



TUGAS AKHIR - TM 141581

RANCANG BANGUN *TRANSLATIONAL SHAKING TABLE* (TST) DAN ANALISIS PENGARUH MASSA *UNBALANCE*, JARAK EKSENTRIS, DAN FREKUENSI TERHADAP RESPON DINAMIS PADA *TRANSLASIONAL SHAKING TABLE*

**WAHYU CAHYO UTOMO
NRP. 02111440000115**

**Dosen Pembimbing :
Dr.Eng. Harus Laksana Guntur, S.T, M.Eng**

**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2018**

Halaman ini sengaja dikosongkan



FINAL PROJECT - TM 141581

**TRANSLATIONAL SHAKING TABLE (TST)
DESIGN AND TRANSLATIONAL SHAKING
TABLE DYNAMIC RESPONSE ANALYSIS WITH
UNBALANCE MASS, ECCENTRIC DISTANCE,
AND FREQUENCY VARIATION**

**WAHYU CAHYO UTOMO
NRP. 02111440000115**

**Supervisor :
Dr.Eng. Harus Laksana Guntur, S.T, M.Eng**

**MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya
2018**

Halaman ini sengaja dikosongkan

**RANCANG BANGUN *TRANSLATIONAL SHAKING TABLE*
(TST) DAN ANALISIS PENGARUH MASSA *UNBALANCE*,
JARAK EKSENTRIS, DAN FREKUENSI TERHADAP
RESPON DINAMIS PADA *TRANSLATIONAL SHAKING
TABLE***

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 :

WAHYU CAHYO UTOMO
NRP. 02111440000115

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Harus Laksana Guntur, ST., M.Eng. (Pembimbing)
NIP. 197505111999031001
2. Dr. Wiwiek Hendrowati, ST., MT. (Penguji I)
NIP. 197004121997032003
3. Aida Annisa Amin Daman, ST., MT. (Penguji II)
NIP. 198907052015042005
4. Ari Kurniawan Saputra, ST., MT. (Penguji III)
NIP. 198604012015041001

SURABAYA

JULI, 2018

Halaman ini sengaja dikosongkan

RANCANG BANGUN *TRANSLATIONAL SHAKING TABLE* (TST) DAN ANALISIS PENGARUH MASSA *UNBALANCE*, JARAK EKSENTRIS, DAN FREKUENSI TERHADAP RESPON DINAMIS PADA *TRANSLATIONAL SHAKING TABLE*

Nama Mahasiswa : Wahyu Cahyo Utomo
NRP : 021 1144 0000 115
Jurusan : Teknik Mesin FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Dr.Eng. Harus Laksana Guntur, S.T,
M.Eng.

Abstrak

Gempa bumi sering mengakibatkan kerusakan pada struktur bangunan berupa gedung bertingkat maupun gedung pembangkit listrik. Getaran yang dihasilkan dari gempa bumi pada frekuensi natural bangunan akan mengakibatkan runtuhnya bangunan tersebut.

Dalam tugas akhir ini dilakukan rancang bangun simulator gempa bumi berupa *Translational Shaking Table (TST)* dan analisa pengaruh massa *unbalance*, jarak eksentrisitas, dan frekuensi terhadap respon dinamis pada *Translational Shaking Table* dalam skala laboratorium. Putaran dari massa *unbalance* dimanfaatkan untuk menghasilkan gerak translasi meja getar.

Proses pengujian *translational shaking table* dilakukan dengan cara memasang massa *unbalance* pada *disc* yang telah divariasikan jarak eksentrisnya dari pusat putaran. Sumber energi untuk putaran massa *unbalance* berupa motor listrik AC $\frac{1}{4}$ hp. Nilai yang divariasikan berupa massa *unbalance* dengan nilai 400 gram; 800 gram; dan 1200 gram serta jarak eksentris dengan nilai 4 cm, 5 cm, dan 6 cm. Pengambilan data dilakukan dengan variasi frekuensi yang dihasilkan dari motor listrik dan pemasangan *probe accelerometer* pada komponen getar *Translational Shaking Table* yang akan dihubungkan dengan *oscilloscope* guna menampilkan grafik respon dinamis percepatan.

Hasil dari Tugas Akhir ini adalah terdapat alat untuk pengujian gempa bumi pada struktur bangunan untuk skala

laboratorium berupa *Translational Shaking Table (TST)* dan didapatkan hasil berupa grafik respon percepatan terhadap perubahan frekuensi yang diberikan serta data yang didapat dari pengujian memiliki kesamaan karakteristik dengan data hasil simulasi dengan permodelan matematis. Pada hasil perhitungan dan simulasi didapatkan frekuensi natural terdapat pada frekuensi 0,748 Hz. Sedangkan frekuensi kerja yang digunakan adalah rentang 5-15 Hz sehingga alat aman untuk digunakan karena tidak melewati frekuensi natural. Grafik dari hasil percobaan merepresentasikan bahwa semakin besar jarak eksentris yang diberikan maka akan berpengaruh semakin besar pula respon percepatannya berbanding lurus. Sama halnya pada besar massa *unbalance* yang digunakan juga berbanding lurus terhadap respon percepatannya. Sedangkan untuk frekuensi memiliki pengaruh fungsi kuadrat terhadap respon percepatan. Data yang didapatkan dari percobaan memiliki karakteristik yang sama dengan hasil simulasi dengan error rata-rata sebesar 9,53%.

Kata kunci : 1 DOF, permodelan dinamis, frekuensi natural, jarak eksentris, massa *unbalance*.

**TRANSLATIONAL SHAKING TABLE (TST) DESIGN AND
TRANSLATIONAL SHAKING TABLE DYNAMIC
RESPONSE ANALYSIS WITH UNBALANCE MASS,
ECCENTRIC DISTANCE, AND FREQUENCY VARIATION**

Name : Wahyu Cahyo Utomo
NRP : 021 1144 0000 115
Department : Mechanical Engineering FTI-ITS
Supervisors : Dr.Eng. Harus Laksana Guntur, S.T,
M.Eng.

Abstract

Earthquakes often result damage to building structures such as skyscraper buildings and power plants. The vibrations generated from the earthquake at the natural frequency of the building will result collapse to the building.

In this final project, the design of earthquake simulator in the form of Translational Shaking Table (TST) and analysis of unbalance mass, eccentricity distance, and frequency effect to dynamic response at Translational Shaking Table in laboratory scale. The rotation of the unbalance mass is used to generate vibration.

The process of translational shaking table testing is done by installing the unbalance mass on the disc which has varied the eccentric distance from the center of the disc. The energy source for the unbalance rotation is ¼ hp AC electric motor . The varied values are unbalance mass with 400 grams; 800 grams; and 1200 grams and eccentric distances with 4 cm, 5 cm, and 6 cm. The data is collected by variation of the frequency generated from the electric motor and the installation of the accelerometer probe on the Translational Shaking Table vibrating component which will be connected to the oscilloscope to display the dynamic response graph of acceleration.

The result of this Final Project is a tool for earthquake testing on building structure for laboratory scale in the form of

Translational Shaking Table (TST) and got the result of graph of acceleration response to the given frequency change and the data obtained from the test have similarity characteristics with simulation result data with mathematical modeling. In the calculation and simulation results obtained natural frequencies contained at the frequency of 0.748 Hz. While the working frequency used is a range of 5-15 Hz so the device is safe to use because it does not pass the natural frequency. The graph of the experimental results represents that the greater the eccentric distance given it will have an effect on the greater the acceleration response is directly proportional. Similarly, the mass of unbalance used is also proportional to the acceleration response. As for the frequency has the effect of the squared function on the acceleration response. The data obtained from the experiments have the same characteristics with the simulation results with an average error of 9.53%.

Keywords: 1 DOF, dynamic modeling, natural frequency, eccentric distance, unbalance mass.

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat serta hidayah-Nya, serta shalawat serta salam kepada Nabi Muhammad SAW, hingga terselesaikannya Tugas Akhir beserta Laporan Tugas Akhir yang berjudul **RANCANG BANGUN *TRANSLATIONAL SHAKING TABLE* (TST) DAN ANALISIS PENGARUH MASSA *UNBALANCE*, JARAK EKSENTRIS, DAN FREKUENSI TERHADAP RESPONS DINAMIS PADA *TRANSLASIONAL SHAKING TABLE*.**

Penulis telah banyak memperoleh bantuan dari berbagai pihak dalam penyelesaian Tugas Akhir dan laporan Tugas Akhir ini. Penulis mengucapkan terimakasih kepada :

1. Kedua orang tua serta keluarga terimakasih atas segala cinta, kasih sayang, doa, perhatian, serta dukungan moral dan material yang telah diberikan.
2. Bapak Dr.Eng. Harus Laksana Guntur, S.T, M.Eng selaku Dosen Pembimbing yang telah memberikan ilmu, petunjuk, nasihat, serta inspirasi.
3. Bapak Ir. Bambang Pramujati, M.Sc.Eng, Ph.D selaku Ketua Departemen Teknik Mesin yang telah memberikan petunjuk, ilmu, serta bimbingan selama menempuh pendidikan di Teknik Mesin.
4. Bapak Dr. Ir. Budi Utomo Kukuh Widodo, ME. selaku dosen wali yang telah membimbing selama perkuliahan.
5. Seluruh teman Tugas Akhir (Yoga, Boni, Dilla, Rojik, Imel, Chika, Syal, Alaika, dkk), terima kasih untuk semuanya.
6. Seluruh teman-teman satu angkatan M57, LBMM, dan Tim Sapuangin yang telah menemani selama menempuh pendidikan di Teknik Mesin.
7. Seluruh dosen, karyawan dan civitas akademik Teknik Mesin FTI-ITS, terimakasih atas segala bantuan dan kerjasamanya.
8. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu, terimakasih atas bantuannya.

