



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TM 141585

PERANCANGAN DAN ANALISIS *ELECTRODYNAMIC SHAKER* UNTUK PENGUJIAN DINAMIS *PRINTED CIRCUIT BOARD (PCB)*

FIKY NUZULLA DARSONO
NRP 2113 100 052

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

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



TUGAS AKHIR – TM141585

PERANCANGAN DAN ANALISIS *ELECTRODYNAMIC SHAKER* UNTUK PENGUJIAN DINAMIS *PRINTED CIRCUIT BOARD (PCB)*

FIKY NUZULLA DARSONO
NRP. 2113 100 052

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

**DESIGN AND ANALYSIS OF ELECTRODYNAMIC
SHAKER FOR DYNAMIC TESTING OF PRINTED
CIRCUIT BOARD (PCB)**

FIKY NUZULLA DARSONO
NRP. 2113 100 052

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

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

**PERANCANGAN DAN ANALISIS *ELECTRODYNAMIC
SHAKER* UNTUK PENGUJIAN DINAMIS *PRINTED
CIRCUIT BOARD (PCB)***

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 :

FIKY NUZULLA DARSONO

NRP. 2113 100 052

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Eng. Harus Laksana Guntur, ST., M. Eng. (Pembimbing)
NIP. 197505111999031001
2. Dr. Wiwiek Hendrowati, ST., MT. (Penguji I)
NIP. 197004121997032003
3. ^{an} Moch. Solichin, ST., MT. (Penguji II)
NIP. 198908172015041003
4. Achmad Syaifudin, ST., M. Eng., PhD. (Penguji III)
NIP. 197909262005011001

SURABAYA

JULI, 2017

**PERANCANGAN DAN ANALISIS
ELECTRODYNAMIC SHAKER UNTUK PENGUJIAN
DINAMIS PRINTED CIRCUIT BOARD (PCB)**

Nama Mahasiswa : Fiky Nuzulla Darsono
NRP : 2113100052
Jurusan : Teknik Mesin FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Harus Laksana Guntur ST., M.Eng.

Abstrak

Electrodynamic shaker pada umumnya digunakan sebagai alat untuk modal analysis. Modal analysis telah menjadi alat utama dalam upaya untuk menentukan, memperbaiki dan mengoptimalkan karakteristik dinamis pada struktur mekanik. Electrodynamic shaker biasanya memiliki sistem translasi, merupakan sistem yang paling sederhana namun mampu memenuhi kriteria pengujian modal analysis. Dengan sistem yang sederhana tersebut, maka sebenarnya electrodynamic shaker mudah untuk direalisasikan serta membutuhkan biaya yang lebih sedikit dalam pembuatannya. Namun pada kenyataannya, belum ada yang memproduksi electrodynamic shaker di Indonesia. Berdasarkan latar belakang tersebut, maka pada tugas akhir ini dilakukan perancangan dan analisis electrodynamic shaker yang digunakan untuk pengujian PCB.

Pada tugas akhir ini, dilakukan perancangan electrodynamic shaker untuk pengujian PCB berdasar parameter dan karakteristik dinamis. Perancangan electrodynamic shaker yang digunakan untuk pengujian PCB diutamakan pada fungsi/fenomena dinamis. Oleh karena itu, dalam tugas akhir ini akan dicari nilai stiffness constant dari electrodynamic shaker (k_1) dan damping constant dari electrodynamic shaker (C_1) yang sesuai untuk pengujian PCB dengan spesifikasi tertentu. Akan dilakukan verifikasi nilai parameter k_1 yang telah diketahui dari katalog pada software Autodesk Inventor agar diketahui nilai tersebut sesuai ataukah tidak. Kemudian, nilai C_1 ditemukan dari proses trial and error yang diverifikasi dengan software Matlab

SIMULIK. Selanjutnya, dilakukan analisa respon dinamis dari electrodynamic shaker yang telah dirancang.

Hasil dari tugas akhir ini didapatkan rancangan electrodynamic shaker untuk pengujian PCB dengan ukuran tebal dari flexible support sebesar 0.15 in dengan nilai k_1 2630 N/m dimana material yang digunakan adalah rubber. Nilai C_1 yang didapat (1869.5 Ns/m) adalah besar nilai redaman keseluruhan dari sistem electrodynamic shaker. Electrodynamic shaker yang telah dirancang menghasilkan besar nilai peak dan rms dari F_e mempunyai kemiripan dengan besar gaya yang dihasilkan oleh electrodynamic shaker acuan dari katalog. Kemudian, didapat besar respon dinamis yang dihasilkan oleh electrodynamic shaker lebih kecil apabila dibandingkan dengan respon dinamis yang dihasilkan oleh PCB. Transien respon dari sistem electrodynamic shaker yang telah dirancang mempunyai nilai overshoot yang hampir 0. Semakin besar nilai i yang diinputkan ke sistem electrodynamic shaker maka semakin besar pula gaya eksitasi yang dihasilkan sistem serta respon dinamis yang diterima sistem dan sebaliknya.

Kata Kunci : Electrodynamic Shaker, Printed Circuid Board (PCB), Modal Shaker, Exciter, Experimental Modal Analysis, Karakteristik Dinamis.

DESIGN AND ANALYSIS OF ELECTRODYNAMIC SHAKER FOR DYNAMIC TESTING OF PRINTED CIRCUIT BOARD (PCB)

Name : Fiky Nuzulla Darsono
NRP : 2113100052
Department : Teknik Mesin FTI-ITS
Advisory Lecturer : Dr. Harus Laksana Guntur ST., M.Eng.

Abstract

Electrodynamic shaker is used as a tool for modal analysis. Modal analysis has become a major tool in the quest for determining, improving and optimizing dynamic characteristics of mechanical structures. Electrodynamic shaker usually have a translation system, the simplest system is yet able to meet the criteria for modal analysis. With a simple system, electrodynamic shaker actually easy to realizable and cost less to make. But in fact, there has not been that produces electrodynamic shakers in Indonesia. Based on the background, this final project performed on the design and analysis of electrodynamic shakers for dynamic testing of PCB.

In this final project, carried out the design of electrodynamic shaker for dynamic testing of PCB based on dynamic parameters and characteristics. The design of electrodynamic shakers are used for testing PCB preferred on functions/dynamic phenomena. Therefore, in this final project will verified the value of the constant stiffness of electrodynamic shaker (k_1) and the damping constant of electrodynamic shaker (C_1) that is suitable for testing PCB with certain specifications. A verification will be done for k_1 parameter value that have known from catalog in Autodesk Inventor software so that it will be verified that it will be suit to be used or not. And then c_1 value is found by try and error method which verified by MATLAB Simulink software. After that, dynamic response of the designed electrodynamic shaker will be analyzed.

The result of this final project is design of electrodynamic shaker obtained for dynamic testing of PCB with thick size of

flexible support amounting to 0.15 inch and value of k_1 2630 N/m where the materials used are rubber. The C_1 value obtained (1869.5 Ns/m) is a great value for the overall damping constant of electrodynamic shaker systems. Electrodynamic shaker who had designed produces peak and rms value of F_e has great similarities with the force generated by the electrodynamic shaker reference from the catalogue. Then, dynamic responses value of electrodynamic shaker is smaller when compared with the dynamic responses value of PCB. Transient responses of the electrodynamic shaker system who had designed has the overshoot nearly 0. The greater value λ inputted into electrodynamic shaker system, it will produced the greater excitation force of the system as well as the dynamic responses are received the system and vice versa.

Keywords : Electrodynamic Shaker, Printed Circuid Board (PCB), Modal Shaker, Exciter, Experimental Modal Analysis, Dynamic Characteristics .

KATA PENGANTAR

Dengan menyebut nama Allah SWT yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang, puji syukur atas kehadiran-Nya yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “Perancangan dan Analisis *Electrodynamic Shaker* untuk Pengujian Dinamis *Printed Circuit Board (PCB)*”. Penulisan tugas akhir ini dimaksudkan untuk memenuhi persyaratan kelulusan pendidikan Sarjana S-1 di Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

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

1. Alm. Wiwit Darsono dan Siti Romelah, orang tua penulis yang selalu membimbing, memotivasi, dan mendoakan.
2. Pamela Sasabila dan Rahma Trihapsari, saudara kandung penulis yang selalu mendoakan dan menjadi motivasi dalam menyelesaikan studi.
3. Dr. Eng. Harus Laksana Guntur, ST., M.Eng., selaku dosen pembimbing yang selalu meluangkan waktu untuk memberikan arahan, petunjuk dan semangat sehingga tugas akhir ini dapat terselesaikan.
4. Dr. Wiwiek Hendrowati, ST., MT., Moch. Solichin, ST., MT., Aida Annisa A.D., ST., MT. serta Achmad Syaifuddin, ST., M. Eng., PhD., selaku dosen penguji yang telah memberikan saran dan kritik kepada penulis tentang Tugas Akhir ini.
5. Vivien Supandhani, ST., M.Eng., Ph.D., selaku dosen wali yang memberikan saran terbaik pada proses perkuliahan penulis.
6. Segenap dosen dan karyawan Departemen Teknik Mesin FTI-ITS, yang telah memberikan ilmu dan pengalaman yang menjadi pembelajaran penulis selama ini.
7. Irvan Ardiyan, yang selalu memberikan dukungan dan semangat kepada penulis.

8. Alvibrionasis Aseptis Dheninta dan Devi Maharani Kosa, tim shaky-shaky yang berjuang bersama dengan penulis untuk menyelesaikan tugas akhir.
9. Harus Kids, yang terdiri dari Alvi, Devi, Ami, Sarbo, Uwi, Dian, Intan Dewani dan Biyyu, yang selalu memberikan dukungan, bantuan, canda dan tawa dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.
10. Teman-teman Lab. Vibrasi dan sistem Dinamis, yang senantiasa mengiringi perjuangan menuju Wisuda 116 ITS.
11. Ariyan Karlino, yang telah banyak mengajari penulis dalam mempelajari *software* Autodesk Inventor.
12. Teman-teman dekat penulis, yang terdiri dari Intan Kumala, Amal, Putri, Mbak Didin, Ayzam, Elita, Qorry, Unni dan Zizi yang senantiasa memberikan semangat kepada penulis.
13. M56, angkatan terbaik yang mengiringi kehidupan kampus penulis.
14. Forkom Generasi Penuh Aksi, Pemandu KOMPAS, KOMPAS Mesin tercinta, Pemandu Merah Mesin, Pemandu FTI-ITS, Gajah Mada, Jala Mangkara dan Wahana Juang ITS, yang senantiasa memberikan warna-warni dan pembelajaran di kehidupan kampus penulis.
15. Segenap Mahasiswa Departemen Teknik Mesin FTI-ITS yang memberikan pembelajaran di kehidupan kampus penulis.
16. Semua pihak yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu, yang telah 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, Juli 2017

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL

LEMBAR PENGESAHAN

Abstrak	i
Abstract	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan Tugas Akhir.....	4
1.5 Manfaat Tugas Akhir.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 <i>Forced Vibration Multi Degree of Freedom (MDoF)</i>	5
2.2 <i>Deflection of Fixed –Fixed Beam with Center Load</i>	7
2.3 <i>Damping Constant of a Parallel Plates Separated by Viscous Fluid</i>	8
2.4 Konsep Elektromagnetik pada <i>Electromechanical System</i>	9
2.5 <i>Electrodynamic Shaker</i>	14
2.6 Penelitian Terdahulu.....	20
2.6.1 <i>Vibration reliability test method for electronics packaging</i>	20
2.6.2 <i>Modal analysis of a printed circuit board (PCB)</i>	23
2.6.3 <i>A study of the electrodynamic shaker</i>	25
2.6.4 <i>Complex dynamics of circular cylindrical shells</i>	29
2.7 Referensi <i>Electrodynamic Shaker</i> yang Sudah Ada di Pasaran	32
BAB III METODOLOGI	35
3.1 Metode Penelitian.....	35

3.2 Penjelasan Diagram Alir Penelitian.....	38
3.2.1 Tahap studi literatur.....	38
3.2.2 Tahap pemodelan dinamis sistem (rancangan <i>electrodynamic shaker</i> yang sesuai untuk pengujian PCB)	38
3.2.3 Tahap penentuan persamaan matematis sistem	40
3.2.4 Tahap verifikasi parameter k_1	46
3.2.5 Tahap pembuatan blok diagram sistem pada matlab simulink dengan variasi input.....	47
3.2.6 Tahap penentuan nilai C_1	47
3.2.7 Tahap simulasi pada MATLAB Simulink.....	48
3.2.8 Tahap perancangan 3D <i>electrodynamic shaker</i> yang sesuai untuk pengujian PCB dan analisa grafik respon dinamis	48
3.2.9 Tahap simulasi pada MATLAB Simulink dengan input step dan tahap analisa grafik transien respon sistem	48
3.2.10 Tahap simulasi pada MATLAB Simulink dengan variasi input arus listrik (i) dan tahap analisa grafik respon dinamis	48
3.2.11 Tahap simulasi pada MATLAB Simulink dengan variasi dimensi pcb yang diuji dan tahap analisa grafik respon dinamis	49
3.3 Penjabaran tahap simulasi pada MATLAB Simulink	49
3.4 Parameter Simulasi.....	51
3.4.1 <i>Electrodynamic shaker</i>	51
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	55
4.1 Perancangan <i>Electrodynamic Shaker</i> untuk Pengujian <i>Printed Circuit Board</i> (PCB).....	55
4.1.1 Verifikasi nilai k_1 (konstanta pegas <i>electrodynamic shaker</i>).....	55
4.1.2 Simulasi untuk menentukan nilai C_1 (konstanta redaman <i>electrodynamic shaker</i>).....	58

4.1.3 Frekuensi natural sistem (<i>electrodynamic shaker</i> untuk pengujian PCB)	62
4.1.4 Hasil rancangan <i>electrodynamic shaker</i> untuk pengujian PCB.....	64
4.1.5 Blok diagram variasi	66
4.2 Analisa Respon Dinamis	67
4.2.1 Analisa respon dinamis hasil rancangan <i>electrodynamic shaker</i> untuk pengujian PCB.....	68
4.2.2 Analisa respon transien hasil rancangan <i>electrodynamic shaker</i> untuk pengujian PCB.....	71
4.2.3 Analisa respon dinamis sistem dengan variasi i (kuat arus listrik).....	74
4.2.4 Analisa respon dinamis sistem dengan variasi dimensi PCB	77
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	81
5.1 Kesimpulan.....	81
5.2 Saran.....	82
DAFTAR PUSTAKA	xvii
LAMPIRAN.....	xix
1. Perhitungan x Maksimum PCB Utama (AM 7)	xix
2. Perhitungan h	xix
3. Perhitungan Nilai C (<i>Viscous Damping</i>) dengan Ukuran <i>Gap</i> (h) yang Baru.....	xx
4. Perhitungan x Maksimum PCB variasi (AM 1)	xx
4. Perpindahan (Displacement) Flexible Support.....	xxi
4.1 X Displacement Flexible Support	xxi
4.1 Y Displacement Flexible Support	xxii
4.1 Z Displacement Flexible Support.....	xxiii
5. Grafik	xxiv
5.1 Grafik Nilai rms Setiap Respon Dinamis Terhadap Variasi Arus	xxiv

5.2 Grafik Nilai rms Setiap Respon Dinamis Terhadap Variasi Dimensi PCB	xxv
BIODATA PENULIS	xxxvii

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Model Sistematis Sistem Getaran Multi Derajat Kebebasan [3].....	5
Gambar 2.2 <i>Free Body Diagram</i> Multi Derajat Kebebasan [3] ...	5
Gambar 2.3 (a) <i>Deflection of Fixed – Fixed Beam with Center Load</i> ; (b) <i>Moment of inertia of the cross section of the Rectangle Shape</i> [4]	7
Gambar 2.4 <i>Parallel Plates with a Viscous Fluid in Between</i> [3]	8
Gambar 2.5 Aturan Kaidah Tangan Kanan untuk Voltase Terinduksi pada Konduktor yang Bergerak [4].....	11
Gambar 2.6 Aturan Kaidah Tangan Kanan Untuk Voltase Terinduksi pada Konduktor yang Bergerak [4].....	12
Gambar 2.7 Representasi dari Sistem <i>Translational Mechanical</i> ; (a) Alur Daya Elektrikal-Mekanikal, (b) Alur Daya Mekanikal-Elektrikal [4]	13
Gambar 2.8 (a) Gambar Skematik <i>Electrodynamic Shaker</i> . (b) Karakteristik Resonansi pada <i>Electrodynamic Shaker</i> secara Umum [3]	15
Gambar 2.9 <i>Typical Modal Test Setup</i> [7].....	16
Gambar 2.10 Model Fisik Mikrofon [7].....	17
Gambar 2.11 Model Skematik Mikrofon [4].....	18
Gambar 2.12 (a) Hubungan Bagian dari Koil Tunggal. (b) Diagram yang Digunakan Untuk Analisa [4].....	19
Gambar 2.13 <i>Free Body Diagram</i> PCB pada <i>Shaker</i> [9]	21
Gambar 2.14 <i>Properties</i> PCB [9]	21
Gambar 2.15 Instalasi Pengujian [9]	22
Gambar 2.16 <i>VTV Failures: Weibull Distribution Plot</i> [9].....	22
Gambar 2.17 <i>Typical Failure Modes: BGA and LGA</i> [9]	23
Gambar 2.18 <i>Material Properties</i> PCB yang Digunakan Pengujian [9]	24

Gambar 2.19 Perbandingan <i>Modal Parameter Hasil Experiment dan Hasil Finite Element Analysis</i> [9].....	25
Gambar 2.20 <i>Free Body Diagram Electrodynamic Shaker</i> [10]	26
Gambar 2.21 <i>Free Body Diagram Electrical Components</i> [10].	26
Gambar 2.22 (a) <i>Time Domain Analysis</i> untuk perpindahan dari <i>movable mass</i> (M_D, M_F). (b) <i>Time Domain Analysis</i> untuk perpindahan dari <i>internal mass structure</i> . (c) <i>Frequency Domain Analysis</i> untuk Mengidentifikasi <i>Modes of Vibration</i> [10].....	28
Gambar 2.23 <i>Kinerja Shaker</i> [10].....	29
Gambar 2.24 Instalasi Pengujian <i>Cylindrical Shells</i> dengan Menggunakan <i>Electrodynamic Shaker</i> [11]	30
Gambar 2.25 Pemodelan Fisik <i>Shells</i> [11]	30
Gambar 2.26 <i>Shell lateral vibration, maximum displacement, positive inward: (a) experiments; (b) simulation Excitation level 0.1V</i> [11].....	32
Gambar 2.27 <i>Shell lateral vibration, minimum displacement, negative outward: (a) experiments. (b) simulation. Excitation level 0.1V</i> [11].....	32
Gambar 2.28 Panduan <i>Modal Shop</i> [12]	33
Gambar 3.1 Diagram alir penyelesaian tugas akhir.....	36
Gambar 3.2 (a) Model 3D; (b) Gambar Potongan; (c) Keterangan Gambar Rancangan <i>Electrodynamic Shaker</i> untuk Pengujian PCB	39
Gambar 3.3 Model Sistematis Rancangan <i>Electrodynamic Shaker</i> untuk Pengujian PCB	40
Gambar 3.4 Model Dinamis <i>Printed Circuit Board</i> pada <i>Electrodynamic Shaker</i>	41
Gambar 3.5 <i>Free Body Diagram</i> Sistem Mekanis <i>Electrodynamic Shaker</i>	42
Gambar 3.6 <i>Free Body Diagram Printed Circuit Board</i>	44
Gambar 3.7 <i>Free Body Diagram</i> Sistem Elektrik <i>Electrodynamic Shaker</i>	45
Gambar 3.8 Gambar <i>Electrodynamic Shaker</i> [3]	46

Gambar 3.9 Diagram Alir Penjabaran Tahap Simulasi Sistem ..	50
Gambar 3.10 Gambar Teknik <i>Electrodynamic Shaker</i> Tipe 2007E [12]	52
Gambar 4.1 Rancangan Dimensi <i>Flexible Support</i>	56
Gambar 4.2 (a) Pemberian Nilai <i>Stiffness</i> pada <i>Flexible Support</i> ; (b) Pemberian Beban pada <i>Flexible Support</i>	57
Gambar 4.3 Nilai Stres pada <i>Flexible Support</i> Setelah Pembebanan	58
Gambar 4.4 Blok Diagram Simulasi dengan Input <i>Sinusoidal</i> ...	59
Gambar 4.5 Respon Dinamis x_2 rms	60
Gambar 4.6 Hasil Rancangan Dimensi <i>Electrodynamic Shaker</i>	62
Gambar 4.7 (a) Tampak Samping; (b) Potongan; (c) 2D Beserta Dimensi; (d) Benda Uji (PCB); (e) <i>Flexible Support</i> ; (f) Keterangan Bagian Penyusun dari Rancangan <i>Electrodynamic Shaker</i> untuk Pengujian PCB	65
Gambar 4.8 Blok Diagram Simulasi dengan Input <i>Step</i>	67
Gambar 4.9 Grafik Respon (a) Gaya Eksitasi; (b) rms Gaya Eksitasi; (c) Percepatan <i>Electrodynamic Shaker</i> ; (d) Percepatan PCB; (e) Kecepatan <i>Electrodynamic Shaker</i> ; (f) Kecepatan PCB; (g) Perpindahan <i>Electrodynamic Shaker</i> ; (h) Perpindahan PCB Dengan Input <i>Sinusoidal</i>	70
Gambar 4.10 Grafik Respon (a) Gaya Eksitasi; (b) Percepatan <i>Electrodynamic Shaker</i> ; (c) Percepatan PCB; (d) Kecepatan <i>Electrodynamic Shaker</i> ; (e) Kecepatan PCB; (f) Perpindahan <i>Electrodynamic Shaker</i> ; (g) Perpindahan PCB Dengan Input <i>Step</i>	72
Gambar 4.11 Grafik Respon (a) Gaya Eksitasi; (b) Percepatan <i>Electrodynamic Shaker</i> ; (c) Percepatan PCB; (d) Kecepatan <i>Electrodynamic Shaker</i> ; (e) Kecepatan PCB; (f) Perpindahan <i>Electrodynamic Shaker</i> ; (g) Perpindahan PCB Dengan Input <i>Sinusoidal</i> dan variasi i	75
Gambar 4.12 Grafik Respon (a) Gaya Eksitasi; (b) Percepatan <i>Electrodynamic Shaker</i> ; (c) Percepatan PCB; (d) Kecepatan	

Electrodynamic Shaker; (e) Kecepatan PCB; (f) Perpindahan
Electrodynamic Shaker; (g) Perpindahan PCB dengan Input
Sinusoidal dan Variasi Dimensi PCB 78

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 <i>Shaker Parameter</i> [11]	30
Tabel 2.2 <i>Shell and Disk Parameter</i> [11].....	31
Tabel 2.3 Spesifikasi <i>Modal Shaker</i> Tipe 2004E, 2007E [12] ...	34
Tabel 3.1 Parameter <i>Electrodynamic Shaker</i>	51
Tabel 3.2 Parameter PCB	53
Tabel 4.1 Hasil Nilai C_1 dari Simulasi pada MATLAB SIMULINK	60
Tabel 4.2 rms Respon Dinamis Hasil <i>Input Sinusoidal</i>	70
Tabel 4.3 Respon Dinamis Hasil <i>Input Step</i>	73
Tabel 4.4 Respon Dinamis Hasil <i>Input Sinusoidal</i> dan Variasi i	76
Tabel 4.5 Respon Dinamis Hasil <i>Input Sinusoidal</i> dan Variasi Dimensi PCB	79

'Halaman ini sengaja dikosongkan''

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Keandalan *Printed Circuit Board* (PCB) di bawah lingkungan dinamis, seperti yang ditemukan di atas pesawat, kapal, dan kendaraan darat perlu mendapat perhatian lebih. Hal tersebut seiring dengan bertambahnya peralatan elektronik yang dirancang dan dibangun untuk digunakan pada pesawat terbang, kapal, dan kendaraan darat. Adapun, guncangan dan getaran telah ditemukan menjadi penyebab kegagalan peralatan elektronik. Markstein (1987) melaporkan bahwa guncangan atau getaran menjadi nomor dua (setelah temperatur) yang menyebabkan kegagalan pada peralatan elektronik. Jika peralatan elektronik tidak dirancang untuk lingkungan yang dinamis, hal ini akan mengakibatkan masalah nantinya dan mungkin membutuhkan sejumlah rancangan ulang dalam lingkup yang luas. Hal ini disebabkan karena getaran terus menerus dapat menyebabkan kegagalan serta kelelahan dari PCB sebagai akibat dari tekanan siklik. Steinberg (1988) menemukan bahwa getaran dapat menyebabkan kegagalan, antara lain keretakan sambungan solder, pemutusan sambungan timah antara PCB ke komponen, kelonggaran sekrup serta kerusakan konektor [1]. Kegagalan PCB dapat dihindari dengan memahami sifat getaran, yaitu mengevaluasi karakteristik respon dinamis dan tingkat stress. Hal ini meliputi penentuan frekuensi natural dan perpindahan, Ketika perpindahan dinamis dan tegangan dapat dievaluasi dari frekuensi natural, penentuan frekuensi natural dari PCB merupakan kepentingan yang mendasar selama tahap rancangan PCB. Dengan informasi frekuensi natural memungkinkan untuk menentukan *fatigue life* (umur dari terjadinya inisiasi *fatigue* sampai rusak) pada komponen, sambungan solder dan PCB. Dari hal tersebut, pada akhirnya akan diperoleh *assembly* PCB yang mempunyai keandalan yang tinggi.

