untuk menyederhanakan sistem, dilakukan asumsi bahwa massa *beam* (balok) diabaikan dan beban (F) terkonsentrasi adalah gaya berat pada pusat massa ( $W = mg$ ). Dari kekuatan bahan, defleksi dari beam karena beban  $F=W$  dapat dirumuskan :

$$\delta = \frac{Wl^3}{3EI} \quad (2.10)$$

Dimana :

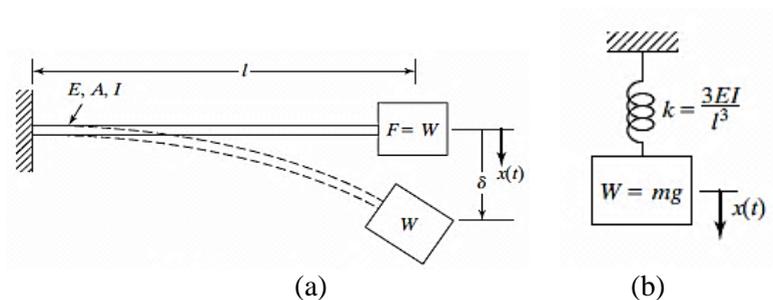
$\delta$  = Defleksi yang terjadi

E = Modulus *Young's*

I = *Moment of inertia of the cross section of the beam*

Sehingga, *spring constant* dari *cantilever beam* dapat dirumuskan <sup>[2]</sup> :

$$W = \frac{W}{\delta} = \frac{3EI}{l^3} \quad (2.11)$$



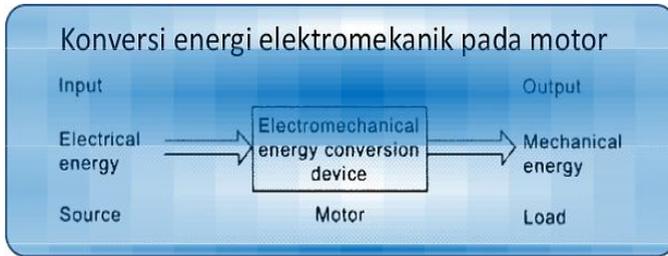
Gambar 2.5 (a) *Cantilever with end force* (b) *Equivalent spring*<sup>[2]</sup>

## 2.4 Dasar *Electromechanic*

### 2.4.1 Konversi Energi *Electromechanic*

Konversi energi listrik menjadi energi mekanik (motor) dan sebaliknya dari energi mekanik menjadi energi listrik (generator) berlangsung melalui medium medan magnet. Energi yang akan diubah dari satu sistem ke sistem lain, sementara akan tersimpan

pada medium medan magnet untuk kemudian dilepaskan menjadi sumber energi. Dengan demikian, medan magnet di sini selain berfungsi sebagai tempat penyimpanan energi juga sekaligus sebagai medium untuk mengkopel proses perubahan energi.



Gambar 2.6 Bagan konversi energi listrik menjadi mekanis<sup>[10]</sup>

#### 2.4.2 Penghubungan oleh Medan Magnet

Mayoritas perangkat *electromechanical* mengandung kabel-kabel yang mengalirkan arus dan dapat berpindah-pindah disekitar medan magnet. Pada hukum-hukum fisika yang menentukan *electromechanical coupling* dengan tipe tersebut menyatakan: (1) Sebuah kabel berarus yang terdapat didalam medan magnet akan mempunyai sebuah gaya yang diberikan padanya, dan (2) Sebuah tegangan akan diinduksi ke kabel yang bergerak relatif terhadap medan magnet. Variabel-variabel yang dibutuhkan dalam pemodelan tersebut adalah sebagai berikut :

$f_e$ , gaya pada konduktor (N)

$v$ , kecepatan konduktor terhadap medan magnet (m/s)

$l$ , panjang konduktor dalam medan magnet (m)

$\Phi$ , flux magnet (Wb)

$B$ , densitas flux dalam medan magnet (Wb/m<sup>2</sup>)

$i$ , arus dalam konduktor (A)

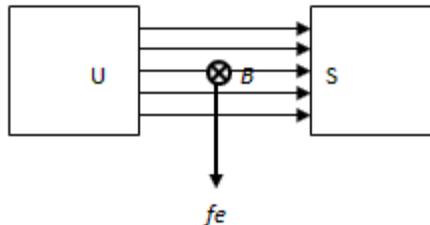
$em$ , arus yang diinduksikan dalam konduktor (V)

Variabel-variabel tersebut adalah dalam satuan skalar. Namun, untuk kasus umum akan diberikan empat buah satuan berikut sebagai vektor yaitu  $fe$ ,  $v$ ,  $l$ , dan  $B$ . Gaya pada sebuah konduktor dalam panjang yang terdiferensial  $dl$  membawa arus  $i$  dalam sebuah medan magnet dengan densitas flux  $B$  adalah:

$$dfe = i(dl \times B) \quad (2.12)$$

*cross* pada (2.12) menyatakan produk vektor *cross*. Untuk mendapatkan total gaya listrik yang diinduksikan  $fe$ , persamaan (2.12) harus diintegrasikan sepanjang konduktor. Dalam pengaplikasiannya, kabel-kabel tersebut dapat berupa sebuah konduktor lurus yang tegak lurus terhadap medan magnet *unidirectional* atau konduktor melingkar dalam medan magnet radial. Dalam kasus lain, panjang yang terdiferensial  $dl$  akan tegak lurus terhadap *uniform flux density*  $B$ , dan kemudian (2.12) akan disederhanakan menjadi hubungan skalar seperti berikut:

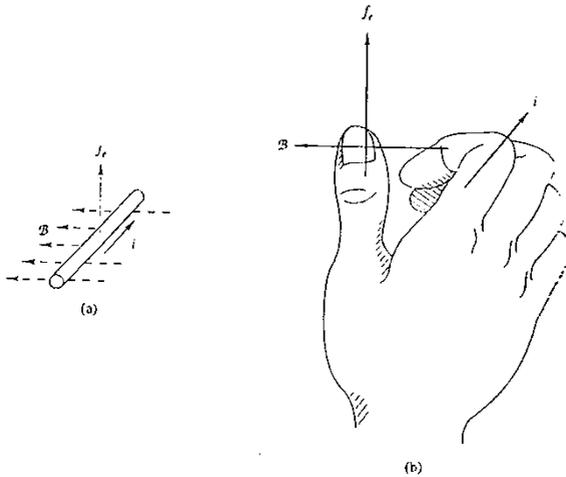
$$fe = B l i \quad (2.13)$$



Gambar 2.7 Gaya yang dihasilkan oleh aliran arus listrik di dalam medan magnet<sup>[10]</sup>

dimana arah gaya adalah tegak lurus terhadap kabel dan medan magnet. Hal tersebut dapat ditemukan pada aturan kaidah tangan kanan seperti pada Gambar 2.13 dimana jari telunjuk menunjukkan arah positif arus ( $i$ ), jari sisanya yang berbelok menunjukkan arah positif medan magnet ( $B$ ), dan ibu jari menunjukkan arah positif

gaya  $(fe)^{[10]}$ . Disebelahnya ditunjukkan arah-arah gaya tersebut pada sebuah batang konduktor.



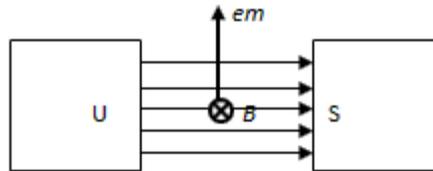
Gambar 2.8 Aturan kaidah tangan kanan untuk gaya pada sebuah konduktor<sup>[11]</sup>

Untuk mendapatkan voltase yang diinduksikan pada sebuah konduktor terhadap panjang yang terdiferensial  $dl$  dengan kecepatan  $v$  dalam sebuah medan magnet  $B$  adalah sebagai berikut:

$$dem = (v \times B) \cdot dl \quad (2.14)$$

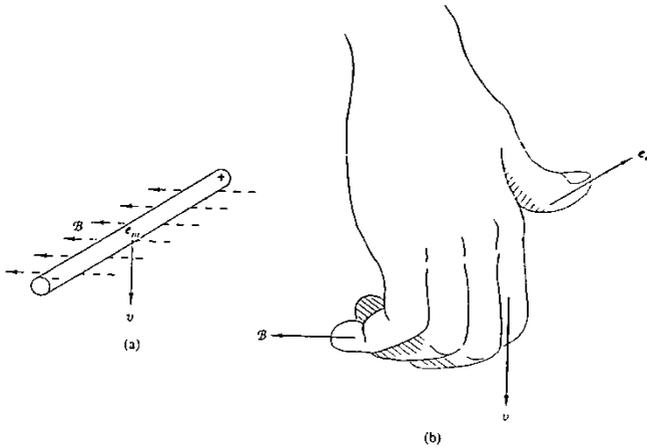
dimana dot menunjukkan produk skalar, atau produk dot dengan notasi vektor. Total voltase yang diinduksikan ke konduktor diperoleh dari pengintegrasian persamaan (2.14) diantara ujung-ujung konduktor. Dalam prakteknya, tiga buah vektor pada persamaan (2.14) akan saling tegak lurus, sehingga hasil integrasi (2.14) menghasilkan hubungan skalar sebagai berikut:

$$em = B lv \quad (2.15)$$

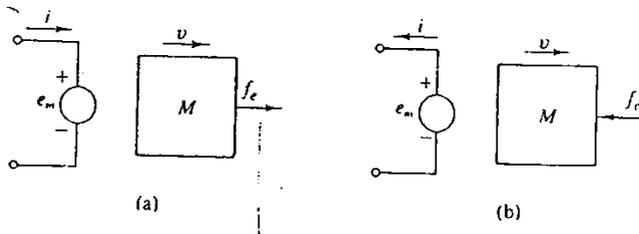


Gambar 2.9 Arah voltase bangkitan terhadap kecepatan konduktor dalam medan magnet<sup>[10]</sup>

Dapat ditemukan pada aturan kaidah tangan kanan seperti pada Gambar 2.10 (b) dimana jari telunjuk menunjukkan arah positif *velocity* ( $i$ ), jari sisanya yang berbelok menunjukkan arah positif medan magnet ( $B$ ), dan ibu jari menunjukkan arah positif arus ( $em$ ) akibat voltase induksi. Dalam gambar 2.10 (a) sebuah batang konduktor terlihat bergerak ke bawah dalam sebuah medan magnet yang positif ke arah kiri. Jika konduktor merupakan bagian dari sebuah sirkuit sempurna tanpa sumber eksternal, arus akan mengalir menuju arah kedalam halaman buku. Berdasarkan gambar 2.8, arus tersebut akan menyebabkan konduktor terkena gaya keatas yang bertolak belakang dengan gerak kebawah. Persamaan (2.13) dan (2.15), yang mendeskripsikan gaya dan voltase induksi dengan kabel yang bergerak tegak lurus pada medan magnet, dapat dimasukkan dalam contoh skema dari sistem *translational electromechanical* seperti pada gambar 2.11. Gaya dari voltase terinduksi di representasikan oleh sebuah sumber pada sirkuit elektris, dimana gaya induksi magnetik mempengaruhi massa  $M$  tempat konduktor berada. Tanda polaritas yang benar untuk  $em$  dan arah referensi untuk  $fe$  dapat ditentukan dengan melihat kondisi spesifiknya, namun pada gambar tersebut menunjukkan dua buah kombinasi dari referensi arah yang konsisten dengan prinsip konservasi energi.



Gambar 2.10 Aturan kaidah tangan kanan untuk voltase terinduksi pada konduktor yang bergerak<sup>[11]</sup>



Gambar 2.11 Representasi dari sistem *translational mechanical*; (a) alur daya Elektrikal-Mekanikal, (b) alur daya Mekanikal-Elektrikal<sup>[11]</sup>

Pada gambar 2.11, polaritas dari sumber listrik menggambarkan seolah-olah daya diserap dari sisa-sisa pada sirkuit saat  $e_m$  dan  $i$  positif. Begitu juga saat  $f_e$  dan  $v$  positif, daya akan di transfer ke bagian sistem *mechanical*. Sebaliknya, daya akan mengalir dari bagian *mechanical* ke *electrical* saat seluruh empat

variabel positif. Untuk mendapatkan besar daya yang terdapat pada mekanisme penghubungan *mechanical-electrical* adalah

$$P_e = em.i = (Blv)i \quad (2.16)$$

dan untuk *electrical-mechanical* adalah

$$P_m = fe.v = (Bli)v \quad (2.17)$$

dimana,

$$P_m = P_e \quad (2.18)$$

yang menyatakan bahwa daya apapun yang dikirimkan ke mekanisme penghubungan dalam bentuk listrik akan dialirkan tanpa pengurangan ke bagian *mechanical*. Tentunya sistem praktikal apapun akan memiliki kerugian oleh hambatan konduktor dan gesekan antara elemen mekanika yang bergerak. Walaupun begitu, elemen disipatif apapun dapat dimodelkan secara terpisah oleh sebuah hambatan dalam sirkuit listrik atau oleh sebuah elemen *viscous-friction* yang mempengaruhi sebuah massa. Dalam kata lain, dapat didemonstrasikan dari gambar 2.11, daya mekanikal yang bersumber dari gaya  $fe$  ditransmisikan ke elemen elektrikal apapun dan akan berhubungan sepanjang  $em$ <sup>[11]</sup>.

## 2.5 Desain dan Konsep dari Alat Pengujian Respon Getaran dengan Menggunakan *Shaker*

Sistem *shaker* banyak sekali digunakan untuk pengujian getaran pada suatu struktur. Jenis pengujian getaran yang sering kali dilakukan adalah dengan cara menggetarkan atau dengan memberi beban kejut pada suatu komponen yang dirakit yang bertujuan untuk mengamati bagaimana suatu struktur tersebut dapat diterapkan dengan baik sesuai dengan kegunaannya. Ini merupakan suatu langkah yang penting dalam proses desain dan pengembangan setiap produk baru yang mempunyai kemungkinan untuk dapat gagal ketika

terkena getaran. Banyak contoh aplikasi dari penggunaan sistem *shaker* ini diantaranya untuk pengujian peralatan militer, industri otomotif, industri kedirgantaraan dan industri elektronik<sup>[6]</sup>.

### 2.5.1 Prosedur Pengujian Getaran

Sistem yang khas dari pengujian getaran adalah terdiri dari tiga *hardware*, yaitu :

- a. Kelompok eksitasi, terdiri dari : sinyal generator, *power amplifier*, dan satu atau lebih aktuator misalnya *electrodynamic shaker*.
- b. Sirkuit umpan balik, terdiri dari : satu atau lebih akselerometer, sinyal pengkondisian dan unit untuk memonitor.
- c. Kontroler. Kontroler ini dapat bersifat analog atau digital, namun berbeda bila untuk pengontrolan algoritma untuk pengujian getaran sinusoidal dan acak.

Sistem *shaker* dirancang untuk dapat memproduksi getaran yang konsisten dengan model matematis atau rekam waktu dari pengujian. Secara historis, dahulu pertama kali suatu produk diuji dengan menggunakan pengujian *single-axis*. Dari pengujian yang banyak dilakukan, telah terbukti bahwa pengujian *multi-axis* memberikan penggambaran yang lebih realistis mengenai kondisi yang sebenarnya<sup>[7]</sup>.

### 2.5.2 Sistem Shaker (*Electrodynamic Shaker*)

Berbagai jenis mesin dirancang untuk mempunyai ketahanan saat strukturnya digetarkan dan pada dasarnya dapat dibagi menjadi dua tipe, yaitu proses kontak dan *non* kontak. Proses kontak ini melibatkan hubungan dengan suatu *exciter* dengan berbagai macam bentuk, yang tetap melekat pada struktur selama kontak terjadi dengan jenis eksitasi yang terjadi adalah yang terus menerus (random, sinusoidal, dll) atau transien (*pulse*, *chirp*)<sup>[6]</sup>. Jenis yang kedua mencakup perangkat yang tidak langsung ada kontak dengan sumber getar (seperti dengan penggunaan penghubung elektromagnet) atau hanya melalui kontak dengan periode yang singkat ketika proses eksitasi berlangsung.

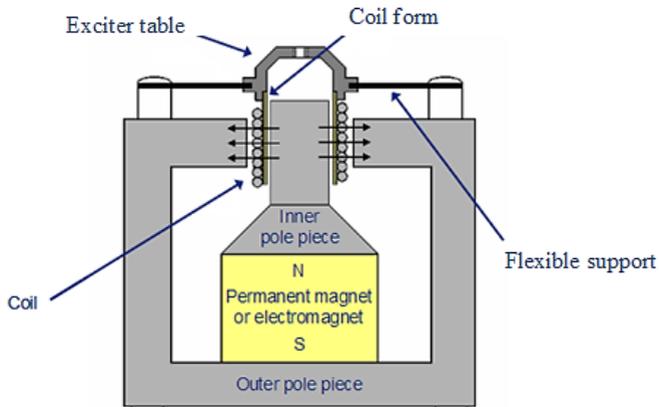
Sistem menggunakan gaya elektromagnetik yang telah lama digunakan untuk menghasilkan getaran pada struktur untuk tujuan yang disebut “*modal testing*”<sup>[6]</sup>. Hal yang paling sederhana dalam pengaplikasiannya adalah penerapan langsung dari gaya magnetik pada struktur yang ingin dieksitasi. Mungkin jenis paling umum dari *exciter* adalah *electrodynamic shaker*.

*Electrodynamic shaker* memberikan gaya yang sebanding dengan arus yang dikenakan pada kumparan, perangkat ini digunakan dalam berbagai macam aktivitas evaluasi produk, uji ketahanan, dan analisa modal (*modal analysis*). *Electrodynamic shaker* biasanya digerakkan oleh *power amplifier* dan dalam kondisi “*open loop*” (seperti dalam pengujian modal) atau dalam kondisi “*close loop*” dimana inputan dijalankan dengan kontrol servo<sup>[6]</sup>.

### **2.5.2.1 Deskripsi *Electrodynamic Shaker***

Struktur dari *electrodynamic shaker* mempunyai kemiripan dengan struktur pengeras suara namun umumnya lebih kuat. Perangkat ini mempunyai tujuan untuk dapat mengubah arus listrik menjadi gaya mekanis dengan range frekuensi yang luas dengan nilai distorsi minimal dari input yang dimasukkan<sup>[7]</sup>.

Inti dari *shaker* ini adalah kumparan kawat yang melekat pada bagian yang tergantung pada adanya medan magnet radial (magnet permanen yang dapat digunakan untuk membangkitkan medan magnet). Sistem kontrol elektronik memberikan sinyal eksitasi yang diperkuat saat arus melewati kumparan. Sinyal tersebut lalu dikonversikan menjadi medan magnet bolak-balik (AC) dan gaya aksial pun dapat diproduksi, dimana harga tersebut sebanding dengan arus yang dilewatkan<sup>[7]</sup>. Dalam kasus ini, frekuensi dan amplitudo dari eksitasi dikendalikan secara independen satu sama lain, sehingga memberikan fleksibilitas operasional.



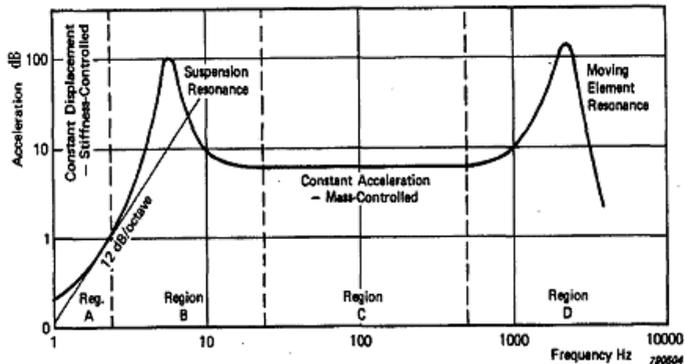
Gambar 2.12 Susunan dasar *electrodynamic shaker*<sup>[7]</sup>

Sirkuit magnet yang digunakan untuk menghasilkan medan magnet yang kuat pada operasi *shaker* ditunjukkan pada gambar di atas. Disini, permeabel (*ferrous*) bagian kutub yang ada di dalam (*inner pole*) mentransmisikan fluks dari satu bagian ujung magnet silinder yang secara aksial terpolarisasi, dan bagian utara dari permeabel tersebut disebut *back structure* dimana bagian tersebut mentransmisikan fluks dari arah kutub magnet yang berlawanan menuju permeabel *disk* melalui sebuah lubang yang berada di bagian pusat dari kutub bagian dalam (*inner pole*). Hal ini menciptakan medan fluks radial pada *gap*<sup>[7]</sup>.

### 2.5.2.2 Karakteristik *Electrodynamic Shaker*

Untuk memastikan gerak translasi *uni-axial* dari *shaker table*, dan untuk mengaktifkan tingkat percepatan gaya yang tinggi, perlu ditetapkan beberapa batasan yang cukup berarti pada desain *shaker*. Dapat diketahui bahwa, efek dari massa (*moving assembly*) dan redaman dapat memberikan nilai karakteristik respon frekuensi pada *shaker*. Pada daerah yang berbeda respon didominasi oleh nilai kekakuan dari *flexure*, massa yang bergerak dan frekuensi yang sangat tinggi. Pada gambar 2.13 masing-masing daerah dapat dengan

jelas diamati dari kurva karakteristik percepatan untuk *shaker* tertentu saat arus diarahkan menuju kumparan dengan konstan untuk melihat frekuensi yang terjadi<sup>[6]</sup>.