Penulis sadar bahwa penulisan laporan Tugas Akhir ini tidaklah sempurna, namun semoga laporan ini dapat memberikan kontribusi yang berarti dan menambah wawasan yang bermanfaat bagi pembaca, keluarga besar Teknik Mesin khususnya, dan civitas akademik ITS pada umumnya. Selain itu juga semoga dapat bermanfaat sebagai referensi pengerjaan laporan Tugas Akhir bagi mahasiswa yang lain.

Surabaya, 26 Juli 2018

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	v
Abstrak.....	vii
<i>Abstract</i>	ix
KATA PENGANTAR.....	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xv
DAFTAR TABEL.....	xix
1. BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	2
1.3. Tujuan.....	2
1.4. Batasan Masalah.....	2
1.5. Sistematika Laporan.....	2
2. BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1. Simulator Gempa Bumi.....	5
2.2. Meja uji getaran.....	9
2.3. Perancangan dan Pengujian Getaran.....	10
2.4. <i>Mechanical Vibration Exciter</i>	12
2.5. Penggetar Mekanis (<i>mechanical vibration exciter</i>).....	14
2.6. Model numerik putaran massa <i>unbalance</i>	15
2.7. <i>Motion Base : Force Transmissibility</i>	18
3. BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	21
3.1. Studi Literatur.....	22
3.2. Perancangan <i>Translational Shaking Table</i>	23
3.3. Permodelan Dinamis Rancangan <i>Translational Shaking Table</i>	25
3.4. Input Parameter.....	26
3.5. Penentuan Nilai Frekuensi Natural.....	29
3.6. Pembuatan Blok Diagram.....	30
3.7. Simulasi Respon TST.....	31
3.8. Proses Manufaktur.....	32
3.9. Pengambilan Data Eksperimen.....	34
3.10. Analisa Data.....	36
3.11. Pembuatan Grafik 3D.....	36
4. BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	37

4.1. Penentuan Parameter Simulasi	37
4.1.1. Nilai konstanta kekakuan pegas	37
4.1.2. Nilai konstanta redaman sistem.....	39
4.2. Analisa hasil perhitungan dan simulasi.....	42
4.2.1. Analisa simulasi frekuensi natural	42
4.2.2. Analisa simulasi respon percepatan pada jarak eksentris 4 cm.....	44
4.2.3. Analisa simulasi respon percepatan pada jarak eksentris 5 cm.....	47
4.2.4. Analisa simulasi respon percepatan pada jarak eksentris 6 cm.....	51
4.2.5. Analisa simulasi respon percepatan pada massa unbalance 1200 gram.....	54
4.3. Analisa hasil pengambilan data eksperimen	55
4.3.1. Analisa respon percepatan pada jarak eksentris 4 cm ...	55
4.3.2. Analisa respon percepatan pada jarak eksentris 5 cm ...	58
4.3.3. Analisa respon percepatan pada jarak eksentris 6 cm ...	60
4.3.4. Analisa respon percepatan pada massa <i>unbalance</i> 1200 gram.....	63
4.4. Validasi hasil simulasi dengan ekspeimen	65
4.4.2. Hasil respon percepatan dengan jarak eksentris 4 cm ...	65
4.4.3. Hasil respon percepatan dengan jarak eksentris 5 cm ...	71
4.4.4. Hasil respon percepatan dengan jarak eksentris 6 cm ...	77
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	85
5.1. Kesimpulan	85
5.2. Saran.....	86
DAFTAR PUSTAKA.....	87
Lampiran 1 : Gambar teknik <i>Translational Shaking Table</i>	89
Lampiran 2 : Peralatan kerja <i>Translational Shaking Table</i>	93
Lampiran 3 : Pengukuran nilai massa eksetris menggunakan neraca	95
Lampiran 4 : Tabel nilai percepatan (m/s^2) dengan berbagai macam variasi jarak eksentris, massa <i>unbalance</i> , serta frekuensi.....	97
BIODATA PENULIS.....	99

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Simulator Gempa Bumi dengan Skala Besar.....	5
Gambar 2.2 Simulator Gempa <i>Outdoor</i>	6
Gambar 2.3 Simulator Gempa Bumi dengan Skala Kecil	7
Gambar 2.4 Respon simpangan struktur dengan isolator-1 akibat percepatan dasar gempa El Centro N-S: (a) DOF-1, (b) DOF-2, (c) DOF-3.....	7
Gambar 2.5 Respon simpangan struktur dengan isolator-2 akibat percepatan dasar gempa El Centro N-S: (a) DOF-1, (b) DOF-2, (c) DOF-3.....	8
Gambar 2.6 Respon simpangan struktur dengan isolator-3 akibat percepatan dasar gempa <i>El Centro N-S</i> : (a) DOF-1, (b) DOF-2, (c) DOF-3.....	9
Gambar 2.7 Skema ilustrasi alat getaran eksitasi [3].....	11
Gambar 2.8 (a) grafik Amplitudo-rpm, massa eksentrik 0.25kg; (b) grafik Amplitudo-rpm, massa eksentrik 0.5kg; (c) grafik Amplitudo-rpm dengan variasi jarak eksentrik [3].....	12
Gambar 2.9 <i>Direct-drive mechanical vibration machine</i> : (a) <i>Eccentric and connecting link</i> (b) <i>Scotch yoke</i> (c) <i>Cam and follower</i>	13
Gambar 2.10 <i>Reaction-type mechanical vibration machine</i>	13
Gambar 2.11 Putaran massa <i>unbalance</i> [3].	16
Gambar 2.12 FBD dari sistem putaran massa <i>unbalance</i> [3].	17
Gambar 2.13 Grafik (MX/me) terhadap $r=(\omega/\omega_n)$ berbagai ξ [7].	18
Gambar 2.14 Eksitasi terhadap alas sistem	19
Gambar 2.15 Grafik force transmissibility terhadap rasio frekuensi r	20
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian	22
Gambar 3.2 Model 3D rancangan <i>Translational Shaking Table</i>	23
Gambar 3.3 Model 2D rancangan rangka bawah <i>Translational Shaking Table</i>	24
Gambar 3.4 Model 2D rancangan rangka atas <i>Translational Shaking Table</i>	24
Gambar 3.5 Model 2D rancangan motor listrik <i>Translational Shaking Table</i>	25

Gambar 3.6 Model dinamis rancangan <i>Shaking Table</i>	25
Gambar 3.7 Model dinamis rancangan <i>Shaking Table</i>	26
Gambar 3.8 <i>flowchart</i> pengambilan data eksperimen dari rasio redaman.	29
Gambar 3.9 Hasil simulasi frekuensi natural menggunakan <i>Solidwork Simulation Professional</i>	30
Gambar 3.10 <i>Block diagram</i> TST.....	31
Gambar 3.11 Model Fisik rancangan <i>Translational Shaking Table</i>	32
Gambar 3.12 Model Fisik rancangan <i>Translational Shaking Table</i> tampak depan.....	33
Gambar 3.13 Model Fisik rancangan <i>Translational Shaking Table</i>	33
Gambar 3.14 Diagram alir pengambilan data eksperimen	34
Gambar 3.15 (a) Probe Accelerometer (b) Inverter.....	35
Gambar 3.16 <i>Oscilloscope</i>	35
Gambar 4.1 Penentuan nilai kekakuan pegas (a) sebelum dan (b) sesudah pemberian beban	38
Gambar 4.2 Uji tarik kekakuan pegas (a) sebelum dan (b)(c) sesudah pemberian tarik	38
Gambar 4.3 Respon getaran bebas <i>Translational Shaking Table</i>	40
Gambar 4.4 Nilai frekuensi natural berdasarkan grafik (a) percepatan terhadap waktu (b) perpindahan terhadap waktu	43
Gambar 4.5 Grafik respon percepatan terhadap waktu pada jarak eksentris 4 cm dan frekuensi 5 Hz.....	44
Gambar 4.6 Statistik grafik respon percepatan terhadap waktu pada jarak eksentris 4 cm, frekuensi 5 Hz, dan massa <i>unbalance</i> 400 gram.....	45
Gambar 4.7 Respon percepatan pada simulasi dengan jarak eksentris 4 cm	47
Gambar 4.8 Grafik respon percepatan terhadap waktu pada jarak eksentris 5 cm dan frekuensi 5 Hz.....	48
Gambar 4.9 Statistik grafik respon percepatan terhadap waktu pada jarak eksentris 5 cm, frekuensi 5 Hz, dan massa <i>unbalance</i> 400 gram.....	49
Gambar 4.10 Respon percepatan pada simulasi dengan jarak eksentris 5 cm	50