Electrodynamic shaker pada umumnya digunakan sebagai alat untuk *modal analysis*. Menurut Ewins (2001), *modal analysis*

adalah proses penentuan karakteristik dinamis sistem dalam bentuk frekuensi natural, *damping factors*, dan *mode shapes*, kemudian menggunakannya untuk merumuskan model matematika yang selanjutnya digunakan untuk mengetahui perilaku dinamis sebuah sistem [2]. *Modal analysis* telah menjadi alat utama dalam upaya untuk menentukan, memperbaiki dan mengoptimalkan karakteristik dinamis pada struktur mekanik. Tidak hanya digunakan dalam struktur mekanik dan dunia penerbangan, modal analisis juga digunakan dalam aplikasi sipil dan struktur bangunan, masalah *biomechanical*, *space structure*, *acoustical instruments*, komponen elektronik, serta pembangkit nuklir.

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka pada tugas akhir ini dilakukan perancangan dan analisis *electrodynamic shaker* yang digunakan untuk pengujian PCB berdasar parameter dan karakteristik dinamis. Adapun, *electrodynamic shaker* dirancang untuk PCB dengan spesifikasi tertentu digunakan untuk uji kelelahan PCB. *Electrodynamic shaker* yang akan dirancang menyesuaikan agar respon perpindahan yang diterima PCB ketika ditinjau secara *root mean square* kurang dari atau sama dengan defleksi maksimum yang dapat diterima PCB. *Electrodynamic shaker* yang akan dirancang memiliki sistem translasi, merupakan sistem yang paling sederhana namun mampu memenuhi kriteria pengujian *modal analysis*. Dengan sistem yang sederhana tersebut diharapkan agar alat ini mudah untuk direalisasikan serta membutuhkan biaya yang lebih sedikit dalam pembuatannya.

1.2 Rumusan Masalah

Dari uraian latar belakang di atas maka dapat dirumuskan beberapa permasalahan yang menjadi pokok bahasan utama pada tugas akhir ini sebagai berikut:

1. Bagaimana rancangan dari *electrodynamic shaker* yang digunakan untuk pengujian *Printed Circuit Board* (PCB)?
2. Bagaimana karakteristik dinamis dari *electrodynamic shaker* yang telah dirancang?

3. Bagaimana respon transien dari *electrodynamic shaker* yang telah dirancang?
4. Bagaimana pengaruh perubahan variabel kuat arus listrik (i) terhadap respon dinamis *electrodynamic shaker* yang telah dirancang?
5. Bagaimana pengaruh perubahan dimensi PCB terhadap respon dinamis *electrodynamic shaker* yang telah dirancang?

1.3 Batasan Masalah

Adapun, batasan masalah dari ruang lingkup tugas akhir ini sebagai berikut:

1. Perancangan *electrodynamic shaker* yang digunakan untuk pengujian *Printed Circuit Board* (PCB) diutamakan pada fungsi/fenomena dinamis.
2. Solderan dan komponen di atas PCB tidak diperhitungkan dalam proses perancangan.
3. PCB dianggap sebagai massa batang yang memiliki panjang dan luasan.
4. Parameter PCB yang digunakan dalam proses perancangan didapat dari jurnal.
5. Rancangan *electrodynamic shaker* yang digunakan sebagai acuan proses perancangan didapat dari jurnal dan katalog.
6. Nilai hambatan induktansi akibat kehilangan efek magnetik (L) pada sistem elektrik *electrodynamic shaker* sangat kecil (mendekati nol) sehingga bisa diabaikan.
7. Input yang digunakan dalam simulasi yaitu input *step* dan input *sinusoidal*.
8. Magnet yang digunakan dalam sistem adalah magnet permanen (sehingga besar medan magnet yang dihasilkan sistem tetap).

1.4 Tujuan Tugas Akhir

Tujuan yang ingin dicapai dalam tugas akhir ini antara lain sebagai berikut:

1. Merancang *electrodynamic shaker* yang digunakan untuk pengujian *Printed Circuit Board* (PCB).
2. Memodelkan dan menganalisa karakteristik respon dinamis dari *electrodynamic shaker* yang telah dirancang.
3. Mengetahui respon transien dari *electrodynamic shaker* yang telah dirancang.
4. Mengetahui pengaruh perubahan variabel kuat arus listrik (i) terhadap respon dinamis *electrodynamic shaker* yang telah dirancang.
5. Mengetahui pengaruh perubahan dimensi PCB terhadap respon dinamis *electrodynamic shaker* yang telah dirancang.

1.5 Manfaat Tugas Akhir

Selanjutnya, manfaat yang diperoleh dari tugas akhir adalah sebagai berikut:

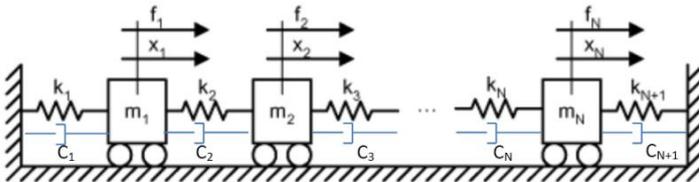
1. Rancangan dapat digunakan sebagai dasar pengembangan *prototype electrodynamic shaker* yang digunakan untuk pengujian *Printed Circuit Board*.
2. Langkah rancangan dan analisa dapat digunakan sebagai dasar rancangan *electrodynamic shaker* untuk pengujian *Printed Circuit Board* dengan spesifikasi lain atau pun benda uji yang bentuknya mirip dengan *Printed Circuit Board*.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

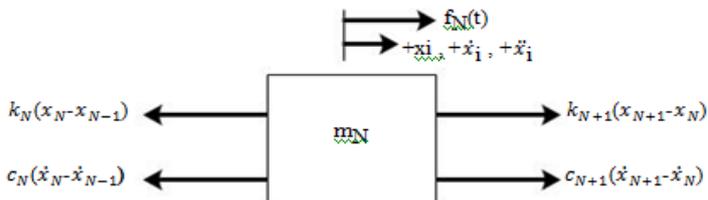
Pada bab ini akan dibahas mengenai dasar teori dan kajian penelitian terdahulu hasil studi literatur yang sudah dilakukan. Dasar teori ini digunakan sebagai acuan rancangan *electrodynamic shaker* yang digunakan untuk pengujian *Printed Circuit Board*.

2.1 Forced Vibration Multi Degree of Freedom (MDOF)

Sistem getaran dengan multi derajat kebebasan (MDOF) 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 berikut ini [3].



Gambar 2.1 Model Sistematis Sistem Getaran Multi Derajat Kebebasan [3]



Gambar 2.2 Free Body Diagram Multi Derajat Kebebasan [3]

Analisa *free body diagram* multi derajat kebebasan dapat dilihat pada Gambar 2.2. Persamaan gerak dari sistem tersebut 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

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

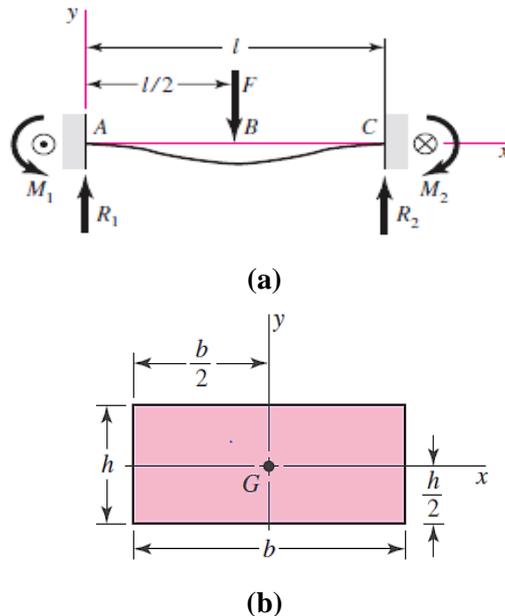
dimana M mewakili matriks massa, K matriks kekakuan dan C matriks redaman yang mempunyai jumlah baris dan kolom yang sama yaitu n.

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

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

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

2.2 Deflection of Fixed –Fixed Beam with Center Load



Gambar 2.3 (a) Deflection of Fixed –Fixed Beam with Center Load;
(b) Moment of inertia of the cross section of the Rectangle Shape [4]

Defleksi pada *beam* yang ditumpu *fixed* pada kedua ujungnya kemudian diberi gaya tepat pada tengah dari *beam* tersebut seperti yang terdapat pada Gambar 2.3 diatas dapat dirumuskan sebagai berikut [4]:

$$y \max = -\frac{Fl^3}{192 EI} \quad (2.6)$$

Dimana:

$y \max$ = Defleksi maksimum *fixed –fixed beam* yang diberi gaya tepat pada tengah (m)

F = Besar gaya yang mengenai *beam* tersebut (N)

l = Panjang keseluruhan *beam* (m)

E = Young's Modulus (N/m²)

I = Moment of inertia of the cross section of the beam
(kgm^2)

dimana I ketika mempunyai bentuk *rectangle* dapat dirumuskan seperti di bawah ini:

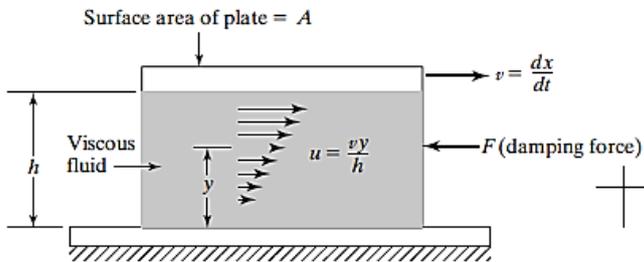
$$I_x = \frac{bh^3}{12}; \quad I_y = \frac{b^3h}{12}; \quad I_{xy} = 0 \quad (2.7)$$

Dimana :

h = dimensi / ukuran pada bidang yang mengalami *bending* (bengkok)

2.3 Damping Constant of a Parallel Plates Separated by Viscous Fluid

Dua buah plat parallel dipisahkan oleh jarak h , dengan viskositas fluida μ diantara dua plat, dimana salah satu plat bergerak dengan kecepatan relatif v . Hal ini seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Parallel Plates with a Viscous Fluid in Between [3]

Lapisan cairan dengan plat bergerak bergerak dengan kecepatan v , sementara mereka yang berhubungan dengan plat yang tidak bergerak. Kecepatan dari cairan yang ada ditengah diasumsikan bervariasi linear antara 0 sampai dengan v seperti pada Gambar 2.4. Menurut hukum Newton mengenai *viscous flow*, *shear stress* (τ) pada lapisan fluida dengan jarak y dari plat tetap, dapat dirumuskan:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (2.8)$$

Dimana $du/dy = v/h$ adalah gradient kecepatan. *Shear/resisting force* (F) pada *bottom surface* dari plat yang bergerak adalah:

$$F = \tau A = \frac{\mu A v}{h} \quad (2.9)$$

Dimana A adalah *surface area* dari plat yang bergerak, maka F dapat dirumuskan:

$$F = c v \quad (2.10)$$

Sehingga, *damping constant* dapat dirumuskan [3]:

$$c = \frac{\mu A}{h} \quad (2.11)$$

2.4 Konsep Elektromagnetik pada *Electromechanical System*

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 dua hal. Yang pertama yaitu sebuah kabel berarus yang terdapat didalam medan magnet akan mempunyai sebuah gaya yang diberikan padanya. Kemudian yang kedua yaitu 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)

Φ , flux magnet (Wb)

\mathcal{B} , densitas flux dalam medan magnet (Wb/m²)

i , arus dalam konduktor (A)

e_m , arus yang diinduksikan dalam konduktor (V)

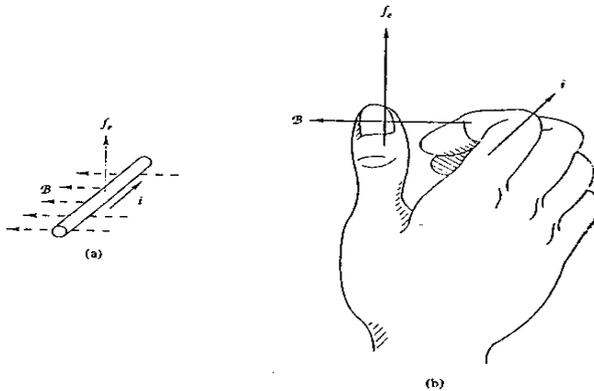
Variabel-variabel tersebut dalam satuan skalar. Namun, untuk kasus umum akan diberikan empat buah satuan berikut sebagai vektor yaitu f_e , v , ℓ , dan \mathcal{B} . Gaya pada sebuah konduktor dalam panjang yang terdiferensial dl membawa arus i dalam sebuah medan magnet dengan densitas *flux* \mathcal{B}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

$$df_e = I (dl \times \mathcal{B}) \quad (2.12)$$

cross pada (2.10) menyatakan produk vektor *cross*. Untuk mendapatkan total gaya listrik yang diinduksikan f_e , 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* \mathcal{B} , dan kemudian (2.12) akan disederhanakan menjadi hubungan skalar seperti berikut:

$$f_e = \mathcal{B} \ell i \quad (2.13)$$

dimana arah gaya adalah tegak lurus terhadap kabel dan medan magnet. Hal tersebut dapat ditemukan pada aturan kaidah tangan kanan seperti pada Gambar 2.5 dimana jari telunjuk menunjukkan arah positif arus (i), jari sisanya yang berbelok menunjukkan arah positif medan magnet (\mathcal{B}), dan ibu jari menunjukkan arah positif gaya (f_e). Disebelahnya ditunjukkan arah-arah gaya tersebut pada sebuah batang konduktor.



Gambar 2.5 Aturan Kaidah Tangan Kanan untuk Voltase Terinduksi pada Konduktor yang Bergerak [4]

Untuk mendapatkan voltase yang diinduksikan pada sebuah konduktor terhadap panjang yang terdiferensial $d\ell$ dengan kecepatan v dalam sebuah medan magnet \mathcal{B} adalah sebagai berikut:

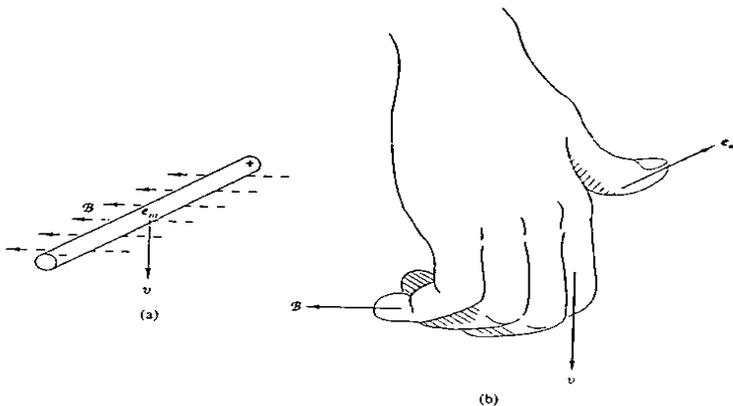
$$de_m = (v \times \beta) \cdot d\ell \quad (2.14)$$

dimana dot menunjukkan produk skalar, atau produk dot dengan notasi vektor. Total voltase yang diinduksikan ke konduktor diperoleh dari mengintegrasikan 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:

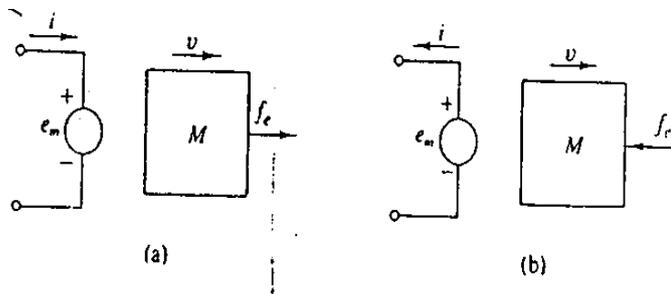
$$e_m = \mathcal{B} \ell v \quad (2.15)$$

Dapat ditemukan pada aturan kaidah tangan kanan seperti pada Gambar 2.6 (b) dimana jari telunjuk menunjukkan arah positif *velocity* (i), jari sisanya yang berbelok menunjukkan arah positif medan magnet (\mathcal{B}), dan ibu jari menunjukkan arah positif arus (e_m) akibat voltase induksi. Dalam Gambar 2.6 (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 kedalaman halaman buku. Berdasarkan Gambar 2.5, 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 2.7. 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 e_m dan arah referensi untuk f_e dapat ditentukan dengan melihat kondisi spesifiknya, namun pada gambar tersebut menunjukkan dua buah kombinasi dari referensi arah yang konsisten dengan prinsip konservasi energi.



Gambar 2.6 Aturan Kaidah Tangan Kanan Untuk Voltase Terinduksi pada Konduktor yang Bergerak [4]



Gambar 2.7 Representasi dari Sistem *Translational Mechanical*; (a) Alur Daya Elektrikal-Mekanikal, (b) Alur Daya Mekanikal-Elektrikal [4]

Pada Gambar 2.7, polaritas dari sumber elektrik menggambarkan seolah-olah daya diserap dari sisa-sisa oleh 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:

$$P_e = e_m \cdot i = (B \ell v) i \quad (2.16)$$

dan untuk *electrical-mechanical* adalah:

$$P_m = f_e \cdot v = (B \ell i) v \quad (2.17)$$

dimana,

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

yang menyatakan bahwa daya apapun yang dikirimkan ke mekanisme penghubungan dalam bentuk elektrik 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

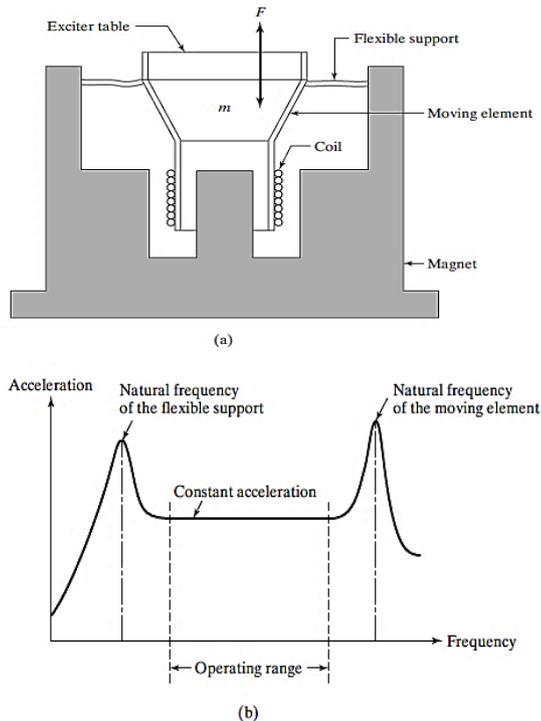
secara terpisah oleh sebuah hambatan dalam sirkuit listrik atau oleh sebuah elemen *viscous-friction* yang mempengaruhi sebuah massa. Dalam kata lain, dapat didemonstrasikan dari Gambar 2.7, daya mekanikal yang bersumber dari gaya f_e ditransmisikan ke elemen elektrikal apapun dan berhubungan sepanjang e_m [5].

2.5 Electrodynamic Shaker

Electrodynamics shaker pada umumnya digunakan sebagai alat untuk *modal analysis*. *Modal Analysis* didefinisikan sebagai proses untuk menunjukkan modal parameter dari sistem baik melalui pendekatan analitis atau eksperimental. Modal parameter meliputi frekuensi natural, rasio fedaman, *peak response magnitude*, serta *mode shape* atau modus getar. *Mode shape* adalah bentuk struktur ketika bergetar pada frekuensi natural. Sementara itu, frekuensi natural adalah frekuensi dari sistem yang bergetar secara bebas [6]. Pengujian menggunakan *electrodynamic shaker* umumnya digunakan ketika mengalami kesulitan saat menggunakan cara analisis/perhitungan serta menghindari kesalahan perhitungan.

Electrodynamic shaker (dapat disebut juga dengan *modal exciter/electromagnetic exciter/modal shaker*) dapat dianggap sebagai kebalikan dari *electrodynamic transducer* sehingga alat ini dapat menghasilkan gerakan mekanis dari gaya elektrik yang dihasilkan oleh sirkuit elektrik [7]. Strukturnya mempunyai kemiripan dengan struktur *loudspeaker* tapi lebih kuat. Alat ini terdiri dari kumparan magnet yang melekat pada elemen penggerak dan struktur magnet dengan celah kecil tempat magnet bergerak. Struktur magnet dirancang untuk memberikan medan magnet yang kuat untuk dapat bergerak diantara celah. Sehingga ketika arus mengalir dalam kumparan, akan timbul gaya terhadap kuat arus dan medan magnet tersebut. *Modal shaker* pada umumnya menggunakan magnet permanen berkekuatan tinggi untuk mengeksitasi gaya dibandingkan menggunakan kumparan medan (*field coil*). Arus AC (*Alternating Current*) yang mengalir pada kumparan menyebabkan elemen penggerak pada *shaker*

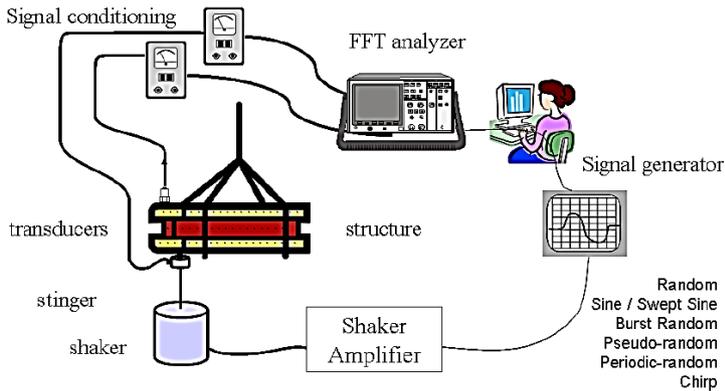
bergerak naik turun memberikan gaya terhadap membran *shaker* yang besarnya berdasarkan input yang diberikan [3].



Gambar 2.8 (a) Gambar Skematik *Electrodynamic Shaker*. (b) Karakteristik Resonansi pada *Electrodynamic Shaker* secara Umum [3]

Adapun, *electrodynamic shaker* mempunyai dua frekuensi natural seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.8 (b) yaitu frekuensi natural pada membran dan elemen penggerak *shaker*. Sedangkan frekuensi operasi *shaker* terletak diantara dua buah frekuensi natural tersebut. *Shaker* dapat menghasilkan gaya hingga 30.000 N, perpindahann 25 mm, dan *range* frekuensi 5-20 kHz [3]. *Shaker* biasanya digunakan untuk kegiatan evaluasi produk,

analisa tegangan, analisis modal, dan uji *squeak-and-rattle*. *Shaker* diberikan input berupa *sinusoidal*, *random*, atau *transient signals* tergantung oleh pengaplikasiannya. *Shaker* biasanya digerakkan oleh sebuah *audio frequency power amplifier* dan menggunakan *open loop* (mayoritas dalam *modal testing*) atau dengan *closed loop* dimana input untuk *driving amplifier* adalah *servo-controlled* untuk mencapai gerakan yang diinginkan pada benda yang diujikan [3].



Gambar 2.9 Typical Modal Test Setup [7]

Gambar 2.9 merupakan gambar *set up* (instalasi) yang biasanya dilakukan untuk pengujian menggunakan *shaker*. Pada instalasi pengujian analisis modal terdapat beberapa komponen alat tes dan pengukuran di sekitar struktur uji. Transduser dinamis biasanya digunakan untuk mengukur input berupa gaya eksitasi dan hasil respon getaran. Hasil *Frequency Response Function* (FRF) yang diperoleh oleh sistem akan disimpan untuk proses-proses selanjutnya seperti perhitungan, pengurangan data, *curve fitting*, dan ekstraksi mode. *Multichannel Dynamic Signal Analyzers* (DSA) dibutuhkan sebagai *signal generator* untuk menggerakkan sistem *shaker* dan memberikan eksitasi mekanis terhadap struktur uji. Sebagian besar DSA sekarang ini memudahkan instalasi dalam pengujian analisis modal karena sistem tersebut sudah termasuk

signal conditioning dan generator, *modal software*, beserta *Fast Fourier Transform (FFT) analyzer*. *Modal shaker* pada zaman sekarang lebih mudah dalam penginstalan dan ringan untuk dibawa berpindah-pindah tempat [7].

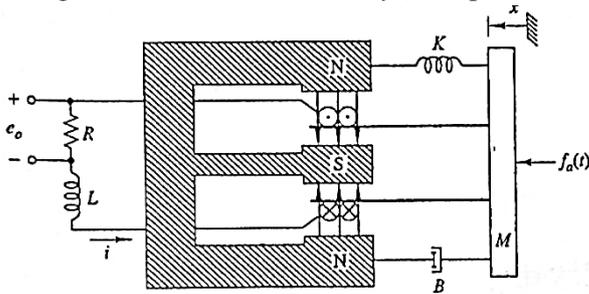
Sistem kerja pada *electrodynamic shaker* dapat dianalogikan seperti pada mikrofon yaitu sistem *electromechanical* yang mempunyai gerakan translasi. Namun, sistem kerja pada *electrodynamic shaker* merupakan kebalikan dari mikrofon. Dimana jika pada mikrofon, terjadi perubahan energi dari elektrik ke mekanik, sedangkan pada *electrodynamic shaker* terjadi perubahan energi mekanik ke elektrik.