Gambar 2.13 Karakteristik percepatan ideal *electrodynamic shaker* untuk arus konstan<sup>[6]</sup>

Nilai nominal dari gaya yang digunakan untuk desain *shaker* akan sangat bergantung pada kemampuan maksimum arus untuk dapat menggerakkan kumparan. Ini dapat dilihat dari hubungan dasar yaitu :

$$F = B i l \quad (2.19)$$

dimana :

F = gaya (N)

B = medan magnet pada gap ( $\text{Wb/m}^2$ )

i = arus pada kumparan (A)

l = panjang konduktor pada gap (m)

Produk dari  $B i$  disebut dengan “*head constan*” bernilai tetap untuk tiap desain yang diberikan. Selain itu, pertimbangan mengenai gaya balik *electromotive* akibat kumparan dapat diperoleh menggunakan rumusan :

$$E_{back} = B l v \quad (2.20)$$

dimana :

$E_{back}$  = e.m.f saat kumparan bergerak balik (V)  
 $V$  = kecepatan konduktor pada gap (m/s)

Untuk sumber tegangan yang konstan dapat dilihat bahwa resonansi *flexure* akan berharga besar pada kecepatan yang terbatas, ketika integrasi dari e.m.f balik dapat digunakan untuk memberikan analog pada perpindahan untuk tujuan pengendalian. Hanya panjang aksial dari kumparan *armature* dan batas fisik dari sistem suspensi *armature* yang membatasi perpindahan *electrodynamic shaker armature*. Sebagian besar dari *shaker* disediakan dengan panjang kumparan yang memadai untuk dapat mempertahankan gaya linear pada frekuensi yang rendah dengan keterbatasan yang utama adalah gangguan fisik dari komponen suspensi<sup>[6]</sup>.

Nilai perpindahan dari *electrodynamic shaker* biasanya tersedia dalam kondisi relatif maksimum antara *armature* dan bagian bodi atau suspensi *shaker*<sup>[7]</sup>. Ketika mempertimbangkan kesesuaian *shaker* untuk memulai pengujian, hal terpenting adalah untuk mempertimbangkan berbagai faktor yang dapat mereduksi perpindahan mutlak pada bagian terkecil objek uji.

Faktor lain yang dapat mereduksi perpindahan adalah defleksi natural dari suspensi *armature* saat pengujian dilakukan dan *fixture* yang ditempatkan pada *shaker* dalam orientasi vertikal terhadap *shaker*. Berat dari beban yang ditambahkan ini menyebabkan *armature* bergerak ke bawah dan oleh karena defleksi natural itulah, perpindahan *armature* ke bawah dapat direduksi<sup>[7]</sup>.

## 2.6 Konstruksi Bodi Mobil

Bagian mobil terbagi dalam 2 kelompok besar, yaitu bodi dan *chassis*. Bodi adalah bagian kendaraan yang dibentuk sedemikian rupa dan pada umumnya terbuat dari bahan pelat logam (*steel plate*) yang tebalnya antara 0,6 mm – 0,9 mm sebagai tempat penumpang ataupun barang. *Chassis* adalah bagian dari kendaraan yang

berfungsi sebagian penopang bodi dan terdiri dari *frame* (rangka), *engine* (mesin), *power train* (pemindah tenaga), *wheels* (roda-roda), *steering system* (sistem kemudi), *suspension system* (sistem suspensi), *brake system* (sistem rem), dan kelengkapan lainnya. Berdasarkan pada konstruksi menempelnya bodi pada rangka, maka terdapat 2 jenis konstruksi bodi kendaraan, yaitu konstruksi *composite* (terpisah) dan konstruksi *monocoque* (menyatu)<sup>[8]</sup>.



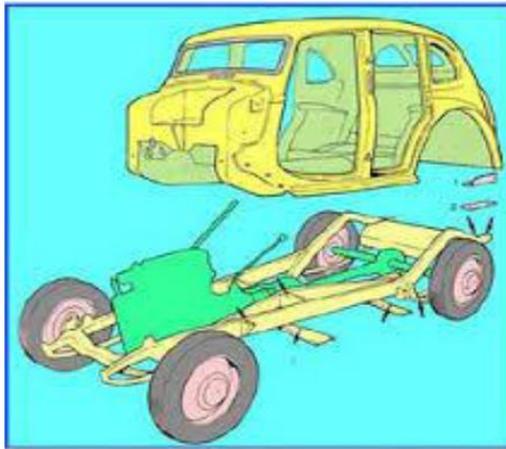
Gambar 2.14 *Assembly* kendaraan<sup>[8]</sup>

Rangka merupakan tempat menempelnya semua komponen kendaraan termasuk bodi. Rangka harus kuat, ringan, kukuh, dan tahan terhadap getaran, atau guncangan yang diterima dari kondisi jalan. Agar kuat maka konstruksi rangka ada yang berbentuk kotak, bentuk U atau pipa, yang pada umumnya terdiri dari dua batang yang memanjang dan dihubungkan dengan bagian yang melintang. Pada awal perkembangan teknologi bodi dan rangka kendaraan, bodi dan rangka dibuat secara terpisah (*composite body*) namun saat ini bodi dan rangka dibuat menyatu (*monocoque body*, atau disebut juga *integral body*) khususnya pada kendaraan sedan.

#### 1. Konstruksi Terpisah (*Composite Body*)

Merupakan jenis konstruksi bodi kendaraan dan rangkanya terpisah. Pertautan atau penyambungan antara bodi dan rangka menggunakan baut dan mur. Untuk meningkatkan

kenyamanan saat digunakan, maka diantara bodi dan rangka dipasang karet sebagai alat peredam getaran. Konstruksi bodi dan rangka yang terpisah ini memberikan kemudahan dalam penggantian bagian bodi yang mengalami kerusakan, terutama bodi bagian bawah atau putusnya rangka. Konstruksi ini biasanya digunakan pada kendaraan sedan tipe lama, kendaraan penumpang dan mobil angkutan barang, misalnya truk, *bus*, *pick up*, dan lainnya.



Konstruksi *composite body*

Gambar 2.15 Konstruksi *composite body* <sup>[8]</sup>

## 2. Konstruksi Menyatu (*Monocoque Body*)

Merupakan jenis konstruksi bodi kendaraan dimana bodi dan rangka tersusun menjadi suatu kesatuan. Konstruksi ini menggunakan prinsip kulit telur, yaitu merupakan satu kesatuan yang utuh sehingga semua beban terbagi merata pada semua bagian kulit. Sambungan yang terjadi antara bodi dan rangka menggunakan sambungan las. Karena bodi dan rangka menyatu, maka bentuknya dapat menjadi lebih rendah jika dibandingkan dengan tipe *composite body*

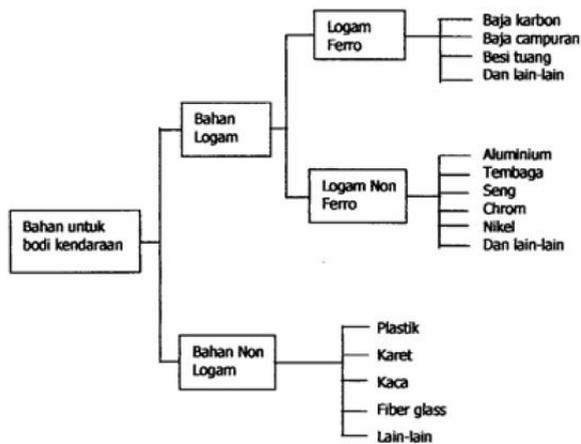
sehingga titik berat gravitasi lebih rendah menyebabkan kendaraan akan lebih stabil. Konstruksi ini banyak digunakan pada mobil sedan, bahkan beberapa kendaraan MPV (*Multi Purpose Vehicle*) juga mulai menerapkan konstruksi jenis ini.



Gambar 2.16 Kontruksi Bodi Integral (*Monocoque Body*)<sup>[8]</sup>

### 2.6.1 Bahan Pembuatan Bodi Kendaraan

Bahan pembuatan bodi kendaraan secara garis besar dapat diklasifikasikan sebagai berikut :



Gambar 2.17 Klasifikasi bahan untuk kendaraan<sup>[8]</sup>

## 1. Bahan Logam

Bahan logam mempunyai beberapa keistimewaan jika dibandingkan dengan bahan lain. beberapa keistimewaan bahan tersebut adalah :

- a. Bahan logam mempunyai berat jenis yang lebih besar daripada bahan non logam.
- b. Bahan logam mempunyai daya hantar listrik dan panas yang lebih tinggi.

Secara garis besar bahan logam dapat diklasifikasikan menjadi dua macam jenis, yaitu bahan logam *ferro* dan *non ferro*.

- Bahan Logam *Ferro*

Adalah bahan logam yang mengandung unsur besi. Besi merupakan bahan yang paling banyak digunakan dalam kehidupan sehari-hari, dan terkadang digunakan sebagai besi murni. Besi dapat dicampurkan dengan bahan logam lainnya untuk menjadi campuran (*alloy*) yang bertujuan untuk memperbaiki karakteristik kegunaannya, antara lain agar tahan karat, tahan panas dan mempunyai tingkat *wear resistant* yang tinggi.

- 1) Baja Karbon

Baja Karbon adalah campuran antara besi atau baja dan karbon. Sifat dari besi akan berubah sesuai dengan kadar kandungan karbonnya. Tipe-tipe baja karbon antara lain baja (*steel*) dan besi tuang.

- a) Baja (*steel*)

Baja adalah campuran besi dan karbon dengan kandungan karbon kurang dari 2%. Bahan ini sering digunakan untuk membuat panel bodi kendaraan.

b) Besi Tuang

Besi tuang adalah campuran besi dan karbon dengan kandungan karbon 2% atau lebih. Besi tuang biasanya dicetak ke dalam bentuk yang diinginkan.

2) Baja Campuran Khusus (*Special Alloy Steel*)

Baja campuran khusus adalah sebuah campuran yang dihasilkan dengan mencampur baja karbon dengan logam lainnya untuk memperbaiki kegunaannya. Apabila besi tuang sebagai pengganti baja karbon, dicampur dengan logam lainnya maka produk yang dihasilkan disebut besi tuang campuran (*alloy cast iron*)

- Bahan Logam *Non-Ferro* (*Non-Ferrous Metal*)

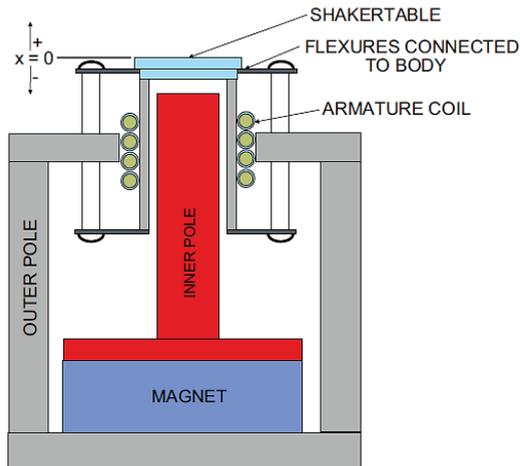
Adalah jenis logam yang secara kimiawi tidak memiliki unsur besi atau *Ferro* (Fe), oleh karena itu logam ini disebut sebagai logam bukan besi (*non Ferro*). Walaupun bodi kendaraan pada umumnya terbuat dari besi atau baja, akan tetapi beberapa komponen kendaraan dapat dibuat dari bahan *non-ferro* ini. Bahan yang tergolong logam *non-ferro* antara lain yaitu kuningan, aluminium, tembaga, seng dan lain-lainnya.

2. Bahan Non Logam

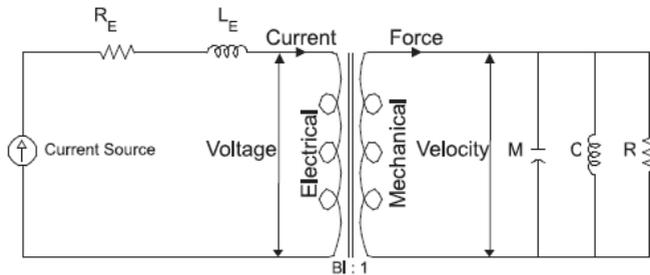
Bahan non logam ternyata juga banyak digunakan sebagai bahan pembuatan bodi kendaraan. Salah satu bahan non logam tersebut adalah *fiberglass*. *Fiberglass* merupakan bahan paduan atau campuran beberapa bahan kimia (bahan komposit) yang bereaksi dan mengeras dalam waktu tertentu. Bahan ini mempunyai beberapa keuntungan jika dibandingkan dengan bahan logam, antara lain yaitu lebih ringan, mudah dibentuk dan harganya lebih ekonomis<sup>[8]</sup>.

## 2.7 Kajian Penelitian Terdahulu

Pada tahun 2015 Abhishek Sarasawat dan Nachiketa Tiwari<sup>[4]</sup> melakukan suatu penelien terkait *electrodynamic shaker* yang memiliki judul *Modeling and Study of Nonlinear Effects in Electrodynamic Shaker*, pembahasan yang dilakukan dalam penelitian tersebut adalah mengenai pengembangan yang dilakukan dengan melakukan suatu pendekatan non-destruktif untuk menentukan parameter, prediksi yang akurat dari perpindahan dan memprediksi respon nonlinier dari *shaker*. Respon yang diprediksi ini nantinya akan divalidasi menggunakan data eksperimen. Melalui pendekatan yang dilakukan, dapat secara akurat diprediksi mengenai distorsi yang dihasilkan respon *shaker* dan efek nonlinearnya. Pedekatan yang dilakukan dalam penelitian difokuskan pada *modelling* dari *electrodynamic shaker*, diilustrasikan pada gambar 2.18, dengan cara sedemikian sehingga parameter model mempunyai bentuk fisik yang signifikan. Dan untuk sirkuit elektris dalam kondisi linear, yang digunakan dalam penelitian dapat diketahui pada gambar 2.19<sup>[4]</sup>.



Gambar 2.18 Struktur permanen magnet *shaker*<sup>[4]</sup>



Gambar 2.19 Model *lumped parameter* untuk sebuah *electrodynamic shaker*<sup>[4]</sup>

Model *lumped parameter* seperti yang ditunjukkan pada gambar di atas, menunjukkan penggunaan analogi mobilitas, yang digunakan untuk menghubungkan bagian elektrik dan mekanis pada *shaker*. Pada pemodelan ini parameter input yang mendasar adalah arus, dan parameter yang lain yaitu perpindahan dan percepatan dapat dihitung dari itu. Dari pemodelan yang telah diketahui di atas, tiga unsur utama dari elemen elektrik, resistor, induktor, dan kapasitor mempunyai nilai yang analog dengan masing-masing bagian mekanis, pegas dan massa<sup>[4]</sup>. Ketiga elemen elektrik tersebut mempunyai korelasi dengan komponen mekanis, yaitu seperti yang disajikan dalam tabel di bawah ini :

Tabel 2.1 Hubungan antara elemen elektrik dan mekanis<sup>[4]</sup>

Voltage-current relations for different electrical elements		Velocity-force relations for different mechanical elements	
Resistor ( $R_e$ )	$V = IR_e$	Mechanical Resistance ( $R_m$ )	$u = FR_m$
Inductor ( $L_e$ )	$V = R_e \frac{dI}{dt}$	Compliance ( $C_m$ )	$u = C_m \frac{dF}{dt}$
Capacitor ( $C_e$ )	$V = \frac{1}{C_e} \int I dt$	Mass ( $M_m$ )	$u = \frac{1}{M_m} \int F dt$

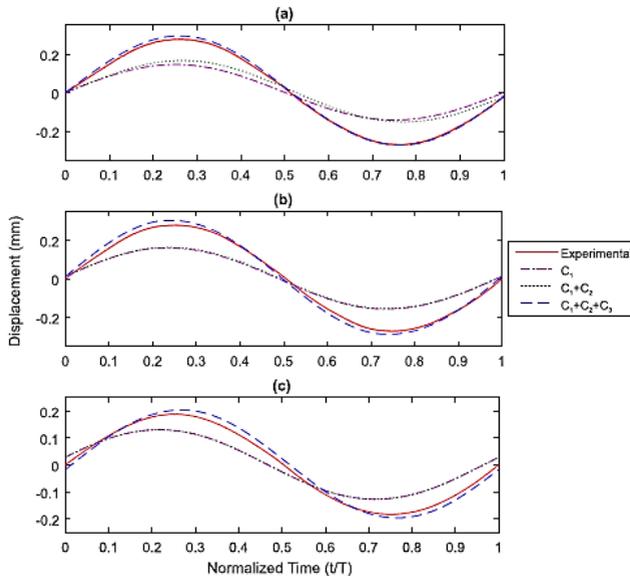
Penelitian ini mendiskusikan metodologi untuk menentukan semua parameter untuk model nonlinear *shaker*. Berikut adalah parameternya :

- (1) Parameter kelistrikan :  $R_E$  dan  $L_E$
- (2) Parameter elektro-mekanis :  $Bl(x)$
- (3) Parameter mekanis : massa efektif yang bergerak ( $M$ ), *mechanical compliance* ( $C_1(x)$ ,  $C_2$ ,  $C_3(x)$ ) dan resistansi mekanis ( $R_1, R_2, R_3$ )

Parameter yang telah disebutkan di atas merupakan suatu nilai yang nantinya dapat diketahui dengan melakukan proses estimasi dan kemudian dari nilai yang telah diestimasi tersebut dapat diperoleh hasil. Hasil yang didapatkan dari penelitian adalah sebagai berikut :

Tabel 2.2 Parameter model yang didapatkan dari hasil penelitian<sup>[4]</sup>

$R_E$	1.619 $\Omega$
$L_E$	13.66 $\mu\text{H}$
$R_1$	$4.4 \cdot 10^{-2}$ m/s-N
$R_2$	$1.2827 \cdot 10^{-5}$ m/s-N
$R_3$	$9.6 \cdot 10^{-3}$ m/s-N
$K_2(x) = 1/C_2(x)$	25468 N/m
$K_3(x) = 1/C_3(x)$	$9998(1 - 3.6510 \cdot 10^4 x^4 + 3.9974 \cdot 10^4 x^2 + 1.9845 \cdot 10^6 x^2 - 1.5931 \cdot 10^9 x^4 - 1.3371 \cdot 10^1 x^2 + 7.5298 \cdot 10^{13} x^6)$ N/m, x in m
$K_1(x) = 1/C_1(x)$	$8714(1 - 3.6510 \cdot 10^4 x^4 + 3.9974 \cdot 10^4 x^2 + 1.9845 \cdot 10^6 x^2 - 1.5931 \cdot 10^9 x^4 - 1.3371 \cdot 10^1 x^2 + 7.5298 \cdot 10^{13} x^6)$ N/m, x in m
$Bl(x)$	$6.373 \cdot e^{-\left(\frac{(x-0.000377)}{0.008841}\right)^2} + 0.4923 \cdot e^{-\left(\frac{(x-0.00311)}{0.001499}\right)^2}$ N/A, x in m
$M$	49.68 g

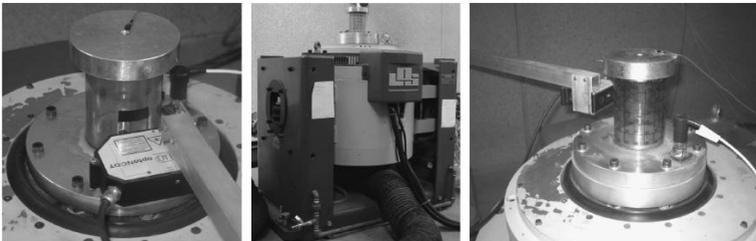


Gambar 2.20 Hasil penelitian dan respon prediksi model pada frekuensi (a) 0,1 Hz (b) 1 Hz (c) 10 Hz<sup>[4]</sup>

Setelah nilai-nilai dari parameter model dihitung, efektifitas dari model *shaker* dapat dievaluasi terhadap data eksperimen. *Shaker* dieksitasi pada frekuensi 0,1 Hz, 1 Hz dan 10 Hz. Pada semua frekuensi yang digunakan, amplitudo eksitasi telah dijaga agar pada rentang nilai yang cukup rendah untuk menghindari efek nonlinear. Gambar 2.20 (a)-(c) menunjukkan respon perpindahan pada *shaker* pada frekuensi 0,1 Hz, 1 Hz dan 10 Hz. Dalam data tersebut diketahui bahwa nilai tiga jenis pendekatan yang dilakukan menunjukkan hasil yang cukup memiliki kesamaan dengan data hasil eksperimen<sup>[4]</sup>.

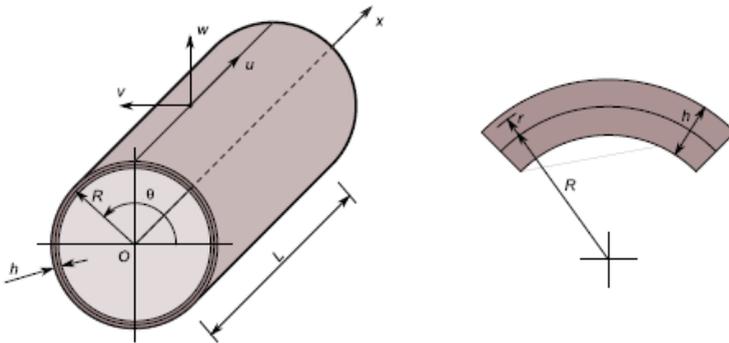
Pada tahun 2014 Francesco Pellicano dan Marco Barbieri<sup>[3]</sup> melakukan penelitian yang berhubungan dengan *electrodynamic shaker* yang digunakan untuk melakukan pengujian pada sistem *shell-disk* terkait dinamika yang kompleks susunan melingkar dari

*shell* terhadap beban aksial. *Shell* ini dipasang secara vertikal pada *shaker*, dimana bagian bawah (*base*) menutup *shaker fixture*, yang dapat menginduksi suatu gerak sepanjang sumbu vertikal *shell*. Pada bagian atas *shell* dipasang suatu jenis *disk* yang kaku, gerak vertikal yang diinduksikan oleh *shaker* dapat menginduksi suatu gaya inersia yang sangat besar karena gerakan *rigid body*nya<sup>[3]</sup>. Gambar 2.21 menunjukkan *set up* perangkat yang digunakan dalam penelitian. Jenis *shaker* yang digunakan adalah LDS V806 LS, dimana bagian dasar dari *shell* menutupi bagian *shaker* yang bergerak, dan pada bagian atas *shell* dipasang suatu *disk* yang terbuat dari paduan aluminium, *shell* yang dipasang ini sangat tipis dan terbuat dari bahan polimer.