Gambar 4.11 Grafik respon percepatan terhadap waktu pada jarak eksentris 6 cm dan frekuensi 5 Hz.....	51
Gambar 4.12 Statistik grafik respon percepatan terhadap waktu pada jarak eksentris 6 cm, frekuensi 5 Hz, dan massa <i>unbalance</i> 400 gram.....	52
Gambar 4.13 Respon percepatan pada simulasi dengan jarak eksentris 6 cm.....	53
Gambar 4.14 Respon percepatan pada simulasi dengan massa <i>unbalance</i> 1200 gram.....	55
Gambar 4.15 Grafik percepatan terhadap waktu pada jarak eksentris 4 cm, massa <i>unbalance</i> 1200 gram, frekuensi 10 Hz...	56
Gambar 4.16 Respon percepatan pada percobaan dengan jarak eksentris 4 cm.....	58
Gambar 4.17 Grafik percepatan terhadap waktu pada jarak eksentris 4 cm, massa <i>unbalance</i> 1200 gram, frekuensi 10 Hz...	59
Gambar 4.18 Respon percepatan pada percobaan dengan jarak eksentris 5 cm.....	60
Gambar 4.19 Grafik percepatan terhadap waktu pada jarak eksentris 4 cm, massa <i>unbalance</i> 1200 gram, frekuensi 10 Hz...	61
Gambar 4.20 Respon percepatan pada percobaan dengan jarak eksentris 6 cm.....	63
Gambar 4.21 Respon percepatan pada simulasi dengan massa <i>unbalance</i> 1200 gram.....	64
Gambar 4.22 Grafik perbandingan respon percepatan hasil simulasi dengan percobaan terhadap frekuensi pada jarak eksentris 4 cm dan massa <i>unbalance</i> 400 gram	65
Gambar 4.23 Grafik perbandingan respon percepatan hasil simulasi dengan percobaan terhadap frekuensi pada jarak eksentris 4 cm dan massa <i>unbalance</i> 800 gram	67
Gambar 4.24 Grafik perbandingan respon percepatan hasil simulasi dengan percobaan terhadap frekuensi pada jarak eksentris 4 cm dan massa <i>unbalance</i> 1200 gram	69
Gambar 4.25 Grafik perbandingan respon percepatan hasil simulasi dengan percobaan terhadap frekuensi pada jarak eksentris 5 cm dan massa <i>unbalance</i> 400 gram	71
Gambar 4.26 Grafik perbandingan respon percepatan hasil simulasi dengan percobaan terhadap frekuensi pada jarak eksentris 5 cm dan massa <i>unbalance</i> 800 gram	73

Gambar 4.27 Grafik perbandingan respon percepatan hasil simulasi dengan percobaan terhadap frekuensi pada jarak eksentris 5 cm dan massa *unbalance* 1200 gram.....75

Gambar 4.28 Grafik perbandingan respon percepatan hasil simulasi dengan percobaan terhadap frekuensi pada jarak eksentris 5 cm dan massa *unbalance* 400 gram77

Gambar 4.29 Grafik perbandingan respon percepatan hasil simulasi dengan percobaan terhadap frekuensi pada jarak eksentris 5 cm dan massa *unbalance* 800 gram79

Gambar 4.30 Grafik perbandingan respon percepatan hasil simulasi dengan percobaan terhadap frekuensi pada jarak eksentris 6 cm dan massa *unbalance* 1200 gram.....81

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Jenis-jenis <i>exciter of shaking table</i> [3].....	10
Tabel 3.1 Nilai parameter	27
Tabel 3.2 Parameter variasi simulasi.....	31
Tabel 4.1 Pengujian Kekakuan Pegas	39
Tabel 4.2 Koefisien redaman sistem	41
Tabel 4.3 Respon percepatan pada simulasi dengan jarak eksentris 4 cm.....	46
Tabel 4.4 Respon percepatan pada simulasi dengan jarak eksentris 5 cm.....	49
Tabel 4.5 Respon percepatan pada simulasi dengan jarak eksentris 6 cm.....	52
Tabel 4.6 Respon percepatan pada simulasi dengan massa unbalance 1200 gram.....	54
Tabel 4.6 Respon percepatan pada percobaan dengan jarak eksentris 4 cm.....	57
Tabel 4.7 Respon percepatan pada percobaan dengan jarak eksentris 5 cm.....	59
Tabel 4.8 Respon percepatan pada percobaan dengan jarak eksentris 6 cm.....	61
Tabel 4.10 Respon percepatan pada simulasi dengan massa unbalance 1200 gram.....	63
Tabel 4.9 Hasil perbandingan RMS percepatan pada jarak eksentris 4 cm dan massa <i>unbalance</i> 400 gram.....	66
Tabel 4.10 Hasil perbandingan RMS percepatan pada jarak eksentris 4 cm dan massa <i>unbalance</i> 800 gram.....	68
Tabel 4.11 Hasil perbandingan RMS percepatan pada jarak eksentris 4 cm dan massa <i>unbalance</i> 1200 gram.....	70
Tabel 4.12 Hasil perbandingan RMS percepatan pada jarak eksentris 5 cm dan massa <i>unbalance</i> 400 gram.....	72
Tabel 4.13 Hasil perbandingan RMS percepatan pada jarak eksentris 5 cm dan massa <i>unbalance</i> 800 gram.....	74
Tabel 4.14 Hasil perbandingan RMS percepatan pada jarak eksentris 5 cm dan massa <i>unbalance</i> 1200 gram.....	76
Tabel 4.15 Hasil perbandingan RMS percepatan pada jarak eksentris 6 cm dan massa <i>unbalance</i> 400 gram.....	78

Tabel 4.16 Hasil perbandingan RMS percepatan pada jarak eksentris 6 cm dan massa <i>unbalance</i> 800 gram.....	80
Tabel 4.17 Hasil perbandingan RMS percepatan pada jarak eksentris 6 cm dan massa <i>unbalance</i> 1200 gram.....	82

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Gempa bumi adalah bencana alam yang terjadi karena pelepasan energi di kerak bumi yang menciptakan gelombang seismik. Beberapa kejadian gempa bumi yang berasal dari gempa tektonik maupun vulkanik seringkali meninggalkan dampak yang cukup besar. Dampak tersebut dapat berupa gunung meletus, tsunami, dan kerusakan infrastruktur dan bangunan seperti runtuhnya rumah dan rusaknya gedung. Sehingga setiap bangunan di Indonesia harus dirancang tahan terhadap beban gempa yang dapat menyebabkan keruntuhan. Hal ini mengakibatkan semakin pentingnya mempelajari masalah struktur bangunan agar mampu menahan beban dinamik yang berupa beban gempa.

Pengetahuan akan beban dinamik dan respon suatu struktur diperlukan untuk meningkatkan kualitas bangunan yang berada di daerah rawan gempa. Bangunan tersebut harus dirancang tahan terhadap gempa. Respon struktur tersebut berupa respon perpindahan suatu bangunan bila dikenai beban gempa. Bila bangunan tersebut mempunyai banyak lantai maka setiap lantai mempunyai respon perpindahan dan frekuensi natural yang berbeda-beda. Oleh karena itu pengetahuan akan efek dari gempa terhadap beberapa kasus struktur bangunan sangat diperlukan. Hal ini mendorong perlunya sistem perancangan yang matang mengenai struktur bangunan yang akan dibangun di daerah rawan gempa seperti Indonesia.

Berdasarkan hal tersebut di atas, permasalahan yang masih harus dianalisa dan dijawab adalah bagaimana mengetahui respon suatu struktur terhadap beban gempa. Sehingga dibutuhkan alat yang mampu merepresentasikan gempa bumi untuk menguji dan mengetahui rancangan suatu bangunan yang mampu menahan beban gempa dan respon dinamisnya. Alat tersebut digunakan sebelum struktur bangunan tersebut diaplikasikan pada kehidupan nyata di lapangan. Maka dibuatlah tugas akhir ini dengan judul “Rancang Bangun *Translational Shaking Table* (TST) dan Analisa Pengaruh Massa *Unbalance*, Eksentrisitas, dan Frekuensi Terhadap Respon Dinamis Pada *Translational Shaking Table*”.

1.2. Rumusan Masalah

Permasalahan penelitian yang diangkat dalam pengerjaan tugas akhir ini antara lain.

1. Bagaimana merancang *Translational Shaking Table* sesuai dengan frekuensi dan amplitudo yang dibutuhkan?
2. Bagaimana pengaruh variasi massa *unbalance* dan jarak eksentrisitas terhadap respon dinamis *translational shaking table*?
3. Bagaimana pengaruh variasi frekuensi terhadap respon dinamis *translational shaking table*?

1.3. Tujuan

Tujuan penelitian yang ingin dicapai dalam pengerjaan tugas akhir ini antara lain.

1. Merancang *Translational Shaking Table* sesuai dengan frekuensi dan amplitudo yang dibutuhkan.
2. Menganalisa pengaruh variasi massa *unbalance* dan jarak eksentrisitas terhadap respon dinamis *translational shaking table*.
3. Menganalisa pengaruh variasi frekuensi terhadap respon dinamis *translational shaking table*.

1.4. Batasan Masalah

Adapun Batasan masalah yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Struktur rangka pondasi *translational shaking table* rigid dan tidak ikut bergetar.
2. Konstanta pegas yang dipakai dianggap linier.
3. Konstanta redam struktur *translational shaking table* diabaikan.
4. Frekuensi dan amplitudo ditentukan.
5. *Translational shaking table* dibuat dalam skala laboratorium.

1.5. Sistematika Laporan

Sistematika penulisan proposal tugas akhir adalah sebagai berikut:

BAB I Pendahuluan

Bab I ini terdiri dari latar belakang, perumusan masalah, tujuan, batasan masalah dan sistematika laporan.