Mikrofon merupakan salah satu transduser (perangkat yang mengubah energi dari satu bentuk ke bentuk lainnya) dimana mikrofon mengubah energi akustik (gelombang suara) menjadi energi listrik (sinyal audio). Ada berbagai tipe mikrofon dimana masing-masing tipe menggunakan metode yang berbeda dalam mengonversi energi, namun semua tipe mikrofon tersebut memiliki satu kesamaan yaitu diafragma. Diafragma (*diaphragm*) merupakan sebuah material tipis (berupa kertas, plastik atau aluminium) yang bergetar ketika terkena gelombang suara. Pada mikrofon genggam yang umum seperti pada gambar di bawah ini, diafragma terletak di dalam kepala mikrofon [8].



Gambar 2.10 Model Fisik Mikrofon [7]

Ketika diafragma bergetar, komponen lain dalam mikrofon ikut bergetar. Getaran ini dikonversi menjadi arus listrik yang kemudian menjadi sinyal audio. Adapun, dalam sistem audio, *loudspeaker* (pengeras suara) juga termasuk transduser yang berfungsi mengubah energi listrik kembali menjadi energi akustik (energi gerak) yaitu kebalikan sistem mikrofon, dimana energi gerak pada mikrofon dan *loudspeaker* (pengeras suara) adalah sama yaitu gerak translasi seperti ditunjukkan pada Gambar 2.11.

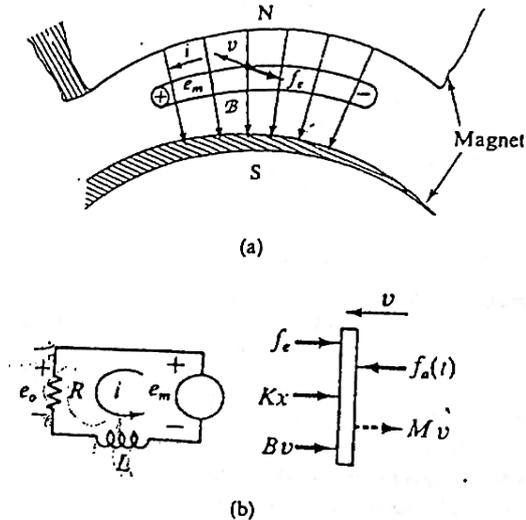


Gambar 2.11 Model Skematik Mikrofon [4]

Langkah pertama untuk memodelkan mikrofon yaitu memodelkan mikrofon pada *mechanical* dan *electrical* model. Hal yang dilakukan pertama kali yaitu menentukan arah positif dari f_e . Arah f_e ditentukan sesuai aturan kaidah tangan kanan yang telah dibahas pada sub bab sebelumnya. Adapun, arah f_e menurut gambar diatas menurut kaidah tangan kanan akan bernilai positif.

Gambar 2.12 (a) di bawah ini menunjukkan bagian atas dari kumparan tunggal sebuah koil seperti yang terlihat dari diafragma yang ditinjau terhadap magnet. Karena *flux* (fluks) mengarah kebawah dari kutub utara ke kutub selatan dan arus mengarah ke kiri, menurut aturan tangan kanan hal tersebut menunjukkan bahwa arah positif f_e menuju ke kumparan. Karena arah kecepatan menjauhi kumparan, aturan tangan kanan digambarkan pada Gambar 2.12 (b) menunjukkan bahwa arah positif dari tenggangan terinduksi sama dengan arus. Adapun, kita bisa mencapai kesimpulan yang sama dengan memeriksa bagian lain dari

kumparan. Sehingga dapat digambar *free body diagram* dari sistem sesuai pada Gambar 2.12 (b).



Gambar 2.12 (a) Hubungan Bagian dari Koil Tunggal. (b) Diagram yang Digunakan Untuk Analisa [4]

Karena kumparan dan garis-garis fluks di celah udara adalah simetri radial, seluruh panjang kumparan tegak lurus terhadap fluks. Sehingga,

$$f_e = \alpha i \quad (2.19)$$

$$e_m = \alpha v \quad (2.20)$$

Dimana, $\alpha = 2\pi nN\beta$ adalah *electromechanical coupling coefficient* untuk sistem.

Sehingga, didapatkan persamaan gerak dari sistem yaitu:

$$m \dot{v} + Bv + kx = -\alpha i + f_a(t) \quad (2.21)$$

Kemudian, ditemukan persamaan pada sistem elektrik dari aplikasi Hukum Kirchoff's *voltage*, sebagai berikut:

$$L \frac{di}{dt} + Ri = \alpha v \quad (2.22)$$

Sistem mempunyai tiga elemen energi penyimpanan yang independen (L, K, M), Sehingga ditemukan *state variable*. Sehingga, *state variable* yang dapat ditetapkan yaitu i , x , v . Dari penulisan kembali rumus di atas, diperoleh *state variable equations* sebagai berikut:

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L} (-R i + \alpha v)$$

$$\dot{x} = v$$

$$\dot{v} = \frac{1}{M} [\alpha i - k x - B v + f a(t)] \quad (2.23)$$

2.6 Penelitian Terdahulu

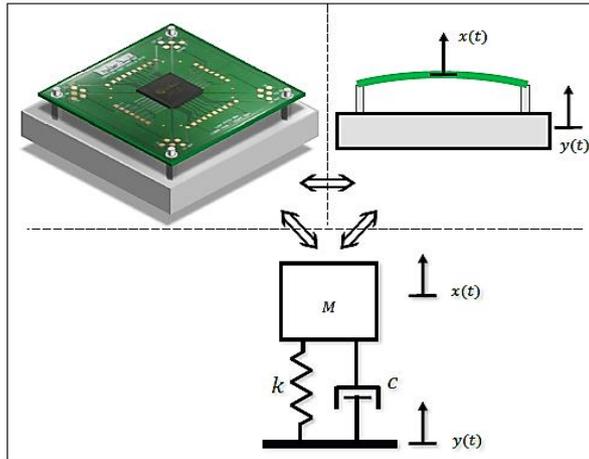
Di bawah ini merupakan beberapa penelitian terdahulu dan katalog *electrodynamic shaker* yang digunakan sebagai dasar dan landasan literatur dalam perancangan *electrodynamic shaker* yang digunakan untuk pengujian *Printed Circuit Board* (PCB) berdasar parameter dan karakteristik dinamis.

2.6.1 *Vibration reliability test method for electronics packaging*

Pada tahun 2013, Aaron Joseph Stewart meneliti keandalan pada *Electronics Packaging*.

Metode pengujian menggunakan getaran sinusoidal dengan *resonance tracking to account* untuk perubahan sistem selama tes. *Vibration controller* terus memantau dan menyesuaikan frekuensi eksitasi agar sesuai dengan frekuensi sistem saat resonansi. *Sine sweeps* digunakan untuk mengetahui karakteristik sistem sebelum dan setelah *resonant sine dwell tests*. *Four terminal resistance sensing* digunakan untuk memantau *solder joints* dan menunjukkan kegagalan. Kemudian *destructive test* dilakukan untuk menentukan modus kegagalan. Tes dilakukan pada PCB identik dengan empat variasi jenis komponen/interkoneksi, meliputi *tin lead* atau timah solder; *ball grid array* atau *land grid*

array. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *typical failure modes* (*solder fatigue*) ditemukan saat pengujian kehandalan [9].



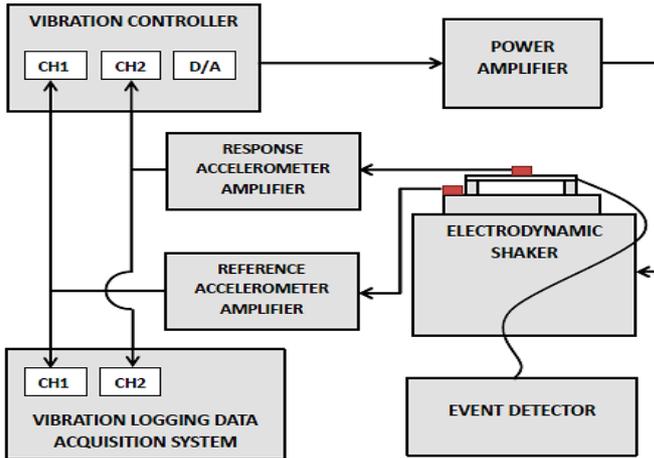
Gambar 2.13 *Free Body Diagram* PCB pada *Shaker* [9]

Gambar 2.13 merupakan *Free Body Diagram* PCB pada *shaker*, dimana PCB yang digunakan mempunyai karakteristik (*properties*) di bawah ini:

Dimensions (H×W×T)	76.2 × 76.2 × 1 mm
Laminate Type	6 layer, 370HR
Pad Diameter	0.38 mm
Mask Diameter	0.56 mm
Finish	NSMD, Copper OSP

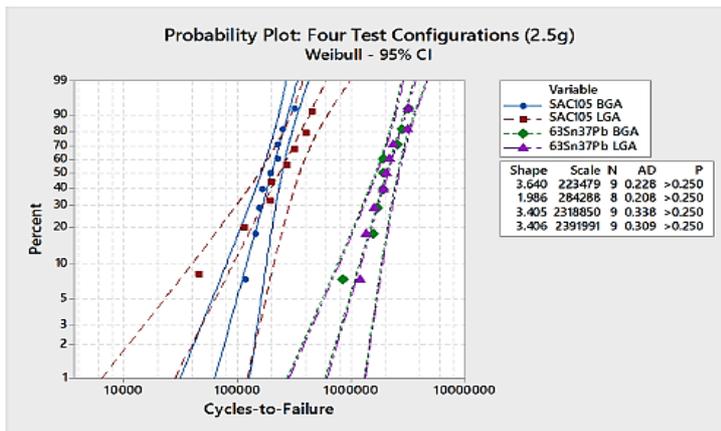
Gambar 2.14 *Properties* PCB [9]

Adapun, instalasi pengujian ditunjukkan pada gambar di bawah ini:

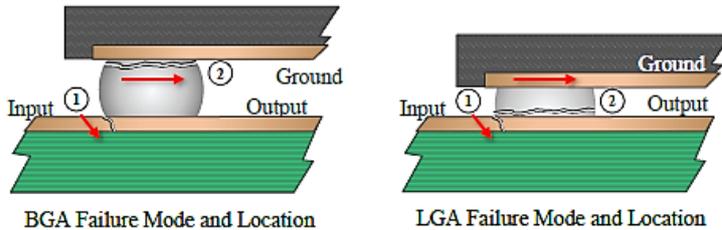


Gambar 2.15 Instalasi Pengujian [9]

Kemudian, hasil analisa kerusakan yang di plot pada distribusi Weibull yang biasanya disebut dengan *Charachteristic Life* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.16. Dimana *typical failure modes* hasil pengujian ditunjukkan pada Gambar 2.17.



Gambar 2.16 VTV Failures: Weibull Distribution Plot [9]



Gambar 2.17 Typical Failure Modes: BGA and LGA [9]

2.6.2 Modal analysis of a printed circuit board (PCB)

Jagdale, R., Bardia, P., and Schmaltz, M Pada tahun 2013 Jagdale, R., Bardia, P., and Schmaltz, M melakukan penelitian mengenai analisis modal pada PCB. Perkiraan mengenai kehandalan dalam hal mekanik PCB di sistem elektronik dianggap menjadi bagian penting dari keseluruhan perkiraan kehandalan seluruh sistem, sebab getaran seringkali merupakan salah satu penyebab utama kegagalan sistem dan komponen. Seperti komponen jenis elektronik yang berbeda (seperti transformers, kapasitor, chip dll) yang dipasang di kedua sisi PCB menggunakan solder, perekat dll, berbagai kompleksitas ditemui ketika harus memodelkan PCB untuk analisis. Untuk menghindari hal tersebut, PCB sederhana tanpa komponen dianggap untuk studi saat ini. Makalah ini berfokus pada metodologi untuk memahami dan memperkirakan perilaku dinamis sistem menggunakan berbagai tes mekanik dan simulasi. Sifat-sifat material (Modulus Elastis dan Poisson's *Ratio*) dari PCB yang diperoleh dari pengujian tarik standar berdasarkan ASTM D638 dimana *Average Elastic Modulus* (E) = 20 GPa dan Poisson's *Ratio* = 0,15. Respon modal model, termasuk modal frekuensi dan *mode shape* diperoleh melalui pengujian. Selanjutnya, model yang sama juga dianalisis oleh simulasi *Finite Element Analysis* (FEA) untuk menentukan sifat dinamis yang sama. Dengan demikian, hasil yang diperoleh melalui kedua pendekatan dibandingkan secara rinci. Kemudian, dengan upaya untuk memahami perilaku respon kekuatan sistem,

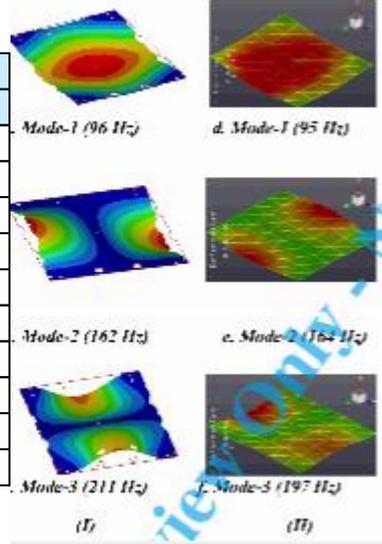
sine swept vibration test dilakukan pada model yang sama menggunakan tingkat getaran yang ditentukan sebagai eksitasi input dan hasilnya, respon amplitudo kurva di lokasi tertentu. Dengan cara yang sama dilakukan simulasi dengan menggunakan *software* FEA yang tersedia di pasaran, dengan asumsi rasio redaman yang berbeda. Hasil simulasi ini dibandingkan dengan hasil tes untuk mencari rasio redaman yang sesuai dimana hal tersebut merupakan salah satu faktor yang sangat penting untuk analisis dinamis. Didapatkan kesimpulan yaitu, hasil modal parameter PCB yang diperoleh melalui *software* FEA dan metode eksperimental berupa *sine swept vibration test* menunjukkan korelasi yang baik. Rasio redaman yang ditemukan yaitu 9% [10].

Adapun, pada Gambar 2.21 merupakan material properties dari PCB yang digunakan untuk pengujian. Selanjutnya pada Gambar 2.22 merupakan *modal parameter* hasil *modal testing*.

PCB	AM1	AM7
Length (mm)	167	186
Width (mm)	141	167
Thickness (mm)	1.57	1.57
Density (kg/m³)	2474	2518

Gambar 2.18 Material Properties PCB yang Digunakan Pengujian
[9]

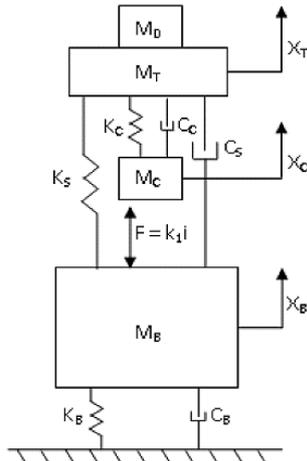
PCB	Natural Frequency (Hz)			Difference (%)
	Modes	FEA	Expt	Expt - FEA
AM1	1	115	128	10
	2	211	228	7
	3	247	266	7
	4	281	314	10
	5	475	440	-8
AM7	1	96	95	-1
	2	162	164	1
	3	211	197	-7
	4	220	231	5
	5	363	372	2



Gambar 2.19 Perbandingan *Modal Parameter* Hasil *Experiment* dan Hasil *Finite Element Analysis* [9]

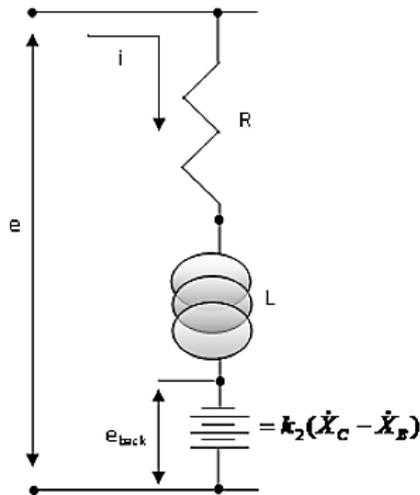
2.6.3 A study of the electrodynamic shaker

Pada tahun 2013 Daryl Hickey, Steve Sewell, William Mortel, Ibrahim Esat melakukan studi tentang *electrodynamic shaker* [11]. Dimana mereka memodelkan *electrodynamic shaker* dengan *free body diagram* seperti Gambar 2.20.



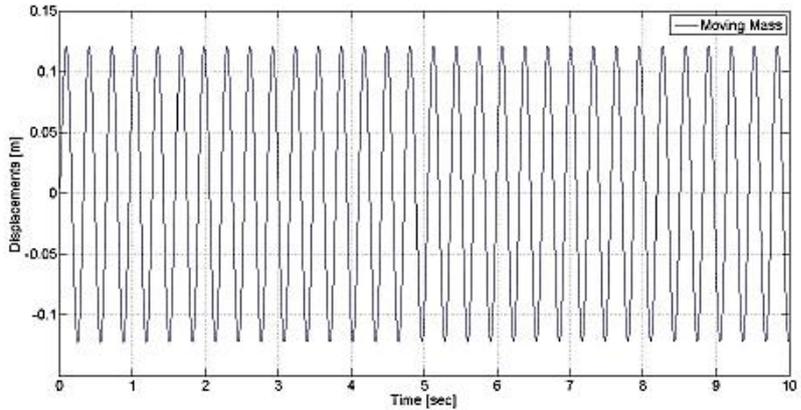
Gambar 2.20 Free Body Diagram Electrodynamic Shaker [10]

Dimana gaya eksitasi pada *electrodynamic shaker* tersebut didapat dari *electrical components* dengan *free body diagram* seperti pada Gambar 2.21.

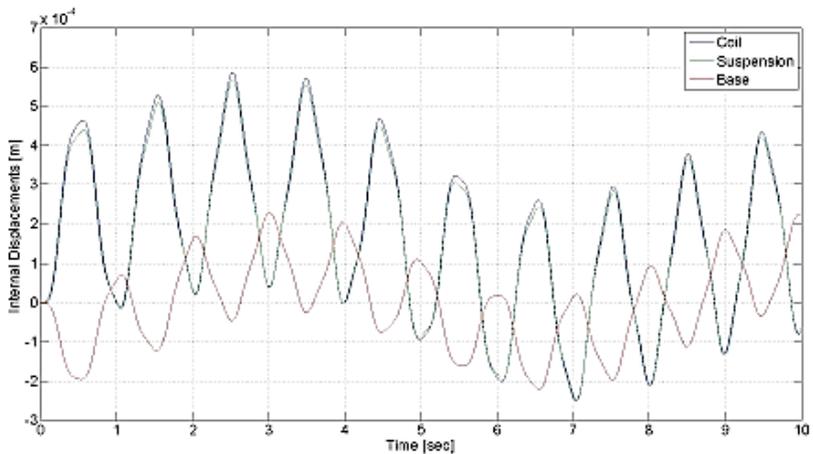


Gambar 2.21 Free Body Diagram Electrical Components [10]

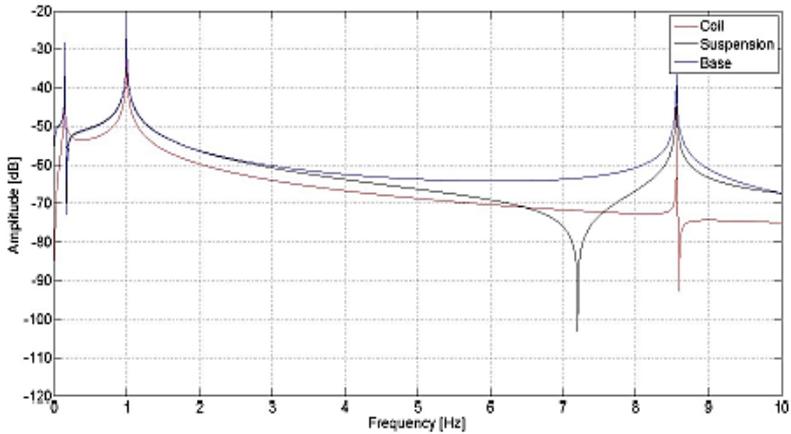
Kemudian didapatkan respon dari sistem dengan empat derajat kebebasan (DoF) tersebut dengan *Ordinary Differential Equations* (ODE) dan Runga-Kutta *Integration* pada Gambar 2.22 (a), (b), (c) pada halaman selanjutnya.



(a)



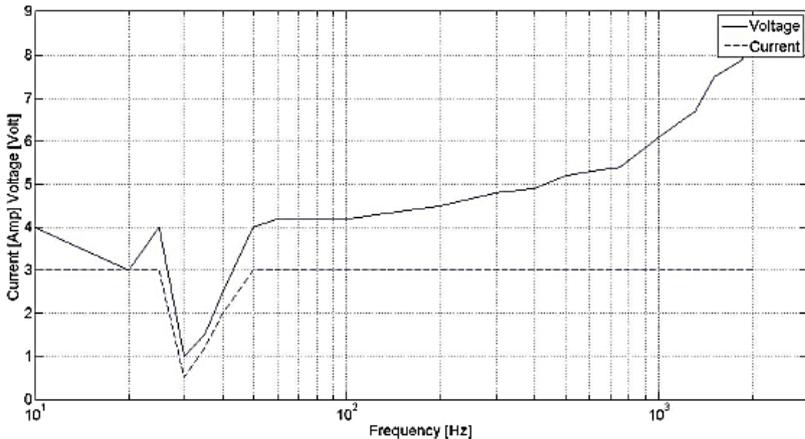
(b)



(c)

Gambar 2.22 (a) Time Domain Analysis untuk perpindahan dari movable mass (M_D, M_F). (b) Time Domain Analysis untuk perpindahan dari internal mass structure. (c) Frequency Domain Analysis untuk Mengidentifikasi Modes of Vibration [10]

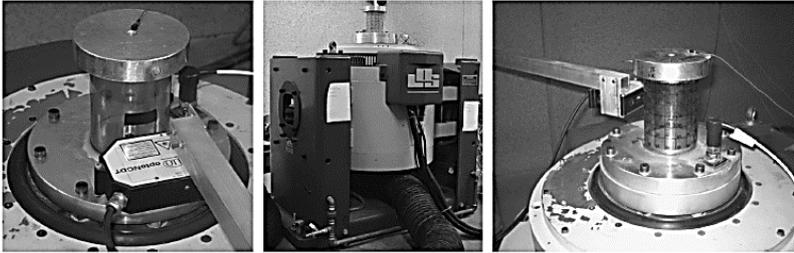
Analisis hasil studi tersebut menyatakan bahwa hal yang paling penting dari *electrodynamic shaker* adalah dalam plot frekuensi. Sebagian (tidak semua) produsen *electrodynamic shaker* memberikan rentang frekuensi optimal operasi untuk *shaker* mereka. Hal ini didasarkan pada kondisi resonansi yang ditunjukkan pada Gambar 2.22. Salah satu model utama kegagalan dari *shaker* adalah *overload* tegangan yang mengarah ke panas berlebihan di kumparan yang menyebabkan *blistering of the windings*, dengan demikian menjaga tegangan untuk minimum lebih disukai dan mengetahui frekuensi yang memerlukan daya minimum untuk operasi penting untuk memperpanjang umur dari perangkat. Grafik kinerja *shaker* diberikan pada Gambar 2.23. Grafik tersebut menjelaskan bahwa tegangan dengan frekuensi tertentu dan arus yang dibutuhkan untuk *shaker* adalah minimal dan seperti daya yang diperlukan [11].



Gambar 2.23 Kinerja Shaker [10]

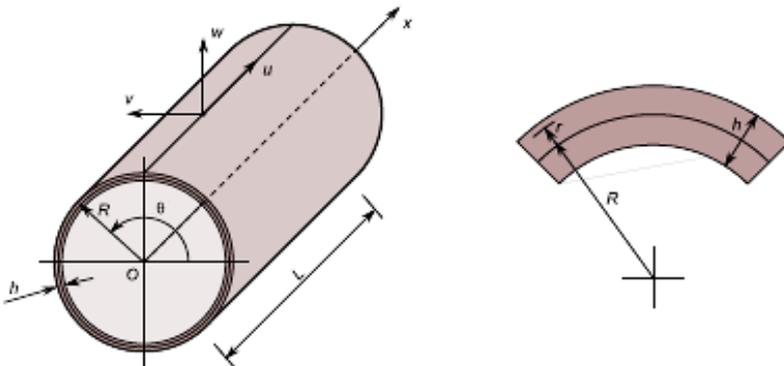
2.6.4 Complex dynamics of circular cylindrical shells

Pada tahun 2014, Francesco Pellicano dan Marco Barbieri melakukan penelitian untuk mengetahui karakteristik dinamis dari struktur yang kompleks yaitu *Cylindrical Shells*. Penelitian dilakukan karena aplikasi penggunaan struktur seperti shell digunakan pada beberapa bidang, seperti pada *Aerospace*, Nuklir, Sipil, Otomotif, Mekanik, dan Energi. Penelitian dilakukan dengan menggunakan *electrodynamic shaker* yang kemudian dilakukan validasi secara mendalam dengan menggunakan *The Non-Linear Sanders–Koiter Theory*, *Non Linear Partial Differential Equations*, *Linear Ordinary Differential Equations* [12]. Adapun, gambar 2.24 merupakan instalasi pengujian menggunakan *electrodynamic shaker*.