Gambar 2.21 *Set up* penelitian dengan sistem *shell-disk*<sup>[3]</sup>

Model fisik *shell* yang digunakan ditunjukkan pada gambar 2.22 dimana sistem koordinat silinder didapatkan dengan meletakkan titik pusatnya pada pusat ujung *shell*,  $x = 0$ . Analisa *shell* yang tipis dapat dilakukan dengan beberapa pendekatan yaitu, (1) tebal ( $h$ )  $\ll R$ , (2) Regangan dan perpindahan cukup kecil, (3) Tekanan normal melintang lebih kecil jika dibandingkan dengan tekanan normal yang lain (sesuai dengan hipotesa *Kirchoff*)<sup>[3]</sup>.



Gambar 2.22 Model *shell*, geometri, sistem koordinat dan area perpindahan<sup>[3]</sup>

Di bawah ini merupakan data parameter dari *shaker* dan *shell-disk* yang digunakan dalam percobaan.

Tabel 2.3 Parameter *shaker*<sup>[3]</sup>

$k_b$ [N/m]	$c_b$ [Ns/m]	$m_0$ [kg]	$\mathcal{L}$ [H]	$\mathcal{R}$ [ $\Omega$ ]	$k_c$ [N/A]	$P_{amp}$	$b_{amp}$ [s]
93000	0.534	14.2	$0.51 \times 10^{-3}$	1.06	121.22	-115	$0.4 \times 10^{-4}$

Keterangan :

$k_b$  adalah nilai kekakuan dari sambungan pada elemen *shaker* yang bergerak (N/m)

$C_b$  adalah koefisien redaman *viscous* (Ns/m)

$m_0$  adalah massa dari elemen *shaker* yang bergerak (kg)

$\mathcal{L}$  adalah induktansi kumparan (H)

$\mathcal{R}$  adalah resistansi kumparan ( $\Omega$ )

$k_c$  adalah arus ke gaya konstan (N/A)

$P_{amp}$  dan  $b_{amp}$  adalah koefisien karakteristik dari penguat

Tabel 2.4 Parameter *shell-disk*<sup>[3]</sup>

$\rho$ [ $\frac{kg}{m^3}$ ]	$\nu$	$E$ [ $\frac{N}{m^2}$ ]	$m_d$ [kg]	$R$ [m]	$L$ [m]	$h$ [m]	$\frac{R}{h}$	$\frac{L}{R}$
1366	0.4	$46 \times 10^8$	0.82	$43.88 \times 10^{-3}$	$96 \times 10^{-3}$	$0.25 \times 10^{-3}$	176	2.19

Keterangan :

$\rho$  adalah massa jenis dari *shell* ( $\frac{kg}{m^3}$ )

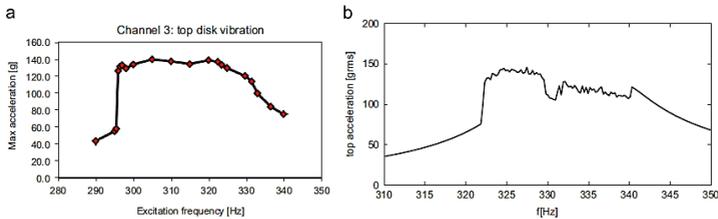
$\nu$  adalah *poisson ratio*

$E$  adalah konstanta elongasi dari *shell* ( $\frac{N}{m^2}$ )

$m_d$  adalah massa *disk* (kg)

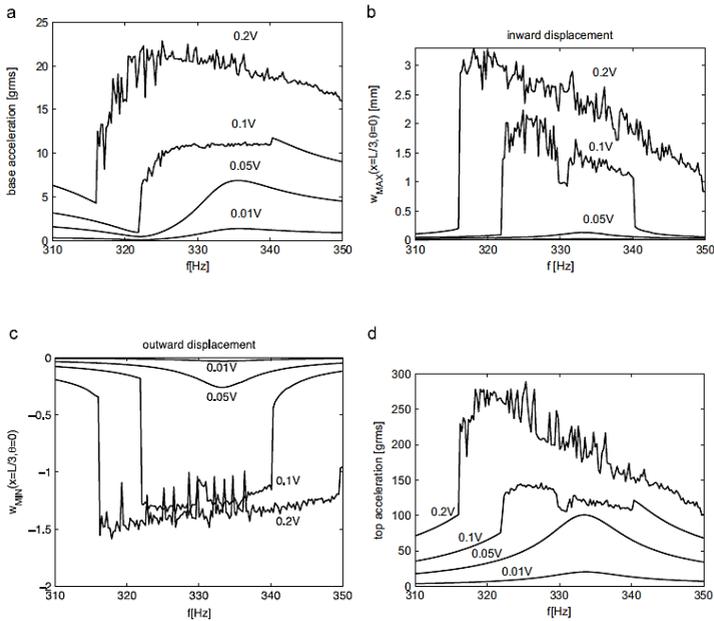
$L$  adalah panjang *shell* (m)

$h$  adalah ketebalan *shell* (m)



Gambar 2.23 Getaran pada *disk*, dengan percepatan maksimum (a) Eksperimen dan (b) Simulasi, dengan tingkat eksitasi  $0,1 V$ <sup>[3]</sup>

Fenomena mengenai saturasi getaran pada *disk* dihasilkan dengan hasil yang memuaskan seperti ditunjukkan pada gambar 2.23. Model yang baru dengan penggunaan *disk* melengkapi informasi mengenai perilaku kualitatif dari sistem dan hasil percobaan. Telah ditunjukkan bahwa pada daerah yang tidak stabil, daerah terjadinya respon yang tidak teratur, model yang lama menghasilkan akurasi yang diterima dari amplitudo getaran<sup>[3]</sup>.



Gambar 2.24 Efek dari tingkat eksitasi<sup>[3]</sup>

Terjadinya suatu ketidakseimbangan sepertinya mempunyai korelasi dengan tingkat getaran yang terjadi pada *disk*, terlihat pada gambar 2.24 (d). Terdapat fenomena yang lebih lanjut mengenai saturasi dari tingkat eksitasi yang terjadi, misalnya getaran minimum pada arah lateral (perpindahan untuk arah keluar) tidak menunjukkan peningkatan terhadap eksitasi.

Pada tahun 2009 S. Ricci, B. Peeters, R. Fetter dan D. Boland melakukan suatu pengujian mengenai *Virtual Shaker* yang bertujuan untuk meningkatkan kinerja uji getaran yang dilakukan untuk pengujian satelit. Pengujian dengan *Virtual Shaker* ini adalah suatu pengujian dengan pendekatan baru untuk menangani mengenai permasalahan nilai parameter apa saja yang mempunyai kemungkinan mempengaruhi perilaku dinamis dari spesimen yang diuji sehingga akan dapat disimulasikan seperti getaran nyata yang

terjadi. Model kontroler yang digunakan pada *set up* pengujian menggunakan dasar algoritma yang sesuai dan kemudian hasilnya dapat divalidasi dengan menggunakan *Hardware-in-the-loop* (HIL). *Set-up* sistem yang digunakan pada pengujian ini, identifikasi metodologinya didasarkan pada analisa perumusan yang telah dikembangkan untuk dapat mengestimasi model dari parameter *shaker* yang dimulai dari pengukuran. Untuk melakukan validasi dari prosedur yang digunakan, telah dilakukan pengukuran pada tegangan RMS dari *shaker*, seperti yang telah ditunjukkan pada gambar 2.25 dimana akselerometer dan sensor terhubung pada kontroler jenis LMS SCADAS III *front-end*. LMS tersebut telah digunakan untuk mengukur nilai FRFs (untuk mengetahui nilai modal parameternya), menggunakan sinyal sinus dan acak sebagai input eksitasi.



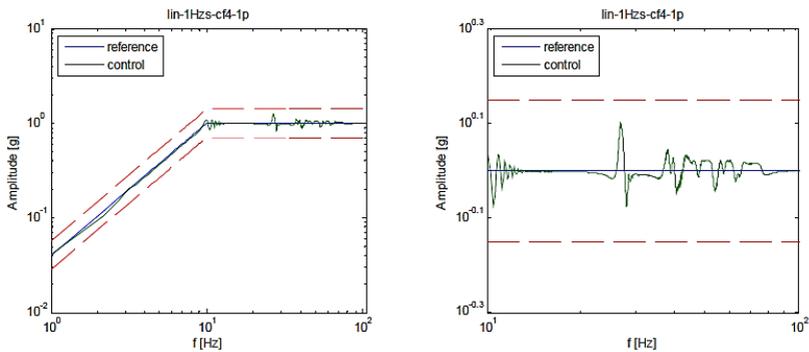
Gambar 2.25 *Shaker* jenis RMS SW3707 dan *power amplifier* TGD3000

Tabel yang disebutkan di bawah ini merupakan data nilai-nilai parameter yang digunakan pada *set-up* alat yang digunakan dalam pengujian yang dilakukan.

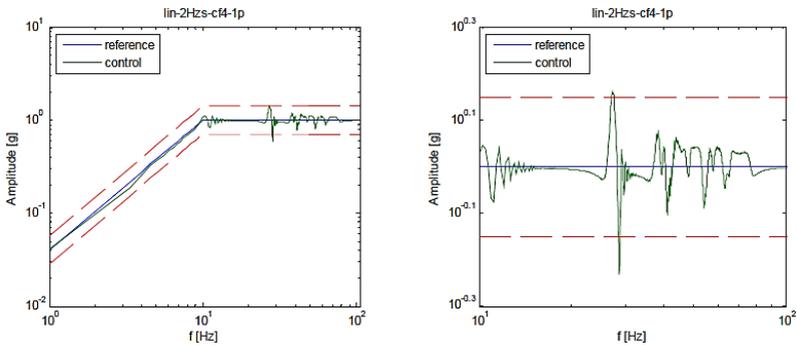
Tabel 2.5 Identifikasi nilai model parameter

Mechanical parameters		Electrical parameters	
$m_c$ [kg]	3.52	$L$ [mH]	0.081
$m_t$ [kg]	4.00	$R$ [ $\Omega$ ]	0.16
$c_c$ [kg/s]	484.28		
$c_t$ [kg/s]	643.77	Coupling constants	
$k_c$ [N/m]	546.65e+06	$K_f$ [N/A]	38.00
$k_t$ [N/m]	145.72e+03	$K_v$ [V/(m/s)]	38.00

Pada penelitian yang telah dilakukan, kontroler sinus yang telah dikembangkan dan digunakan dalam pengujian menghasilkan grafikan seperti yang telah ditunjukkan pada gambar 2.26 dan 2.27, dimana pada percobaan ini parameter yang ditunjukkan pada pengujian ini adalah parameter kontrol dari algoritma yang bervariasi dan efek dari kualitas kontrol yang telah dipelajari juga dalam pengujian.

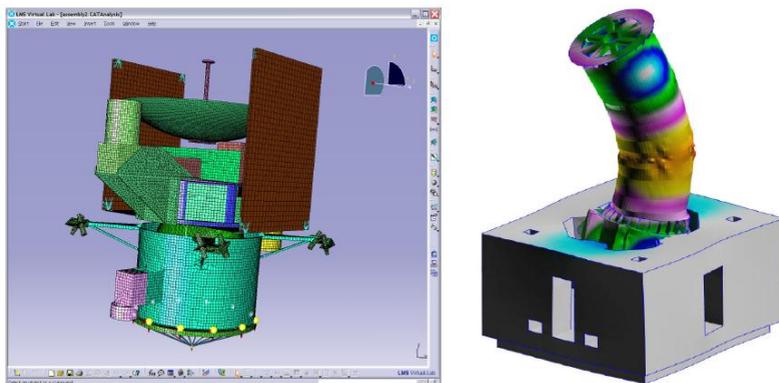


Gambar 2.26 Hasil kontrol dengan 1 Hz/s,  $c_f = 4$ ,  $N_p = 1$ . (Kiri) *Full Range*, (Kanan) *pembesaran 10-100 Hz*



Gambar 2.27 Hasil kontrol dengan 2 Hz/s,  $c_f = 4$ ,  $N_p = 1$ . (Kiri) *Full Range*, (Kanan) pembesaran 10-100 Hz

Tes lanjutan yang dilakukan pada struktur satelit menghasilkan suatu model pengujian seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.28. Struktur dari pesawat ruang angkasa biasanya diasumsikan linier dalam proses desain, pengembangan dan verifikasi. Ini berarti bahwa respon dari eksitasi beban statis atau dinamis akan meningkatkan atau menurunkan nilai amplitudo dari beban eksitasi yang berubah. Analisa pada prediksi yang dilakukan telah mencakup kondisi statis dan dinamis untuk tingkat pengujian satelit yang berguna untuk memprediksi beban penerbangan untuk konfigurasi satelit tertentu dan untuk mengkonfirmasi beban manual *launcher* yang biasanya digunakan sebelumnya untuk mendesain struktur satelit. Namun, pada dasarnya pengalaman telah menunjukkan bahwa berbagai bentuk gaya *nonlinear* mungkin ada dalam struktur pesawat ruang angkasa dan karena itulah diperlukan proses verifikasi dari prosedur desain yang dilakukan.



Gambar 2.28 (Kiri) Model struktur satelit yang digunakan saat pengujian; (Kanan) Simulasi struktur satelit akibat beban *bending*

## 2.8 Referensi *Electrodynamic Shaker* Menurut Katalog

Pada katalog *shaker* yang sudah banyak ditemukan di pasaran, seperti *The Modal Shop*, terdapat suatu panduan dalam pemilihan *shaker* berdasarkan objek yang akan diuji<sup>[12]</sup>. Pada gambar 2.29 ditunjukkan suatu acuan yang dapat digunakan untuk *range* dari gaya, frekuensi serta amplitudo yang biasanya dipergunakan untuk pengujian yang disesuaikan dengan objek uji.



Gambar 2.29 Panduan dari katalog *Modal Shop*<sup>[12]</sup>

Dengan merujuk pada gambar tersebut, dapat diketahui bahwa untuk objek uji yaitu plat kap mobil dapat diuji menggunakan *shaker* dengan tipe 2060E. Dimana *shaker* tersebut memiliki spesifikasi seperti ditunjukkan tabel 2.6 berikut :

### 2060E

30 pounds (133 N) pk *sine force*

1.4 in (36 mm) *stroke*

Tabel 2.6 Spesifikasi *shaker* dengan tipe 2060E<sup>[12]</sup>

#### **SPECIFICATIONS:**

<b>PERFORMANCE:</b>	
Output Force, sine pk, ambient air cooling	30 lbs (133 N)
Stroke Length, pk - pk	1.4 in (36 mm) <sup>#1</sup>
Frequency Range, nominal	DC - 6,000 Hz <sup>#1/#2</sup>
First Resonance Frequency, nominal	> 4,000 Hz <sup>#1</sup>
Maximum Acceleration, bare table	100 g (1000 m/s <sup>2</sup> ) pk
Maximum Velocity	120 ips (3 m/s) pk
Protection Features	Mechanical stops Over-current (in-line fuse)
<b>PHYSICAL:</b>	
Maximum Current, ambient air cooling	9 A rms
DC Resistance, armature, nominal	1 $\Omega$ <sup>#3</sup>
Armature Suspension System	8 pcs carbon fiber composite flexures
Effective Armature Mass	0.6 lb (0.272 kg)
Dimensions (H x W x D), nominal	10.8 x 12.6 x 6.5 in (273 x 319 x 165 mm) <sup>#1</sup>
Weight	37 lbs (17 kg)
Operating Range	40 - 100°F (4 - 38°C), < 85% RH

Model Number <b>2060E</b>		<b>MODAL EXCITER</b>		Revision: B ECN #:
<b>PERFORMANCE</b>				
Sline Force Natural Air Cooling	lbf pk (N pk)	30 (133)		
Max. Displacement Continuous pk-pk	in (mm)	1.4 (36)		
Between Stops	in (mm)	1.45 (37)		
Frequency Range <sup>1</sup>	Hz	DC-5000		
Fundamental Resonance <sup>1</sup>	Hz	>4000		
Maximum Velocity Acceleration <sup>1,2</sup>	ips pk (m/s pk)	120 (3.05)		
Bare Table	g pk	100		
1 lb load	g pk	38		
5 lb load	g pk	11		
Maximum Acceleration at Resonance	g pk	200		
<b>PHYSICAL</b>				
Armature Weight	lb (kg)	0.6 (0.272)	<b>RELATED EQUIPMENT</b> 2050E05 Power Amplifier, selectable voltage / current control, 500 VA 2150G12 Modal Stingers, 1/16" diameter rod with 10-32 threaded end, pack of three 2155G12 Modal Stingers, 3/32" diameter rod with 10-32 threaded end, pack of three K2160G Piano Wire Stinger Kit, includes quick disconnect load cell adapter 2250A Latent Excitation Stand 2050E03 Cooling Package, 110V portable 2100E16 Cooling Package, 220V portable	
Suspension Stiffness	lbf/in (N/mm)	20 (3.5)		
Rated Drive Current Natural Cooling	A rms	9		
Stray Magnetic Field 1.5" above coilset	Gauss	< 15		
1.0" from body	Gauss	< 20		
Cooling Air	cfm/15 in H <sub>2</sub> O	100		
Dimensions	in (mm) HxWxD	10.75 x 12.56 x 6.5 (273 x 319 x 165)		
Shaker Weight	lbs (kg)	37 (17)		

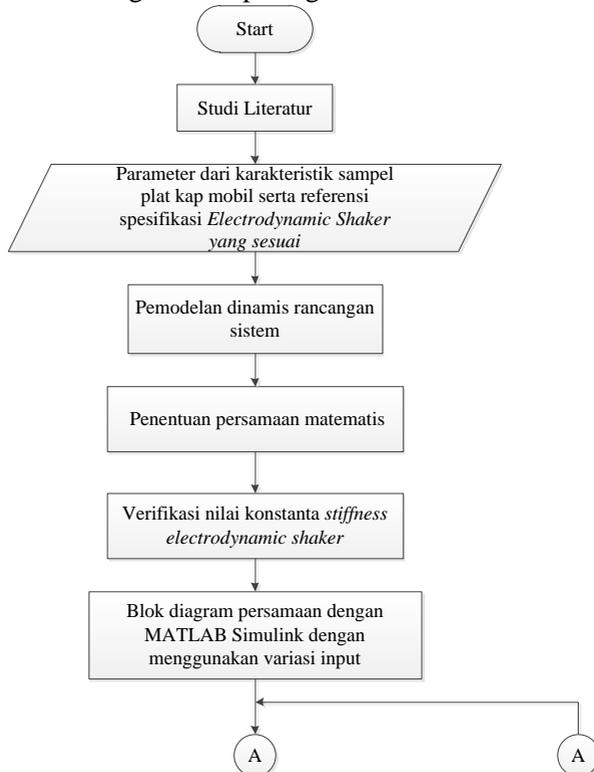
### 2.30 Spesifikasi *modal exciter* tipe 2060E dan dimensinya

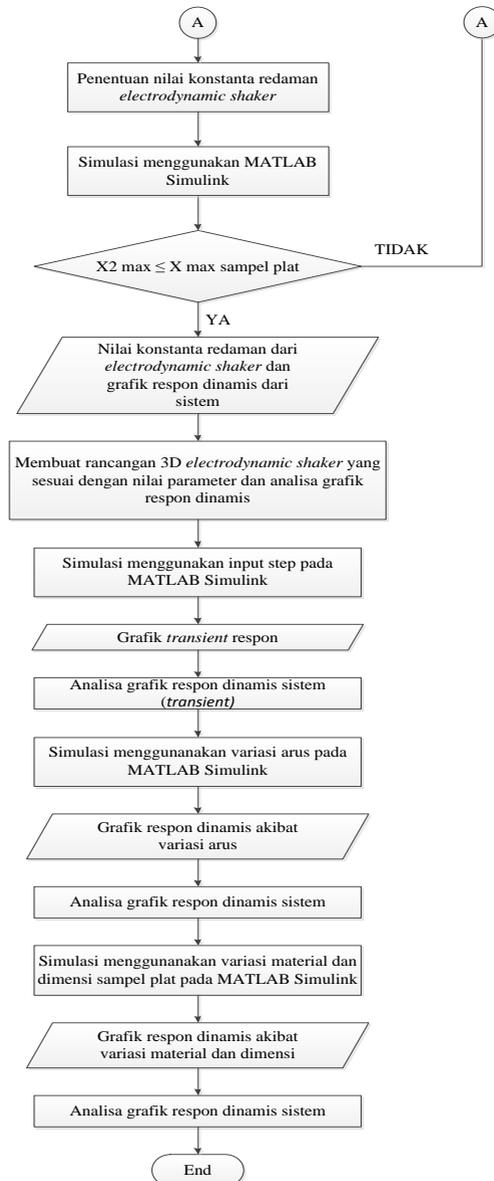
***“Halaman ini sengaja dikosongkan”***

## BAB III METODOLOGI

### 3.1 Metode Penelitian

Penulisan tugas akhir ini dilakukan untuk mendapatkan desain 3D dari *electrodynamic shaker* untuk pengujian benda uji, yang dalam hal ini adalah sampel plat mobil bagian kap (penutup) berdasarkan parameter dan karakteristik dinamisnya. Desain 3D dari *electrodynamic shaker* tersebut ditentukan dengan melakukan analisa respon dinamis perpindahan yang terjadi pada sistem. Dalam proses analisis dilakukan beberapa langkah yang ditunjukkan oleh diagram alir pada gambar 3.1.