BAB II Teori Penunjang

Bab II ini dibahas mengenai teori-teori yang berkaitan dengan simulator gempa bumi, getaran, peredam, perancangan dan pengujian, meja uji getaran, penggetar mekanis, dan model numerik putaran massa *unbalance*.

BAB III Metodologi Penelitian

Bab III ini berisi mengenai rancangan dari penelitian yang dilakukan, metode, dan langkah-langkah dalam penelitian.

BAB IV Hasil dan Pembahasan

Bab IV ini berisi mengenai hasil simulasi dan hasil eksperimen dan pembahasannya.

BAB V Kesimpulan dan Saran

Bab V ini berisi mengenai kesimpulan dan saran dari hasil penelitian.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

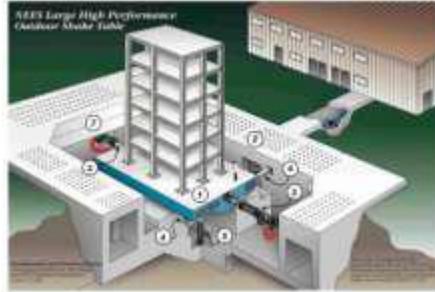
2.1. Simulator Gempa Bumi

Simulator gempa bumi yang biasanya digunakan untuk mengetahui respon suatu struktur bangunan terdiri dari suatu meja getar dan penggerak seperti motor maupun aktuator hidrolik. Simulator gempa tersebut didesain dalam skala besar dan kecil. Skala besar digunakan untuk benar-benar mengetahui respon struktur bangunan terhadap input eksitasi gempa. Struktur bangunan yang biasanya diuji adalah struktur kerangka beton gedung yang memiliki banyak lantai.



Gambar 2.1 Simulator Gempa Bumi dengan Skala Besar.

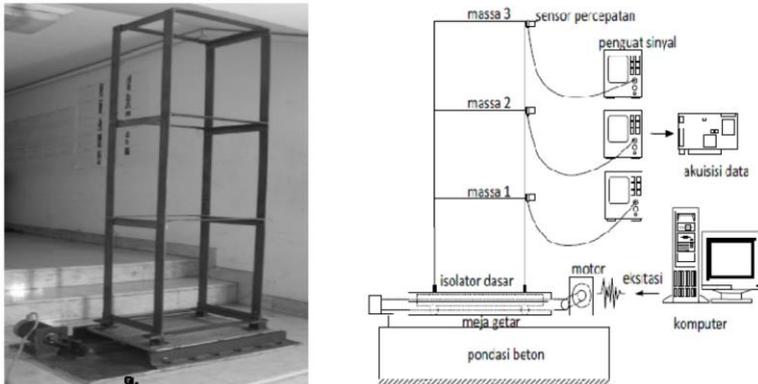
Pada penelitian yang dilakukan oleh Joel P. Conte pada 2004 simulator gempa yang digunakan diletakkan di luar ruangan [1]. Kapasitas dari simulator tersebut mencapai 200 MN. Penggerak simulator tersebut menggunakan aktuator hidrolik dengan rentan frekuensi yang dihasilkan sekitar 0-20 Hz. Material yang digunakan untuk meja getar adalah baja.



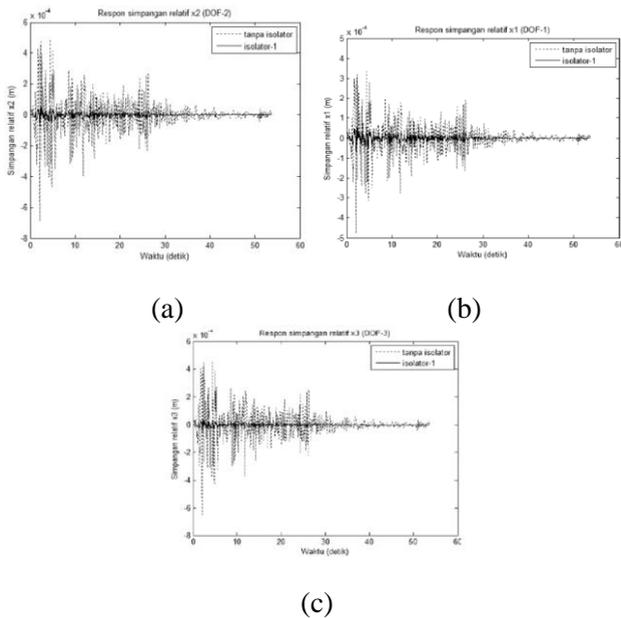
Gambar 2.2 Simulator Gempa *Outdoor*

Sedangkan untuk simulator gempa bumi skala kecil digunakan untuk menguji skala kecil yang berguna untuk mengetahui respon struktur terhadap beban seismik. Pada penelitian Herlien dkk, 2012 [2] yang berjudul “Pengembangan Sistem Isolasi Seismik pada Struktur Bangunan yang Dikenai Beban Gempa sebagai Solusi untuk Membatasi Respon Dinamik” alat uji gempa yang digunakan menggunakan mekanisme slider crank seperti yang terlihat pada gambar 2.3 . Alat uji gempa tersebut menerapkan mekanisme sederhana mengingat struktur bangunan yang ingin dianalisa dalam skala kecil. Alat uji gempa dengan menggunakan mekanisme slider crank memanfaatkan panjang radius (r) disc motor dan lengan (l) untuk mendapatkan gaya yang bekerja pada meja getar serta gaya yang harus ditransmisikan dari motor ke lantai (base). Prinsip analisis getaran pada simulator gempa ini berbeda-beda tergantung bagiannya. Pada bagian antara struktur beban dan meja getaran menggunakan prinsip motion of base sedangkan pada bagian antar motor dan lantai (base) menggunakan prinsip base isolation. Input getaran yang diberikan pada alat uji gempa ini adalah sinusoidal karena gelombang gempa yang terjadi merupakan gelombang sinusoidal.

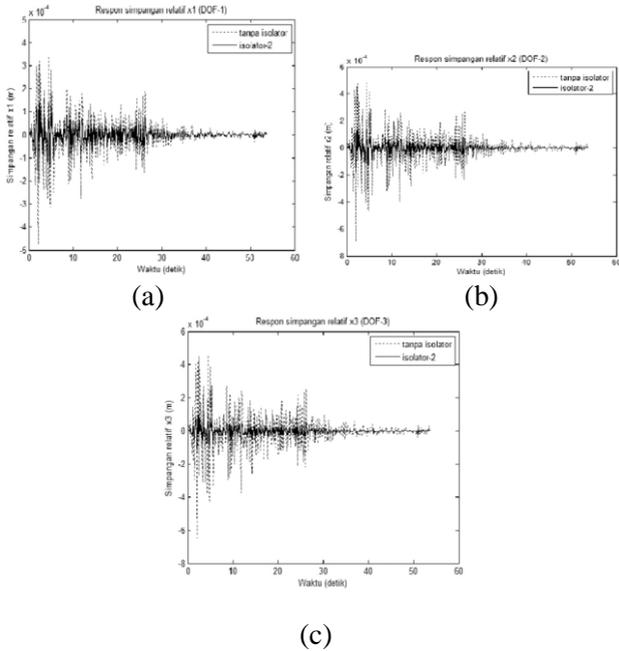
Getaran dari meja getar menghasilkan gerak translasi. Dari penelitian yang dilakukan oleh Herlien, dkk pada tahun 2008 didapatkan respon struktur seperti pada gambar 2.4.



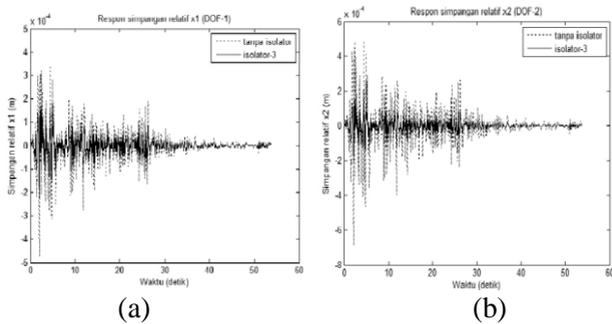
Gambar 2.3 Simulator Gempa Bumi dengan Skala Kecil

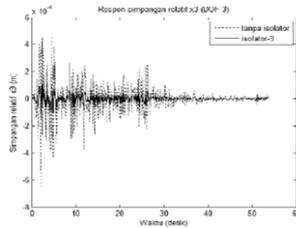


Gambar 2.4 Respon simpangan struktur dengan isolator-1 akibat percepatan dasar gempa El Centro N-S: (a) DOF-1, (b) DOF-2, (c) DOF-3



Gambar 2.5 Respon simpangan struktur dengan isolator-2 akibat percepatan dasar gempa El Centro N-S: (a) DOF-1, (b) DOF-2, (c) DOF-3





(c)

Gambar 2.6 Respon simpangan struktur dengan isolator-3 akibat percepatan dasar gempa *El Centro N-S*: (a) DOF-1, (b) DOF-2, (c) DOF-3

2.2. Meja uji getaran

Meja uji getaran (*Shaking Table*) merupakan alat yang penting dalam pengujian untuk melakukan analisis getaran dan mendiagnosis kegagalan benda uji seperti struktur tertentu yang mengalami getaran berlebihan. Berbagai jenis getaran eksitasi dari *shaking table* digunakan untuk pengembangan, simulasi, produksi dan mempelajari efek getaran untuk mengevaluasi sifat fisik bahan dan struktur.