Gambar 2.24 Instalasi Pengujian *Cylindrical Shells* dengan Menggunakan *Electrodynamic Shaker* [11]

Kemudian, pada Gambar 2.25 merupakan gambar pemodelan fisik dari *shell*.



Gambar 2.25 Pemodelan Fisik *Shells* [11]

Pada Tabel 2.1, 2.2. merupakan parameter yang digunakan ketika pengujian.

Tabel 2.1 *Shaker Parameter* [11]

k_b [N/m]	c_b [Ns/m]	m_b [kg]	ζ [H]	\mathcal{R} [Ω]	k_c [N/A]	P_{amp}	b_{amp} [s]
93000	0.534	14.2	0.51×10^{-3}	1.06	121.22	-115	0.4×10^{-4}

Keterangan tabel :

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 (Ω)

k_c adalah arus ke gaya konstan (N/A)

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

Tabel 2.2 Shell and Disk Parameter [11]

ρ $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$	ν	E $\left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right]$	m_d [kg]	R [m]	L [m]	h [m]	$\frac{R}{h}$	$\frac{L}{R}$
1366	0.4	46×10^8	0.82	43.88×10^{-3}	96×10^{-3}	0.25×10^{-3}	176	2.19

Keterangan :

ρ adalah massa jenis dari *shell* $\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)$

ν adalah *poisson ratio*

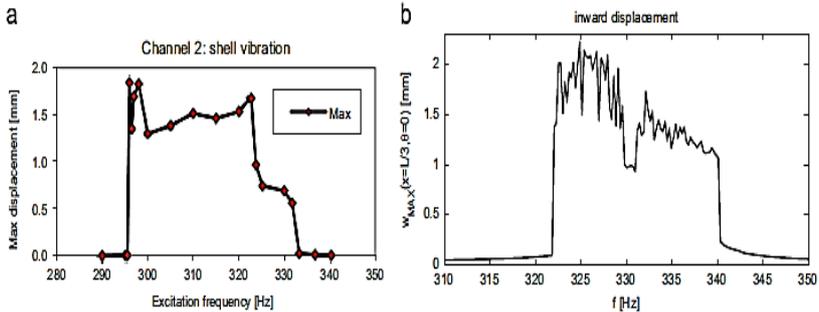
E adalah konstanta elongasi dari *shell* $\left(\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right)$

m_d adalah massa *disk* (kg)

L adalah panjang *shell* (m)

h adalah ketebalan *shell* (m)

Hasil penelian mendapatkan *mode shape* yang tidak jauh beda antara proses analitis dengan eksperimen seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.26 dan Gambar 2.27.



Gambar 2.26 Shell lateral vibration, maximum displacement, positive inward: (a) experiments; (b) simulation Excitation level 0.1V [11]

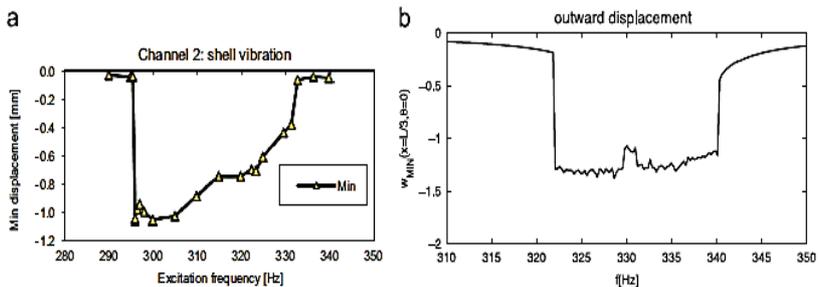


Fig. 7. Shell lateral vibration, minimum displacement, negative outward: (a) experiments and (b) simulation. Excitation level 0.1 V.

Gambar 2.27 Shell lateral vibration, minimum displacement, negative outward: (a) experiments. (b) simulation. Excitation level 0.1V [11]

2.7 Referensi *Electrodynamic Shaker* yang Sudah Ada di Pasaran

Gambar 2.28 merupakan panduan pemilihan *modal shaker* berdasarkan alat yang akan diuji. Pada gambar tersebut tertera *range* gaya, frekuensi, serta amplitudo yang biasanya dipakai untuk menguji sesuai dengan benda yang akan diuji [13].



Gambar 2.28 Panduan Modal Shop [12]

Gambar tersebut menunjukkan bahwa PCB dapat diuji menggunakan *modal shaker* tipe 2004E atau 2007E. Dimana tipe tersebut memiliki spesifikasi sebagai berikut:

2004E

4.5 pounds (20 N) pk *sine force*

0.2 inch (0.5 cm) *stroke*

2007E

7 pounds (31 N) pk *sine force*

0.5 inch (1.27 cm) *stroke*

Mini-Shaker Model 2004E & 2007E

Electrodynamic exciter ini kecil dengan *portable permanent magnet shakers*.

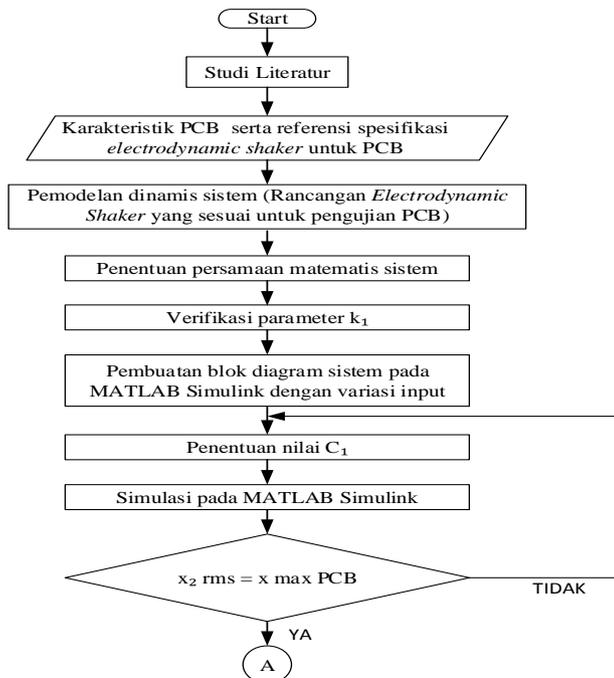
Tabel 2.3 Spesifikasi Modal Shaker Tipe 2004E, 2007E [12]

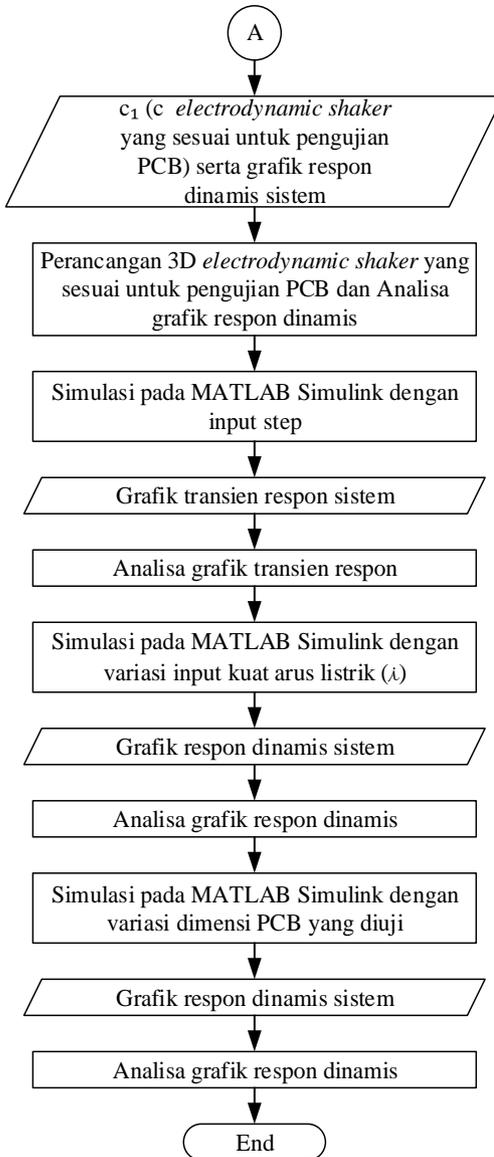
SPECIFICATIONS:	2004E	2007E
PERFORMANCE		
Output Force, sine pk		
Natural Air Cooling	4.5 lbf (20 N)	7 lbf (31 N)
Output Force, random RMS		
Natural Air Cooling	3 lbf (13.3 N)	5 lbf (22 N)
Output Force, shock pk	9 lbf (40 N)	15 lbf (67 N)
Stroke Length		
Continuous pk-pk	0.2 in (5 mm)	0.5 in (13 mm)
Between Stops	0.35 in (9 mm)	0.55 in (14 mm)
Frequency Range ⁽¹⁾	DC-11 kHz	DC-9 kHz
Acceleration ^g - ⁽²⁾		
No load	64 g _{pk}	70 g _{pk}
0.1 lb load	26 g _{pk}	35 g _{pk}
1 lb load	4.2 g _{pk}	6.4 g _{pk}
2 lb load	2.2 g _{pk}	3.3 g _{pk}
Protection Features	Over-current (in-line fuse)	
ELECTRICAL		
Maximum Current	5 A	8 A
DC Resistance, armature, nominal	1.5 Ω	0.37 Ω
PHYSICAL		
Armature Mass, nominal	0.07 lb (0.032 kg)	0.1 lb (0.045 kg)
Suspension Stiffness, nominal	15 lbf/in (2.63 N/mm)	
Dimensions (HxWxD), nominal	5.3 x 6.75 x 3.5 in (135 x 171 x 89 mm)	
Weight	6 lbs (2.72 kg)	
Electical Connector	7 ft (2.13 m) Integral cable to ring terminals	
Table Mounting	10-32 thread	

BAB III METODOLOGI

3.1 Metode Penelitian

Penulisan tugas akhir ini dilakukan untuk mendapatkan rancangan 3D *electrodynamic shaker* yang digunakan untuk pengujian *Printed Circuit Board* (PCB) berdasar parameter dan karakteristik dinamis. Perancangan *electrodynamic shaker* yang digunakan untuk pengujian PCB diutamakan pada fungsi/fenomena dinamis. Oleh karena itu, dalam tugas akhir ini akan dicari nilai *stiffness constant* dari *electrodynamic shaker* (k_1) dan *damping constant* dari *electrodynamic shaker* (C_1) yang sesuai untuk pengujian PCB dengan spesifikasi tertentu. Dalam proses perancangan dilakukan beberapa langkah yang ditunjukkan oleh diagram alir pada Gambar 3.1.





Gambar 3.1 Diagram alir penyelesaian tugas akhir

Metode pelaksanaan tugas akhir ini secara umum ditunjukkan pada Gambar 3.1, dimulai dari studi literatur mengenai rancangan *electrodynamic shaker* yang digunakan untuk pengujian PCB serta karakteristik dari PCB berupa data *mechanical properties* yang mendukung untuk simulasi pada MATLAB Simulink nantinya. Langkah selanjutnya yaitu pemodelan dinamis dari rancangan *electrodynamic shaker* yang sesuai untuk pengujian PCB dengan referensi model dan spesifikasi sistem yang telah ada sebelumnya di pasaran yang kemudian disesuaikan dengan karakteristik PCB sebagai benda uji. Kemudian, dilakukan pemodelan matematis rancangan *electrodynamic shaker* untuk pengujian PCB yang telah agar diketahui persamaan matematis sistem dan *state variable equation* sistem sebagai penunjang simulasi pada MATLAB Simulink. Selanjutnya, akan dilakukan verifikasi nilai parameter k_1 yang telah diketahui dari katalog pada *software* Autodesk Inventor agar diketahui nilai tersebut sesuai atau tidak. Setelah itu, pembuatan blok diagram sistem pada MATLAB Simulink. Dari blok diagram tersebut dilakukan simulasi dengan variasi input *step* dan *sinusoidal*. Simulasi dilakukan untuk menemukan nilai C_1 yang sesuai untuk *electrodynamic shaker* yang akan dirancang. Adapun nilai C_1 yang sesuai ditemukan melalui proses *trial* dan *error* sampai ditemukan C_1 yang menghasilkan respon perpindahan yang diterima PCB ketika ditinjau secara *root mean square* sama dengan defleksi maksimum yang dapat diterima PCB tersebut ($x_2\ rms = x_{max}\ \text{PCB}$) dimana merupakan batas maksimal yang akan dikenakan ketika pengujian PCB agar terdapat *constrain* jelas. Kemudian, akan dilakukan perancangan 3D *electrodynamic shaker* yang sesuai untuk pengujian PCB yang disesuaikan dengan nilai C_1 yang telah didapat dari simulasi pada MATLAB Simulink. Selain itu, dilakukan pula analisa grafik respon dinamis dari *electrodynamic shaker* yang telah dirancang. Selanjutnya, akan dilakukan simulasi pada MATLAB Simulink serta analisa grafik ketika diberi input *step*, variasi input kuat arus listrik (λ), dan variasi dimensi PCB yang diuji. Hal tersebut

bertujuan agar diketahui karakteristik respon dinamis *electrodynamic shaker* yang telah dirancang pada kondisi tersebut.

3.2 Penjelasan Diagram Alir Penelitian

Pada Gambar 3.1 terdapat sembilan proses utama dalam metode pelaksanaan penelitian. Berikut ini adalah penjelasan detail dari diagram alir:

3.2.1 Tahap studi literatur

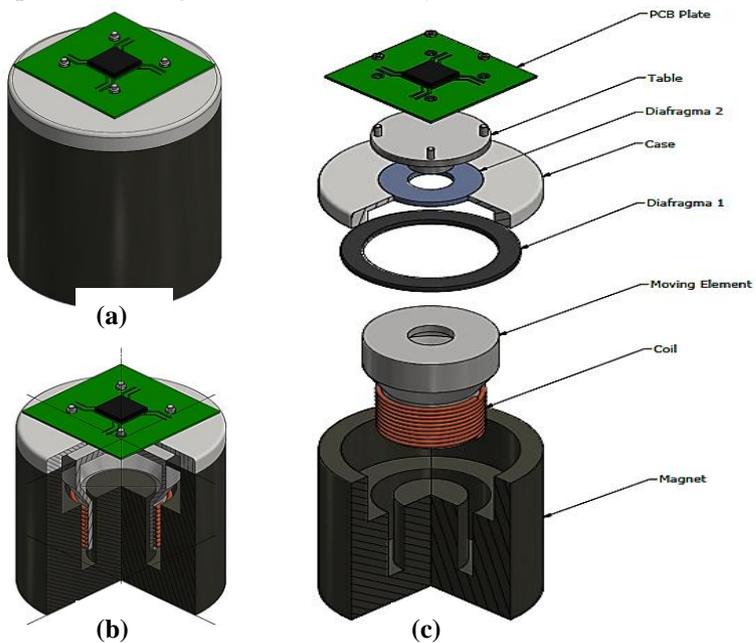
Dalam penulisan tugas akhir ini diperlukan referensi-referensi yang dapat menunjang dalam rancangan sistem dinamis pada *electrodynamic shaker* yang digunakan untuk pengujian PCB. Adapun, materi dari studi literatur yang mendukung dalam penulisan tugas akhir ini yaitu *Forced Vibration Multi Degree of Freedom (MDoF), Deflection of Fixed – Fixed Beam with Center Load, Damping Constant of a Parallel Plates Separated by Viscous Fluid*, Konsep Elektromagnetik pada *Electromechanical System, Electrodynamic Shaker*, Penelitian Terdahulu dan Referensi *Electrodynamic Shaker* yang Sudah Ada di Pasaran.

Nilai parameter diambil dari jurnal-jurnal yang meliputi karakteristik PCB berupa data *mechanical properties* yang mendukung untuk simulasi pada MATLAB Simulink nantinya. Kemudian, referensi model dan spesifikasi *electrodynamic shaker* untuk pengujian PCB diambil dari katalog *electrodynamic shaker* yang ada pada pasaran sebagai referensi pemodelan.

3.2.2 Tahap pemodelan dinamis sistem (rancangan *electrodynamic shaker* yang sesuai untuk pengujian PCB)

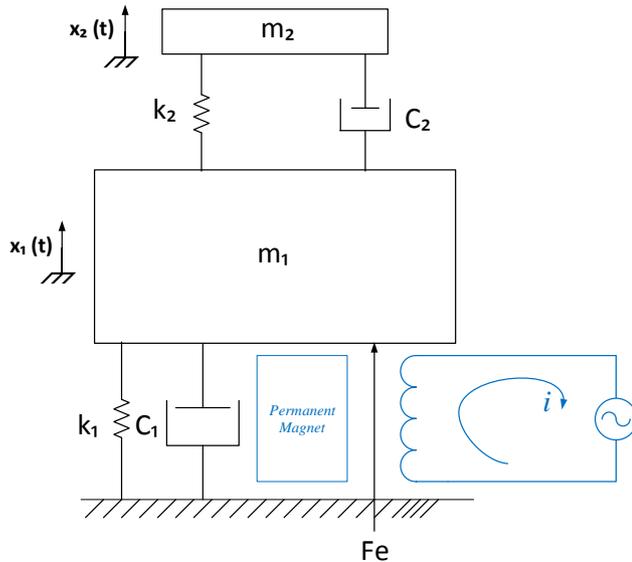
Pemodelan dinamis *electrodynamic shaker* yang sesuai untuk pengujian PCB ini seperti yang digambarkan pada Gambar 3.2 yang dapat dilihat di halaman selanjutnya. *Electrodynamic shaker* pada gambar tersebut nantinya akan menghasilkan gerak mekanis secara translasi dimana gerak tersebut kemudian digunakan sebagai input pengujian *modal analysis*. Gerak translasi tersebut dihasilkan oleh gaya eksitasi (gaya elektromagnetik).

Adapun gaya eksitasi tersebut terjadi akibat sistem elektrik pada *electrodynamic shaker*. Gaya tersebut dihasilkan oleh medan magnet yang dialiri arus listrik di kumparan. Dengan susunan sistem seperti pada Gambar 3.3 dimana susunan magnet seperti susunan magnet pada mikrofon sehingga menghasilkan medan magnet seperti yang ditunjukkan tanda panah hitam pada Gambar 3.3 Gaya eksitasi yang dihasilkan oleh *electrodynamic shaker* tersebut dapat bergerak translasi ke arah atas dan bawah seiring dengan arus bolak-balik (AC) yang diberikan ke sistem. Hal tersebut sesuai dengan teori bahwa arah gaya elektromagnetik adalah tegak lurus dengan medan magnet. Gaya eksitasi tersebut selanjutnya akan mengenai ke benda uji yaitu PCB, sehingga PCB ikut bergerak ke atas dan ke bawah akibat terkena gaya eksitasi. Adapun, PCB di tempatkan di atas *shaker table* dengan cara dijepit empat baut di bagian sudut sisi - sisinya.



Gambar 3.2 (a) Model 3D; (b) Gambar Potongan; (c) Keterangan Gambar Rancangan *Electrodynamic Shaker* untuk Pengujian PCB

Model dinamis sistem dalam 2 dimensi:



Gambar 3.4 Model Dinamis *Printed Circuit Board* pada *Electrodynamic Shaker*

Keterangan Gambar:

m_1 = massa *Electrodynamic Shaker* (kg)

m_2 = massa *Printed Circuit Board* (kg)

F_e = Gaya eksitasi yang ditimbulkan oleh sistem elektrik pada *Electrodynamic Shaker* (N)

k_1 = konstanta pegas (*stiffness constant*) *Electrodynamic Shaker* (N/m)

k_2 = konstanta pegas *Printed Circuit Board* (N/m)

C_1 = konstanta redaman (*damping constant*) *Electrodynamic Shaker* (Ns/m)

C_2 = konstanta redaman *Printed Circuit Board* (Ns/m)

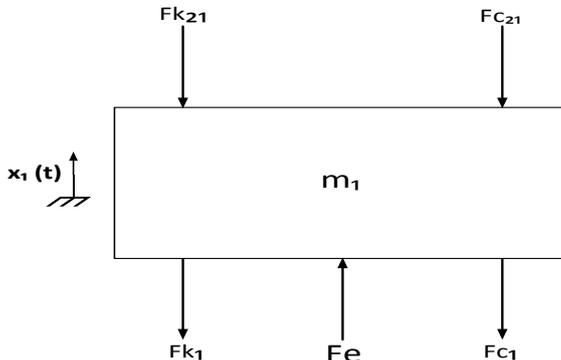
$x_1(t)$ = respon perpindahan pada massa satu (*electrodynamic shaker*) (m)

$x_2(t)$ = respon perpindahan pada massa dua (*Printed Circuit Board*) (m)

Model matematis

Setelah itu, digambarkan model matematis sistem. Dimana, dalam hal ini dianalisa gaya-gaya apa saja yang mempengaruhi pada setiap komponen massa yang mempengaruhi sistem sehingga didapatkanlah *Free Body Diagram* pada tiap komponen massa. Selanjutnya, dari *Free Body Diagram* tiap massa tersebut didapatkan persamaan gerak menurut Hukum Newton seperti yang terlihat pada analisa di bawah ini. Dari persamaan matematis sistem, dicari *state variable equation* ($\dot{x} = v$ / bentuk orde dua pada persamaan gerak diubah ke bentuk orde 1) pada tiap komponen massa seperti yang terlihat pada uraian di bawah ini :

Free body diagram sistem mekanis *electrodynamic shaker*



Gambar 3.5 *Free Body Diagram* Sistem Mekanis *Electrodynamic Shaker*

Keterangan Gambar:

F_{k21} = gaya pegas pada m_1 relatif terhadap m_2 (N)

F_{c21} = gaya redaman pada m_1 relatif terhadap m_2 (N)

$m_1 \ddot{x}_1$ = gaya inersia pada m_1 yang timbul karena percepatan pada m_1 (N)

F_{k_1} = gaya pegas pada m_1 (N)

F_{c_1} = gaya redaman pada m_1 (N)

\dot{x}_1 = respon perpindahan pada m_1 ($\frac{m}{s}$)

\ddot{x}_1 = respon percepatan pada m_1 ($\frac{m}{s^2}$)

Persamaan gerak sistem mekanis *electrodynamic shaker*

$$\begin{aligned} \uparrow + \sum F &= m_1 \ddot{x}_1 \\ -m_1 \ddot{x}_1 - F_{C_1} - F_{k_1} - F_{C_{21}} - F_{k_{21}} + F_e &= 0 \\ -m_1 \ddot{x}_1 - C_1 \dot{x}_1 - k_1 x_1 - C_2 (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - k_2 (x_1 - x_2) + F_e &= 0 \quad (3.1) \end{aligned}$$

dimana $F_e = \alpha i$

$\alpha = N\beta 2\pi r$ = *electromechanical coupling coefficient* untuk sistem = konstan (Wb/m)

N = jumlah lilitan pada sistem elektrik *electrodynamic shaker*

β = *flux density* (kuat medan magnet) pada sistem elektrik *electrodynamic shaker* (Wb/m² / Tesla)

r = radius lilitan kawat (*wire coil*) (m)

i = kuat arus listrik (A)

sehingga persamaan (3.1) menjadi:

$$\begin{aligned} -m_1 \ddot{x}_1 - C_1 \dot{x}_1 - k_1 x_1 - C_2 (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - k_2 (x_1 - x_2) + \alpha i &= 0 \\ m_1 \ddot{x}_1 + C_1 \dot{x}_1 + k_1 x_1 + C_2 (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_2 (x_1 - x_2) - \alpha i &= 0 \quad (3.2) \end{aligned}$$

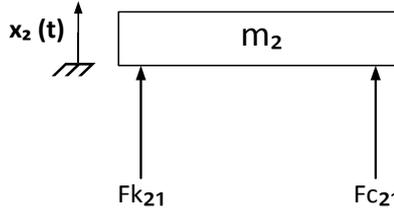
State variable equation* sistem mekanis *electrodynamic shaker

$$\dot{x}_1 = v_1 ; \dot{x}_2 = v_2$$

$$\dot{v}_1 = \frac{1}{m_1} (-C_1 v_1 - k_1 x_1 - C_2 (v_1 - v_2) - k_2 (x_1 - x_2) + \alpha i)$$

$$\dot{v}_2 = \frac{1}{m_2} (-C_2 v_1 - C_2 (v_1 - v_2) - k_1 x_1 - k_2 (x_1 - x_2) + \alpha i) \quad (3.3)$$

Free body diagram printed circuit board



Gambar 3.6 Free Body Diagram Printed Circuit Board

Keterangan gambar:

$m_2\ddot{x}_2$ = gaya inersia pada m_2 yang timbul karena percepatan pada m_2 (N)

F_{k_2} = gaya pegas pada m_2 (N)

F_{c_2} = gaya redaman pada m_2 (N)

\dot{x}_2 = respon perpindahan pada m_2 ($\frac{m}{s}$)

\ddot{x}_2 = respon percepatan pada m_2 ($\frac{m}{s^2}$)