Gambar 3. 1 Diagram alir penyelesaian tugas akhir

Metode penyelesaian tugas akhir ini secara umum ditunjukkan pada gambar 3.1, dimulai dari studi literatur dan studi lapangan mengenai sistem kerja *electrodynamic shaker* dan komponen yang menunjang kerja alat tersebut. Langkah selanjutnya yaitu melakukan pemodelan dinamis dari rancangan sistem *electrodynamic shaker* untuk menguji sampel plat kap mobil. Setelah model dinamis dari sistem *electrodynamic shaker* diketahui, *free body diagram* dari sistem dapat digambar dan dijabarkan persamaan matematisnya. Persamaan matematis yang telah diperoleh dapat digunakan sebagai dasar pembuatan model blok diagram pada MATLAB Simulink. Setelah didapatkan nilai persamaan matematis tersebut, dilakukan proses validasi nilai *koefisien stiffness* dari *electrodynamic shaker* yang diambil dari katalog menggunakan program *Inventor* agar dapat diketahui apakah sebenarnya nilai tersebut sesuai atau tidak untuk dapat dilakukan proses perancangan selanjutnya. Kemudian, nilai konstanta *stiffness* yang didapatkan tersebut dapat mulai disimulasikan pada blok diagram yang telah dibuat pada MATLAB Simulink dan dilanjutkan dengan penentuan nilai konstanta redaman *electrodynamic shaker* yang sesuai untuk perancangan menggunakan input *step* dan *sinusoidal*. Dimana nilai konstanta redaman yang didapatkan tersebut besarnya diperoleh menggunakan metode *trial and error* untuk mendapatkan nilai yang sesuai dengan nilai defleksi maksimum yang mampu dikenakan pada sampel plat kap, yang mana nilai tersebut dapat dilihat dan disesuaikan dengan besaran *peak value* yang dihasilkan dari perpindahan plat uji. Setelah didapat nilai konstanta damping yang sesuai, rancangan 3D dari sistem *electrodynamic shaker* dapat dibuat dan selanjutnya dilakukan analisa pada grafik respon dinamisnya. Pada tahapan selanjutnya, dilakukan proses simulasi untuk variasi menggunakan input *step*, variasi arus dan variasi pada jenis bahan material sampel plat uji agar dapat diketahui karakteristik respon dinamis *electrodynamic shaker* pada kondisi-kondisi tersebut.

### 3.2 Penjelasan Diagram Alir Penelitian

Pada Gambar 3.1 telah diuraikan diagram alir dari proses pengerjaan Tugas Akhir yang akan dikerjakan dan terdapat beberapa proses utama dalam metode pelaksanaannya. Berikut adalah penjelasan dari diagram alir tersebut :

#### 3.2.1 Tahap Studi Literatur

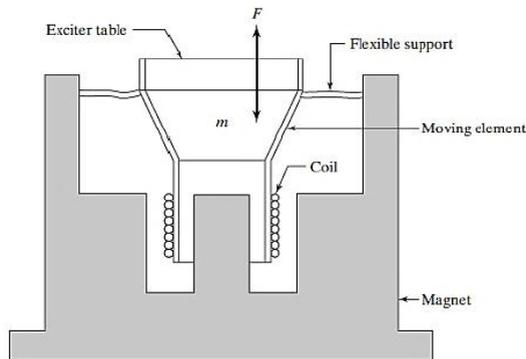
Dalam menyelesaikan penulisan tugas akhir ini diperlukan referensi-referensi yang dapat menunjang dalam proses analisa sistem *electrodynamic shaker* untuk pengujian pada sampel plat kap mobil. Oleh karena itu, dilakukan studi literatur guna menambah wawasan, pengetahuan, dan landasan mengenai topik permasalahan yang akan dibahas. Adapun materi dari studi literatur yang mendukung dalam penulisan tugas akhir ini yaitu mengenai sistem getaran multi *degree of freedom*, *Damping Constant of a Parallel Plates Separated by Viscous Fluid*, *Spring Constant of a Cantilever Beam*, dasar hukum sistem *electromechanic*, desain dan konsep dari alat pengujian respon getaran dengan menggunakan *shaker*, konstruksi bodi mobil, kajian dari penelitian terdahulu, serta referensi *shaker* yang didapatkan dari katalog. Nilai parameter yang berupa data karakteristik dinamis dari plat uji dan *mechanical properties*nya didapatkan dari jurnal. Sedangkan nilai dari *electrodynamic shaker* didapatkan dari katalog-katalog penunjang yang memuat nilai untuk jenis *shaker* serupa sehingga dapat dijadikan acuan.

#### 3.2.2 Pemodelan Dinamis Rancangan *Electrodynamic Shaker*

Pemodelan dinamis dari rancangan *electrodynamic shaker* ini mempunyai ide yaitu dengan mengubah arus listrik menjadi gaya mekanis dimana gaya mekanis tersebut bergerak secara translasi ke arah atas dan bawah, yang nantinya digunakan sebagai input untuk pengujian objek tertentu. Arus aliran listrik yang digunakan adalah jenis arus AC (bolak balik) dan nantinya akan dialirkan pada magnet, dimana magnet tersebut mempunyai suatu beda potensial. Aliran listrik yang terjadi bergerak dari

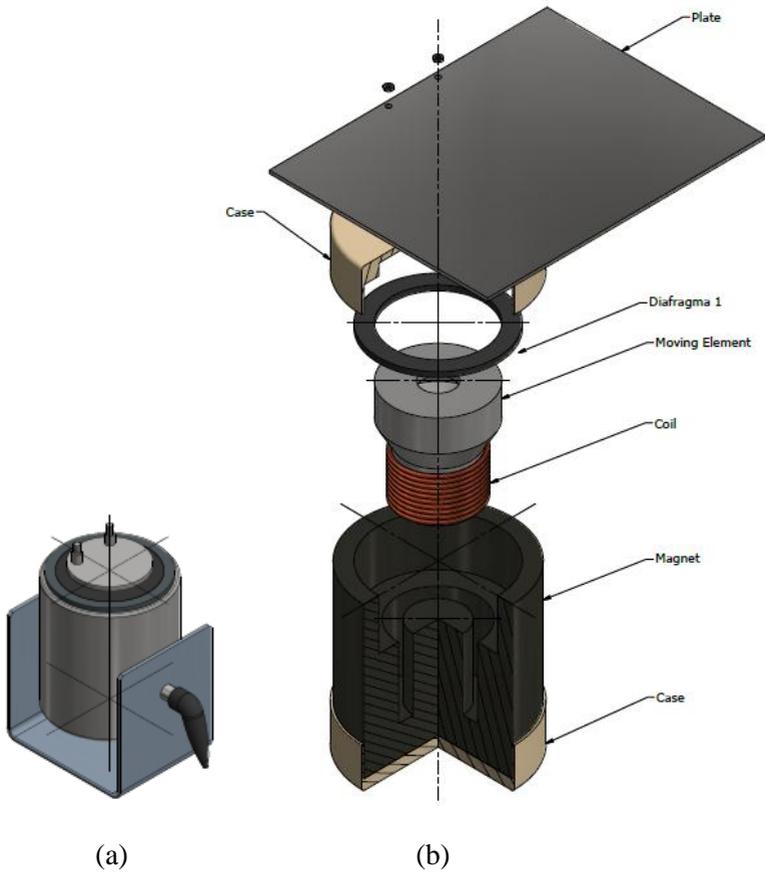
magnet yang berpotensi tinggi menuju magnet berpotensi rendah atau dari kutub positif menuju kutub negatif melalui suatu penghantar yang dalam hal ini berbentuk kumparan kawat yang berperan sebagai konduktor dan dapat menghantarkan listrik saat magnet mulai termagnetisasi. Inti dari *electrodynamic shaker* ini sebenarnya adalah kumparan kawat yang melekat pada bagian yang tergantung pada adanya medan magnet radial (yang dapat membangkitkan medan magnet).

Gambar 3.2 di bawah merupakan pemodelan dinamis sistem dasar dari *electrodynamic shaker* :

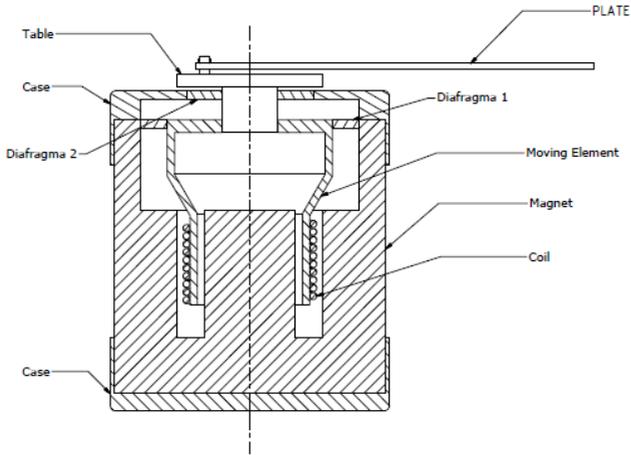


Gambar 3.2 Konstruksi dasar *electrodynamic shaker*

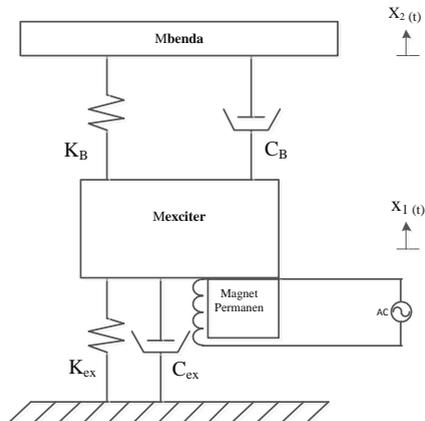
Dimana pada ide perancangan ulang *electrodynamic shaker* yang digunakan untuk pengujian sampel plat kap mobil ini, nilai dari konstanta *stiffness electrodynamic shaker* digambarkan atau ditunjukkan pada bagian *moving element*-nya. Sedangkan untuk nilai konstanta redaman *electrodynamic shaker* mewakili nilai koefisien redam yang ditunjukkan oleh bagian *flexible support*-nya dan tidak menutup kemungkinan juga masih tetap dipengaruhi oleh komponen-komponen pendukung yang ada disekitar *flexible support* tersebut. Dan gambar 3.3 di bawah ini merupakan rancangan pemodelan sistem dinamis yang digunakan dalam pengujian.



Gambar 3.3 (a) Model 3D rancangan *electrodynamic shaker* tanpa benda uji, (b) Keterangan gambar rancangan *electrodynamic shaker* untuk pengujian sampel plat kap mobil



(a)

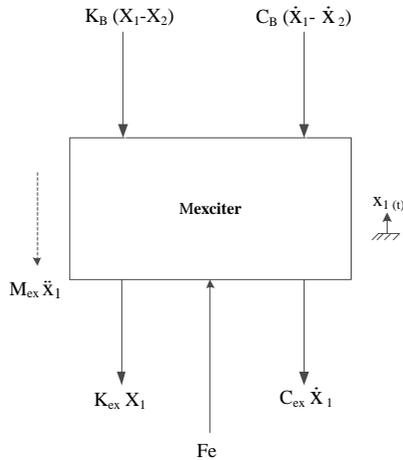


(b)

Gambar 3.4 (a) Model sistematis rancangan *electrodynamic shaker* untuk pengujian sampel plat kap mobil (b) Model dinamis sampel plat kap mobil pada rancangan *electrodynamic shaker*

### 3.2.3 Penentuan Persamaan Matematis Sistem *Electrodynamic Shaker*

Penentuan persamaan matematis dari sistem *electrodynamic shaker* bisa didapatkan berdasarkan *free body diagram*. Pada gambar 3.5 merupakan *free body diagram* sistem utama *electrodynamic shaker* untuk pengujian sampel plat kap mobil. Pada sistem tersebut terdapat massa utama ( $M_{exciter}$ ) yang dikenai vektor-vektor gaya sehingga menghasilkan perpindahan pada massa utama ( $X_1$ ). Berikut adalah *free body diagram* dari *exciter* :



Gambar 3.5 *Free body diagram* dari *exciter*

Keterangan :

- $M_{ex} \ddot{X}_1$  = Gaya inersia massa utama atau *exciter* (N)
- $F_e$  = Gaya eksitasi dari sistem kumparan (N)
- $X_1(t)$  = Respon perpindahan dari massa utama (m)
- $X_2$  = Perpindahan dari massa plat uji (m)
- $\dot{X}_1$  = Kecepatan dari massa utama (m/s)

- $\dot{X}_2$  = Kecepatan dari plat uji (m/s)  
 $K_{ex}$  = Koefisien pegas dari *exciter* (N/m)  
 $K_B$  = Koefisien pegas dari plat uji (N/m)  
 $C_{ex}$  = Koefisien redaman dari *exciter* (Ns/m)  
 $C_B$  = Koefisien redaman dari plat uji (Ns/m)

Dari *free body diagram exciter*, didapatkan persamaan matematis berdasarkan hukum *Newton* adalah sebagai berikut :

$$\Sigma F = M_{ex}\ddot{X}_1$$

$$F_e - C_{ex}\dot{X}_1 - K_{ex} X_1 - C_B(\dot{X}_1 - \dot{X}_2) - K_B(X_1 - X_2) = M_{ex}\ddot{X}_1$$

$$F_e - C_{ex}\dot{X}_1 - K_{ex} X_1 - C_B\dot{X}_1 + C_B\dot{X}_2 - K_B X_1 + K_B X_2 = M_{ex}\ddot{X}_1$$

$$F_e - (C_{ex} + C_B)\dot{X}_1 - (K_{ex} + K_B) X_1 + C_B\dot{X}_2 + K_B X_2 = M_{ex}\ddot{X}_1$$

$$(3.1)$$

*State Variable* dari *free body diagram exciter*

$$\dot{v}_1 = \frac{1}{M_{ex}} [F_e - (C_{ex} + C_B) v_1 - (K_{ex} + K_B) X_1 + C_B v_2 + K_B X_2]$$

$$(3.2)$$

Keterangan untuk *state variable* :

$$\begin{aligned} \dot{X}_1 &= v_1 \\ \dot{X}_2 &= v_2 \\ \ddot{X}_1 &= \dot{v}_1 \\ \ddot{X}_2 &= \dot{v}_2 \end{aligned}$$

Dan untuk *free body diagram* objek uji (plat kap mobil) adalah sebagai berikut :



Gambar 3.6 *Free body diagram* dari benda uji

Keterangan :

$M_B \ddot{X}_2$  = Gaya inersia pada sistem pengujian plat uji (N)

$X_2(t)$  = Respon perpindahan dari plat uji (m)

$X_1$  = Respon perpindahan dari massa utama  
(*electrodynamic shaker*) (m)

$X_2$  = Perpindahan dari massa plat uji (m)

$\dot{X}_1$  = Kecepatan dari massa utama (m/s)

$\dot{X}_2$  = Kecepatan dari plat uji (m/s)

$K_B$  = Koefisien pegas dari plat uji (N/m)

$C_B$  = Koefisien redaman dari plat uji (Ns/m)

Dari *free body diagram* objek uji (sampel plat kap mobil), didapatkan persamaan matematis berdasarkan hukum *Newton* adalah sebagai berikut :

$$\Sigma F = M_B \ddot{X}_2$$

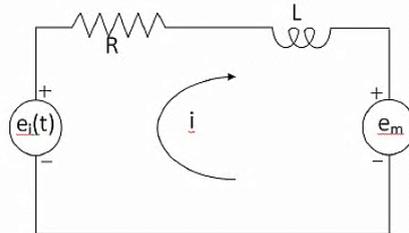
$$C_B (\dot{X}_1 - \dot{X}_2) + K_B (X_1 - X_2) = M_B \ddot{X}_2$$

$$C_B \dot{X}_1 - C_B \dot{X}_2 + K_B X_1 - K_B X_2 = M_B \ddot{X}_2 \quad (3.3)$$

*State Variable* dari *free body diagram* sampel plat kap mobil

$$\dot{v}_2 = \frac{1}{M_B} [C_B v_1 - C_B v_2 + K_B X_1 - K_B X_2] \quad (3.4)$$

Untuk perangkat *electrodynamic shaker* yang digunakan dalam pengujian ini, dibutuhkan analisa mengenai *free body diagram* dari sistem elektrik yang berhubungan. *Free body diagram* dari sistem elektrik tersebut adalah sebagai berikut :



Gambar 3.7 *Free body diagram* dari sistem elektrik yang digunakan pada *electrodynamic shaker*

Keterangan :

- L = Nilai hambatan induktansi akibat kehilangan efek magnetik (Henry (H) atau Wb/A)
- R = Resistansi kumparan/ kerugian akibat energi listrik ( $\Omega$ )
- i = Kuat arus listrik (A)
- $e_m$  = Tegangan yang dihasilkan/ tegangan yang diinduksikan di konduktor (V)
- $e_i(t)$  = Sumber tegangan (V)

Berikut adalah persamaan matematis dari sistem elektrik yang digunakan :

$$e(i) = L \frac{di}{dt} + R_i + e_m \quad (3.5)$$

Sesuai pada batasan masalah nomor 7, nilai parameter L yang digunakan dianggap kecil sekali (mendekati nol) sehingga tidak signifikan dan nilainya dapat diabaikan. Maka persamaan menjadi :

$$e_i(t) = R_i + e_m \quad (3.6)$$

Dimana nilai

$$e_m = \alpha v = \alpha \dot{x} = \alpha(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) \quad (3.7)$$

Sehingga persamaan (3.6) menjadi :

$$ei(t) = R_i + \alpha(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) \quad (3.8)$$

Dan untuk nilai  $\alpha$  diperoleh dari perhitungan berikut :

$$\alpha = 2 \pi a N \beta \quad (3.9)$$

Dimana :

- $\alpha$  = *electromechanical coupling coefficient* untuk sistem (konstan) (Wb/m)
- $i$  = kuat arus listrik (A)
- $a$  = radius kumparan (*wire coil*) (m)
- $N$  = jumlah kumparan pada sistem elektrik *electrodynamic shaker*
- $\beta$  = *flux density* (kuat medan magnet) pada sistem elektrik *electrodynamic shaker* (Wb/m<sup>2</sup>/Tesla)

dan nilai *state variable* dari *free body diagram* sistem elektris yang digunakan pada *electrodynamic shaker* :

$$i = \frac{1}{R}(ei(t) - \alpha(\dot{X}_1 - \dot{X}_2)) \quad (3.10)$$

### 3.2.4 Verifikasi Nilai Konstanta *Stiffness Electrodynamic Shaker*

Mengacu pada gambar 3.2, yaitu konstruksi dasar *electrodynamic shaker*, tahapan verifikasi nilai konstanta *stiffness* merupakan salah satu hal yang harus dilakukan. Pada tahap ini nilai konstanta *stiffness* yang telah didapatkan dari katalog coba untuk dilakukan verifikasi menggunakan *software* Inventor dan dilakukan pengecekan apakah nilai yang telah didapatkan tersebut cocok atau tidak bila direalisasikan pada perancangan

*electrodynamic shaker* yang dilakukan. Dimana pada ide perancangan ulang *electrodynamic shaker* yang digunakan untuk pengujian sampel plat kap mobil ini mendefinisikan nilai konstanta *stiffness* pada *electrodynamic shaker* merupakan nilai yang dimiliki oleh *flexible support* atau dapat disebut juga membran.

### **3.2.5 Blok Diagram Persamaan Sistem Menggunakan MATLAB Simulink dengan Variasi Input**

Dari hasil *state variable* persamaan yang didapatkan berdasarkan gerak pada *free body diagram* disetiap kondisi, dapat dijadikan sebagai acuan untuk membuat blok diagram dengan menggunakan *software* MATLAB Simulink. Pada blok diagram yang telah dibuat tersebut, dapat dimasukkan nilai-nilai parameter yang telah didapatkan dari perhitungan dan studi literatur yang telah dilakukan. Nilai parameter yang telah didapatkan tersebut dimasukkan pada program editor *m-file* terlebih dahulu baru kemudian dapat dihubungkan dengan blok diagram yang telah dibuat. Dan dapat diketahui bahwa pada tahap ini proses variasi input dapat dilakukan, dimana variasi input yang digunakan pada tugas akhir ini menggunakan input *step* dan input *sinusoidal*.

### **3.2.6 Penentuan Nilai Konstanta Redaman *Electrodynamic Shaker***

Pada langkah penentuan nilai konstanta redaman dari *electrodynamic shaker* ini, proses penentuan nilai konstanta redaman yang diinginkan dilakukan dengan metode *trial and error* pada program *m-file* yang telah dibuat. Penentuan nilai konstanta redaman untuk *electrodynamic shaker* tersebut harus memenuhi kriteria yaitu respon perpindahan yang diterima oleh sampel plat kap harus sesuai dengan nilai defleksi maksimum yang dapat dikenakan pada plat uji ketika ditinjau sesuai besar *peak value* ( $X_2 \text{ max} = X_{\text{max}} \text{ plat uji}$ ). Dimana defleksi maksimum tersebut merupakan batas maksimum pengujian yang dapat dikenakan saat pengujian berlangsung dan agar terdapat

*constrain* yang cukup jelas apabila dilakukan simulasi pada MATLAB Simulink. Dimana pada ide perancangan ulang *electrodynamic shaker* untuk pengujian sampel plat kap mobil ini mendefinisikan nilai konstanta redaman pada *electrodynamic shaker* merupakan nilai dari *viscous damping* yang terdapat pada *gap* yang ada diantara *moving element* tempat menempelnya *coil* dengan magnet, dapat dilihat pada gambar 3.2. Sesuai pada tinjauan pustaka bahwa ketika sistem *electrodynamic shaker* berjalan, *moving element* akan bergerak secara translasi ke atas bawah, sedangkan magnet permanen akan tetap diam.