Pada umumnya *shaking table* berdasarkan jenisnya dibagi menjadi 3: *electro-dynamic exciter*, *hydraulic exciter*, dan *mechanical exciter*. Adapun fitur dari ketiga jenis tersebut terdapat pada Tabel 2.1. *Exciter of shaking table* jenis penggerak mekanis memiliki beberapa macam sumber penggerak antara lain [3]:

- a) Batang pendorong (*connecting link*)
- b) *Scotch yoke*
- c) *Cam and follower*
- d) Putaran masa eksentris (*rotating unbalance mass*)

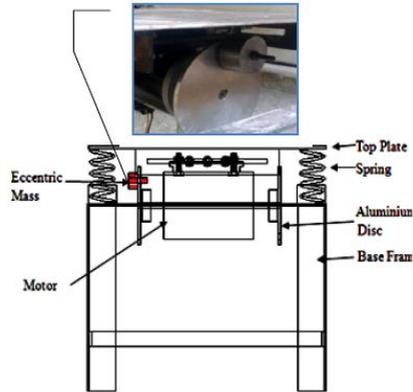
Tabel 2.1 Jenis-jenis *exciter of shaking table* [3]

Exciter type Parameters	Mechanical	Elektro- dynamic	Electro- Hydraulic
Frequency (Hz)	2-50	2-10,000	0.1-500
Maximum Displacement (cm)	2.5	2.5	50
Maximum Acceleration (g)	20	100	20
Maximum Force (N)	4500	2000	450,000
Excitation Waveform	Sinusoidal only	High Flexibility and Accuracy	Average Flexibility

2.3. Perancangan dan Pengujian Getaran

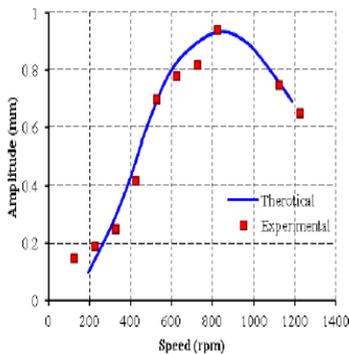
Perancangan dan pengujian dari getaran dari hasil gaya eksitasi putaran massa *unbalance*, pada tahun 2014 dijadikan penelitian oleh Nitinkumar Anekar dkk [3]. System terdiri dari massa eksentrik, motor penggerak, pegas, plat penggetar, piringan Aluminium dan rangka sebagai pondasi alat. Semua komponen dari alat pengujian getaran ini terbuat dari baja ringan, kecuali piringan untuk dudukan massa eksentrik yang terbuat dari Aluminium. Massa eksentrik yang terletak pada piringan aluminium dihubungkan dengan motor DC yang dipasang permanen terhadap plat penggetar. Motor DC diputar pada kisaran putaran 0 sampai 1440 rpm (24Hz).

Gambar 2.7 merupakan skema ilustrasi dari rancangan Nitinkumar Anekar dkk [3] :

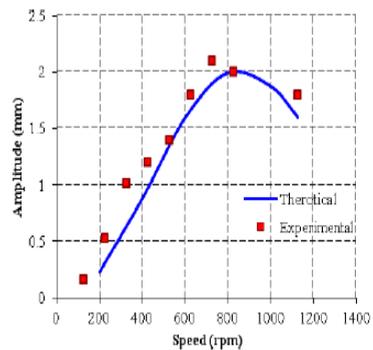


Gambar 2.7 Skema ilustrasi alat getaran eksitasi [3].

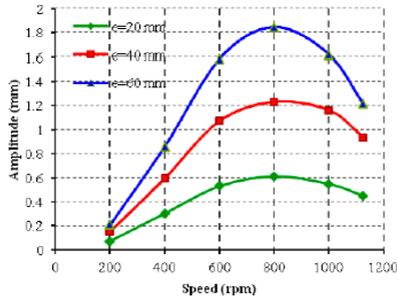
Pada tahap percobaan dilakukan guna menguji performa dari gaya eksitasi yang dihasilkan guna pemanfaatan untuk pemadatan konsentrat dll. Hasil dari percobaan tersebut didapat konstanta redam alat tersebut. Dari hasil pengukuran pengujian, didapat hubungan dari amplitude gerak eksitasi dengan putaran motor. Dengan mevariasikan massa eksitasi dan jarak eksitasi didapat kurva hubungan amplitude dengan kecepatan sudut motor penggerak sehingga dapat membuktikan secara eksperimen bahwa hasil yang didapat sesuai dengan teori yang ada tentang putaran resonansi.



(a)



(b)



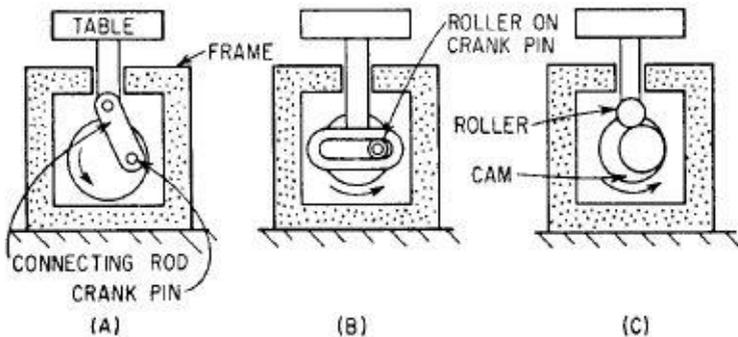
(c)

Gambar 2.8 (a) grafik Amplitudo-rpm, massa eksentrik 0.25kg; (b) grafik Amplitudo-rpm, massa eksentrik 0.5kg; (c) grafik Amplitudo-rpm dengan variasi jarak eksentrik [3].

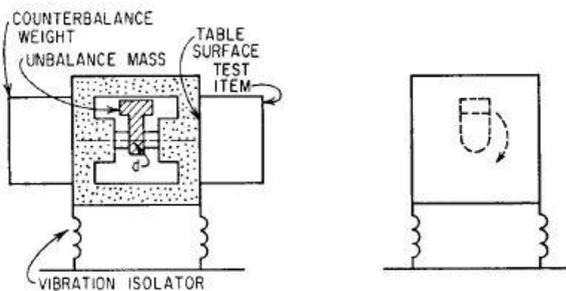
Pada gambar 2.8 terlihat hasil yang didapat menunjukkan bahwa pada putaran tertentu grafik amplitude mencapai titik maksimal dimana pada putaran tersebut merupakan putaran pada frekuensi naturalnya, sehingga alat *shaking table* akan beresonansi yang ditunjukkan dengan nilai amplitude yang sangat besar.

2.4. Mechanical Vibration Exciter

Menurut Harris' Shock and Vibration Handbook [4], *mechanical vibration machine* dibagi menjadi dua tipe berdasarkan sistem penggerakannya yakni *direct-drive mechanical vibration machines* dan *reaction-type mechanical vibration machine*. Pada tipe *direct-drive* terdapat empat jenis yakni *Eccentric and connecting link*, *scotch yoke*, dan *cam and follower*. Sedangkan untuk tipe *reaction type* terdapat *rotating unbalance mass*.



Gambar 2.9 Direct-drive mechanical vibration machine: (a) Eccentric and connecting link (b) Scotch yoke (c) Cam and follower



Gambar 2.10 Reaction-type mechanical vibration machine

Adapun keuntungan dan kerugian serta aplikasi dari *mechanical exciter* adalah sebagai berikut:

Keuntungan [5]:

- Gaya yang dihasilkan oleh *rotating unbalance* diteruskan secara langsung menuju meja tanpa bergantung pada kekokohan alas pondasi
- Biaya *mechanical exciter* yang relatif lebih murah ketimbang *exciter* jenis lain.
- Tidak ada masalah berupa kebocoran seperti pada tipe hidraulik

- Tidak adanya permasalahan pada komponen listrik yang mudah mengalami kerusakan pada kondisi getaran.

Kerugian:

- *Mechanical exciter* tidak dapat digunakan pada temperatur dan kelembapan tinggi
- Hanya dapat diaplikasikan pada benda kecil
- Jangkauan frekuensi untuk beroperasi relatif lebih rendah dibanding tipe hidraulik dan pneumatik

Aplikasi

- Digunakan untuk kepentingan studi efek vibrasi atau untuk mengevaluasi properti fisik material atau struktur.
- Untuk mencari frekuensi natural benda

Untuk menguji sambungan las, solder dan hasil pengecoran semen atau beton dalam cetakan.

2.5. Penggetar Mekanis (*mechanical vibration exciter*)

konsep dari *Self-Excited System* merupakan getaran yang diakibatkan gaya internal sistem secara spontan menghasilkan amplitude tertentu dengan rentang kenaikan non-linier. Energi yang digunakan getaran merupakan energi kinetik dari massa tertentu yang bergerak isolasi.

Self-Excited vibration berbeda dengan konsep getaran paksa (*forced vibration*). Perbedaannya yaitu pada *Self-Excited vibration* gaya eksitasi berhubungan dengan gerak yang dihasilkan, saat gerakan berhenti, disaat itulah menunjukkan tidak ada gaya eksitasi. Pada getaran paksa, sumber gaya penggetar bersifat independen terhadap getaran yang dihasilkan [6].