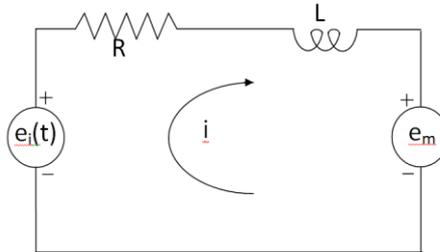
Persamaan gerak printed circuit board

$$\begin{aligned}
 \uparrow + \sum F &= m_2\ddot{x}_2 \\
 -m_2\ddot{x}_2 + F_{c21} + F_{k21} &= 0 \\
 -m_2\ddot{x}_2 + C_2(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_2(x_1 - x_2) &= 0 \\
 m_2\ddot{x}_2 - C_2(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - k_2(x_1 - x_2) &= 0
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

State variable equation printed circuit board

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= v_1 ; \dot{x}_2 = v_2 \\
 \dot{v}_2 &= \frac{1}{m_2}(C_2(v_1 - v_2) + k_2(x_1 - x_2))
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

Free body diagram sistem elektrik *electrodynamic shaker*



Gambar 3.7 Free Body Diagram Sistem Elektrik *Electrodynamic Shaker*

Keterangan gambar:

R = Hambatan resistansi / Kerugian energi listrik (Ω)

L = Nilai hambatan induktansi akibat kehilangan efek magnetik (Henry (H) atau Wb/A)

i = *flux* / kuat arus listrik (A)

e_m = tegangan yang dihasilkan / tegangan yang diinduksi di konduktor (V)

$e_i(t)$ = sumber tegangan (V)

Persamaan gerak sistem elektrik *electrodynamic shaker*

$$e_i(t) = L \frac{di}{dt} + R i + e_m \quad (3.6)$$

Dimana pada batasan masalah no. 8 pada Bab 1 telah tertulis bahwa nilai hambatan induktansi akibat kehilangan efek magnetik (L) pada sistem elektrik *electrodynamic shaker* sangat kecil (mendekati nol) sehingga bisa diabaikan. Sehingga persamaan (3.6) menjadi:

$$e_i(t) = R i + e_m \quad (3.7)$$

Dimana $e_m = \alpha v = \alpha \dot{x} = \alpha (\dot{x}_1 - \dot{x}_2)$, sehingga persamaan (3.7) menjadi:

$$e_i(t) = R i + \alpha (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) \quad (3.8)$$

dimana $\alpha = N\beta 2\pi r = \text{electromechanical coupling coefficient}$
 untuk sistem = konstan (Wb/m)
 N = jumlah lilitan pada sistem elektrik *electrodynamic shaker*
 β = *flux density* (kuat medan magnet) pada sistem elektrik *electrodynamic shaker* (Wb/m² (Tesla))
 r = radius lilitan kawat (*wire coil*) (m)

$$i = \frac{1}{R} (e_i(t) - \alpha(\dot{x}_1 - \dot{x}_2)) \quad (3.9)$$

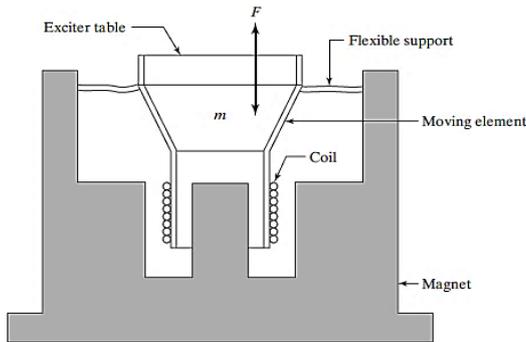
State variable equation sistem elektrik *electrodynamic shaker*

$$\dot{x}_1 = v_1 ; \dot{x}_2 = v_2$$

$$i = \frac{1}{R} (e_i(t) - \alpha(v_1 - v_2)) \quad (3.10)$$

3.2.4 Tahap verifikasi parameter k_1

Pada tahap ini akan dilakukan verifikasi nilai parameter k_1 yang telah diketahui dari katalog pada *software* Autodesk Inventor agar diketahui nilai tersebut sesuai ataukah tidak apabila direalisasikan.



Gambar 3.8 Gambar *Electrodynamic Shaker* [3]

Dimana ide pada tugas akhir ini yaitu mendefinisikan nilai k_1 yaitu merupakan nilai *stiffness constant* yang dimiliki oleh *flexible*

support pada Gambar 3.8 atau yang biasanya disebut juga membran.

3.2.5 Tahap pembuatan blok diagram sistem pada matlab simulink dengan variasi input

Dari *state variable equation* sistem yang telah didapatkan pada tahap 3.2.3 di atas, dibuat blok diagram sistem dengan *software* MATLAB SIMULINK. Pada blok diagram tersebut dimasukkan parameter-parameter yang telah didapatkan dari studi literatur yang telah dilakukan. Parameter-parameter tersebut ditulis pada editor di m file. Pada tahap ini dilakukan variasi berupa input yang akan diberikan pada sistem. Variasi input tersebut berupa input *step* dan input *sinusoidal*. Adapun, tahapan pembuatan blok diagram sistem seperti yang tertera pada Gambar 3.9.

3.2.6 Tahap penentuan nilai C_1

Pada tahap ini ditentukan nilai C_1 yang akan dijadikan nilai parameter simulasi pada m-file secara *trial* dan *error*. Kriteria nilai C_1 yang sesuai dan akan digunakan adalah C_1 dengan hasil respon perpindahan yang diterima PCB ketika ditinjau secara *root mean square* sama dengan defleksi maksimum yang dapat diterima PCB tersebut ($x_2 rms = x_{max} PCB$) dimana merupakan batas maksimal yang akan dikenakan ketika pengujian PCB agar terdapat *constrain* jelas ketika dilakukan simulasi pada Simulink MATLAB. Adapun, ide pada tugas akhir ini mendefinisikan besar nilai C_1 sebagai nilai *viscous damping* yang ada pada *gap* antara *moving element* yang ditempati oleh *coil* dengan *magnet* yang dapat dilihat pada Gambar 3.8. Sebab saat sistem *electrodynamic shaker* berjalan, *moving element* akan bergerak translasi naik dan turun sedangkan magnet akan diam. Hal tersebut akan menyebabkan *viscous damping* yang tertera pada tinjauan pustaka pada bagian 2.3.

3.2.7 Tahap simulasi pada MATLAB Simulink

Pada tahap simulasi yang pertama ini dilakukan simulasi dengan menggunakan input *sinusoidal* yang bertujuan untuk mencari parameter C_1 yang menghasilkan respon perpindahan yang diterima PCB ketika ditinjau secara *root mean square* sama dengan defleksi maksimum yang dapat diterima PCB tersebut ($x_2 \text{ rms} = x_{max} \text{ PCB}$). Apabila tidak ditemukan hasil respon dinamis dari simulasi berupa $x_2 \text{ rms} = x_{max} \text{ PCB}$ maka tahap penyelesaian tugas akhir ini akan kembali ke tahap 3.2.6 yaitu tahap penentuan nilai C_1 yang akan dijadikan nilai parameter simulasi pada m-file sampai pada akhirnya ditemukan nilai C_1 yang menghasilkan $x_2 \text{ rms} = x_{max} \text{ PCB}$.

3.2.8 Tahap perancangan 3D *electrodynamic shaker* yang sesuai untuk pengujian PCB dan analisa grafik respon dinamis

Pada tahap ini akan dilakukan visualisasi rancangan *electrodynamic shaker* yang sesuai untuk pengujian PCB dalam bentuk 3D yang sesuai dengan nilai k_1 dan C_1 yang telah didapat pada tahap sebelumnya. Selain itu, dilakukan pula analisa grafik respon dinamis dari *electrodynamic shaker* yang telah dirancang.

3.2.9 Tahap simulasi pada MATLAB Simulink dengan input step dan tahap analisa grafik transien respon sistem

Pada tahap ini dilakukan simulasi pada MATLAB Simulink serta analisa grafik ketika diberi input *step*. Hal tersebut bertujuan agar diketahui transien respon dari *electrodynamic shaker* yang telah dirancang.

3.2.10 Tahap simulasi pada MATLAB Simulink dengan variasi input arus listrik (λ) dan tahap analisa grafik respon dinamis

Pada tahap ini dilakukan simulasi pada MATLAB Simulink serta analisa grafik ketika diberikan variasi input arus listrik (λ). Besar nilai perbedaan yang diberikan saat variasi λ yaitu

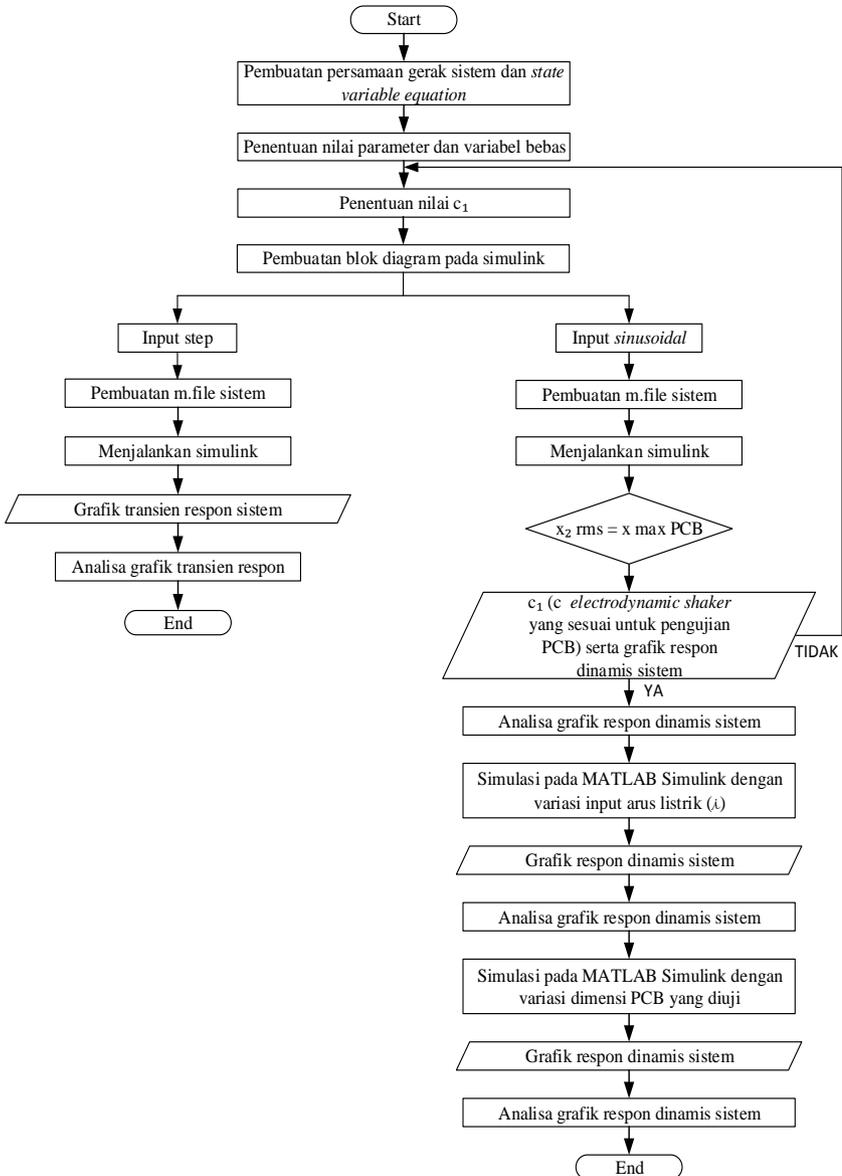
sebesar 1 A kurang dari dan lebih dari apabila dibandingkan dengan nilai λ yang diberikan ke sistem utama. Hal tersebut bertujuan agar diketahui perubahan respon dinamis *electrodynamic shaker* yang telah dirancang ketika diberi input λ yang berbeda.

3.2.11 Tahap simulasi pada MATLAB Simulink dengan variasi dimensi pcb yang diuji dan tahap analisa grafik respon dinamis

Pada tahap ini dilakukan simulasi pada MATLAB Simulink serta analisa grafik ketika diberikan dimensi PCB yang diuji. Hal tersebut bertujuan agar diketahui perubahan respon dinamis *electrodynamic shaker* yang telah dirancang ketika digunakan untuk menguji PCB dengan dimensi yang berbeda.

3.3 Penjabaran tahap simulasi pada MATLAB Simulink

Simulasi yang dilakukan pada MATLAB Simulink untuk penyelesaian tugas akhir ini dilakukan dengan variasi input *sinusoidal* dan *step*. Simulasi pertama yang dilakukan adalah simulasi dengan input *sinusoidal* untuk mencari nilai C_1 yang menghasilkan respon perpindahan yang diterima PCB ketika ditinjau secara *root mean square* sama dengan defleksi maksimum yang dapat diterima PCB tersebut ($x_2 \text{ rms} = x_{\text{max}} \text{ PCB}$). Simulasi kedua yang dilakukan adalah simulasi dengan input *step* untuk melihat respon transien dari *electrodynamic shaker* yang telah dirancang. Selanjutnya, simulasi yang dilakukan adalah simulasi menggunakan input *sinusoidal* dengan variasi λ untuk melihat perubahan respon dinamis *electrodynamic shaker* yang telah dirancang ketika diberi input λ yang berbeda. Simulasi terakhir yaitu simulasi menggunakan input *sinusoidal* dengan variasi PCB yang diuji perubahan respon dinamis *electrodynamic shaker* yang telah dirancang ketika digunakan untuk menguji PCB dengan dimensi yang berbeda. Adapun, diagram alir penjabaran tahap simulasi sistem seperti yang tertera pada Gambar 3.9.



Gambar 3.9 Diagram Alir Penjabaran Tahap Simulasi Sistem

3.4 Parameter Simulasi

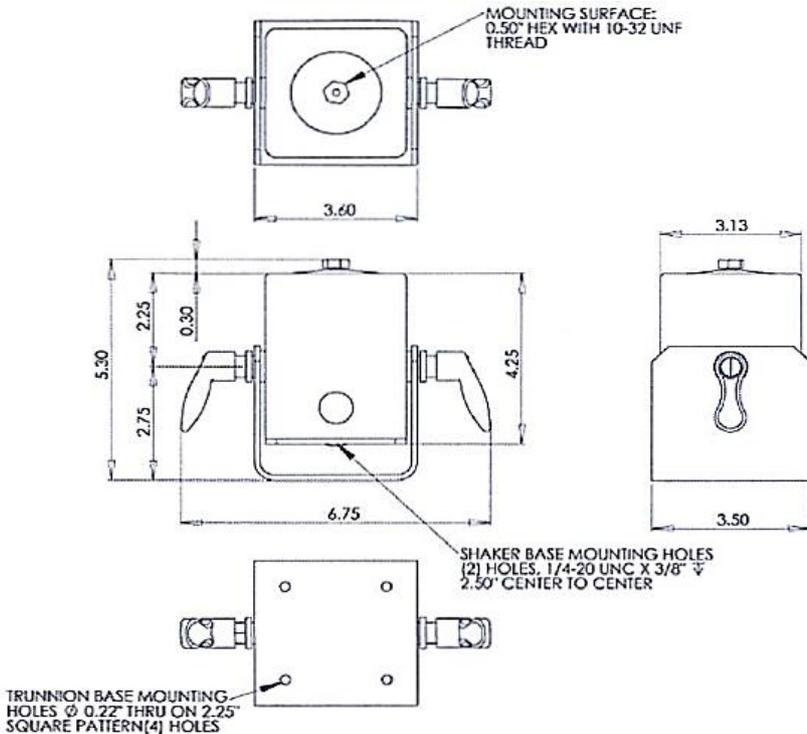
Agar simulasi dapat dijalankan, maka dibutuhkan informasi parameter-parameter yang berhubungan dengan blok diagram yang dibuat pada MATLAB Simulink. Berikut ini adalah parameter yang digunakan pada simulasi tugas akhir ini.

3.4.1 *Electrodynamic shaker*

Nilai parameter *electrodynamic shaker* yang digunakan dalam simulasi pada MATLAB Simulink seperti yang tertera pada Tabel 3.1 berikut ini. Nilai dalam tabel didapat dari katalog referensi [13] atau dapat dilihat pada Bab 2 Tinjauan Pustaka bagian 2.7. Adapun, *Electrodynamic shaker* untuk pengujian PCB yang akan dijadikan referensi dipilih tipe 2007E sebab ketersediaan referensi α (*electromechanical coupling coefficient*) untuk frekuensi dengan *range/cakupan* 1-10 kHz dari paper referensi [14]. Untuk rumus perhitungan α dapat dilihat pada keterangan di persamaan (3.8). Sehingga, dimensi *electrodynamic shaker* yang digunakan untuk referensi mengacu pada gambar teknik dari *electrodynamic shaker* tipe 2007E seperti yang terlihat pada Gambar 3.10.

Tabel 3.1 Parameter *Electrodynamic Shaker*

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Massa	m_1	2.72	kg
Konstanta Pegas (<i>stiffness constant</i>)	k_1	2.63 / 15	N/mm / lbf/in
Kuat Arus Listrik	i	8	A
Hambatan Resistansi	R	0.37	Ω
Tegangan/Beda Potensial	V	2.96	Volt
<i>Electromechanical Coupling Coefficient</i>	α	3.9564	Wb/m
Jumlah Lilitan	N	150	lilit
Kuat Medan Magnet (<i>Flux Density</i>)	β	0.28	Wb/m ² (Tesla)
Radius Lilitan Kawat (<i>Wire Coil</i>)	r	0.015	m



Gambar 3.10 Gambar Teknik *Electrodynamic Shaker Tipe 2007E* [12]

3.4.2 Printed circuit board (PCB)

Nilai parameter PCB yang digunakan dalam simulasi pada MATLAB Simulink seperti yang tertera pada Tabel 3.2 berikut ini. Nilai dalam tabel didapat dari perhitungan yang mengacu pada data yang dapat dilihat pada Bab 2 Tinjauan Pustaka bagian 2.6.2. PCB AM7 digunakan untuk perhitungan pada sistem utama perancangan *electrodynamic shaker* yang akan dirancang pada tugas akhir ini. Sedangkan, PCB AM1 digunakan sebagai PCB yang akan dijadikan variasi dimensi untuk melihat perubahan

respon dinamis *electrodynamic shaker* yang telah dirancang ketika digunakan untuk menguji PCB dengan dimensi yang berbeda, terutama pada panjang dan lebar PCB.

Tabel 3.2 Parameter PCB

Parameter	AM7			AM1		
	Simbol	Nilai	Satuan	Simbol	Nilai	Satuan
Panjang	ℓ	0.186	m	ℓ	0.167	m
Lebar	w	0.167	m	w	0.141	m
Tinggi	t	0.00157	m	t	0.00157	m
Massa Jenis	ρ	2518	kg/m ³	ρ	2474	kg/m ³
Massa	m_2	0.122796	kg	m_2	0.0941	kg
Frekuensi Natural (dari data hasil eksperimen ([10])	f_{n_2}	211.8	Hz	f_{n_2}	275.2	Hz
Frekuensi Natural	ω_{n_2}	1330.104	rad/s	ω_{n_2}	1728.256	rad/s
Konstanta Pegas (<i>Stiffness Constant</i>)	k_2	217247.816	N/m	k_2	27319.0206	N/m
<i>Damping Ratio</i>	ζ_2	9	%	ζ_2	9	%
Konstanta Redaman (<i>Damping Constant</i>)	c_2	29.39966	Ns/m	c_2	28.4519	Ns/m

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

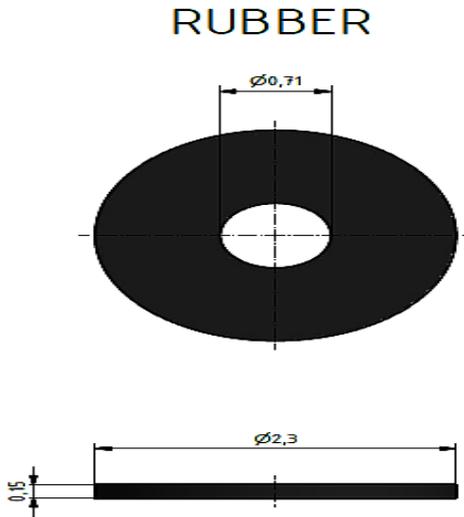
4.1 Perancangan *Electrodynamic Shaker* untuk Pengujian *Printed Circuit Board (PCB)*

Perancangan *electrodynamic shaker* yang digunakan untuk pengujian PCB pada tugas akhir ini didasarkan pada parameter dan karakteristik dinamis PCB serta diutamakan pada fungsi/fenomena dinamis. Sehingga sebelum dilakukan visualisasi rancangan *electrodynamic shaker* dalam bentuk 3D, diperlukan informasi berupa nilai *stiffness constant* dari *electrodynamic shaker* (k_1) dan *damping constant* dari *electrodynamic shaker* (C_1) yang sesuai untuk pengujian PCB dengan spesifikasi tertentu.

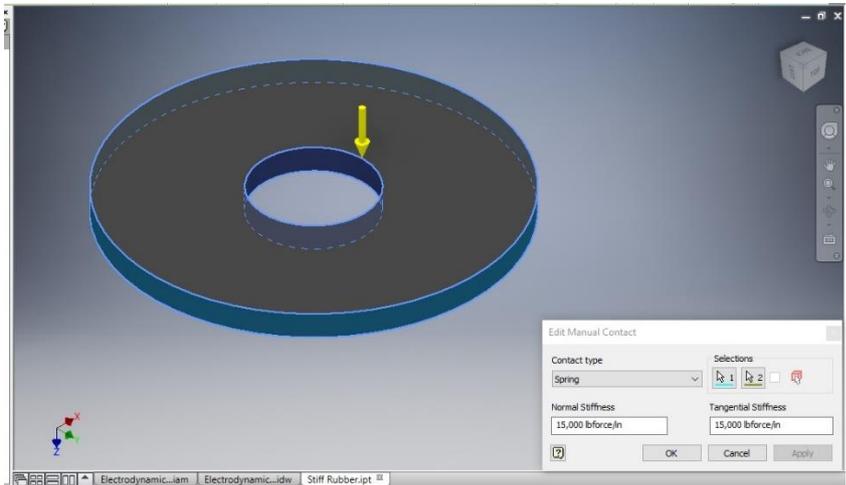
4.1.1 Verifikasi nilai k_1 (konstanta pegas *electrodynamic shaker*)

Pada 3.2.4 telah didefinisikan nilai k_1 yaitu nilai *stiffness constant* yang dimiliki oleh *flexible support*. Adapun menurut sumber [15] *flexible support* atau yang biasanya disebut dengan membran biasa terbuat dari material *rubber*. Verifikasi dilakukan pada *software* Autodesk Inventor. Dimana, langkah verifikasi adalah sebagai berikut. Pertama, dilakukan tahap menggambar dimensi lingkaran *flexible support* dimana ukurannya mengacu pada Gambar 3.10. Kemudian, dilakukan trial and error pada ukuran tebal dari *flexible support* yang pada akhirnya ditentukan tebal sebesar 0.15 in seperti yang dapat dilihat pada Gambar 4.1. Kemudian, ditentukan besaran nilai k seperti acuan dari katalog yang dapat dilihat pada Tabel 2.3 yaitu 15 lbf/in dengan bahan yang digunakan yaitu *rubber*. Langkah ini bisa dilihat pada Gambar 4.2 (a). Selanjutnya, langkah terakhir yaitu dilakukan pemberian beban pada rancangan *flexible support* seperti yang tertera pada Gambar 4.2 (b) untuk mengetahui apakah rancangan tersebut aman atautah tidak. Adapun, pembebanan yang diberikan adalah beban yang diterima *flexible support* secara vertikal yaitu sebesar massa PCB ditambah dengan massa shaker yaitu 2.84 kg

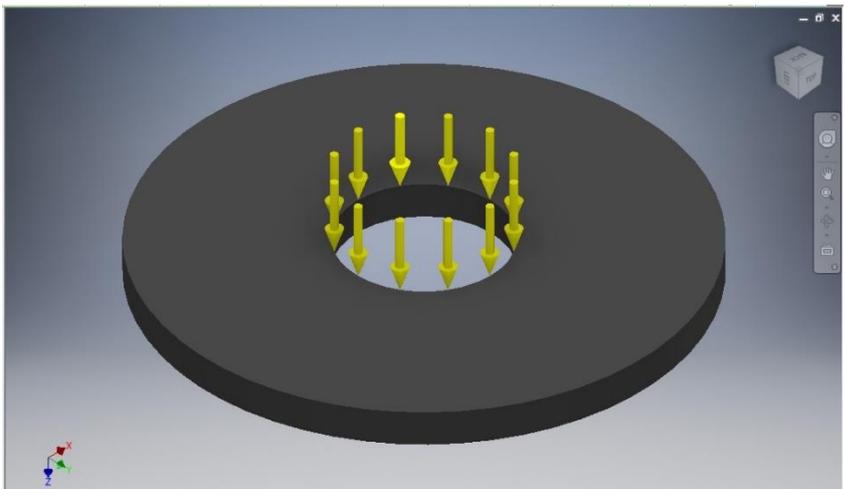
atau sebesar 6.261127832 lb. Hasil yang didapat dari pembebanan dapat dilihat pada Gambar 4.3. Gambar tersebut merupakan nilai *stress* hasil dari pembebanan yang dilakukan pada *flexible support* yang telah dirancang. Sedangkan nilai perpindahan (*displacemet*) arah sumbu X, Y, Z dari rancangan tersebut ketika diberi pembebanan dapat dilihat pada Lampiran. Jadi, dapat disimpulkan bahwa hasil yang didapat adalah rancangan *flexible support* yang dibuat adalah masih aman dengan nilai k_1 yang didapat sebesar 15 lbf/in (2630 N/m), tebal 0.15 in serta bahan yang digunakan adalah *rubber*.