### 3.2.7 Simulasi Menggunakan MATLAB Simulink

Pada tahap simulasi ini, simulasi yang pertama dilakukan adalah dengan menggunakan inputan *sinusoidal* dengan tujuan untuk mencari tahu berapa besar nilai konstanta redaman yang cocok untuk menghasilkan respon perpindahan sesuai dengan nilai defleksi maksimum pada plat uji (*peak value*  $X_2 = X_{max}$  plat uji). Apabila nilai dari konstanta redaman yang ditentukan masih belum memenuhi hasil respon dinamis sesuai dengan nilai *peak value*  $X_2 = X_{max}$  plat uji, maka tahap yang harus dilakukan yaitu dengan melakukan kembali tahap 3.2.6 hingga didapatkan nilai konstanta redaman yang sesuai dengan persyaratan.

### 3.2.8 Membuat Rancangan 3D *Electrodynamic Shaker* yang Sesuai dengan Nilai Parameter dan Analisa Grafik Respon Dinamis

Tahapan ini memuat bentuk visual dari rancangan 3D *electrodynamic shaker* yang sesuai untuk pengujian sampel plat kap mobil dimana nilai dari konstanta *stiffness* dan konstanta redamannya telah disesuaikan dengan nilai yang telah diperoleh dari tahap simulasi sebelumnya. Disamping itu, analisa grafik respon dinamis dari *electrodynamic shaker* yang telah dirancang juga dilakukan pada tahapan ini.

### **3.2.9 Simulasi Menggunakan Input *Step* pada MATLAB Simulink dan Analisa Grafik Respon *Transient***

Setelah melakukan perancangan 3D, nilai parameter-parameter yang telah didapat pada simulasi input *sinusoidal* dapat digunakan untuk pengujian input *step*. Simulasi menggunakan input *step* ini bertujuan untuk mengetahui respon *transient* dari *electrodynamic shaker* yang telah dirancang.

### **3.2.10 Simulasi Menggunakan Variasi Arus Listrik (i) pada MATLAB Simulink dan Analisa Grafik Respon Dinamis Sistem**

Pada tahap variasi arus ini, simulasi dilakukan pada penggunaan input *sinusoidal* menggunakan MATLAB Simulink dan kemudian dianalisa respon dinamisnya saat terdapat variasi arus listrik (i). Nilai arus listrik (i) menentukan besarnya gaya eksitasi yang ditimbulkan oleh sistem elektris *electrodynamic shaker*.

### **3.2.11 Simulasi Menggunakan Variasi Jenis Material dan Dimensinya serta Analisa Grafik Respon Dinamis Sistem**

Pada tahap ini dilakukan proses simulasi menggunakan variasi untuk jenis material yang berbeda dari simulasi yang telah dilakukan dan dimensi yang digunakanpun berbeda dari material yang digunakan sebelumnya. Hal tersebut bertujuan untuk mengetahui perubahan respon dinamis *electrodynamic shaker* yang telah dirancang ketika digunakan untuk pengujian plat uji dengan input *sinusoidal*.

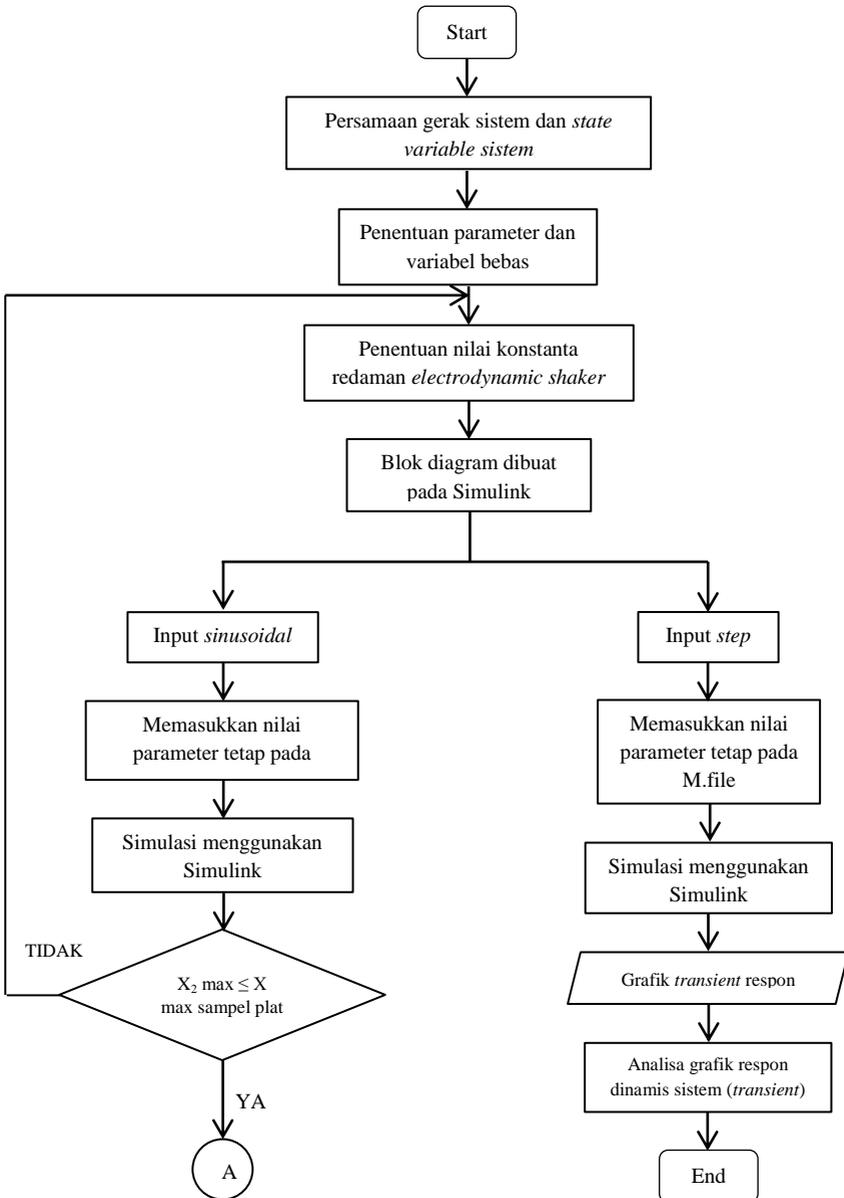
## **3.3 Penjabaran Proses Simulasi pada MATLAB Simulink**

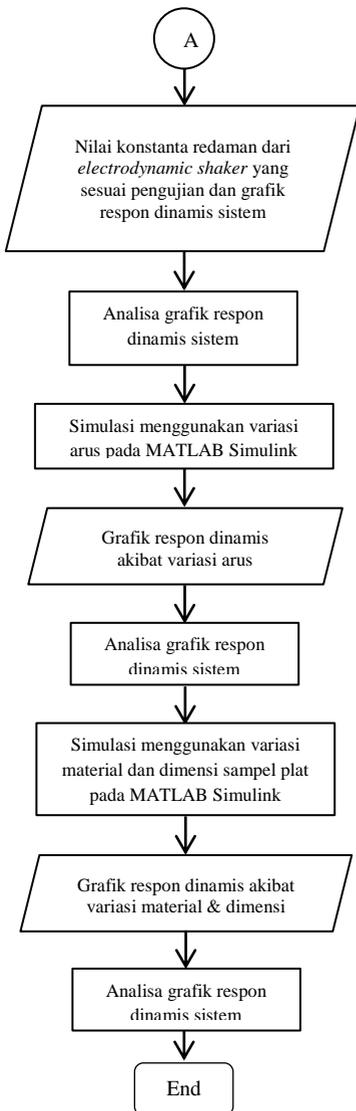
Tahap simulasi yang digunakan pada penyelesaian tugas akhir ini menggunakan jenis variasi input *step* dan *sinusoidal*. Proses pertama yang dilakukan adalah dengan menggunakan input *sinusoidal* untuk menentukan nilai konstanta redaman yang sesuai dan menghasilkan respon perpindahan yang diterima plat

uji sama dengan defleksi maksimum yang dapat diterima plat. Selanjutnya, simulasi yang digunakan adalah dengan menggunakan input *step* yang mempunyai tujuan untuk melihat respon *transient* dari sistem *electrodynamic shaker* yang telah dirancang. Persamaan untuk kedua jenis inputan tersebut dapat dituliskan sebagai berikut :

- Input *sinusoidal* :  $y(t) = Y \sin \omega t$ . Dimana pada persamaan *sinusoidal* tersebut, nilai Y mendefinisikan nilai amplitudo dari besar arus listrik (i) yang dilewatkan, yaitu sebesar 9 A. Dan pada jenis inputan *sinusoidal* ini digunakan variasi untuk besar arus listrik (i) yaitu pada 7, 9 dan 11 A, serta variasi pada jenis material dan dimensi dari sampel plat yang digunakan untuk pengujian (AISI 1008 dan Aluminium 7075-0). Untuk besaran frekuensi yang digunakan adalah pada frekuensi 50 Hz, dimana besaran frekuensi tersebut disesuaikan dengan penggunaan listrik yang ada di Indonesia.
- Input *step* : untuk jenis input *step* yang digunakan adalah jenis arus listrik (i) dengan besar 9 A dan pada frekuensi input listrik sebesar 50 Hz.

Proses simulasi selanjutnya yaitu dengan menggunakan variasi untuk arus listrik (i) pada input *sinusoidal* untuk dapat dilihat seberapa besar perubahan respon dinamis *electrodynamic shaker* yang telah dirancang ketika terdapat perbedaan arus listrik (i). Simulasi terakhir yang dilakukan pada tugas akhir ini adalah dengan menggunakan variasi material dan dimensi pada benda uji, dimana input yang digunakan tetap menggunakan input *sinusoidal* untuk menyesuaikan gerak *electrodynamic shaker*. Diagram alir yang digunakan pada simulasi variasi ini dapat ditunjukkan pada gambar di bawah ini.





Gambar 3.8 Diagram alir tahap simulasi sistem *electrodynamic shaker*

### 3.4 Parameter - Parameter pada Simulasi

Parameter yang digunakan pada sistem *electrodynamic shaker* sangat dibutuhkan untuk menunjang informasi yang akan diinputkan pada *m-file* dan nantinya dapat dihubungkan dengan blok diagram yang telah dibuat pada MATLAB Simulink. Berikut merupakan parameter yang dapat digunakan pada proses simulasi tugas akhir ini.

#### 3.4.1 Sampel Plat Kap Mobil

Nilai parameter sampel plat uji yang digunakan pada simulasi MATLAB Simulink dapat diketahui pada tabel 3.1 Dimana nilai dari parameter-parameter tersebut berasal dari studi literatur dan perhitungan yang dilakukan sebelum proses simulasi dilakukan. Sampel plat uji pertama yang digunakan pada perancangan *electrodynamic shaker* ini adalah jenis AISI Steel 1008 dan untuk variasi material serta dimensi sampel plat uji adalah Aluminium 7075-0, variasi tersebut digunakan untuk melihat perubahan respon dinamis *electrodynamic shaker* yang telah dirancang ketika digunakan untuk menguji sampel plat uji saat terjadi perbedaan material plat dan dimensinya.

Tabel 3.1 Parameter sampel plat kap mobil

Parameter	AISI Steel 1008		Aluminium 7075-0	
	Nilai	Satuan	Nilai	Satuan
Panjang (p)	0.5	M	0.6	m
Lebar (l)	0.5	M	0.6	m
Tinggi (t)	0.6	Mm	0.6	mm
Massa Jenis ( $\rho$ )	7850	kg/m <sup>3</sup>	2810	kg/m <sup>3</sup>
Massa (m)	1.1775	Kg	0.607	kg
Modulus Elastisitas (E)	200	MPa	71.7	MPa
Konstanta	80	N/m	4	N/m

<i>stiffness</i> (K)				
Konstanta Redaman (C)	530	Ns/m	115	Ns/m
Tensile Strength	340	MPa	280	MPa
Yield Strength	285	MPa	140	MPa
Poison Ratio	0.27	-	0.33	-

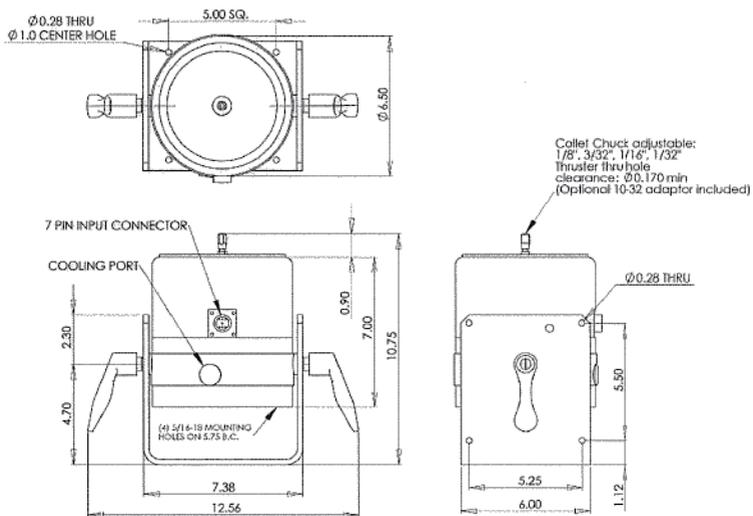
### 3.4.2 *Electrodynamic Shaker*

Nilai parameter dari *electrodynamic shaker* yang digunakan pada simulasi MATLAB Simulink dapat dilihat pada tabel 3.2 di bawah. Nilai parameter yang terdapat dalam tabel 3.2 tersebut didapatkan dari katalog dan studi literatur yang digunakan sebagai referensi. Apabila disesuaikan dengan katalog referensi, tipe *electrodynamic shaker* yang dapat dipilih adalah tipe 2060E dengan ketersediaan referensi  $\alpha$  (*electromechanical coupling coefficient*) untuk *range* frekuensi 1-6 kHz dari *paper* referensi [12]. Dimensi *electrodynamic shaker* yang digunakan untuk pengujian tugas akhir ini mengacu pada gambar teknik dari *electrodynamic shaker* tipe 2060E seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.9

Tabel 3.2 Parameter *electrodynamic shaker* yang digunakan dalam perhitungan

Parameter	Nilai	Satuan
Massa <i>electrodynamic shaker</i> ( $M_{ex}$ )	4	kg
Massa sampel plat kap mobil ( $M_b$ )	1.1775	kg
Konstanta <i>stiffness electrodynamic shaker</i> ( $K_{ex}$ )	3500	N/m
Konstanta <i>stiffness</i> sampel plat kap	80	N/m

mobil ( $K_b$ )		
Konstanta redaman <i>electrodynamic shaker</i> ( $C_{ex}$ )	2356	Ns/m
Konstanta redaman sampel plat kap mobil ( $C_b$ )	530	Ns/m
$\alpha$ ( <i>electromechanical coupling</i> )	3.956	Wb/m
Hambatan listrik ( <i>resistance</i> : $\Omega$ ) (R)	1	$\Omega$
Tegangan/ Beda potensial (V)	9	Volt
Jumlah lilitan (N)	150	Lilit
Kuat medan magnet / <i>flux density</i> ( $\beta$ )	0.28	Wb/m <sup>2</sup> (Tesla)
Radius lilitan kawat (r)	0.015	m



Gambar 3.9 Gambar teknik *electrodynamic shaker* tipe 2060E<sup>[12]</sup>

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## BAB IV GRAFIK DAN PEMBAHASAN

### 4.1 *Design of Requirement*

Rancangan *electrodynamic shaker* ini dengan memanfaatkan arus listrik yang diubah menjadi gaya mekanis dimana gaya mekanis tersebut bergerak secara translasi ke arah atas dan bawah, yang nantinya digunakan sebagai input pengujian. Arus listrik yang digunakan adalah jenis arus AC (bolak balik) dan nantinya akan dialirkan pada magnet, dimana magnet ini akan termagnetisasi oleh kumparan kawat yang lilitkan. Inti dari *electrodynamic shaker* ini sebenarnya adalah kumparan kawat yang melekat pada bagian yang tergantung pada adanya medan magnet radial (yang dapat membangkitkan medan magnet).

Bagian yang akan dirancang dalam penelitian tugas akhir ini diantaranya adalah nilai konstanta *stiffness*, koefisien redaman, jarak *gap* (yang ada di antara *moving element* yang ditempati oleh *coil* dan magnet), dan luasan benda uji. Sedangkan untuk bagian-bagian penyusun *electrodynamic shaker* yang lain seperti magnet permanen, kawat kumparan, daya untuk inputan, *amplifier*, diameter utama *electrodynamic shaker*, *input connector*, serta aksesoris yang lainnya disesuaikan dengan katalog acuan yang digunakan.

*Electrodynamic shaker* ini dirancang dengan spesifikasi yang diperoleh dari katalog acuan sebagai berikut :

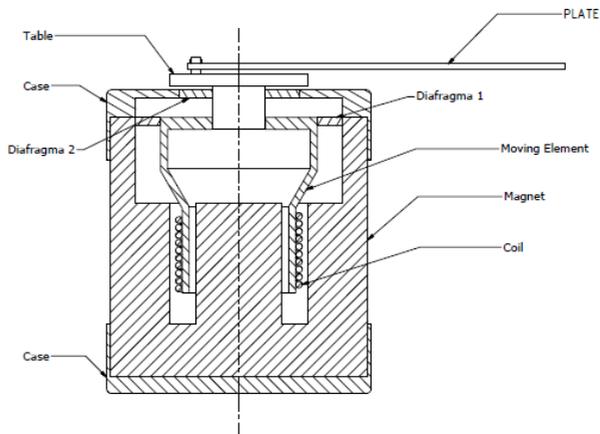
- Nama alat : *Electrodynamic shaker type 2060E*
- Dimensi rangka : 273 mm x 319 mm x 165 mm
- *Amplifier* : Seri 2050E05 dengan *control current* 500 VA
- Radius lilitan (*coil*) kawat : 0.015 m
- Jumlah lilitan : 150 lilit
- Kuat medan magnet : 0.28 Tesla ( $\text{Wb/m}^2$ )
- Hambatan listrik : 1  $\Omega$
- Daya inputan : 9 V, 50 Hz
- Diameter utama *shaker* : 165,1 mm

Dan untuk spesifikasi bagian yang akan dirancang diperoleh nilai sebagai berikut :

- Konstanta *stiffness shaker* : 3500 N/m
- Koefisien redaman *shaker* : 2356 Ns/m
- Jarak *gap* :  $6.6072 \times 10^{-9}$  m
- Dimensi benda uji : 0.5m x 0.5m x 0.05m
- Bahan benda uji : AISI *Steel* 1008

#### 4.2 Perancangan Sistem Utama *Electrodynamic Shaker*

Sistem utama yang digunakan dalam penelitian tugas akhir ini merupakan suatu jenis rancangan *electrodynamic shaker* yang dapat digunakan untuk pengujian sampel plat kap mobil dimana proses perancangan yang dilakukan tersebut didasarkan pada parameter serta karakteristik dinamis dari material uji dan juga lebih diutamakan pada fungsi atau fenomena dinamis yang akan ditimbulkan. Oleh karena hal tersebut, sebelum dilakukan visualisasi 3D dari rancangan *electrdynamic shaker* yang akan digunakan, diperlukan beberapa informasi yang harus diketahui terkait nilai konstanta *stiffness* dari *electrodynamic shaker* tersebut serta nilai koefisien redaman yang sesuai untuk pengujian yang akan dilakukan pada pengujian sampel plat kap mobil.