Dalam penentuan konsep penggetar mekanis (*mechanical vibration exciter*), untuk memperoleh hasil yang naik tentunya harus memperhatikan kelebihan, kekurangan, dan aplikasi dari penggetar mekanis. Dibawah ini merupakan berbagai kelebihan, kekurangan, dan aplikasi penggetar mekanis (*mechanical vibration exciter*) [3].

Keuntungan :

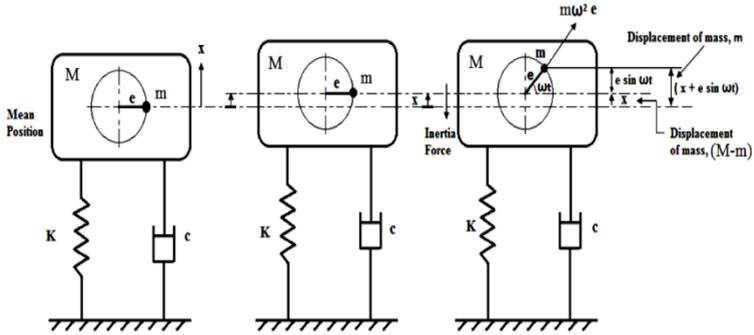
1. Gaya yang dihasilkan oleh putaran massa *unbalance* disalurkan secara langsung terhadap plat bergetar tanpa bergantung terhadap kekokohan pondasi;
2. Harga untuk merancang dan membuat penggetar mekanis (*mechanical vibration exciter*) lebih murah dibandingkan dengan jenis yang lainnya;
3. Tidak ada masalah kebocoran seperti pada *hydraulic exciter*;
4. Meminimalisir penggunaan perangkat listrik sehingga dapat menekan biaya perawatan.

Kerugian :

1. penggetar mekanis (*mechanical vibration exciter*) tidak dapat digunakan pada temperature tinggi, humiditas tinggi dan lingkungan pada dataran tinggi;
2. Hanya dapat digunakan untuk aplikasi skala kecil;
3. Hanya beroperasi pada rentang frekuensi rendah dibandingkan dengan hidrolis dan elektrik;

2.6. Model numerik putaran massa *unbalance*.

Hasil putaran dari massa *unbalance* adalah salah satu penyebab utama dari terjadinya getaran. Permodelan numerik putaran massa *unbalance* disederhanakan pada skema Gambar 2.14. Massa eksitasi diperumpamakan dalam bentuk ' m ', berputar terhadap pusat massa terhadap sumbu putar dengan jarak ' e '. Putaran dari massa *unbalance* akan menimbulkan gaya eksitasi yang didukung dengan adanya pegas dan peredam.



Gambar 2.11 Putaran massa *unbalance* [3].

Massa total dari sistem diumpamakan dengan ‘*M*’. sistem diasumsikan hanya bergerak vertikal dan memiliki gerak 1 Derajat kebebasan. Total pergerakan vertikal tidak termasuk massa eksentrik (*M – m*) adalah sebesar *x* dan total perpindahan dari massa eksentrik akibat berputar *m* adalah sebesar (*x + e sin ωt*). Sehingga gaya inersia pada sistem tidak termasuk massa *unbalance* adalah (*M – m*) \ddot{x} .

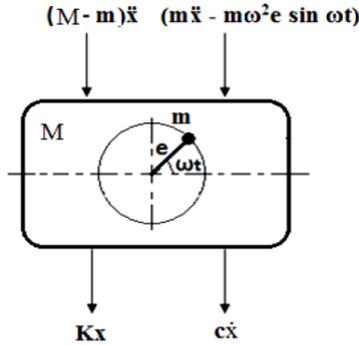
Untuk menghitung gaya inersia eksitasi yang dihasilkan oleh putaran massa *unbalance* dapat dilakukan dengan perkalian massa *unbalance* dengan percepatan. Untuk mendapatkan nilai percepatan, dapat dilakukan kuadrat penurunan dari perpindahan massa *unbalance*.

$$F_{(t)} = m \frac{d^2}{dt^2} (x + e \sin \omega t).$$

$$F_{(t)} = m((-\omega)^2 e \sin \omega t).$$

$$F_{(t)} = m\omega^2 e \sin \omega t \dots\dots\dots (2.2)$$

*F*_(*t*) merupakan gaya inersia eksitasi yang dihasilkan dari putaran massa *unbalance*. Sehingga *Free Body Diagram* dari sistem dapat dibuat seperti pada Gambar 2.15.



Gambar 2.12 FBD dari sistem putaran massa *unbalance* [3].

kx dan $c\dot{x}$ berturut-turut merupakan gaya akibat adanya pegas dan peredam. Sehingga persamaan getarannya dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$(M - m)\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m\ddot{x} + me\omega^2 \sin \omega t$$

$$M\ddot{x} + c\dot{x} + kx = me\omega^2 \sin \omega t \dots \dots \dots (2.3)$$

Persamaan untuk mendapatkan respon *steady* dari perpindahan didapat:

$$x_p(t) = X \sin(\omega t - \phi) \dots \dots \dots (2.4)$$

Dengan X merupakan amplitude dari persamaan gerak dan ϕ merupakan beda fase yang terbentuk. Adapun persamaan untuk mendapatkan amplitude dan beda fase sebagai berikut:

$$X = \frac{me\omega^2}{[(k-M\omega^2)^2 + (c\omega)^2]^{1/2}} \dots \dots \dots (2.5)$$

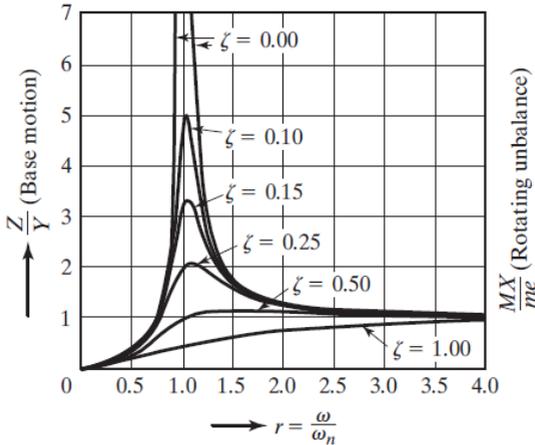
$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{c\omega}{k-M\omega^2}\right) \dots \dots \dots (2.6)$$

Dengan mendefinisikan perbandingan nilai redam (*damping ratio*) $\xi = c/M\omega_n$ dan perbandingan frekuensi (*frequency ratio*) $= \frac{\omega}{\omega_n}$,

persamaan (2.4) dapat di ubah kedalam bentuk tanpa dimensi berupa:

$$\frac{MX}{me} = \frac{r^2}{[(1-r^2)^2 + (2\xi r)^2]^{1/2}} \dots\dots\dots (2.7)$$

Variasi nilai dari MX/me terhadap r dengan perbedaan nilai dari ξ dapat dilihat pada Gambar 2.5 [7].

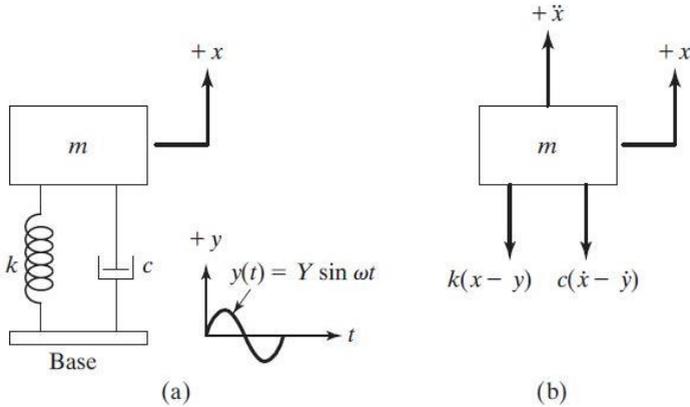


Gambar 2.13 Grafik (MX/me) terhadap $r=(\omega/\omega_n)$ berbagai ξ [7].

2.7. Motion Base : Force Transmissibility

Dasar atau alas dari sebuah sistem dengan massa pegas dan peredam terkadang mengalami gerakan harmoni seperti ditunjukkan pada gambar 2.25(a). Perpindahan dari alas digambarkan oleh $y(t)$ dan $x(t)$ sebagai perpindahan massa dari posisi semula terhadap satuan waktu t . Perpanjangan pegas digambarkan oleh $x-y$ dan kecepatan relatif peredam adalah $\dot{x} - \dot{y}$. Dari free body diagram didapatkan persamaan gerak:

$$\ddot{x} + c(\dot{x} - \dot{y}) + k(x - y) = 0 \quad (2.8)$$



Gambar 2.14 Eksitasi terhadap alas sistem

Pada gambar 2.14 [8], sebuah gaya F akan diteruskan menuju alas sistem akibat reaksi dari pegas dan peredam. Gaya ini dapat dituliskan sebagai berikut:

$$F = k(x - y) + c(\dot{x} - \dot{y}) = -m\ddot{x} \quad (2.9)$$

Persamaan 2.9 apabila digabungkan dengan persamaan 2.10 yang merupakan respon *steady state* massa m , dapat dituliskan sebagai berikut:

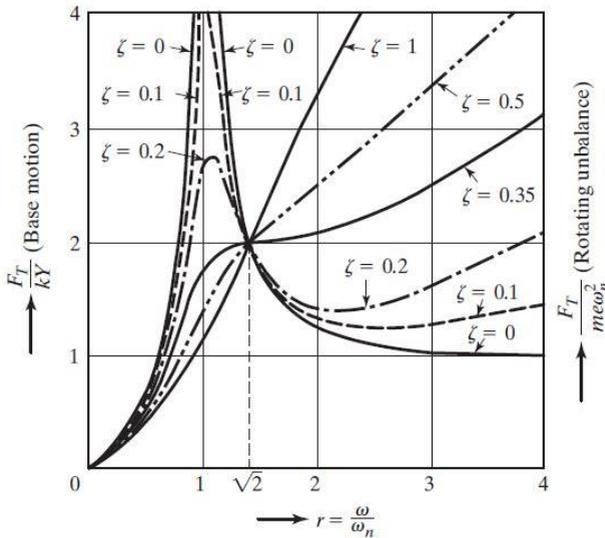
$$x_p(t) = \tan^{-1} \left(\frac{c\omega}{k - m\omega^2} \right) \quad (2.10)$$

$$F = m\omega^2 X \sin(\omega t - \phi) = F_T \sin(\omega t - \phi) \quad (2.11)$$

Dimana F_T merupakan amplitudo atau nilai maksimum dari gaya yang diteruskan menuju alas dituliskan:

$$\frac{F_T}{kY} = r^2 \left[\frac{1 + (2\zeta r)^2}{(1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.12)$$

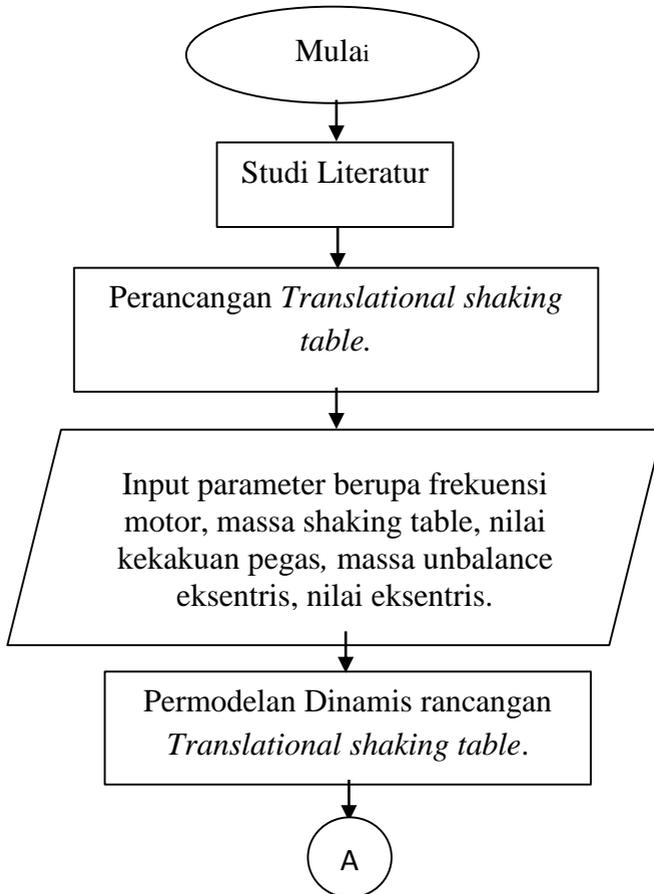
Rasio $\left(\frac{F_T}{kY}\right)$ dikenal juga sebagai *force transmissibility*. Gaya yang diteruskan berada pada fasa sama dengan gerakan massa $x(t)$. Variasi dari gaya yang diteruskan menuju alas terhadap rasio frekuensi r ditunjukkan oleh gambar 2.9 [8] dengan nilai ζ yang berbeda-beda.

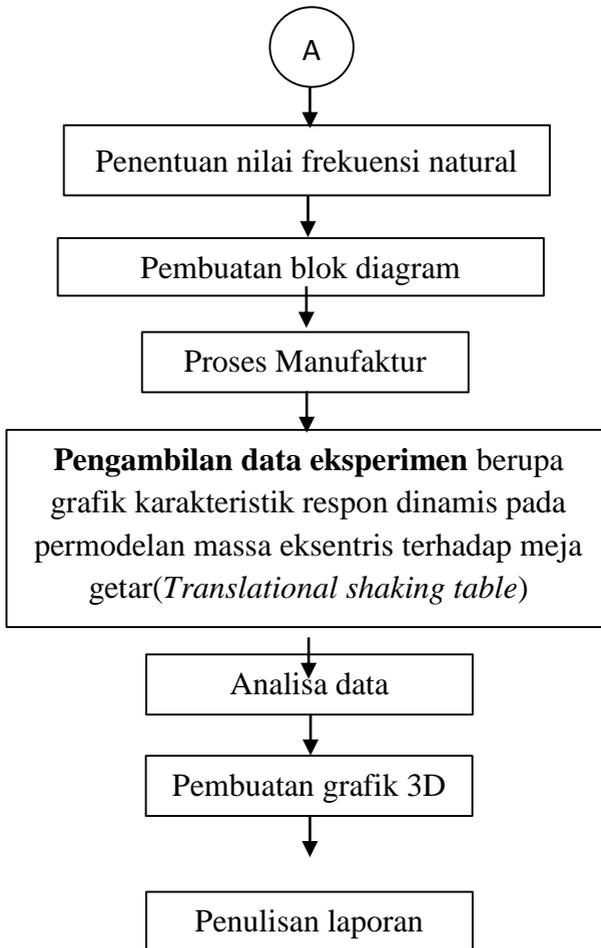


Gambar 2.15 Grafik force transmissibility terhadap rasio frekuensi r

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian pada tugas akhir ini dirancang pada beberapa tahapan, yang digambarkan pada diagram alir seperti pada gambar 3.1. Tahapan tersebut meliputi beberapa hal berikut:





Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

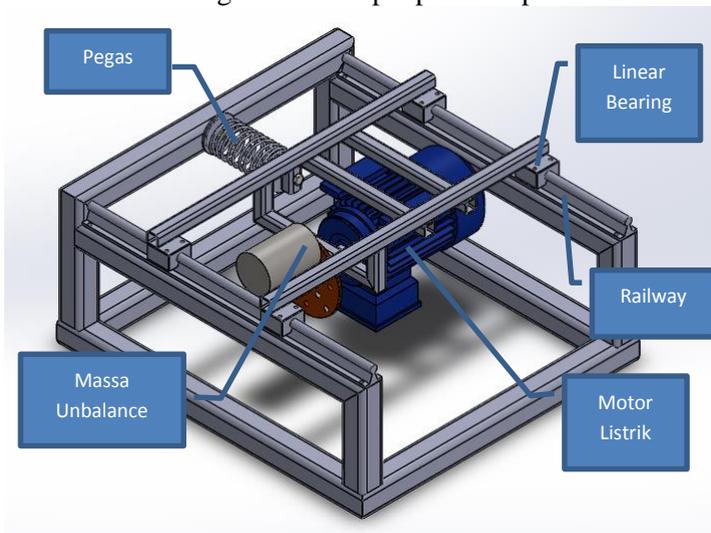
3.1. Studi Literatur

Dalam penulisan tugas akhir ini, diperlukan referensi-referensi yang dapat menunjang dalam menganalisis penelitian ini. Oleh karena itu, dilakukan studi literatur untuk menambah wawasan, pengetahuan, dan landasan teori mengenai permasalahan yang akan dibahas. Materi yang akan mendukung dalam penelitian ini yaitu simulator gempa bumi, penelitian

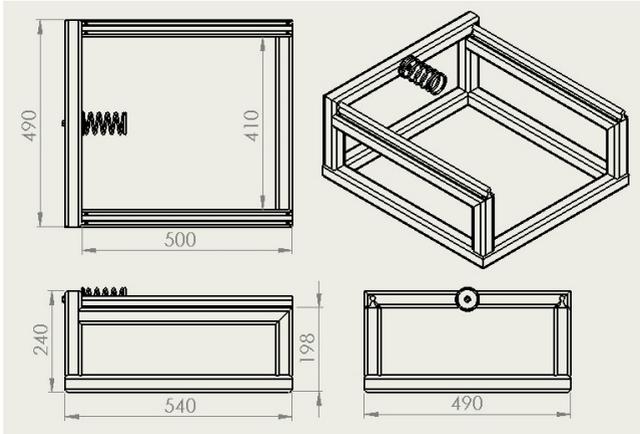
terdahulu, meja uji getaran (*Translational shaking table*), penggetar mekanis, model numerik putaran massa *unbalance*. Referensi untuk studi literatur didapatkan dari buku, jurnal ilmiah, dan penelitian terdahulu yang pernah dilakukan.