Gambar 4.1 Rancangan Dimensi *Flexible Support*

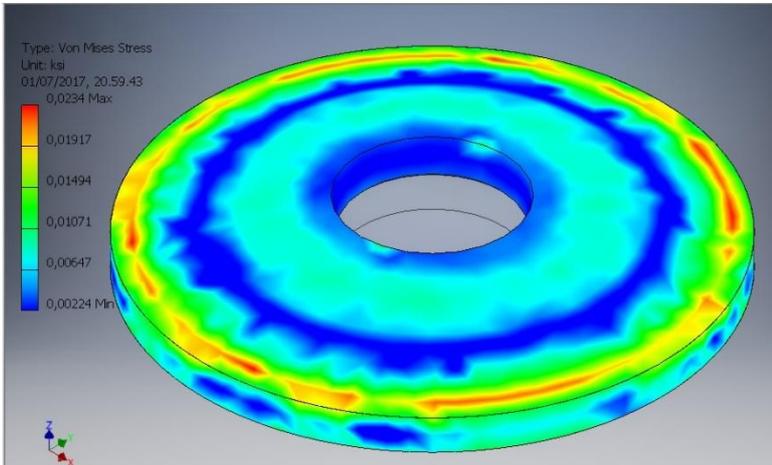


(a)



(b)

Gambar 4.2 (a) Pemberian Nilai *Stiffness* pada *Flexible Support*; (b) Pemberian Beban pada *Flexible Support*



Gambar 4.3 Nilai Stres pada *Flexible Support* Setelah Pembebanan

4.1.2 Simulasi untuk menentukan nilai C_1 (konstanta redaman *electrodynamic shaker*)

Pada 3.2.6 telah didefinisikan nilai C_1 yaitu nilai *viscous damping* yang ada pada *gap* antara *moving element* yang ditempati oleh *coil* dengan *magnet*. Simulasi pada Simulink MATLAB untuk mencari besar nilai C_1 ini diharapkan akan ditemukan besar nilai C_1 yang menghasilkan respon perpindahan yang diterima PCB tidak melebihi defleksi maksimum ketika ditinjau secara *root mean square* yang dapat diterima PCB tersebut ($x_2 \text{ rms} = x_{\text{max}} \text{ PCB}$). Adapun besar nilai $x_{\text{max}} \text{ PCB}$ yang menjadi acuan besar $x_2 \text{ rms}$ dimana nilai tersebut menandakan simulasi telah menemukan hasil C_1 didapat dari perhitungan menurut Persamaan 2.6. Persamaan tersebut digunakan untuk mencari nilai defleksi maksimum *fixed-fixed beam* yang diberi gaya tepat pada tengah. Jadi, dalam hal ini PCB dianggap sebagai massa batang yang memiliki panjang dan luasan yang mendapat gaya tepat pada tengah PCB yaitu berupa gaya berat PCB. Dengan parameter PCB yang tertera pada Tabel 3.2, sehingga, didapat nilai $x_{\text{max}} \text{ PCB}$ sebesar $3.430 \times 10^{-5} \text{ m}$ (0.000034 m). Adapun, perhitungan

x_{max} PCB yang akan disesuaikan tersebut dapat dilihat pada Lampiran.

4.1.2.1 Blok diagram

Berikut ini adalah gambar rincian blok diagram simulasi untuk mendapatkan nilai C_1 yang dapat dilihat pada Gambar 4.4. Dimana pada blok diagram tersebut input yang diberikan ke sistem adalah *input sinusoidal* yang merepresentasikan arus bolak-balik (AC) yang diinputkan ke sistem. Input yang diberikan sebesar persamaan (4.1)

$$Y(t) = \text{Amp} * \text{Waveform}(\text{Freq}, t) \quad (4.1)$$

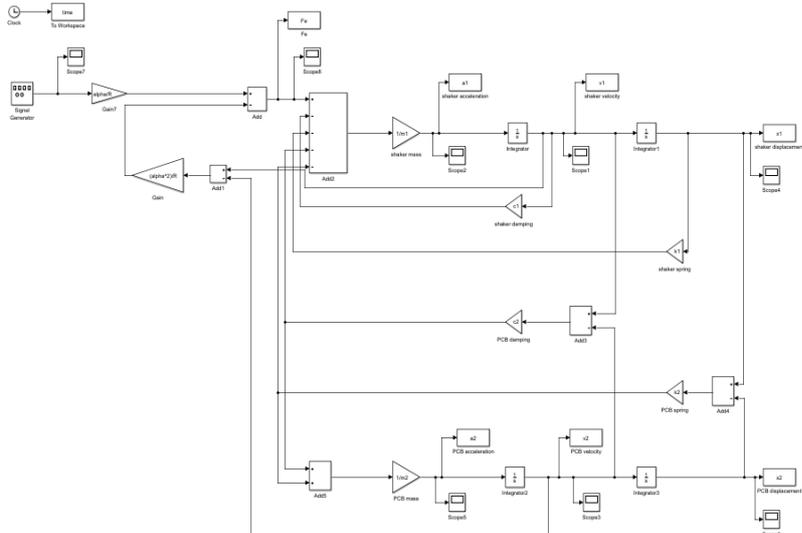
Dimana:

Amp : Amplitudo = Besar beda potensial input / *electrodynamic shaker* sebesar 2.96 Volt

Freq : Frekuensi = Besar frekuensi input / *electrodynamic shaker* sebesar 50 Hz

Wave form = sine

Time (t) = Use Simulation Time



Gambar 4.4 Blok Diagram Simulasi dengan Input Sinusoidal

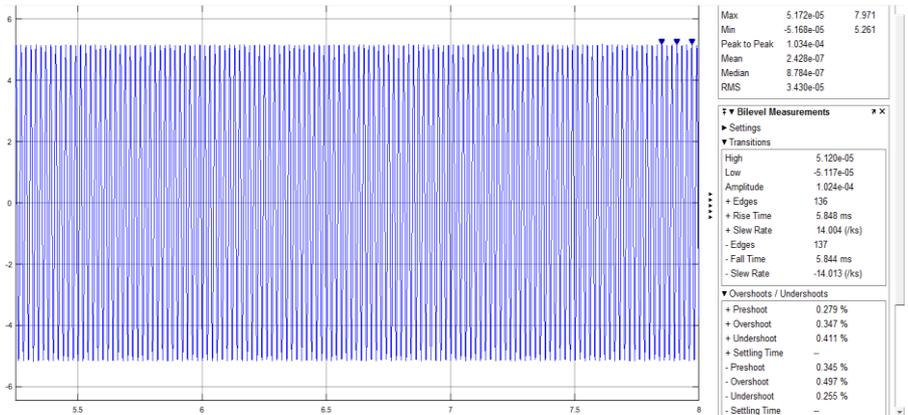
4.1.2.2 Hasil nilai C_1 dari simulasi pada MATLAB Simulink

Hasil yang didapat dari simulasi dengan blok diagram dan input yang telah dijelaskan pada bagian 4.1.2.1 adalah seperti yang dipaparkan pada Tabel 4.1 berikut ini:

Tabel 4.1 Hasil Nilai C_1 dari Simulasi pada MATLAB SIMULINK

Nilai C_1 (Ns/m)	x_2 rms (m)
1890	0.00003401
1870	0.00003429
1869.5	0.0000343
1868.9	0.00003431
1868.5	0.00003431
1868	0.00003432
1867	0.00003433
1865	0.00003436
1850	0.00003459
1800	0.00003539

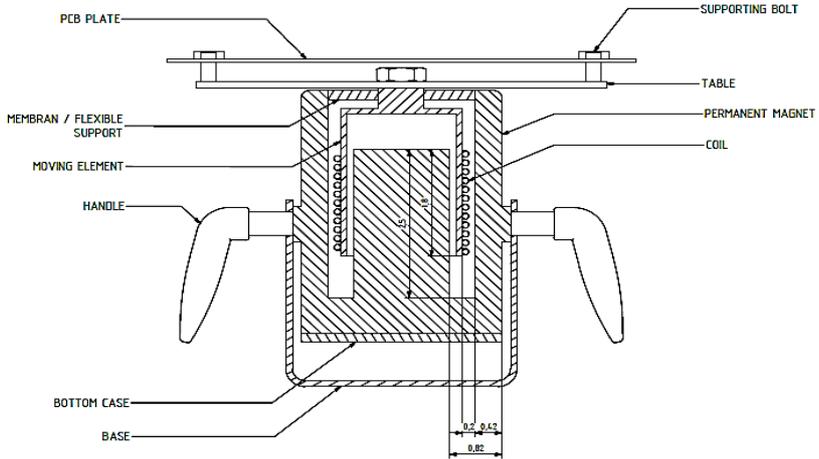
Dapat dilihat bahwa nilai C_1 dari simulasi yang memenuhi nilai menghasilkan respon perpindahan yang diterima PCB ketika ditinjau secara *root mean square* sama dengan defleksi maksimum yang dapat diterima PCB (x_2 rms = x_{max} PCB) adalah 1869.5 Ns/m. Maka besar C_1 yang sesuai menurut simulasi pada MATLAB Simulink adalah 1869.5 Ns/m. Adapun respon dinamis x_2 rms dapat dilihat pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Respon Dinamis x_2 rms

4.1.2.3 Analisa visualisasi C_1 dalam bentuk 3D

Setelah didapatkan nilai C_1 sebesar 1869.5 Ns/m, maka dapat ditentukan besar *gap* antara *moving element* yang ditempati oleh *coil* dengan *magnet* dari nilai tersebut. Adapun, perhitungan menggunakan Persamaan (2.11). Dari perhitungan Persamaan (2.11) didapatkan besar *gap* antara *moving element* yang ditempati oleh *coil* dengan *magnet* (h) sebesar 1.236×10^{-10} m. Adapun, perhitungan tersebut dapat dilihat pada lampiran. Nilai tersebut apabila dimodelkan secara fisik sebagai *gap* antara *moving element* akan tidak *manufacturable*. Maka, dengan memperhatikan faktor manufaktur nantinya serta faktor estetika, besar *gap* tersebut didesain dengan $h = 0.2$ in. Hasil rancangan dimensi *electrodynamic shaker* tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.6. Dimana, dimensi pada gambar tersebut dalam satuan in. Dengan besar $h = 0.2$ in, maka besar nilai C pada *gap* menjadi sangat kecil. Perhitungan C baru dengan $h = 0.2$ in bisa dilihat pada lampiran. Jadi, dapat ditarik kesimpulan bahwa besar nilai C_1 tersebut adalah besar nilai C keseluruhan dari sistem *electrodynamic shaker*. Nilai C sistem *electrodynamic shaker* tidak hanya diakibatkan oleh nilai *viscous damping* yang ada pada *gap* antara *moving element* yang ditempati oleh *coil* dengan *magnet*. Namun, ada pengaruh juga dari redaman yang lain, berupa *dissipated energy* dari *electrical system* maupun *mechanical system*.



Gambar 4.6 Hasil Rancangan Dimensi *Electrodynamic Shaker*

4.1.3 Frekuensi natural sistem (*electrodynamic shaker* untuk pengujian PCB)

Analisa matematis dilakukan untuk mendapatkan nilai frekuensi natural pada sistem *electrodynamic shaker* yang dirancang. Diharapkan akan didapat besar frekuensi natural yang tidak sama dengan frekuensi operasi *electrodynamic shaker* yaitu 50 Hz.

$$\begin{bmatrix} M_1 & 0 \\ 0 & M_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_1 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1 + C_2 & -C_2 \\ -C_2 & -C_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_2 \\ \dot{x}_1 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_1 + K_2 & -K_2 \\ -K_2 & K_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_2 \\ x_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Fe \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Dalam perhitungan nilai frekuensi natural, digunakan beberapa asumsi, yaitu nilai redaman beserta gaya eksitasi diabaikan. Dimana parameter yang digunakan dalam simulasi dapat dilihat pada Tabel 3.1. dan Tabel 3.2 Untuk nilai \ddot{x} diubah dengan mensubstitusikan $\ddot{x} = -\lambda x$ dan $\lambda = \omega^2$, sehingga persamaan di atas menjadi :

$$-\omega^2 \begin{bmatrix} M_1 & 0 \\ 0 & M_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_2 \\ x_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} -M_1\omega^2 + k_2 + k_1 & -k_2 \\ -k_2 & -M_2\omega^2 + k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_2 \\ X_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Karena $\lambda = \omega^2$, maka :

$$\det \begin{bmatrix} -M_1\lambda + k_2 + k_1 & -k_2 \\ -k_2 & -M_2\lambda + k_2 \end{bmatrix} = 0$$

$$[(-M_1\lambda + k_2 + k_1)(-M_2\lambda + k_2)] - [(-k_2)(-k_2)] = 0$$

$$(M_1M_2)\lambda^2 - (k_1M_1 + k_1M_2 + k_2M_2)\lambda + k_1k_2 = 0$$

Dengan memasukkan nilai parameter yang ada pada Tabel 3.1 dan Tabel 3.2 sehingga menjadi:

$$(0.334)\lambda^2 - (617914.1758)\lambda + 571361756.1 = 0$$

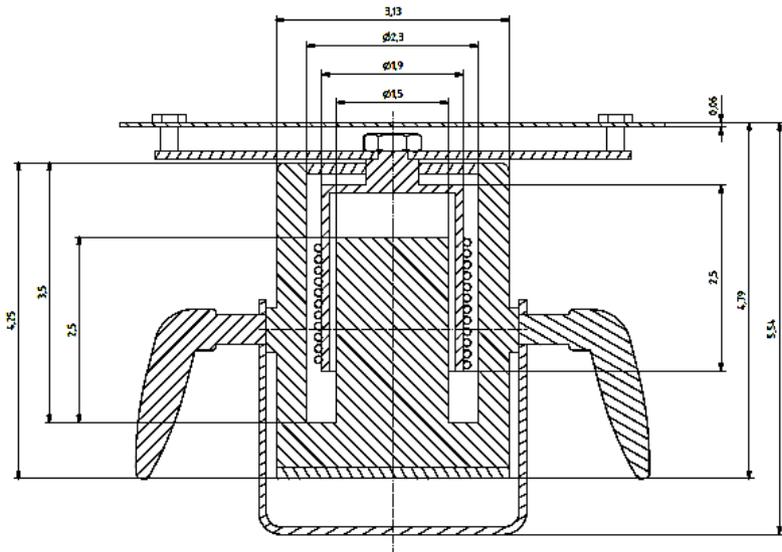
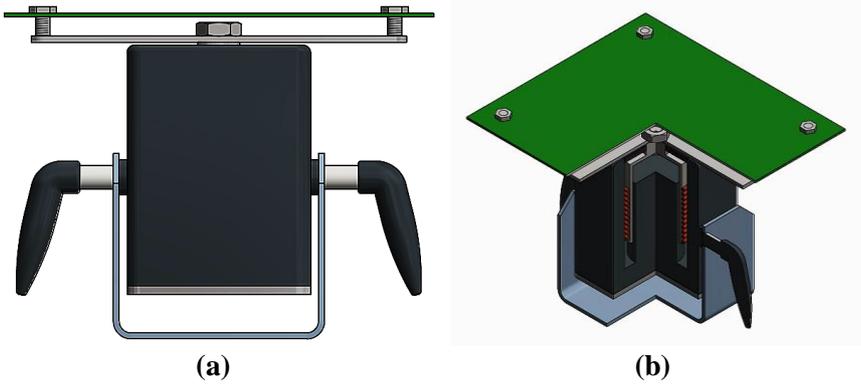
Sehingga didapatkan nilai λ_1, λ_2 dan frekuensi natural adalah :

$$\lambda_1 = 1849117.318 \rightarrow \omega_{n1} = 1359.822532 \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 216.5322503 \text{ Hz}$$

$$\lambda_2 = 925.1246115 \rightarrow \omega_{n2} = 30.41586118 \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 4.843289997 \text{ Hz}$$

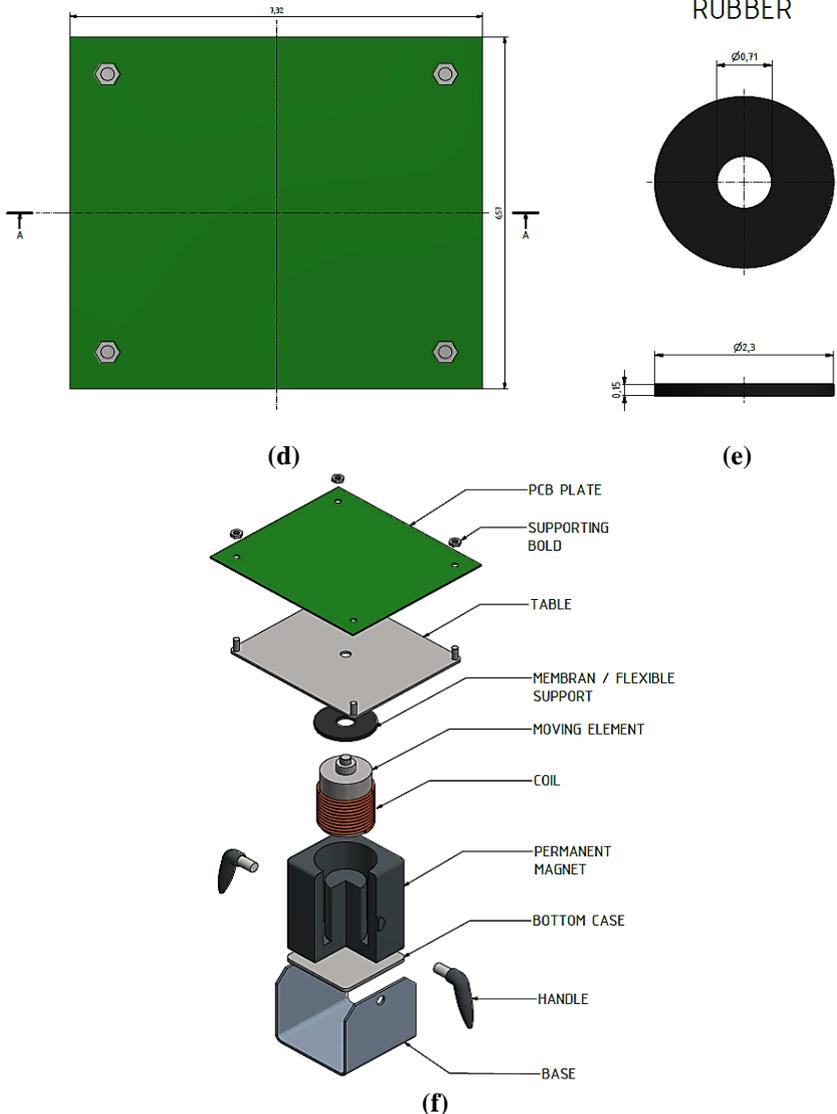
Menurut hasil frekuensi natural yang telah didapat dari perhitungan, maka dapat disimpulkan bahwa frekuensi operasi sebesar 50 Hz adalah aman sebab berada diantara dua frekuensi natural sistem *electrodynamic shaker* yang telah dirancang. Adapun frekuensi 50 Hz merepresentasikan frekuensi arus listrik yang akan masuk ke sistem berdasarkan besar frekuensi listrik yang biasanya diproduksi di Indonesia.

4.1.4 Hasil rancangan *electrodynamic shaker* untuk pengujian PCB



A-A (1:1)

(c)



Gambar 4.7 (a) Tampak Samping; (b) Potongan; (c) 2D Beserta Dimensi; (d) Benda Uji (PCB); (e) *Flexible Support*; (f) Keterangan Bagian Penyusun dari Rancangan *Electrodynamic Shaker* untuk Pengujian PCB

Gambar diatas menunjukkan gambar keseluruhan hasil rancangan *electrodynamic shaker* yang digunakan untuk pengujian PCB. Gambar 4.7 menunjukkan (a) Gambar tampak samping; (b) Gambar potongan; (c) Gambar 2D beserta dimensi; (d) Dimensi benda uji (PCB); (e) Dimensi *flexible support*; dan (f) Keterangan bagian-bagian penyusun dari rancangan *electrodynamic shaker* untuk pengujian PCB.

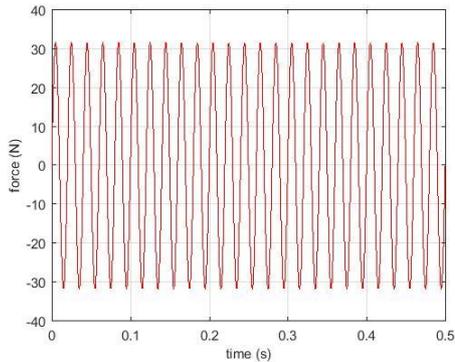
4.1.5 Blok diagram variasi

Simulasi yang dilakukan pada MATLAB Simulink untuk penyelesaian tugas akhir ini dilakukan dengan variasi input *sinusoidal* dan *step*. Simulasi pertama yang dilakukan adalah simulasi dengan input *sinusoidal* untuk mencari nilai C_1 yang menghasilkan respon perpindahan yang diterima PCB ketika ditinjau secara *root mean square* sama dengan defleksi maksimum yang dapat diterima PCB tersebut ($x_2 \text{ rms} = x_{\text{max}} \text{ PCB}$). Simulasi kedua yang dilakukan adalah simulasi dengan input *step* untuk melihat respon transien dari *electrodynamic shaker* yang telah dirancang. Selanjutnya, simulasi yang dilakukan adalah simulasi menggunakan input *sinusoidal* dengan variasi i untuk melihat perubahan respon dinamis *electrodynamic shaker* yang telah dirancang ketika diberi input i yang berbeda. Simulasi terakhir yaitu simulasi menggunakan input *sinusoidal* dengan variasi PCB yang diuji perubahan respon dinamis *electrodynamic shaker* yang telah dirancang ketika digunakan untuk menguji PCB dengan dimensi yang berbeda.

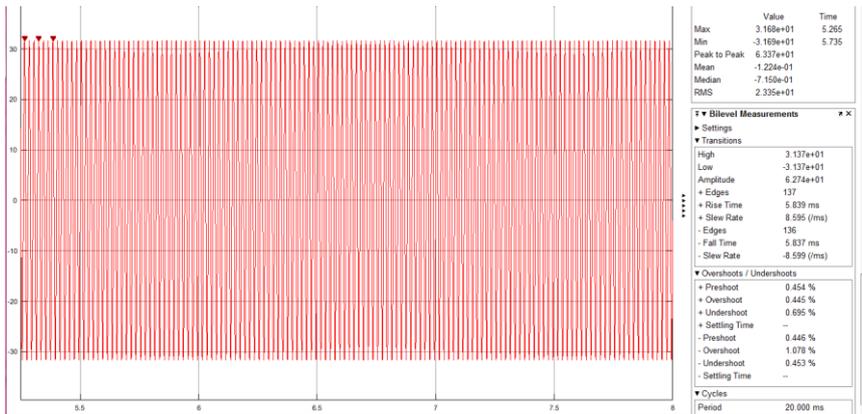
Blok diagram simulasi dengan input *sinusoidal* ditunjukkan oleh Gambar 4.4. Sedangkan, blok diagram simulasi dengan input *step* ditunjukkan oleh Gambar 4.8 di bawah ini.

4.2.1 Analisa respon dinamis hasil rancangan *electrodynamic shaker* untuk pengujian PCB

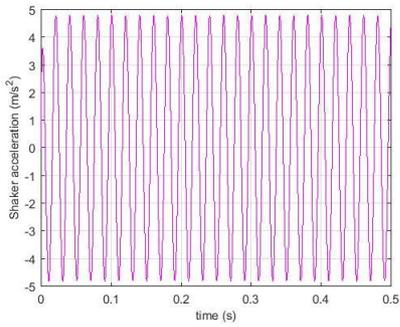
Di bawah ini merupakan analisa respon dinamis dimana input simulasi yang digunakan adalah input *sinusoidal* dengan amplitudo 2.96 dan frekuensi 50 Hz seperti yang telah dipaparkan pada 4.1.2.1.