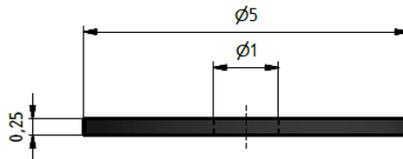
Gambar 4.1 Rancangan *electrodynamic shaker* yang digunakan untuk pengujian sampel plat kap mobil

#### 4.2.1 Verifikasi dan Representasi Nilai Konstanta *Stiffness* pada Perancangan Sistem *Electrodynamic Shaker*

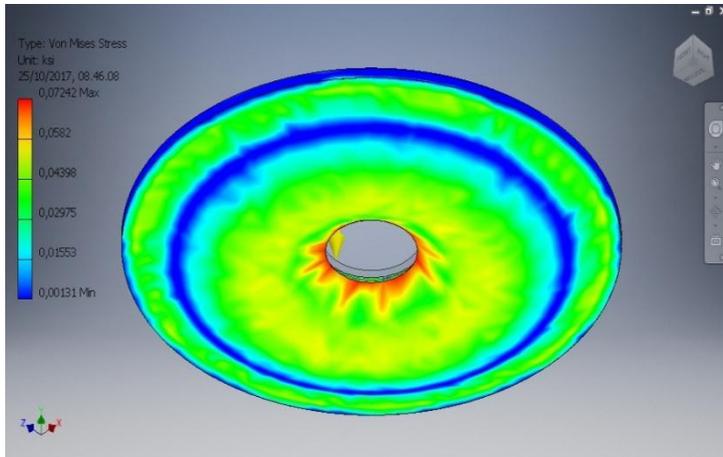
Telah didefinisikan pada penjabaran bab 3.2.4 bahwa nilai dari konstanta *stiffness* yang ada pada *electrodynamic shaker* merepresentasikan nilai yang dimiliki oleh *flexible support*. *Flexible support* tersebut biasanya disebut dengan jenis membran yang materialnya berasal dari *rubber* dimana nilai konstanta *stiffness*-nya telah tertera pada katalog acuan yang selanjutnya dilakukan simulasi pada *software Autodesk Inventor* untuk dapat dilakukan analisa mengenai tingkat keamanannya. Langkah verifikasi yang dilakukan adalah sebagai berikut, pertama dilakukan proses perancangan dengan menggambar lingkaran untuk *flexible support* dimana dimensinya disesuaikan dan mengacu pada gambar 3.9. Selanjutnya, dilakukan tahapan *trial and error* pada dimensi *flexible support* yang pada akhirnya ditentukan tebal yang sesuai adalah senilai 0.00635 m (0.25 in) seperti pada gambar 4.2. Dimana pada sebelumnya telah dilakukan beberapa kali percobaan dengan simulasi menggunakan

dimensi tebal yang berbeda-beda. Dimensi yang digunakan adalah sebesar 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3 in yang ditunjukkan pada gambar 4.3. Diketahui bahwa pada tebal selain 0.25 in (0.00635 m), kondisi *flexible support* yang digunakan menunjukkan kondisi kritisnya saat dikenai pembebanan dan pada tebal 0.1 in (0.003 m) terdapat peringatan *failure* pada pembebanan yang dilakukan. Kemudian dapat ditentukan besar nilai konstanta *stiffness* seperti pada katalog tabel 2.6 yakni sebesar 20 lbf/in dengan jenis material *rubber*. Langkah selanjutnya yaitu dilakukan pemberian beban pada rancangan *flexible support* yang tebalnya telah didapatkan, sehingga dihasilkan hasil pembebanan seperti yang ada pada gambar 4.3 (d) sehingga diketahui apakah rancangan yang digunakan aman atau tidak. Pembebanan yang diberikan pada *flexible support* adalah jenis beban vertikal yang mewakili massa *shaker* dan massa plat uji yaitu sebesar 5,1775 kg atau senilai 11,4144 lb. Gambar 4.3 tersebut merupakan nilai *stress* yang dihasilkan dari pembebanan yang dilakukan pada rancangan *flexible support*. Jadi dapat diambil kesimpulan bahwa, hasil rancangan *flexible support* yang telah dibuat masih aman untuk dapat digunakan dan memiliki nilai koefisien *stiffness* sebesar 20 lbf/in setara 3500 N/m dengan tebal 0.25 in (0,00635 m) dan berasal dari jenis material *rubber*.

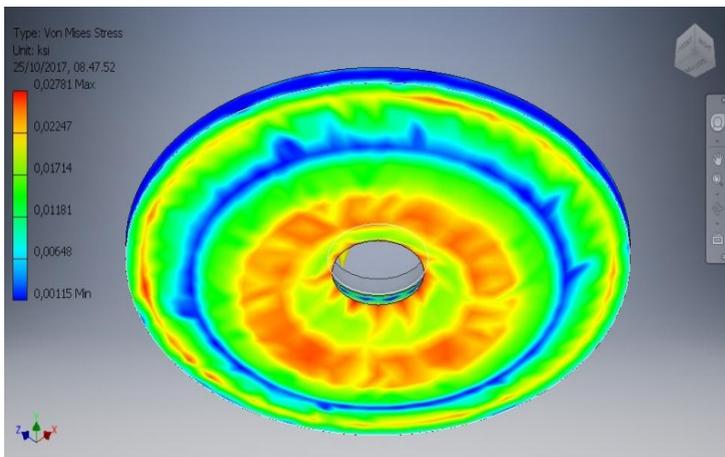
## STIFF SUSPENSION



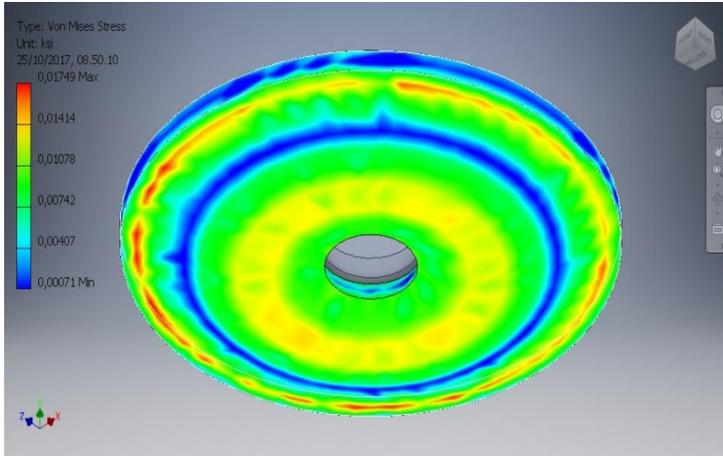
Gambar 4.2 Rancangan dimensi *flexible support*



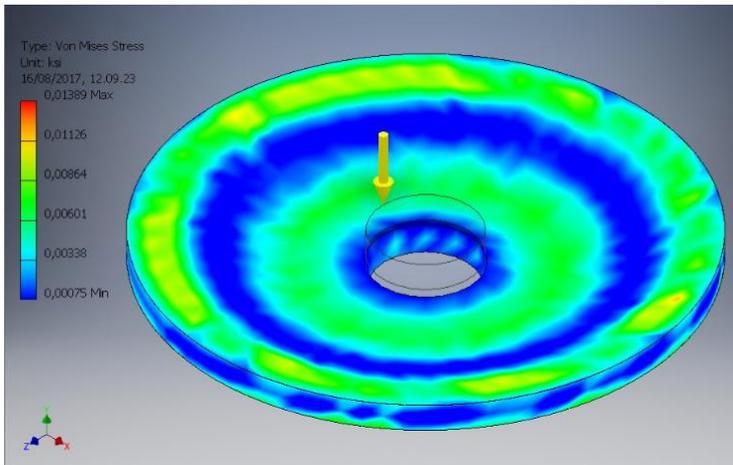
(a)



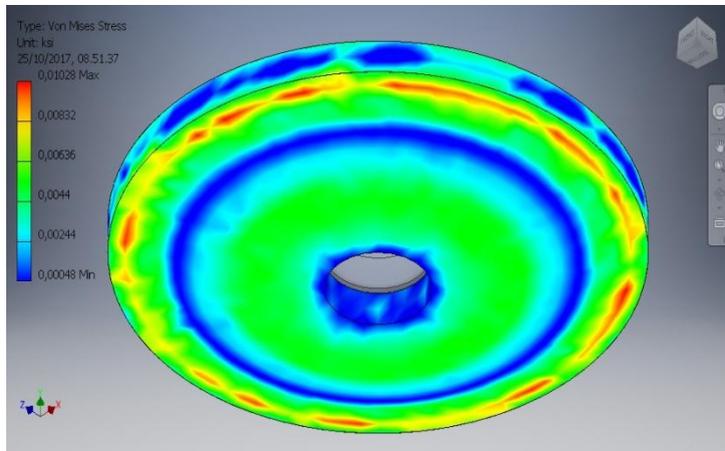
(b)



(c)



(d)



(e)

Gambar 4.3 Hasil simulasi pada percobaan untuk penentuan tebal *flexible support* dengan variasi tebal, (a) 0.00254 m, (b) 0.00381 m, (c) 0.00508 m, (d) 0.00635 m, (e) 0.00762 m

#### 4.2.2 Penentuan Nilai Konstanta Redaman yang Sesuai Pengujian

Pada bab 3.2.6 telah diketahui bahwa nilai dari koefisien redaman *electrodynamic shaker* didefinisikan sebagai nilai *viscous damping* yang terdapat pada *gap* yang berada di antara *moving element* yang ditempati oleh *coil* dan magnet. Pada langkah penentuan nilai konstanta redaman ini perlu dilakukan simulasi pada program MATLAB Simulink dengan harapan untuk dapat mengetahui nilai koefisien redaman dari *electrodynamic shaker* yang sesuai untuk pengujian sampel plat kap mobil. Sehingga dengan nilai tersebut, dapat dihasilkan respon perpindahan yang diterima oleh sampel plat kap mobil yang tidak melebihi nilai defleksi maksimumnya ketika ditinjau berdasarkan *peak value* dari beban yang dapat diterima (*peak value*  $X_2 = X_{\max}$  benda uji). Besar nilai defleksi maksimum

material uji inilah yang dijadikan sebagai acuan untuk besar perpindahan plat ( $X_{2 \text{ max}}$ ) dimana nilai tersebut menandakan bahwa simulasi telah mendapatkan hasil yang sesuai dengan perhitungan menurut persamaan 2.10, sehingga nilai dari koefisien redaman yang tidak melebihi nilai defleksi maksimumnya inilah yang dapat diambil menjadi nilai koefisien redaman yang sesuai. Dalam hal ini, sampel plat kap yang digunakan untuk pengujian dianggap sebagai massa batang yang memiliki panjang dan luasan yang mendapatkan beban di salah satu sisinya. Dengan parameter-parameter untuk material uji yang telah diketahui, didapatkan nilai  $X_{\text{max}}$  sampel plat uji sebesar  $4,706 \times 10^5$  m. Adapun perhitungan untuk nilai defleksi maksimum yang terjadi pada sampel plat dapat dilihat pada lampiran.

Simulasi yang digunakan untuk mendapatkan nilai koefisien redaman *electrodynamic shaker* ini dapat dilakukan dengan menggunakan simulasi Simulink dengan jenis input *sinusoidal* yang merepresentasikan gerak dari arus bolak-balik (AC) yang terjadi pada sistem *electrodynamic shaker* yang diinputkan. Input yang diberikan pada sistem yaitu sebesar persamaan :

$$Y(t) = \text{Amp} * \text{Waveform} (\text{Freq}, t)$$

Dimana :

Amp (Amplitudo) = Besar beda potensial input / *electrodynamic shaker* sebesar 9 Volt.

Freq (Frekuensi) = Besar frekuensi input / *electrodynamic shaker* sebesar 50 Hz.

*Wave form* = *sine*

*Time* (t) = Waktu yang digunakan untuk simulasi

Blok diagram yang akan digunakan untuk simulasi sistem utama untuk memperoleh nilai koefisien redaman *electrodynamic shaker* adalah dengan menggunakan input jenis *sinusoidal*, dimana blok diagram tersebut akan diuraikan pada subbab berikutnya. Dan dalam simulasi yang dilakukan, dihasilkan nilai koefisien

redaman yang sesuai untuk pengujian sampel plat sama dengan defleksi maksimum adalah sebesar 2356 Ns/m. Berikut hasil yang didapatkan dari simulasi dengan menggunakan blok diagram dan input jenis *sinusoidal* adalah seperti yang ditunjukkan pada tabel 4.1.

Tabel 4.1 Data hasil simulasi nilai koefisien redaman *electrodynamic shaker* pada Simulink

Nilai Cex (Ns/m)	Peak value $x_2$ (m)
1500	0,0000619
1675	0,0000586
1800	0,0000564
2100	0,0000513
2150	0,0000506
2300	0,0000481
2356	0,000047
2400	0,0000467
2500	0,0000457
2750	0,0000423

Berdasarkan tabel 4.1 di atas dapat diketahui bahwa nilai koefisien redaman dari simulasi, yang memenuhi nilai dan menghasilkan respon perpindahan pada sampel plat kap mobil ketika ditinjau secara *peak value* sama dengan defleksi maksimum yang dapat diterima sampel plat kap mobil (*peak value*  $X_2 = X_{\max}$  benda uji) adalah sebesar 2356 Ns/m. Sehingga besar koefisien redaman untuk *electrodynamic shaker* yang sesuai dengan simulasi yang telah dilakukan pada MATLAB Simulink adalah 2356 Ns/m, dan respon dinamis dari perpindahan sampel plat kap mobil dapat diketahui pada gambar 4.4 berikut.

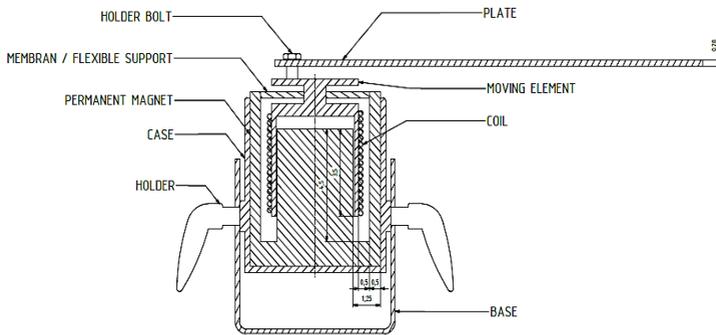


Gambar 4.4 Respon dinamis perpindahan sampel plat kap mobil

#### 4.2.2.1 Analisa Visualisasi Koefisien Redaman dalam Bentuk 3D

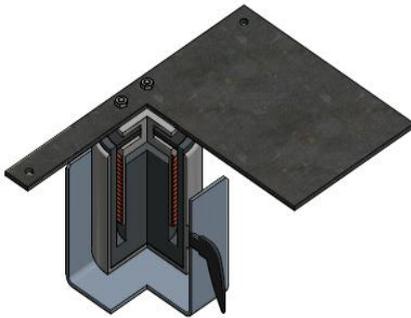
Setelah nilai dari koefisien redaman didapatkan dan diketahui nilainya yaitu sebesar 2356 Ns/m, selanjutnya nilai dari besaran *gap* yang terdapat diantara *moving element* yang ditempati oleh *coil* dan magnet dapat ditentukan dimensinya. Mengacu pada persamaan (2.9), perhitungan mengenai besaran *gap* dapat dilakukan, sehingga didapatkan besar *gap* yang ada diantara *moving element* dimana terdapat *coil* dan magnet ( $h$ ) diketahui sebesar  $6.6072 \times 10^{-9}$  m. Perhitungan mengenai besar *gap* yang didapatkan, dicantumkan pada lampiran. Dengan besaran nilai *gap* sedemikian, seperti yang didapatkan dari perhitungan memiliki beberapa kendala dan akan sedikit mengalami kesusahan saat dilakukan proses *manufacturing* bila akan dimodelkan secara fisik. Maka dari itu dengan memperhatikan segi *manufacturing* dan estetikanya, besar *gap* yang dipergunakan didesain dengan ukuran  $h = 0.00508$  m atau senilai 0.2 in. Dengan adanya nilai  $h$  sebesar 0.00508 m tersebut, nilai koefisien redaman yang ada pada *gap* menjadi sangat kecil (perhitungan nilai koefisien redaman yang baru ada pada

lampiran). Dengan adanya hal tersebut, dapat disimpulkan bahwa besaran nilai koefisien redaman dari *electrodynamic shaker* tersebut mewakili nilai koefisien redaman dari keseluruhan bagian pada sistem *electrodynamic shaker*. Dimana nilai koefisien redaman pada sistem *electrodynamic shaker* tersebut tidak hanya merepresentasikan nilai *viscous damping* yang ada pada *gap* diantara *moving element* tempat *coil* dan magnet saja, namun juga terdapat pengaruh redaman berupa *dissipated energy* yang berasal dari *electrical system* maupun *mechanical system*.



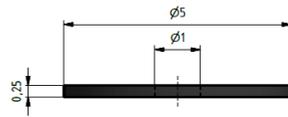
Gambar 4.5 Hasil rancangan dimensi *electrodynamic shaker*

#### 4.2.2.2 Hasil Akhir Rancangan *Electrodynamic Shaker* untuk Pengujian Sampel Plat Kap Mobil

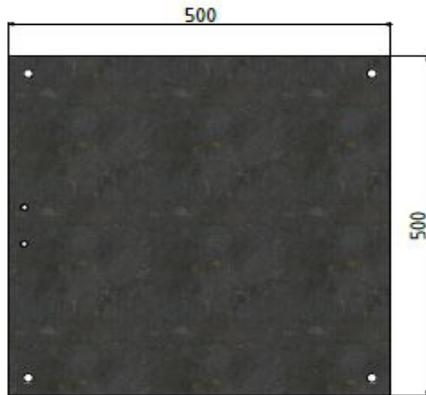


(a)

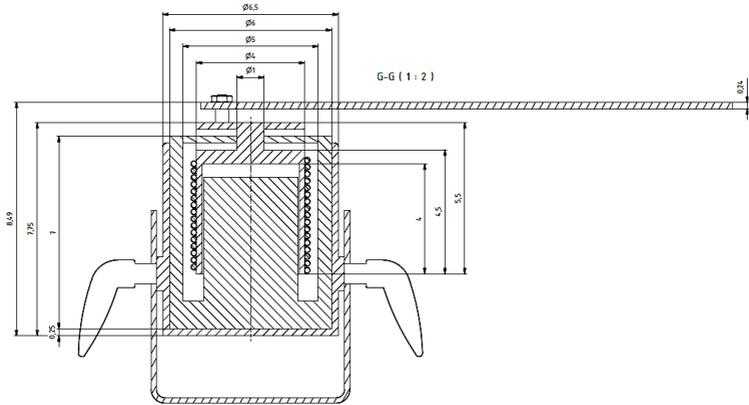
STIFF SUSPENSION



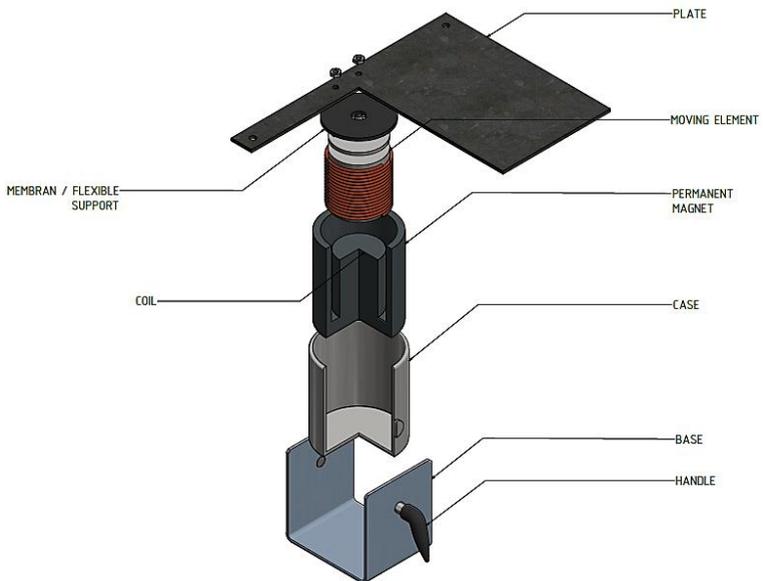
(b)



(c)



(d)



(e)

Gambar 4.6 (a) Gambar potongan *electrodynamic shaker*; (b) *Flexible support*; (c) Benda uji (sampel plat kap mobil); (d)

Gambar 2D serta dimensi; (e) Keterangan bagian penyusun dari rancangan *Electrodynamic Shaker* untuk pengujian sampel plat kap mobil

Gambar diatas menunjukkan gambaran secara keseluruhan dari hasil rancangan *electrodynamic shaker* yang digunakan untuk pengujian. Gambar 4.6 tersebut menunjukkan (a) Gambar potongan *electrodynamic shaker*; (b) Dimensi *flexible support*; (c) Dimensi benda uji (sampel plat kap mobil); (d) Gambar 2D beserta dimensi; dan (e) Keterangan bagian-bagian penyusun dari rancangan *electrodynamic shaker* untuk pengujian sampel plat kap mobil.

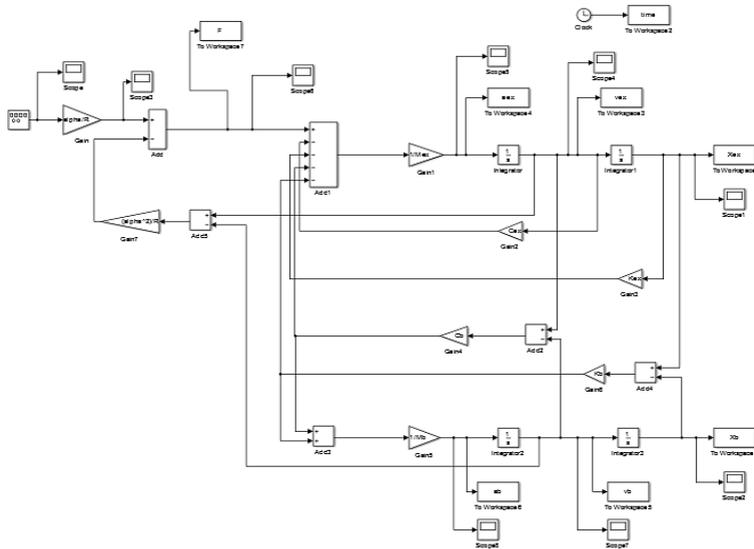
### 4.3 Analisa Respon Dinamis untuk Simulasi Pengujian

Simulasi yang dilakukan untuk penyelesaian tugas akhir ini dilakukan dengan menggunakan program MATLAB Simulink menggunakan inputan dengan jenis input *sinusoidal* dan *step* pada sistem *electrodynamic shaker* untuk pengujian sampel plat kap mobil. Selain variasi mengenai inputan untuk sistem utama *electrodynamic shaker*, variasi yang digunakan pada tugas akhir ini yaitu adanya variasi pada besaran arus yang dilewatkan pada sistem *electrodynamic shaker* serta variasi material dan dimensi plat uji, dimana untuk variasi besar arus dan material serta dimensi ini menggunakan jenis input *sinusoidal*.

#### 4.3.1 Respon Input *Sinusoidal*

Simulasi untuk proses pertama yang dilakukan pada sistem *electrodynamic shaker* untuk pengujian sampel plat kap mobil adalah dengan jenis input *sinusoidal* untuk dihasilkan nilai koefisien redaman sistem *electrodynamic shaker* yang cocok untuk pengujian. Dimana hasil pada simulasi dengan jenis input *sinusoidal* ini menghasilkan respon perpindahan yang terjadi pada material uji sama dengan nilai defleksi maksimum yang dapat diterima material, sehingga didapatkan nilai koefisien redaman yang disesuaikan dengan nilai defleksi yang telah dibatasi dengan

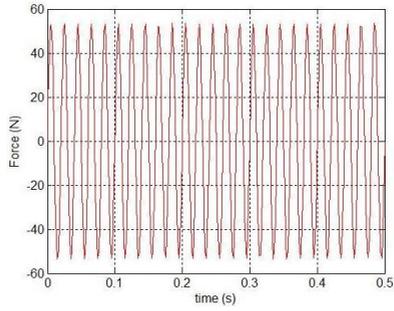
nilai defleksi maksimum tersebut. Berikut merupakan blok diagram pada program MATLAB Simulink yang digunakan untuk simulasi sistem utama *electrodynamic shaker* yaitu dengan menggunakan input jenis *sinusoidal*.



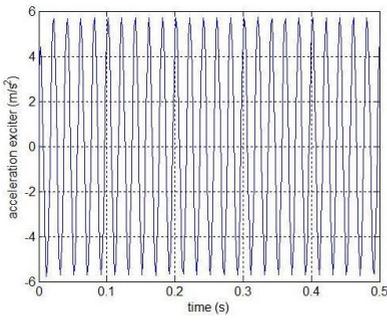
Gambar 4.7 Blok Diagram Simulasi sistem utama dengan Input *Sinusoidal*

#### 4.3.1.1 Hasil Simulasi dan Analisa Respon

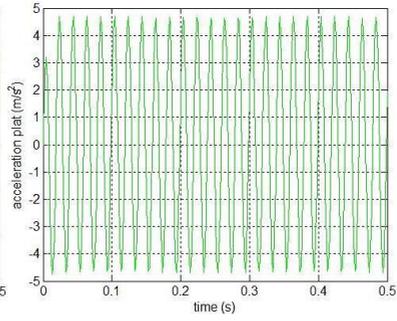
Berikut merupakan analisa respon dinamis saat input yang digunakan pada *electrodynamic shaker* adalah input *sinusoidal* dengan nilai amplitudo 9 Volt dan frekuensi 50 Hz.



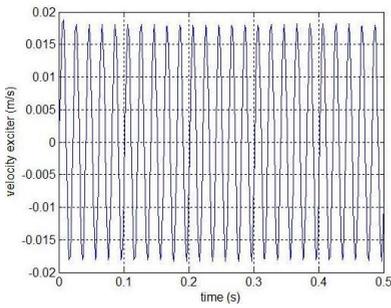
(a)



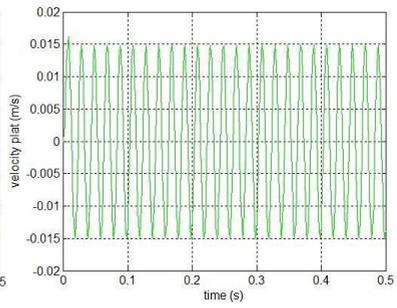
(b)



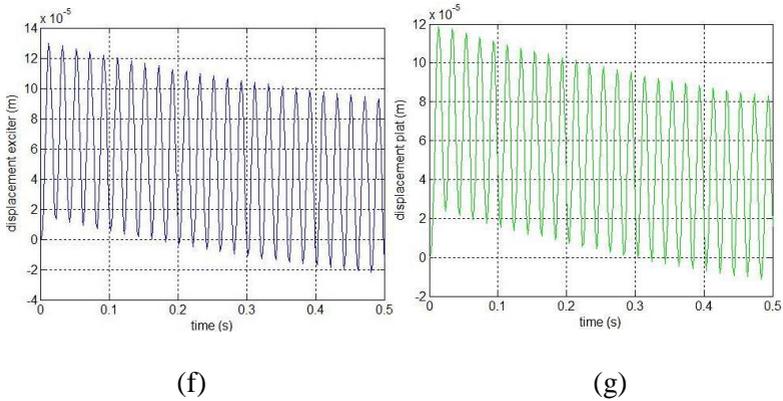
(c)



(d)



(e)



Gambar 4.8 Grafik respon dinamis (a) gaya eksitasi, (b) percepatan *shaker*, (c) percepatan plat, (d) kecepatan *shaker*, (e) kecepatan plat, (f) perpindahan *shaker*, (g) perpindahan plat dengan input *sinusoidal*

Dari hasil simulasi yang telah dilakukan, diperoleh nilai-nilai dari setiap besaran gaya, percepatan, kecepatan dan perpindahan untuk *electrodynamic shaker* dan plat uji, hasil yang didapatkan dari hasil simulasi dapat ditabelkan menjadi seperti tabel 4.2 berikut.

Tabel 4.2 Data hasil respon sistem *electrodynamic shaker* dengan input *sinusoidal*

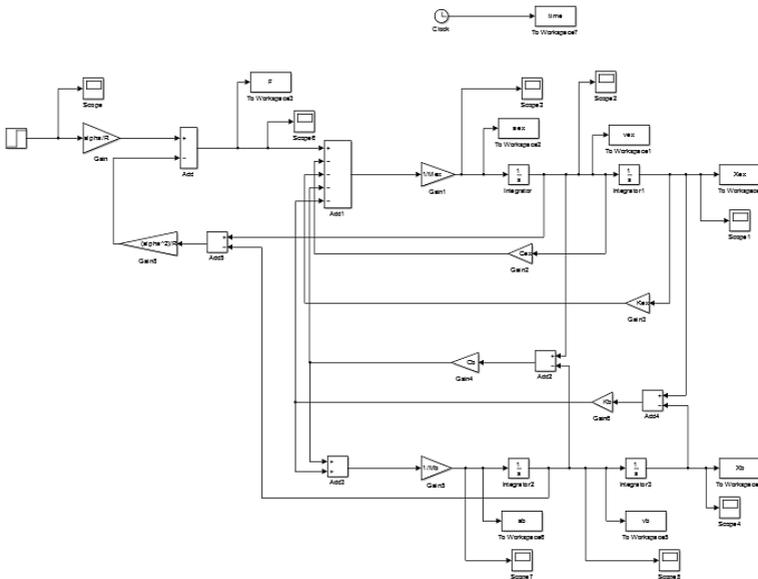
Jenis Respon	<i>Electrodynamic Shaker</i>	Sampel plat
x (perpindahan maksimum; m)	0.000058	0.000047
v (kecepatan maksimum; m/s)	0.0187	0.016
a (percepatan maksimum; m/s <sup>2</sup> )	5.73	4.703

Gambar 4.8 merupakan gambar grafik respon dinamis dari (a) gaya eksitasi, (b) percepatan *shaker*, (c) percepatan plat, (d) kecepatan *shaker*, (e) kecepatan plat, (f) perpindahan *shaker*, (g) perpindahan plat dengan menggunakan inputan arus sebesar 9 A disesuaikan dari katalog. Dari simulasi yang dihasilkan, besar nilai gaya eksitasi yang dihasilkan dan mengenai sistem *electrodynamic shaker* adalah sebesar 53,7 N. Berdasarkan tabel 4.2, dapat diketahui bahwa respon yang dihasilkan oleh *electrodynamic shaker* secara keseluruhan menunjukkan hasil yang lebih besar jika dibandingkan respon dinamis yang terjadi pada plat uji. Hal tersebut dapat disebabkan karena *electrodynamic shaker* memiliki nilai koefisien redaman yang cukup besar jika dibandingkan dengan plat uji yaitu sebesar 2356 Ns/m untuk *shaker* dan 530 Ns/m untuk plat uji. Disamping itu, respon dinamis perpindahan yang dihasilkan oleh *electrodynamic shaker* menunjukkan nilai yang lebih besar dikarenakan gaya eksitasi yang terjadi oleh keseluruhan sistem lebih dahulu mengenai *shaker* lalu kemudian baru diteruskan ke plat uji. Dalam respon percepatan dan kecepatan pada kedua jenis massa *electrodynamic shaker* dan plat uji membutuhkan waktu yang relatif sebentar untuk mencapai kondisi *steady* yakni kurang dari 2 s. Namun hal tersebut tidak berlaku untuk respon perpindahan yang terjadi, untuk mencapai kondisi *steady*-nya *electrodynamic shaker* dan plat uji setidaknya membutuhkan waktu kurang lebih sekitar 4,5 s.

#### 4.3.2 Respon Input Step

Setelah menggunakan inputan jenis *sinusoidal*, input yang selanjutnya digunakan adalah jenis input *step* dimana jenis inputan ini digunakan pada sistem *electrodynamic shaker* untuk dapat melihat respon *transient* yang terjadi saat pengujian sampel plat *hood* mobil yang telah dirancang. Dimana untuk besaran parameter-parameter yang digunakan pada simulasi menggunakan input *step* ini secara keseluruhan disamakan dengan input *sinusoidal* karena input *sinusoidal* merupakan jenis input yang

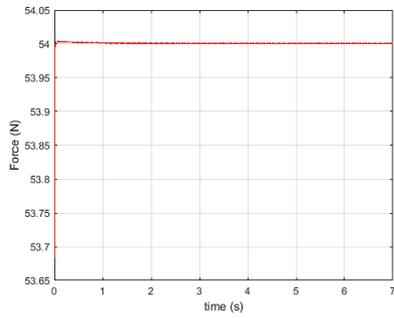
sesuai untuk perepresentasian gerak sistem *electrodynamic shaker*, dan untuk input *step* hanya dipergunakan untuk melihat kondisi sistem *electrodynamic shaker* ketika dikenai gangguan. Berikut merupakan blok diagram pada program MATLAB Simulink yang digunakan untuk proses simulasi *electrodynamic shaker* yaitu dengan menggunakan input jenis *step*.



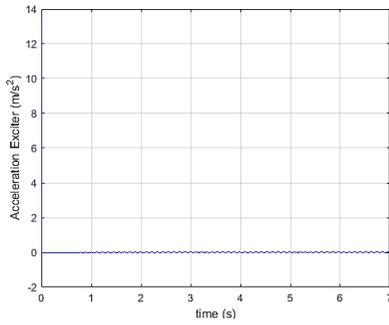
Gambar 4.9 Blok Diagram Simulasi sistem utama dengan Input *Step*

#### 4.3.2.1 Hasil Simulasi dan Analisa Respon

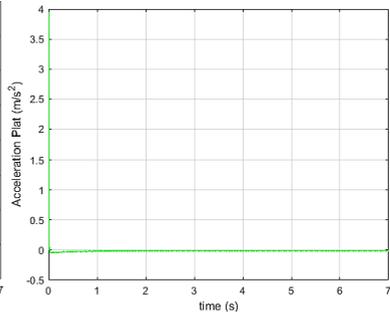
Berikut merupakan analisa respon dinamis saat input yang digunakan pada *electrodynamic shaker* menggunakan input *step* dengan arus listrik yang dialirkan sebesar 9 A. Proses analisa menggunakan jenis input *step* ini bertujuan untuk mengetahui seberapa besar respon *transient* sistem terhadap gaya yang diberikan.



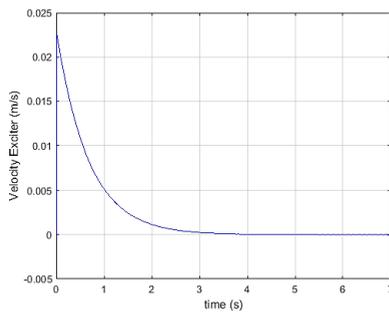
(a)



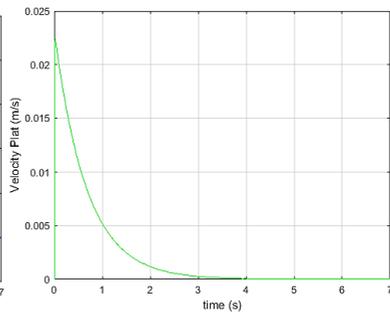
(b)



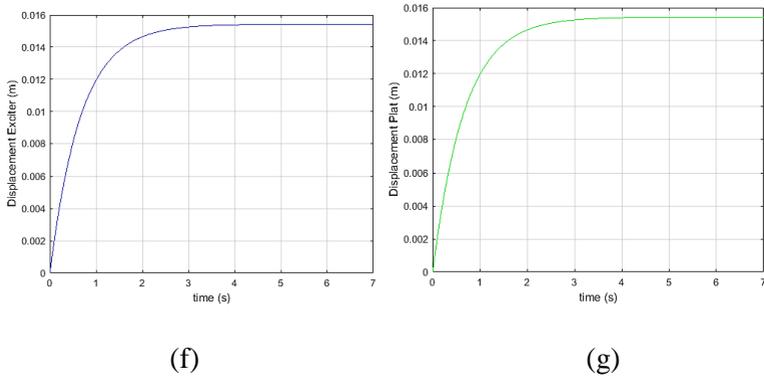
(c)



(d)



(e)



Gambar 4.10 Grafik respon dinamis (a) gaya eksitasi, (b) percepatan *shaker*, (c) percepatan plat, (d) kecepatan *shaker*, (e) kecepatan plat, (f) perpindahan *shaker*, (g) perpindahan plat dengan input *step*

Tabel 4.3 Data hasil respon sistem *electrodynamic shaker* dengan input *step*

Jenis Respon	<i>Electrodynamic Shaker</i>	Sampel plat
x (perpindahan maksimum; m)	0.0154	0.0153
v (kecepatan maksimum; m/s)	0.0115	0.0111
a (percepatan maksimum; $m/s^2$ )	0.134	2.047
Settling time respon perpindahan (s)	4.7	4.3
Settling time respon kecepatan (s)	4.6	4.1
Settling time respon percepatan (s)	0.005	0.0041
%Overshoot respon perpindahan	0.504%	0.504%
%Overshoot respon kecepatan	0.792%	1.020%
%Overshoot respon percepatan	1.036%	1.385%

Pada gambar 4.10 dapat diketahui grafik respon dinamis pada *electrodynamic shaker* menggunakan input *step* yang meliputi (a) gaya eksitasi, (b) percepatan *shaker*, (c) percepatan plat, (d) kecepatan *shaker*, (e) kecepatan plat, (f) perpindahan *shaker*, (g) perpindahan plat. Dan pada tabel 4.3 merupakan data hasil nilai maksimum, *settling time*, beserta *%overshoot* dari setiap respon dinamis yang terjadi. Dari hasil simulasi menggunakan input jenis *step* ini diperoleh gaya eksitasi yang dihasilkan dari sistem yaitu sebesar 54 N. Untuk respon dinamis dari sistem, nilai *%overshoot* pada respon perpindahan, kecepatan dan percepatannya menunjukkan nilai hampir mendekati 0 sebab tidak diperlukan proses osilasi untuk mencapai nilai stabilnya. Hal tersebut dikarenakan akibat nilai redaman pada sistem *electrodynamic shaker* yang cukup tinggi. Untuk nilai *settling time* yang didapatkan pada respon perpindahan dan kecepatan menunjukkan nilai yang mempunyai *range* yang tidak begitu jauh yaitu 4-5 s pada kedua massa (*electrodynamic shaker* dan plat uji). Namun, untuk *settling time* pada respon percepatannya menunjukkan nilai yang relatif kecil yaitu hampir mendekati 0. Dan nilai respon perpindahan serta kecepatan pada *electrodynamic shaker* menunjukkan nilai yang lebih besar jika dibandingkan dengan plat ujinya, namun hal tersebut berbanding terbalik untuk nilai respon percepatannya dimana diketahui nilai percepatan dari plat uji justru lebih besar jika dibandingkan dengan *electrodynamic shaker*.

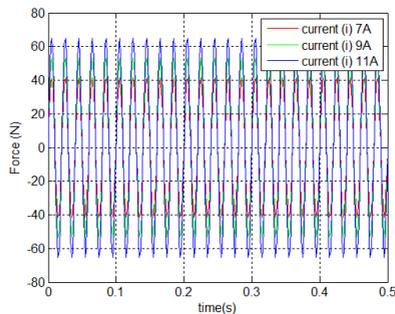
### 4.3.3 Respon Variasi

Tahapan selanjutnya yaitu melakukan simulasi dengan menggunakan variasi nilai arus listrik dari sistem elektris pada *electrodynamic shaker*. Dimana seperti penjelasan yang telah disampaikan sebelumnya bahwa dalam proses simulasi dengan variasi kuat arus listrik ini, input yang digunakan pada sistem *electrodynamic shaker* adalah input *sinusoidal* karena input ini merupakan representasi gerak sistem yang sebenarnya. Besar nilai perbedaan arus listrik yang dialirkan yaitu sebesar kurang lebih 2

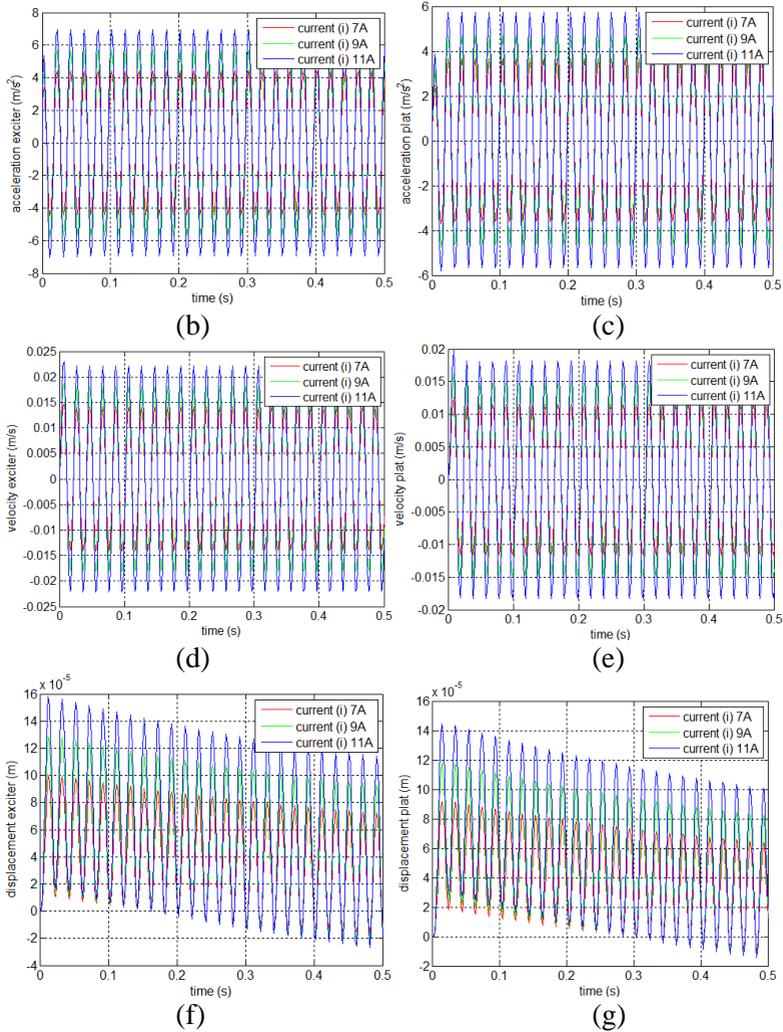
A dari nilai arus listrik yang diberikan ke sistem utama. Besar nilai arus listrik yang diberikan pada sistem yaitu sebesar 7 A, 9 A dan 11 A. Selain variasi untuk input arus listrik, variasi juga dilakukan pada jenis material plat uji (variasi jenis material dan dimensi ukurannya). Variasi pada nilai kuat arus dan material plat uji tersebut dimaksudkan agar sistem dapat mengetahui respon dinamis dari sistem saat dikenai inputan arus listrik yang berbeda dan pada plat dengan material yang berbeda, seberapa besarkah perbedaannya.

#### 4.3.3.1 Respon Variasi Arus pada Input *Sinusoidal*

Berikut merupakan analisa respon dinamis saat input yang digunakan pada *electrodynamic shaker* menggunakan input *sinusoidal* dan dengan menggunakan variasi arus listrik yang dialirkan sebesar 7 A, 9 A dan 11 A serta pada frekuensi 50 Hz.