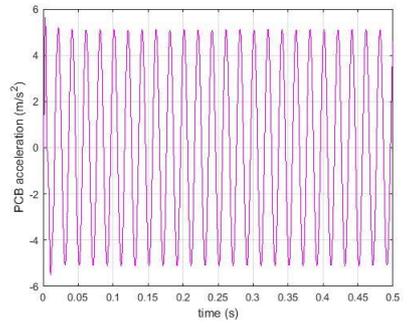
(a)



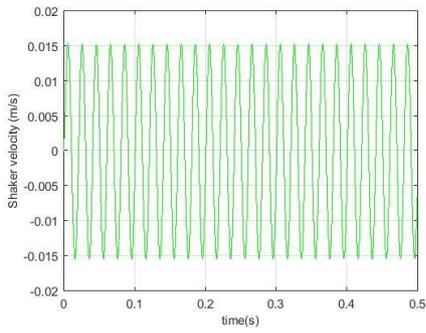
(b)



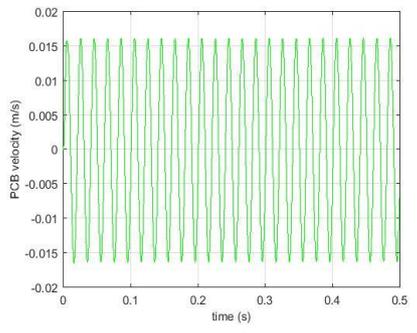
(c)



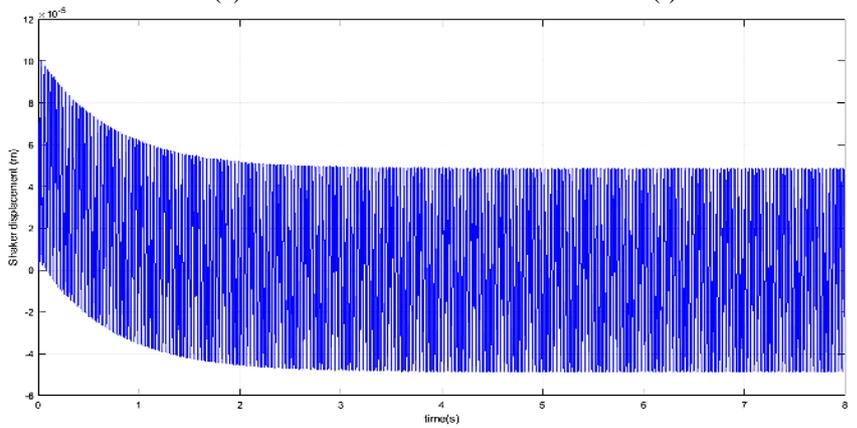
(d)



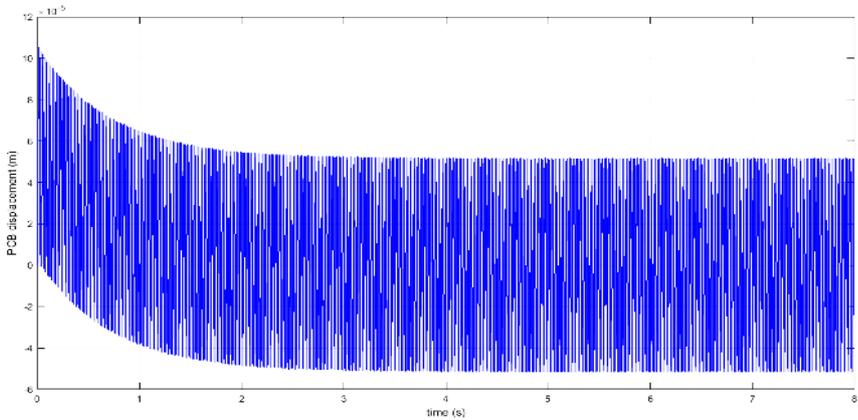
(e)



(f)



(g)



(h)

Gambar 4.9 Grafik Respon (a) Gaya Eksitasi; (b) rms Gaya Eksitasi; (c) Percepatan *Electrodynamic Shaker*; (d) Percepatan PCB; (e) Kecepatan *Electrodynamic Shaker*; (f) Kecepatan PCB; (g) Perpindahan *Electrodynamic Shaker*; (h) Perpindahan PCB Dengan Input *Sinusoidal*

Tabel 4.2 rms Respon Dinamis Hasil *Input Sinusoidal*

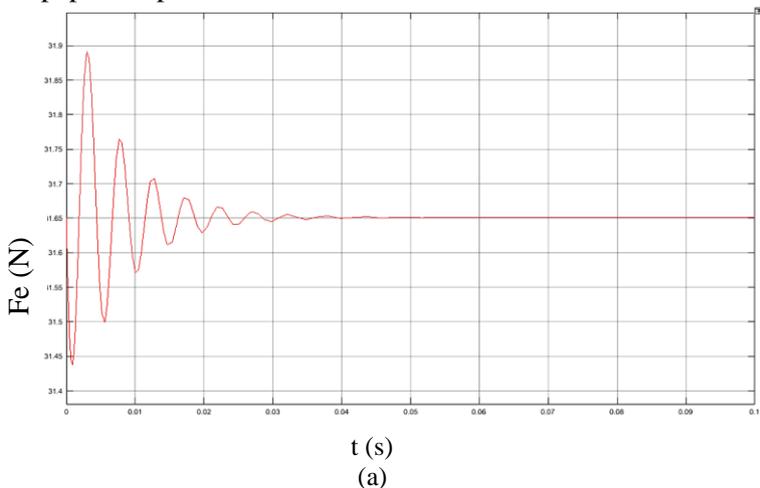
Respon Dinamis	rms	Satuan
F_e	23.35	N
a_1	3.194	m/s^2
v_1	0.01147	m/s
x_1	0.00003238	m
a_2	3.393	m/s^2
v_2	0.01215	m/s
x_2	0.0000343	m

Dari Gambar 4.9 dapat dilihat grafik respon dinamis dari simulasi dengan input *sinusoidal* yang meliputi (a) gaya eksitasi; (b) rms gaya eksitasi; (c) percepatan *electrodynamic shaker*; (d) percepatan PCB; (e) kecepatan *electrodynamic shaker*; (f) kecepatan PCB; (g) percepatan *electrodynamic shaker*; (h) perpindahan PCB. Kemudian, nilai rms setiap respon dinamis dapat dilihat pada Tabel 4.1.

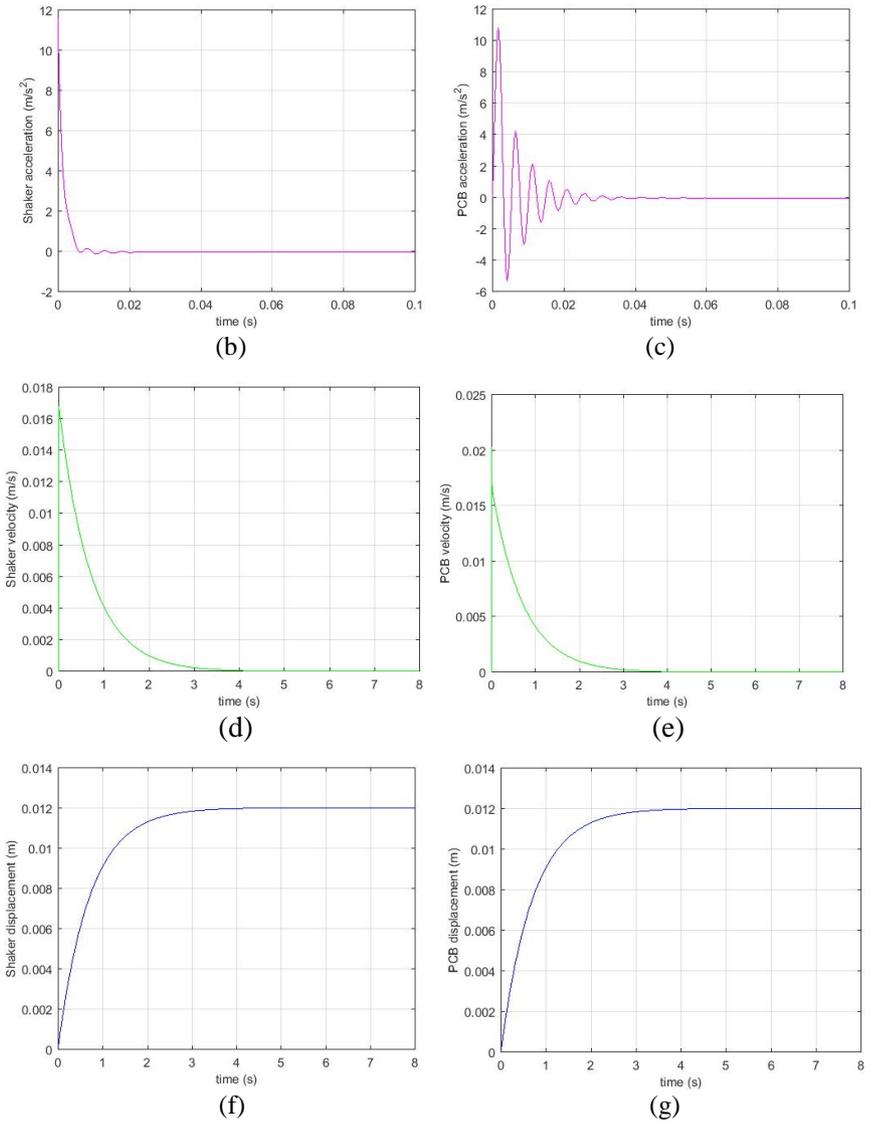
Dapat dilihat pada Gambar 4.9 (a) dan (b) bahwa besar nilai *peak* dan rms dari F_e mempunyai kemiripan dengan besar gaya yang dihasilkan oleh *electrodynamic shaker* acuan dari katalog tercantum pada Tabel 2.3 yaitu dengan besar *peak* 31.37 N serta rms 23.35 N. Selanjutnya, dapat dilihat pada Gambar 4.9 tersebut bahwa besar respon dinamis yang dihasilkan oleh *electrodynamic shaker* lebih kecil apabila dibandingkan dengan respon dinamis yang dihasilkan oleh PCB. Terlihat bahwa respon percepatan dan kecepatan pada kedua massa (PCB dan *electrodynamic shaker*) membutuhkan waktu yang sedikit bahkan kurang dari 0.1 s untuk mencapai kondisi *steady*. Namun, pada respon perpindahan di kedua massa membutuhkan waktu yang lebih lama untuk mencapai kondisi *steady* yaitu sekitar 3.1 s. Dari grafik di atas dapat dianalisa besar gaya yang mengenai *electrodynamic shaker* dan PCB sebesar 8.68768 N dan 0.41665 N dari konsep $F=m.a$.

4.2.2 Analisa respon transien hasil rancangan *electrodynamic shaker* untuk pengujian PCB

Di bawah ini merupakan analisa respon dinamis dimana input simulasi yang digunakan adalah input *step* dengan input *final value* sebesar 2.96 dan frekuensi 50 Hz seperti yang telah dipaparkan pada 4.1.4.



(a)



Gambar 4.10 Grafik Respon (a) Gaya Eksitasi; (b) Percepatan *Electrodynamic Shaker*; (c) Percepatan PCB; (d) Kecepatan *Electrodynamic*

Shaker; (e) Kecepatan PCB; (f) Perpindahan *Electrodynamic Shaker*; (g) Perpindahan PCB Dengan Input *Step*

Tabel 4.3 Respon Dinamis Hasil Input *Step*

Respon Dinamis	max	Satuan	Settling Time (s)	%Overshoot
Fe	31.89	N	0.021	250.08
a_1	11.64	m/s ²	0.021	3.606
v_1	0.01684	m/s	4.1	1.787
x_1	0.01023	m	4.2	0.502
a_2	10.82	m/s ²	0.059	6.679
v_2	0.0203	m/s	3.9	1.73
x_2	0.01023	m	4.2	0.502

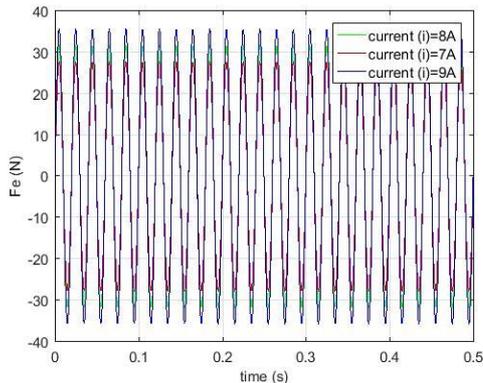
Dari Gambar 4.10 dapat dilihat grafik respon dinamis dari simulasi dengan input *step* yang meliputi (a) gaya eksitasi; (b) percepatan *electrodynamic shaker*; (c) percepatan PCB; (d) kecepatan *electrodynamic shaker*; (e) kecepatan PCB; (f) percepatan *electrodynamic shaker*; (g) perpindahan PCB. Kemudian, nilai maksimum, *settling time*, serta %*overshoot* setiap respon dinamis dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Gambar diatas merupakan transien respon dari *electrodynamic shaker* yang telah dirancang. Dapat dilihat bahwa yang mempunyai %*overshoot* tertinggi adalah Fe, sebab Fe mempunyai bentuk respon transien yang sinus/berosilasi sebelum dia stabil di titik 0. Nilai %*overshoot* yang tinggi tersebut tidak masalah sebab Fe merupakan gaya eksitasi yang menjadi input *electrodynamic shaker*. Kemudian, untuk respon selain Fe mempunyai nilai *overshoot* yang hampir 0 sebab untuk mencapai stabil tidak diperlukan osilasi. Hal tersebut disebabkan nilai redaman yang tinggi pada sistem. Selanjutnya, nilai *settling time* pada Fe dan percepatan pada kedua massa (PCB dan *electrodynamic shaker*) sangat kecil bahkan bernilai hampir 0. Namun, pada kecepatan dan perpindahan di kedua massa mempunyai nilai *settling time* rata-rata sebesar 4s. Kemudian, dapat dilihat nilai rms, *settling time*, serta %*overshoot* pada respon

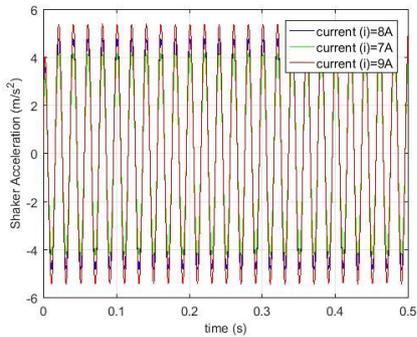
perpindahan *electrodynamic shaker* dan PCB mempunyai besar yang sama.

4.2.3 Analisa respon dinamis sistem dengan variasi λ (kuat arus listrik)

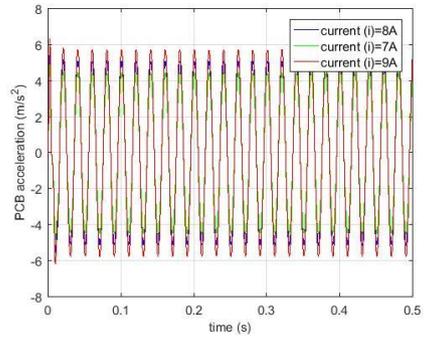
Di bawah ini merupakan analisa respon dinamis dimana input serta nilai parameter pada Tabel 3.1. simulasi yang digunakan adalah input *sinusoidal* seperti yang telah dipaparkan pada penjelasan sebelumnya. Namun, dalam simulasi ini dilakukan variasi nilai λ . Besar nilai perbedaan yang diberikan saat variasi λ yaitu sebesar 1A kurang dari dan lebih dari apabila dibandingkan dengan nilai λ yang diberikan ke sistem utama. Besar nilai λ yang akan diinputkan ke sistem adalah sebesar 7A, 8A, serta 9A. Sehingga hal tersebut merubah nilai amplitudo yang diberikan ke input *sinusoidal* menjadi 2.59, 2.96, dan 3.33. Nilai tersebut didapat dari besar nilai beda potensial yang merepresentasikan nilai amplitudo yang diinputkan ke sistem didapat dari persamaan $V = \lambda \cdot R$ menurut variasi λ tersebut



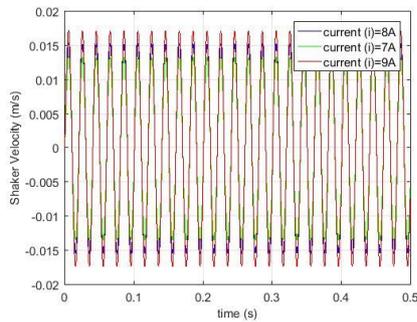
(a)



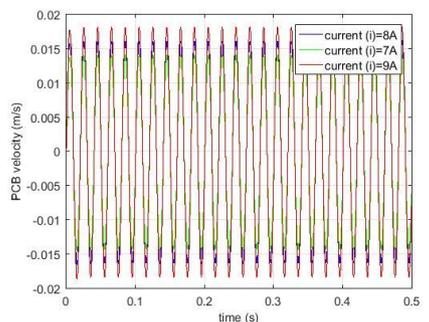
(b)



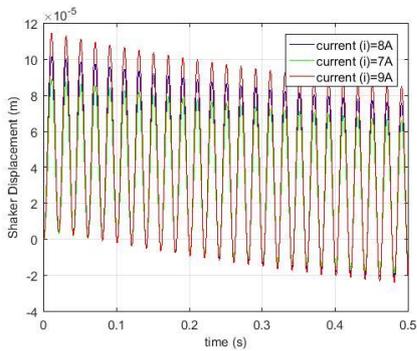
(c)



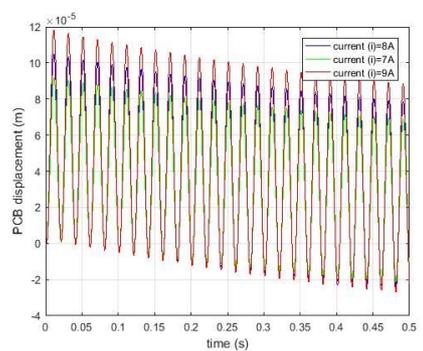
(d)



(e)



(f)



(g)

Gambar 4.11 Grafik Respon (a) Gaya Eksitasi; (b) Percepatan *Electrodynamic Shaker*; (c) Percepatan PCB; (d) Kecepatan

***Electrodynamic Shaker*; (e) Kecepatan PCB; (f) Perpindahan
Electrodynamic Shaker; (g) Perpindahan PCB Dengan Input
Sinusoidal dan variasi λ**

Tabel 4.4 Respon Dinamis Hasil Input Sinusoidal dan Variasi λ

Respon Dinamis rms (m)	Arus Listrik (λ) A			Satuan	% Perubahan	
	7	8	9		$\lambda = 7A$	$\lambda = 9A$
Fe	20.43	23.35	26.26	N	-12.505	12.463
a_1	2.795	3.194	3.593	m/s ²	-12.492	12.492
v_1	0.01004	0.01147	0.01291	m/s	-12.467	12.554
x_f	0.00002834	0.00003238	0.00003643	m	-12.477	12.508
a_2	2.969	3.393	3.818	m/s ²	-12.496	12.526
v_2	0.01063	0.01215	0.01367	m/s	-12.51	12.51
x_2	0.00003001	0.0000343	0.00003859	m	-12.507	12.507

Dari Gambar 4.11 dapat dilihat grafik respon dinamis dari simulasi dengan input *sinusoidal* dan variasi λ yang meliputi (a) gaya eksitasi; (b) percepatan *electrodynamic shaker*; (c) percepatan PCB; (d) kecepatan *electrodynamic shaker*; (e) kecepatan PCB; (f) percepatan

electrodynamic shaker; (g) perpindahan. Nilai rms setiap respon dinamis pada tiap variasi nilai λ serta % perubahan ketika terjadi kenaikan dan penurunan nilai λ dapat dilihat pada Tabel 4.3. Adapun, untuk lebih jelasnya grafik nilai rms setiap respon dinamis terhadap variasi λ dapat dilihat pada Lampiran.

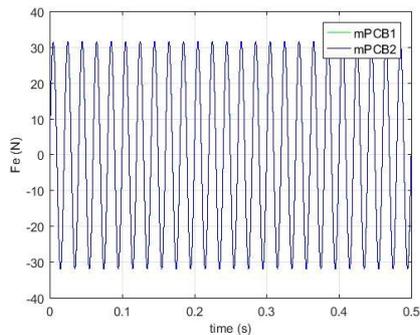
Pada Gambar 4.11 terlihat grafik warna hijau menunjukkan besar respon dinamis ketika diberi input nilai λ sebesar 7A, warna biru menunjukkan besar respon dinamis ketika diberi input nilai λ sebesar 8A, serta warna merah menunjukkan besar respon dinamis ketika diberi input nilai λ sebesar 9A. Kemudian apabila dianalisa, Gambar 4.11 menunjukkan *trendline* bahwa semakin besar nilai λ yang diinputkan ke sistem maka semakin besar pula gaya eksitasi yang dihasilkan sistem serta respon dinamis yang diterima sistem dan sebaliknya. Hal ini sesuai dengan persamaan (2.19) yaitu $f_e = \alpha i$. Sehingga ketika input yang diberikan ke sistem semakin besar

maka akan membuat sistem tersebut mempunyai nilai respon dinamis yang semakin besar.

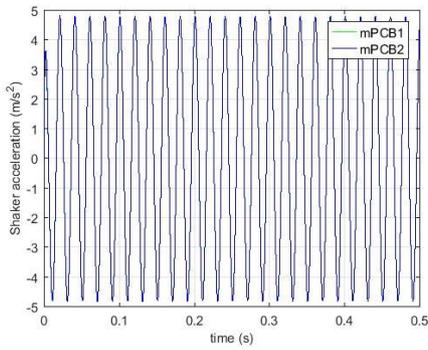
Pada Tabel 4.3 terdapat nilai presentase perubahan ketika terjadi kenaikan dan penurunan nilai λ . Presentase perubahan yang terjadi ketika terjadi kenaikan dan penurunan nilai λ pada setiap respon dinamis mempunyai nilai yang hampir sama yaitu sekitar 12.5 %.

4.2.4 Analisa respon dinamis sistem dengan variasi dimensi PCB

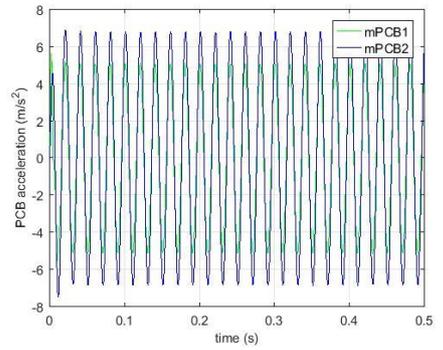
Di bawah ini merupakan analisa respon dinamis dimana input simulasi yang digunakan adalah input *sinusoidal* seperti yang telah dipaparkan pada penjelasan sebelumnya. Namun, dalam simulasi ini dilakukan variasi nilai dimensi pada PCB terutama pada panjang dan lebar. Adapun, PCB yang akan dijadikan variasi dimensi untuk melihat perubahan respon dinamis *electrodynamic shaker* yang telah dirancang adalah PCB AM1. Parameter PCB AM1 dapat dilihat pada Tabel 3.2. Dari Tabel 3.2 terlihat bahwa akibat dari variasi yang tersebut, nilai massa (m), *stiffness coefficient* (k), serta *damping constant* (C) menjadi berbeda dengan PCB awal. Dimana m dan C pada PCB2 (AM1) adalah lebih kecil apabila dibandingkan dengan PCB1 (AM7). Selanjutnya, nilai *stiffness coefficient* (k) pada PCB2 bernilai lebih besar dibandingkan dengan PCB1.



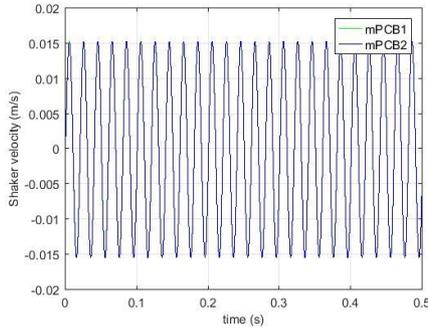
(a)



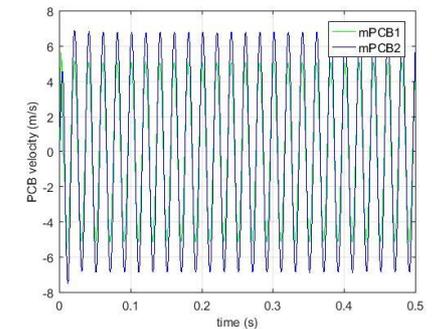
(b)



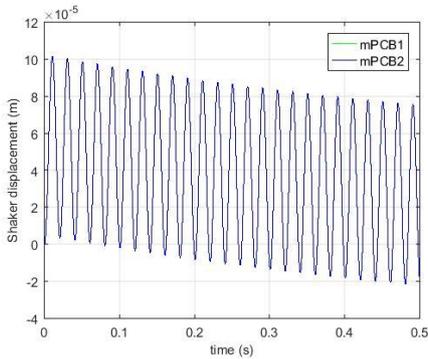
(c)



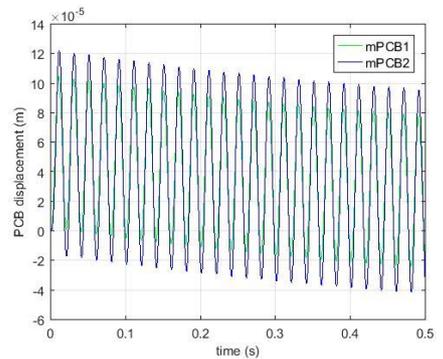
(d)



(e)



(f)



(g)

Gambar 4.12 Grafik Respon (a) Gaya Eksitasi; (b) Percepatan *Electrodynamic Shaker*; (c) Percepatan PCB; (d) Kecepatan *Electrodynamic*

Shaker; (e) Kecepatan PCB; (f) Perpindahan *Electrodynamic Shaker*; (g) Perpindahan PCB dengan Input Sinusoidal dan Variasi Dimensi PCB

Tabel 4.5 Respon Dinamis Hasil Input *Sinusoidal* dan Variasi Dimensi PCB

Respon Dinamis rms (m)	PCB 1	PCB 2	Satuan	% Perubahan
Fe	23.35	23.25	N	0
a_1	3.194	3.194	m/s^2	0
v_1	0.01147	0.01147	m/s	0
x_1	0.00003238	0.00003238	m	0
a_2	3.393	4.753	m/s^2	40.08252284
v_2	0.01215	0.01551	m/s	27.65432099
x_2	0.0000343	0.00004816	m	40.40816327

Dari Gambar 4.12 dapat dilihat grafik respon dinamis dari simulasi dengan input *sinusoidal* dan variasi Dimensi PCB yang meliputi (a) gaya eksitasi; (b) percepatan *electrodynamic shaker*; (c) percepatan PCB; (d) kecepatan *electrodynamic shaker*; (e) kecepatan PCB; (f) percepatan *electrodynamic shaker*; (g) perpindahan PCB. Nilai rms setiap respon dinamis pada tiap variasi dimensi PCB serta % perubahan ketika diberi variasi simulasi berupa dimensi PCB dapat dilihat pada Tabel 4.5. Kemudian, untuk lebih jelasnya grafik nilai rms setiap respon dinamis terhadap variasi dimensi PCB dapat dilihat pada Lampiran.