(a)

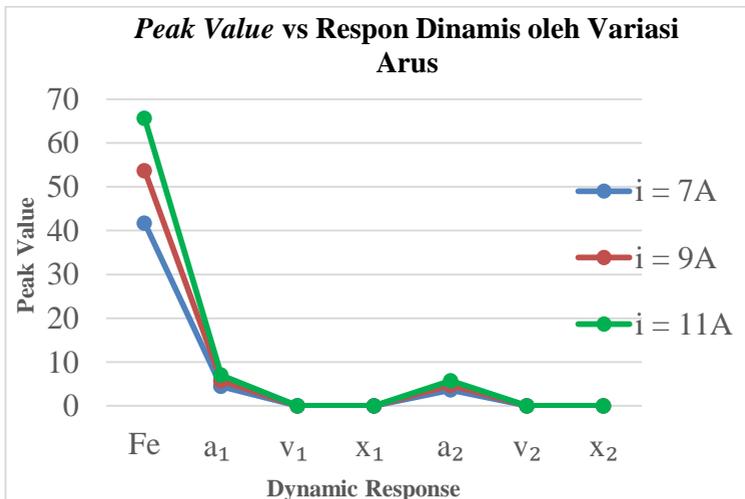


Gambar 4.11 Grafik respon dinamis (a) gaya eksitasi, (b) percepatan *shaker*, (c) percepatan plat, (d) kecepatan *shaker*, (e) kecepatan plat, (f) perpindahan *shaker*, (g) perpindahan plat

dengan input *sinusoidal* pada variasi arus sebesar 7A, 9A dan 11A

Tabel 4.4 Data hasil respon sistem *electrodynamic shaker* dengan variasi arus

Respon Dinamis (m)	Arus Listrik (i) A			Satuan	% Perubahan	
	7	9	11		i = 7A	i = 11A
Fe	41,7	53,7	65,58	N	-22,2	22,2
$a_1$	4,46	5,736	7,01	$m/s^2$	-22,2	22,2
$v_1$	0,0146	0,01876	0,02292	m/s	-22,1	22,1
$x_1$	0,000045	0,000058	0,000071	m	-22,2	22,1
$a_2$	3,658	4,703	5,748	$m/s^2$	-22,2	22,2
$v_2$	0,01245	0,01601	0,01957	m/s	-22,2	22,2
$x_2$	0,000037	0,0000482	0,0000583	m	-22,7	21,0



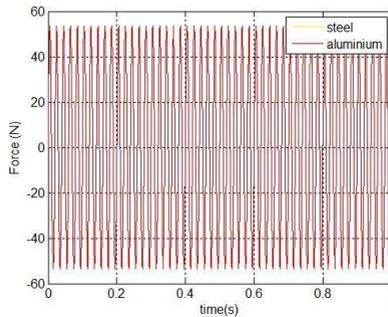
Gambar 4.12 Grafik nilai *peak* dari tiap respon dengan variasi arus

Gambar 4.11 merupakan gambar grafik respon dinamis dari (a) gaya eksitasi, (b) percepatan *shaker*, (c) percepatan plat, (d) kecepatan *shaker*, (e) kecepatan plat, (f) perpindahan *shaker*, (g) perpindahan plat dengan input *sinusoidal* pada variasi arus sebesar 7A, 9A dan 11A. Serta pada tabel 4.4 dapat diketahui data hasil simulasi respon sistem *electrodynamic shaker* dengan variasi besar arus dan % perubahan saat terjadi kenaikan dan penurunan nilai arusnya. Untuk gambar selanjutnya, yaitu gambar 4.12 adalah gambar grafik *peak value* terhadap respon dinamis pada tiap variasi arus yang terjadi, dan untuk grafik *peak value* setiap responnya dapat dilihat pada halaman Lampiran.

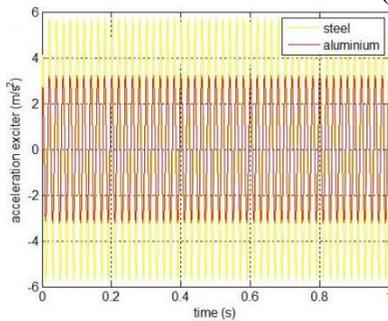
Pada gambar 4.11 diketahui bahwa grafik dengan warna biru menunjukkan hasil respon dinamis yang terbesar saat arus listrik yang dikenakan yaitu sebesar 11A, warna hijau menunjukkan besar respon dinamis saat sistem dikenai arus listrik sebesar 9A, serta warna merah menunjukkan besar respon dinamis pada sistem saat dikenai arus listrik sebesar 7A dan ini merupakan respon dinamis dengan nilai terendah jika dibandingkan dengan dua respon dinamis lainnya saat arus listrik yang digunakan sebesar 9A dan 11A. Dapat dilakukan analisa pada gambar 4.11 dan 4.12, bahwa gambar grafik menunjukkan *trendline* saat semakin besar nilai arus listrik yang dikenakan ke sistem *electrdynamic shaker* maka akan semakin besar juga gaya eksitasi yang dihasilkan pada sistem dan respon dinamis yang diterima. Dengan kata lain saat input yang diberikan ke sistem semakin besar, nilai respon dinamis yang dihasilkan pun juga akan semakin besar. Dan pada tabel 4.4 dapat diketahui presentase dari nilai perubahan ketika terjadi kenaikan dan penurunan nilai arus listrik yang dikenakan, dimana pada tabel tersebut ditunjukkan bahwa besar presentase untuk setiap respon dinamis yang dihasilkan yaitu mencapai angka sekitar 22.2 %.

### 4.3.3.2 Respon Variasi Material dan Dimensi pada Input Sinusoidal

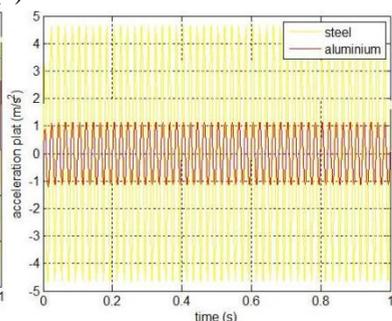
Berikut merupakan analisa respon dinamis saat input yang digunakan pada *electrodynamic shaker* menggunakan input *sinusoidal* dengan menggunakan variasi material dan dimensinya, pada frekuensi 50 Hz. Dimana material yang digunakan adalah jenis AISI 1008 berukuran 0.5m x 0.5m x 0.05m dan aluminium 7075-0 berukuran 0.6m x 0.6m x 0.06m.



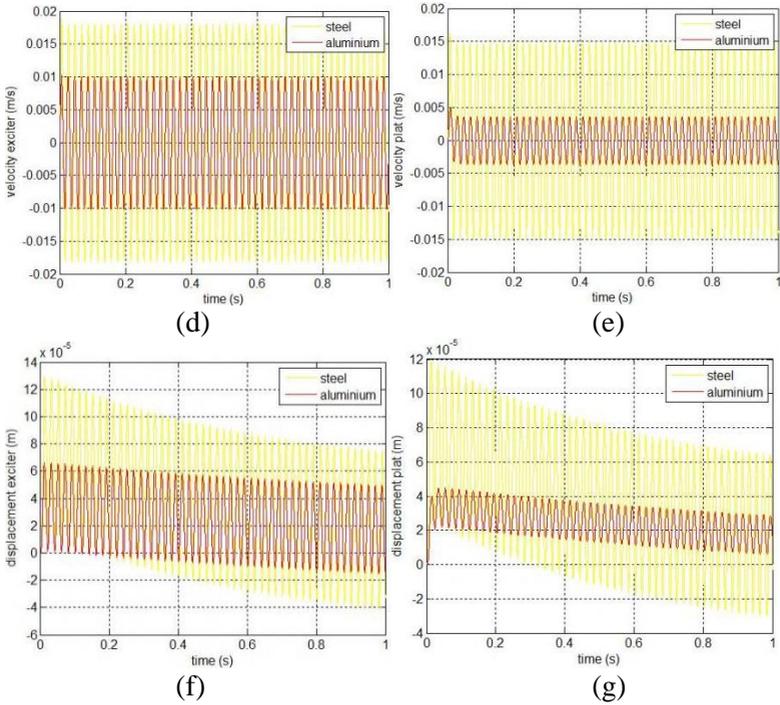
(a)



(b)



(c)

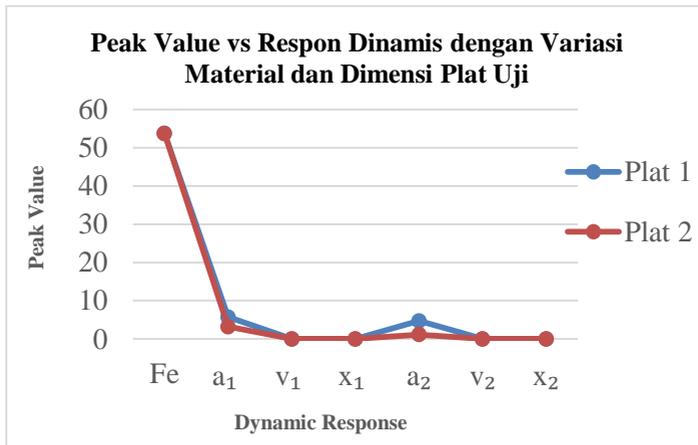


Gambar 4.13 Grafik respon dinamis (a) gaya eksitasi, (b) percepatan *shaker*, (c) percepatan plat, (d) kecepatan *shaker*, (e) kecepatan plat, (f) perpindahan *shaker*, (g) perpindahan plat dengan input *sinusoidal* pada variasi material dan dimensi plat uji

Tabel 4.5 Data hasil respon sistem *electrodynamic shaker* dengan variasi material dan dimensi plat uji

Respon Dinamis (Peak Value) (m)	Plat 1 (AISI 1008)	Plat 2 (Aluminium 7075-0)	Satuan	% Perubahan
Fe	53,7	53,7	N	0

$a_1$	5,73	3,198	$m/s^2$	44,18848168
$v_1$	0,0187	0,01016	$m/s$	45,6684492
$x_1$	0,000058	0,000066	$m$	13,79310345
$a_2$	4,703	1,124	$m/s^2$	76,10036147
$v_2$	0,016	0,004898	$m/s$	69,3875
$x_2$	0,000047	0,00000543	$m$	4,255319149



Gambar 4.14 Grafik besar *Peak Value* terhadap respon dinamis dengan variasi material dan dimensi plat uji

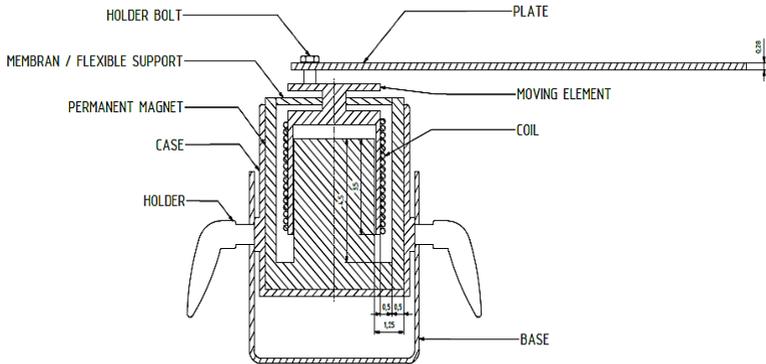
Dari gambar 4.13 dapat dilihat grafik respon dinamis dari simulasi dengan input *sinusoidal* menggunakan variasi jenis material (AISI 1008 dan Aluminium 7075-0) dan dimensi ukuran plat uji meliputi (a) gaya eksitasi, (b) percepatan *shaker*, (c) percepatan plat, (d) kecepatan *shaker*, (e) kecepatan plat, (f) perpindahan *shaker* dan (g) perpindahan plat. Serta pada tabel 4.5 dapat diketahui data hasil simulasi respon dinamis sistem *electrodynamic shaker* dan gambar grafik 4.14 menunjukkan besar *peak value* terhadap respon dinamis dengan variasi material dan dimensi plat uji. Dari hasil yang ditunjukkan tersebut, dapat diketahui bahwa nilai input Fe yang dikenakan pada sistem

*electrodynamic shaker* bernilai sama yaitu sebesar 53,7. Hal tersebut berarti bahwa besar perubahan pada nilai  $m$ ,  $k$  dan  $C$  pada plat uji tidak mengubah respon dinamis besar gaya eksitasi pada sistem kelistrikan yang nantinya diterima oleh *electrodynamic shaker*. Kemudian untuk proses selanjutnya dapat dilakukan analisa pada respon dinamis yang dihasilkan oleh masing-masing plat untuk besar percepatan, kecepatan, perpindahannya dan dari hasil yang ditunjukkan diketahui bahwa nilai dari plat aluminium 7075-0 menunjukkan hasil respon dinamis yang lebih kecil jika dibandingkan dengan plat AISI 1008. Hal tersebut berarti bahwa ketika dilakukan variasi pada material dan dimensi plat uji perlu dilakukan penyesuaian untuk nilai koefisien redaman yang digunakan, karena apabila digunakan nilai redaman yang tetap sama antara material AISI 1008 dan Aluminium 7075-0, material Aluminium 7075-0 akan mengalami defleksi yang melebihi nilai defleksi maksimal yang diperbolehkan untuk spesifikasinya. Nilai redaman yang sesuai untuk masing-masing material tersebut adalah 2356 Ns/m untuk AISI 1008 dan 5000 Ns/m untuk Aluminium 7075-0.

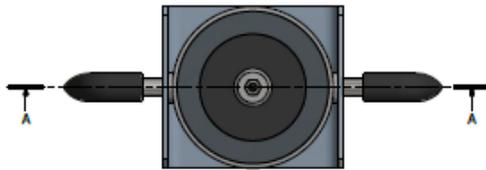
#### **4.4 *Electrodynamic Shaker Final Design***

Berdasarkan pada proses simulasi sistem *electrodynamic shaker* menggunakan input *sinusoidal* seperti yang telah dilakukan, didapatkan nilai redaman dari kesatuan sistem *electrodynamic shaker* yang telah sesuai dengan rancangan. Dengan nilai yang telah didapatkan tersebut, diketahui hasil dari besaran *gap* di dalam instalasi komponen *shaker* yang tidak proporsional dengan besar redaman sebesar 2356 Ns/m. Dari hal tersebut dapat diambil kesimpulan bahwa nilai redaman sistem *electrodynamic shaker* yang didapatkan tidak hanya disebabkan dan dipengaruhi oleh adanya efek *viscous damping* saja namun juga berasal dari pengaruh subsistem *part-part* yang menjadi komponen penyusun *electrodynamic shaker* secara keseluruhan serta terpengaruh dari redaman lain yang berupa *dissipated energy* dari sistem kelistrikan maupun mekanisnya. Untuk dapat

menghasilkan *electrodynamic shaker* yang dapat mudah dilakukan proses manufaktur, dimensi yang proporsional dan sesuai dapat diketahui pada gambar 4.15



(a)



(b)

Gambar 4.15 Rancangan akhir dari *electrodynamic shaker* (a) dengan keterangan, (b) tampak atas

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

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian dan analisa yang telah dilakukan pada sistem *electrodynamic shaker* untuk pengujian plat kap mobil, didapatkan kesimpulan yaitu sebagai berikut :

1. Diperoleh hasil rancangan *electrodynamic shaker* yang digunakan untuk pengujian plat kap mobil dengan nilai ukuran tebal *flexible support* yang sesuai yaitu sebesar 0.00635 m (0.25 in) dan nilai konstanta *stiffness* yaitu sebesar 3500 N/m dengan jenis material yang digunakan adalah *rubber* karena memiliki nilai elastisitas yang sesuai. Untuk nilai koefisien redaman dari keseluruhan sistem *electrodynamic shaker* yang digunakan diperoleh nilai sebesar 2356 Ns/m dimana nilai tersebut mewakili keseluruhan nilai redaman pada sistem, dimana nilai redaman tersebut tidak hanya diakibatkan oleh nilai *viscous damping* yang ada pada *gap* antara *moving element* yang ditempati oleh *coil* dan magnet saja, namun juga karena pengaruh dari redaman lain berupa *dissipated energy* yang berasal dari sistem listrik maupun mekanis.
2. Sistem *electrodynamic shaker* yang telah dirancang menghasilkan respon dinamis dengan nilai respon pada *shaker* lebih besar apabila dibandingkan dengan nilai respon dinamis yang dihasilkan oleh plat uji. Hal tersebut dapat terjadi karena adanya pengaruh sistem listrik yang terlebih dahulu dikenakan pada *shaker* dan kemudian baru diteruskan ke plat uji.
3. Pada sistem *electrodynamic shaker* yang telah dirancang, nilai respon dinamis menggunakan input *step* menunjukkan nilai *%overshoot* mendekati 0. Untuk nilai *settling time* yang dihasilkan, perpindahan sistem mulai menunjukkan kondisi *steady* pada nilai sekitar 4.5 s dan untuk respon percepatan menunjukkan waktu lebih cepat yaitu pada nilai

sekitar 0.005 s. Dan selanjutnya dapat diketahui *peak value*, *settling time* serta *%overshoot* pada respon dinamis *electrodynamic shaker* mempunyai nilai yang nyaris sama.

4. Besar nilai arus (i) yang diinputkan pada sistem *electrodynamic shaker* berpengaruh pada besar atau kecilnya respon dinamis yang dihasilkan oleh sistem. Dimana semakin besar input arus (i) yang diinputkan, maka semakin besar pula gaya eksitasi (Fe) yang dihasilkan sistem serta respon dinamisnya dan begitu pula sebaliknya.
5. Sesuai dengan *electrodynamic shaker* yang telah dirancang, besar nilai koefisien redaman yang digunakan tidak sesuai apabila digunakan untuk pengujian material dengan jenis Aluminium 7075-0, karena diperlukan nilai koefisien redaman yang cukup tinggi yaitu senilai 5000 Ns/m. Nilai koefisien redaman tersebut dianggap cukup aman untuk dapat menghasilkan defleksi pada plat uji yang tidak melebihi nilai defleksi maksimumnya. Namun, *electrodynamic shaker* yang telah dirancang dapat pula digunakan untuk pengujian material jenis Aluminium 7075-0 (tanpa mengubah nilai koefisien redaman yang telah digunakan) apabila input dari sistem elektrisnya diperkecil dengan alat inverter sehingga besar gaya eksitasi yang dihasilkan *electrodynamic shaker* dapat lebih kecil. Hingga akhirnya respon yang diterima oleh plat uji dapat lebih kecil atau disamakan dengan nilai defleksi maksimalnya.

## 5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, saran untuk pengembangan dalam penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut :

1. Perlu dilakukan pengujian pada sistem *electrodynamic shaker* yang telah dirancang, dan disarankan pengujian tersebut dengan menggunakan parameter-parameter yang telah didapatkan dari simulasi pada tugas akhir ini. Hal

tersebut dilakukan guna bertujuan untuk melakukan validasi terhadap hasil rancangan, pemodelan dan simulasi yang telah dilakukan.

2. Disarankan untuk melakukan pengembangan dan studi lebih lanjut mengenai sistem rancangan, mengingat banyak pengaruh dari faktor tambahan diluar yang terdapat dalam tugas akhir ini.

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. M. Sugeng Budiono, dkk., “Bunga Rampai Hiperkes & KK”, Semarang: Badan Penerbit Universitas Diponegoro, 2003.
- [2] S. S. Rao, “*Mechanical Vibrations Fifth Edition*”, United States of America: Pearson, 2011.
- [3] F. Pellicano and M. Barbieri, “*Complex Dynamics of Circular Cylindrical Shells*,” Elsevier, 2014.
- [4] A. Saraswat and N. Tiwari, “*Modeling and Study of Nonlinear Effects in Electrodynamic Shakers*”, Elsevier, 2015.
- [5] S. Ricci, B. Peeters, R. Fetter dan D. Boland, “*Virtual Shaker Testing for Predicting and Improving Vibration Test Performance*”, Elsevier, 2009.
- [6] M. P. Jairo, “*Design and Comparison of LQR and PID Type Controllers in an Electrodynamic Shaker*”, pp. 10-13, 2003.
- [7] B. H. Venkatesh, “*Design and Evaluation of Multi-Axis Vibration Shaker Concepts*”, Proquest, 2001.
- [8] Gunadi, “Teknik Bodi Otomotif Jilid 1”, Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan, 2008.
- [9] G. F. Lang, “*Sound and Vibration*,” *Electrodynamic Shaker Fundamentals*, p. 1-3, April 1997.
- [10] Zuhail, “Prinsip Dasar Elektroteknik”, Jakarta: Gramedia, 2004.
- [11] C. M. Close, D.K. Frederick and J.C. Newell, “*Modelling and Analysis of Dynamic System Third Edition*”, United States of America: John Wiley & Son, 2001.

- [12] T. M. Shop. “Modal Shaker Selection Guide”, The Modal Shop, [Online]. Available <http://www.modalshop.com/excitation/Modal-Shaker-Selection-Guide?ID=344>. [Accessed 23 Maret 2017].
- [13] Nyoman Sutantra dan Bambang Sampurno, “Teknologi Otomotif”, Surabaya: Penerbit Guna Widya, 2010.
- [14] Wolf-Heinrich Hucho, “*Aerodynamik des Automobils*”, Germany: Vogel-Verlag, 1981.
- [15] A. Azzam dan Wei Li, “*Introducing CFRP as an Alternative Material for Engine Hood to Achieve Better Pedestrian Safety Using Finite Element Modeling*”, Elsevier, 2015.

## BIODATA PENULIS



**Alvibrionasis Aseptis Dheninta** lahir di Tulungagung, 24 September 1994 merupakan anak kedua dari 2 bersaudara dari orang tua bernama Siswo Utomo dan Juminah. Riwayat pendidikan yang ditempuh penulis dimulai di SDN Kalidawir 1 pada tahun 2001-2007. Kemudian penulis melanjutkan pendidikan di SMPN 1 Tulungagung pada tahun 2007-2010, selanjutnya dilanjutkan di SMAN 1 Boyolangu tahun 2010-2013.

Pendidikan yang ditempuh penulis dari SD hingga SMA ditempuh di Tulungagung dan dilanjutkan pendidikan jenjang S1 Departemen Teknik Mesin di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya yang terdaftar dengan NRP 2113100030.

Selama masa kuliah, penulis aktif mengikuti organisasi Himpunan Mahasiswa Mesin pada Departemen Umum khususnya pada Biro Pendelegasian dan Inventarisasi untuk meningkatkan *soft skill* penulis. Selain mengikuti organisasi, penulis juga aktif sebagai *Grader* Mata Kuliah Statika serta Asisten Praktikum Mekanika Getaran dan Pengukuran Teknik, serta aktif dalam beberapa jenis kepanitian. Di Departemen Teknik Mesin, penulis mengambil bidang studi Vibrasi dan Sistem Dinamis sebagai bahasan Tugas Akhir dengan topik analisa sistem dinamis pada *Redesign Electrodynamic Shaker* untuk pengujian sampel plat kap (*engine hood*) mobil di bawah bimbingan Dr. Harus Laksana Guntur S.T., M.Eng.

Untuk semua informasi, pertanyaan maupun saran terkait Tugas Akhir yang ingin disampaikan kepada penulis, dapat melalui email [alvibrionasisdheninta@gmail.com](mailto:alvibrionasisdheninta@gmail.com).

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