Pada Gambar 4.12 dan Tabel 4.5 dapat dianalisa bahwa nilai input Fe yang dihasilkan sistem sampai ke respon yang diterima oleh *electrodynamic shaker* adalah sama. Hal tersebut mempunyai arti bahwa adanya pergantian m, k, dan C yang dimiliki PCB ternyata tidak mengganti besar gaya eksitasi yang dihasilkan oleh *electrodynamic shaker* sampai ke respon dinamis yang dimiliki oleh *electrodynamic shaker*. Selanjutnya, dapat dianalisa bahwa respon dinamis yang dimiliki oleh PCB pada PCB2 (AM1) lebih besar apabila dibandingkan dengan PCB1 (AM7). Hal tersebut berarti, ketika variasi yang dilakukan pada PCB mengganti besar nilai m dan C yang dimiliki menjadi lebih kecil serta nilai k

menjadi lebih besar dapat mengakibatkan kenaikan besar respon dinamis yang diterima oleh PCB tersebut.

Konsep awal yang telah dibuat pada awal proses perancangan bahwa *electrodynamic shaker* dirancang untuk PCB dengan spesifikasi tertentu digunakan untuk uji kelelahan PCB. Rancangan *electrodynamic shaker* yang akan dibuat menyesuaikan agar respon perpindahan yang diterima PCB ketika ditinjau secara *root mean square* kurang dari atau sama dengan defleksi maksimum yang dapat diterima PCB. Besar nilai defleksi maksimum pada PCB2 adalah 0.00000205975 m dimana proses perhitungan dapat dilihat pada lampiran. Mengacu pada konsep tersebut, maka *electrodynamic shaker* yang dirancang tidak sesuai apabila digunakan untuk pengujian PCB2 karena besar respon perpindahan yang diterima PCB ketika ditinjau secara *root mean square* (0.00004816 m) lebih besar apabila dibandingkan dengan nilai defleksi maksimum pada PCB2 (0.0000205975 m). Namun, *electrodynamic shaker* yang dirancang dapat digunakan untuk pengujian PCB2 apabila besar λ yang menjadi input sistem elektrik *electrodynamic shaker* diperkecil dengan alat *signal generator* sehingga besar gaya eksitasi yang dihasilkan oleh *electrodynamic shaker* lebih kecil. Pada akhirnya respon yang diterima oleh PCB2 akan lebih kecil serta bisa disamakan atau kurang dari nilai perpindahan yang diterima PCB ketika ditinjau secara *root mean square*.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang didapat dari penelitian yang sudah dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Didapatkan hasil rancangan *electrodynamic shaker* dengan ukuran tebal dari *flexible support* sebesar 0.15 in dimana nilai *stiffness coefficient* sebesar 2630 N/m dan material yang digunakan adalah *rubber*. Kemudian, nilai *damping constant*/redaman yang didapat dari simulasi pada Simulink MATLAB adalah 1869.5 Ns/m yang merupakan nilai redaman keseluruhan dari sistem *electrodynamic shaker*. Adapun, nilai redaman sistem *electrodynamic shaker* tidak hanya diakibatkan oleh nilai *viscous damping* yang ada pada *gap* antara *moving element* yang ditempati oleh *coil* dengan *magnet*. Namun, ada pengaruh juga dari redaman yang lain berupa *dissipated energy* dari *electrical system* maupun *mechanical system*.
2. *Electrodynamic shaker* yang telah dirancang menghasilkan besar nilai peak dan rms dari Fe mempunyai kemiripan dengan besar gaya yang dihasilkan oleh *electrodynamic shaker* acuan dari katalog. Kemudian, didapat besar respon dinamis yang dihasilkan oleh *electrodynamic shaker* lebih kecil apabila dibandingkan dengan respon dinamis yang dihasilkan oleh PCB.
3. Transien respon dari sistem *electrodynamic shaker* yang telah dirancang mempunyai nilai *overshoot* yang hampir 0. Selanjutnya, nilai *settling time* percepatan pada kedua massa (PCB dan *electrodynamic shaker*) sangat kecil bahkan bernilai hampir 0. Namun, pada kecepatan dan perpindahan di kedua massa mempunyai nilai *settling time* rata-rata sebesar 4s. Kemudian, dapat dilihat nilai rms, *settling time*, serta %*overshoot* pada respon perpindahan

electrodynamic shaker dan PCB mempunyai besar yang sama.

4. Semakin besar nilai λ yang diinputkan ke sistem *electrodynamic shaker* maka semakin besar pula gaya eksitasi yang dihasilkan sistem serta respon dinamis yang diterima sistem dan sebaliknya. Presentase perubahan yang terjadi ketika terjadi kenaikan dan penurunan nilai λ pada setiap respon dinamis mempunyai nilai yang hampir sama yaitu sekitar 12.5 %.
5. *Electrodynamic shaker* yang dirancang tidak sesuai apabila digunakan untuk pengujian PCB2 (AM1). Namun, *electrodynamic shaker* yang dirancang dapat digunakan untuk pengujian PCB2 apabila besar λ yang menjadi input sistem elektrik pada *electrodynamic shaker* diperkecil dengan alat *signal generator* sehingga besar gaya eksitasi yang dihasilkan oleh *electrodynamic shaker* lebih kecil. Pada akhirnya respon yang diterima oleh PCB2 akan lebih kecil serta bisa disamakan atau kurang dari nilai perpindahan yang diterima PCB ketika ditinjau secara *root mean square*.

5.2 Saran

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

1. Disarankan pada penelitian selanjutnya untuk melakukan pengujian eksperimen dengan menggunakan parameter-parameter yang telah didapat dari simulasi pada tugas akhir ini. Hal ini bertujuan untuk melakukan validasi terhadap hasil rancangan dan simulasi yang telah dilakukan pada tugas akhir ini.
2. Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan, disarankan untuk melakukan pengembangan penelitian dalam hal pencarian nilai redaman selain dari yang telah dipaparkan pada tugas akhir ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] G. H. Lim, "Vibration Analysis of a Printed Circuit Board," pp. 16-49, 2000.
- [2] Ewins, "Modal Analysis of a Printed Circuit Board," p. 45, 2001.
- [3] S. S. Rao, *Mechanical Vibrations Fifth Edition*, United States of America: Pearson, 2011.
- [4] B. -. Nisbett, *Shigley's Mechanical Engineering Design, Eight Edition*, United States: McGraw - Hill, 2006.
- [5] C. M. Close, D. K. Frederick and J. C. Neweel, *Modelling and Analysis of Dynamics Systems Third Edition*, United States of America: John Wiley & Son, 2001.
- [6] A. Budipriyanto, "Modal Testing and Analysis of Uncracked and Cracked Plates in Air and in Water," *Proquest*, pp. 16-26, 1993.
- [7] M. Peres, R. Bono and D. Brown, "Practical Aspects of Shaker Measurements for Modal Testing," *Proceedings of ISMA, USA*, 2010.
- [8] Goshen, "Mengenai Mikrofon dan Tipe Kerjanya," 25 Oktober 2015. [Online]. Available: <http://www.goshen.co.id/detailberita/390-mengenai-mikrofon-tipe-dan-cara-kerjanya>. [Accessed 18 Maret 2017].
- [9] A. J. Stewart, "Vibration Reliability Test Method For Electronics Packaging," *ProQuest*, 2013.
- [10] Rahul Jagdale, R. Jagdale, P. Bardia and M. Schmaltz, "Dynamic Response Determination of Electronic Printed Circuit Board (PCB)".

- [11] D. Hickey, S. Sewell and I. Esat, "A Study of The Electrodynamic Shaker," *International Conference on Vibration Problems*, 2013.
- [12] F. Pellicano and M. Barbieri, "Complex Dynamics of Circular Cylindrical Shells," *Elsevier*, 2014.
- [13] T. M. Shop, "A PCB GROUP CO.," The Modal Shop, [Online]. Available: <http://www.modalshop.com/excitation/Modal-Shaker-Selection-Guide?ID=344>. [Accessed 15 Februari 2017].
- [14] L. Bertini , P. Neri and C. Santus , "Design and Optimization of A Compact High-Frequency Electromagnetic Shaker," *International Conference on Engineering Vibration*, 2015.
- [15] Delserro Engineering Solutions, "Choosing A Vibration Test Lab Part 1," DES, 5 August 2015. [Online]. Available: <http://www.desolutions.com/blog/2015/08/choosing-a-vibration-test-lab/>. [Accessed 27 April 2017].

LAMPIRAN

1. Perhitungan x Maksimum PCB Utama (AM 7)

Dengan menggunakan Persamaan (2.6) serta Tabel 3.2 maka didapatkan:

$$x_{\text{Maksimum}} (x_{\text{max}}) = -\frac{Fl^3}{192 EI}$$

Dimana :

x_{max} = Defleksi maksimum *fixed-fixed beam* yang diberi gaya tepat pada tengah (m)

F = Besar gaya yang mengenai *beam* tersebut (N) (Gaya berat PCB)

l = Panjang keseluruhan *beam* (m)

E = Young's Modulus (N/m²)

I = *Moment of inertia of the cross section of the beam* (kgm²)

Maka:

$$I = I_x = \frac{bh^3}{12} = \frac{0.186 \text{ m} \times (0.00157 \text{ m})^3}{12} \\ = 5,998 \times 10^{-11} \text{ m}^4$$

Sehingga,

$$x_{\text{max}} = -\frac{Fl^3}{192 EI} = -\frac{1.228 \text{ N} \times (0.186 \text{ m})^3}{192 \times 20 \cdot \frac{10^9 \text{ N}}{\text{m}^2} \times 5.3856 \cdot 10^{-11} \text{ m}^4} \\ = -3.430 \times 10^{-5} \text{ m}$$

Dimana tanda (-) menunjukkan arah defleksi.

2. Perhitungan h

Dengan menggunakan Persamaan (2.11), Tabel 3.1, serta Gambar 3.10 maka didapatkan:

$$c = \frac{\mu A}{h}$$

Dimana :

c = Nilai *damping constant* (Ns/m)

μ = Viskositas absolut udara = 1.983×10^{-5} Ns/m²

A = *Surface area of plate* (m) = $\pi d L$ ($\pi = 3.14$)

h = Besar *gap* antara *moving element* yang ditempati oleh *coil* dengan *magnet* (m)

Maka:

$$c = \frac{\mu A}{h} = \frac{1.983 \times 10^{-5} \text{ Ns/m}^2 \times 3.14 \times 0.05842 \text{ m} \times 0.0635 \text{ m}}{h} = 1869.5 \text{ Ns/m}$$

Jadi, didapatkan nilai h sebesar $1.235555251 \times 10^{-10}$ m.

3. Perhitungan Nilai C (*Viscous Damping*) dengan Ukuran *Gap* (h) yang Baru

Dengan menggunakan cara yang sama dengan perhitungan di atas (Lampiran no 2) namun besar nilai h adalah besar nilai h baru yang digunakan pada perancangan, maka dihitung nilai *viscous damping* dengan h baru menjadi: (h baru = 0.2 in = 0.00508m)

$$C_1 = \frac{1.983 \times 10^{-5} \text{ Ns/m}^2 \times 3.14 \times 0.05842 \text{ m} \times 0.0635 \text{ m}}{0.00508 \text{ m}} \\ = 4.546989255 \times 10^{-5} \text{ Ns/m}$$

4. Perhitungan x Maksimum PCB variasi (AM 1)

Dengan cara yang sama seperti yang telah diuraikan pada bagian 1 Lampiran, maka didapatkan:

$$I = I_x = \frac{bh^3}{12} = \frac{0.167 \text{ m} \times (0.00157 \text{ m})^3}{12} \\ = 5,3856 \times 10^{-11} \text{ m}^4$$

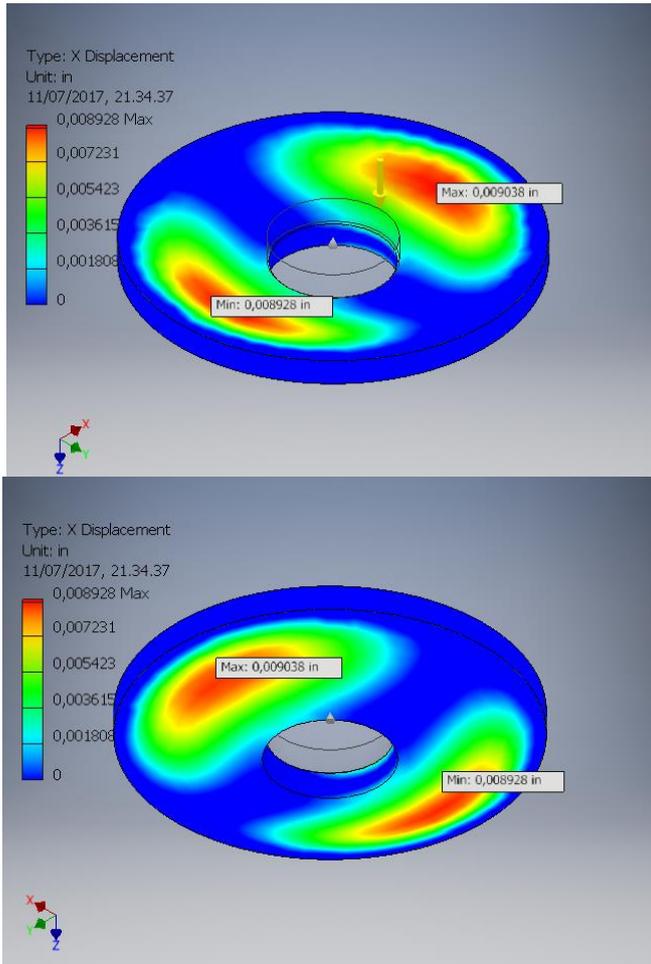
Sehingga,

$$x_{max} = -\frac{Fl^3}{192EI} = -\frac{0.9146 \text{ N} \times (0.167\text{m})^3}{192 \times 20 \frac{10^9 \text{ N}}{\text{m}^2} \times 5.3856 \cdot 10^{-11} \text{ m}^4} \\ = -2,05975 \times 10^{-5} \text{ m}$$

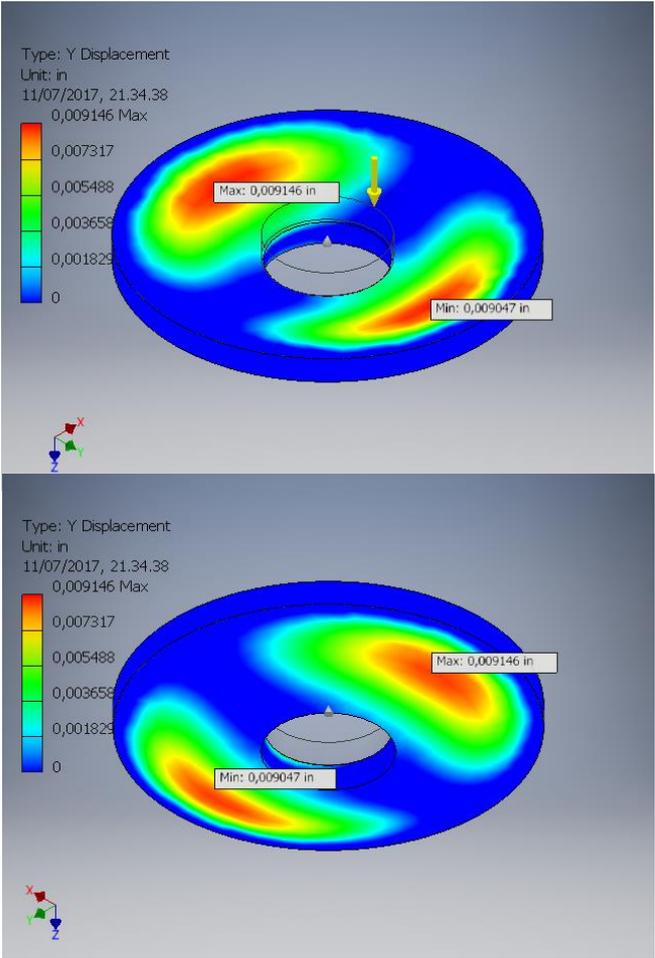
4. Perpindahan (Displacement) Flexible Support

Berikut ini adalah gambar dari nilai perpindahan (*displacemet*) *flexible support* arah sumbu X, Y, Z *electrodynamic shaker* yang telah dirancang ketika diberi pembebanan.

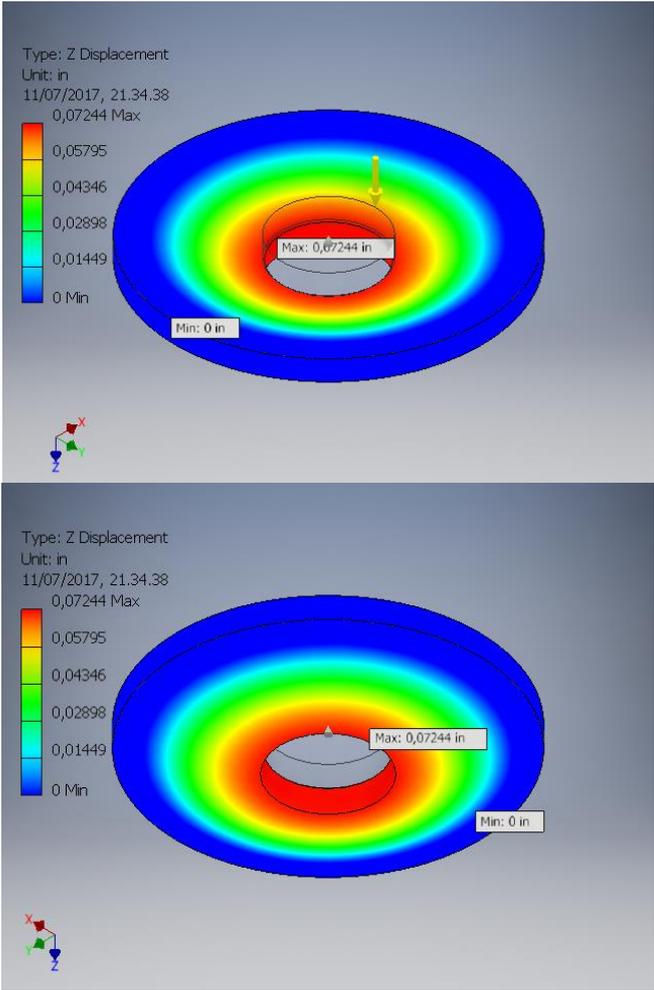
4.1 X Displacement Flexible Support



4.1 Y Displacement Flexible Support

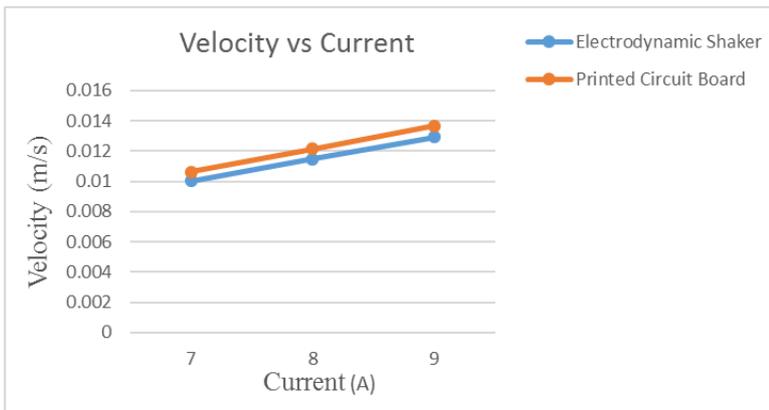
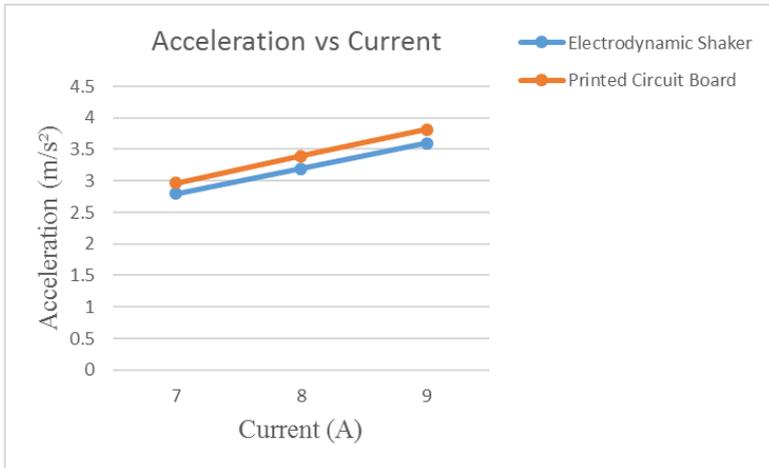


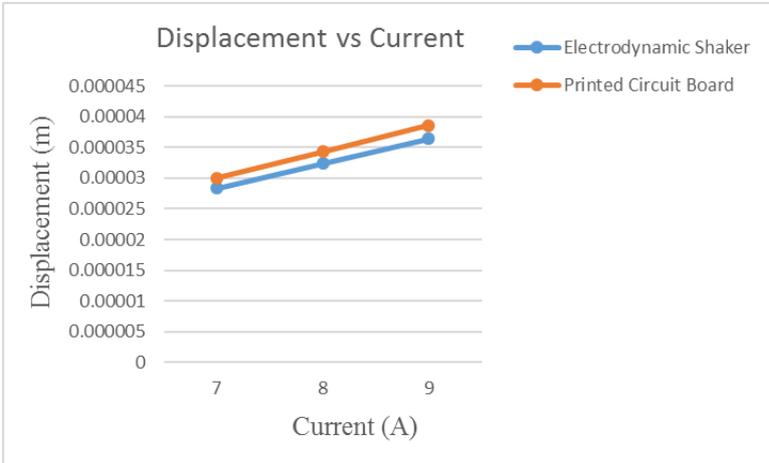
4.1 Z Displacement Flexible Support




5. Grafik



5.1 Grafik Nilai rms Setiap Respon Dinamis Terhadap Variasi Arus





5.2 Grafik Nilai rms Setiap Respon Dinamis Terhadap Variasi Dimensi PCB





BIODATA PENULIS



Fiky Nuzulla Darsono dilahirkan di Tulungagung, 6 Februari 1996 anak yang terlahir dari orang tua terbaik bernama Wiwit Darsono dan Siti Romelah. Riwayat pendidikan penulis diawali di SDN Botoran II pada tahun 2001-2007. Penulis melanjutkan pendidikannya di SMPN I Kedungwaru, pada tahun 2007-2010, selanjutnya di SMAN 1 Kauman pada tahun 2010-2013. Pendidikan SD sampai dengan SMA tersebut dilalui di Kabupaten Tulungagung. Selanjutnya, penulis melanjutkan pendidikan

jenjang S-1 Departemen Teknik Mesin di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya melalui jalur SNMPTN Undangan.

Penulis aktif dalam kegiatan akademik maupun organisasi selama perkuliahan. Penulis pernah menjadi asisten dosen pada mata kuliah Analisa Numerik, Dinamika Teknik, dan Mekanika Getaran. Selain itu, penulis juga pernah menjadi asisten praktikum di Laboratorium Mekanika Fluida dan Laboratorium Vibrasi dan Sistem Dinamis. Dalam organisasi kemahasiswaan, penulis aktif menjadi staff Departemen Sosial Masyarakat di Himpunan Mahasiswa Mesin (HMM) dan Staff Divisi Internal di Lembaga Dakwah Jurusan (LDJ) Ash-Shaff pada tahun 2014-2015. Kemudian, pada tahun 2015-2016, diamanahi menjadi Sekretaris Departemen Sosial Masyarakat HMM dan Staff Divisi PSDM di LDJ Ash-Shaff. Mulai tahun 2014 sampai masa kelulusannya, penulis aktif sebagai Pemandu Latihan Ketrampilan Manajemen Mahasiswa (LKMM).

Motto hidup penulis adalah “Perluas zona nyaman dan nikmati setiap prosesnya” menjadikan penulis mampu

menghadapi masa kuliah dan mengambil pembelajaran dalam setiap kegiatannya. Untuk semua informasi dan masukan terkait tugas akhir ini dapat menghubungi penulis melalui email fiky.nuzulla@gmail.com.