3.2. Perancangan *Translational Shaking Table*

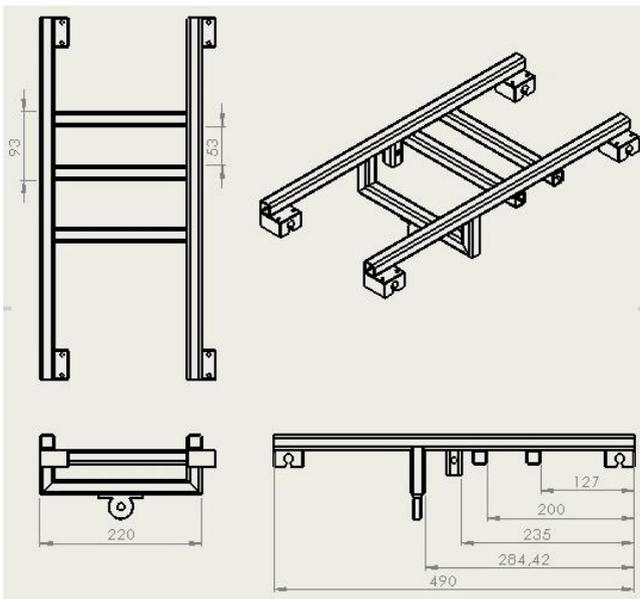
Pemodelan fisik dari rancangan *Translational shaking table* menggunakan motor listrik AC $\frac{1}{4}$ Hp sebagai penggerak massa *unbalance*. Dapat menghasilkan gaya maksimum sebesar 1200 N, percepatan maksimum sebesar 50 m/s^2 , dan frekuensi yang dihasilkan bisa mencapai 20 Hz. Spesifikasi tersebut sesuai dengan standar uji gempa. Menggunakan besi pejal dengan diameter 60 mm sebagai massa *unbalance*, Poros diameter 10 mm sebagai penghubung motor listrik dengan plat yang menumpu massa *unbalance*. Linear rail bearing sebagai benda yang bergesekan secara translasi untuk meminimalkan gaya gesek. Menggunakan frame berupa besi hollow $40\text{mm} \times 40\text{mm}$. Sebagai tempat dudukan rail. Menggunakan frame besi hollow $20\text{mm} \times 20\text{mm}$ sebagai dudukan motor listrik. Untuk gambar teknik dari rancangan *Translational Shaking Table* terdapat pada lampiran 1.



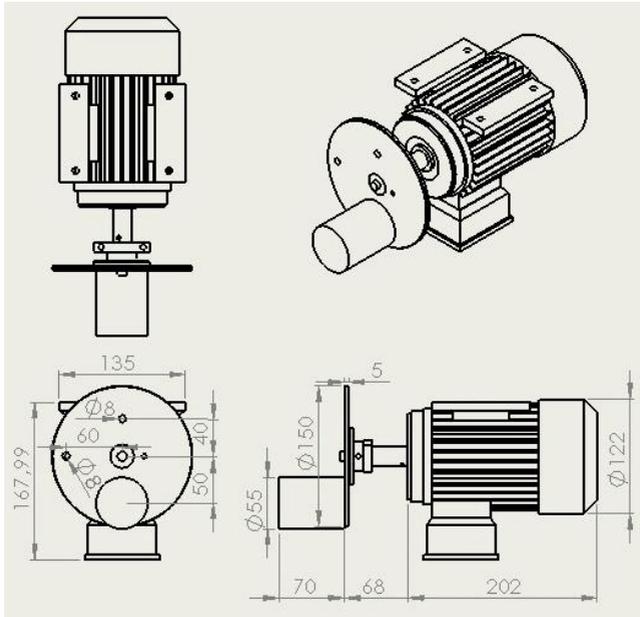
Gambar 3.2 Model 3D rancangan *Translational Shaking Table*



Gambar 3.3 Model 2D rancangan rangka bawah *Translational Shaking Table*



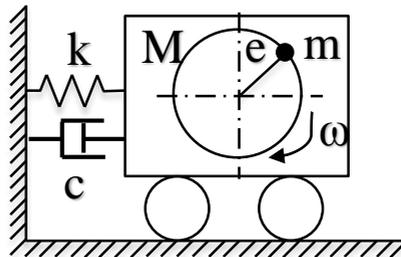
Gambar 3.4 Model 2D rancangan rangka atas *Translational Shaking Table*



Gambar 3.5 Model 2D rancangan motor listrik *Translational Shaking Table*

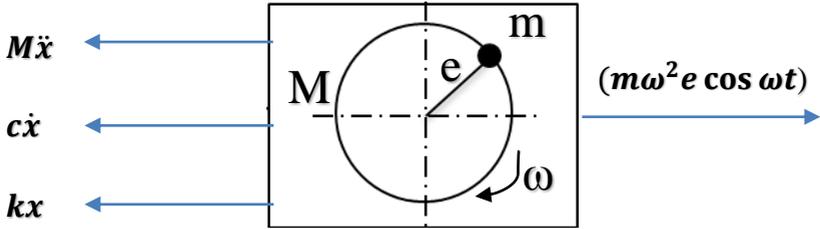
3.3. Permodelan Dinamis Rancangan *Translational Shaking Table*

Mode dinamis dari *translational shaking table* merupakan bentuk penyederhanaan dari model fisik dari gambar 3.2, dapat dilihat dari gambar 3.6 seperti di bawah ini.



Gambar 3.6 Model dinamis rancangan *Shaking Table*

Gambar 3.6 juga menunjukkan bahwa sistem tersebut memiliki derajat kebebasan (dof) sebanyak 1 yaitu gerakan translasi pada *shaking table*. Gambar 3.7 merupakan *free body diagram* dari setiap dof pada sistem.



Gambar 3.7 Model dinamis rancangan *Shaking Table*

Dari gambar 3.7 didapatkan persamaan di bawah ini.

$$\sum F = M\ddot{x} \dots\dots\dots (3.2)$$

$$M\ddot{x} + c\dot{x} + kx = me\omega^2 \cos \omega t \dots\dots\dots (3.3)$$

$$\ddot{x} = \frac{1}{M} (me\omega^2 \cos \omega t - c\dot{x} - kx) \dots\dots\dots (3.4)$$

Persamaan untuk mendapatkan amplitude dari persamaan gerak sebagai berikut:

$$X = \frac{me\omega^2}{[(k-M\omega^2)^2 + (c\omega)^2]^{1/2}} \dots\dots\dots (3.5)$$

Persamaan (3.3) merupakan persamaan state variable yang nantinya akan digunakan untuk membuat diagram blok pada MATLAB Simulink.

3.4. Input Parameter

Parameter yang ditetapkan dan dimasukkan dalam pemodelan fisik *translational shaking table* dapat dilihat pada tabel 3.1.

Tabel 3.1 Nilai parameter

Parameter	Nilai	Satuan	Keterangan
M	9,6	Kg	Massa yang bergetar
K	200	N/m	Kekakuan Pegas
m₁	0.4	Kg	Massa <i>unbalance</i>
m₂	0.8	Kg	Massa <i>unbalance</i>
m₃	1.2	Kg	Massa <i>unbalance</i>
e₁	3	cm	Jarak eksentris
e₂	4	cm	Jarak eksentris
e₃	5	cm	Jarak eksentris

Dalam perancangan TST, agar data yang didapatkan semakin valid, maka perlu adanya parameter nilai redaman TST yang hanya bisa didapat dari pengujian dari eksperimen. Adapun data nilai parameter redaman dari TST dapat dilakukan dengan pengujian metode *logarithmic decrement* seperti berikut ini.

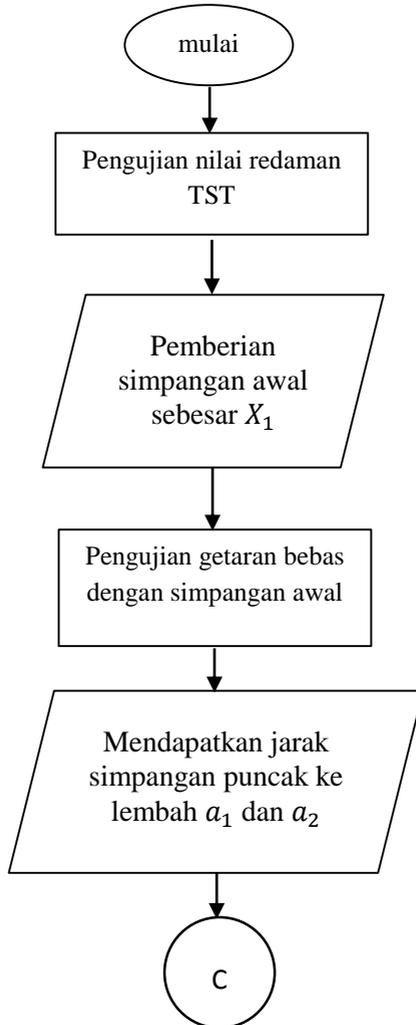
$$\delta = \ln \frac{X_1}{X_2} \dots \dots \dots (3.6)$$

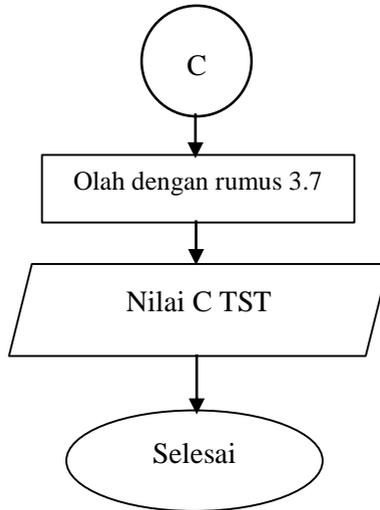
Dimana : $\delta = \text{logarithmic decrement}$

Logarithmic decrement merupakan besaran tidak berdimensi dan pada pengambilan data dilakukan dengan melakukan 10 sampel dengan variable terikat X_1 dan akan didapat parameter X_2 , sehingga didapatkan nilai rasio redaman dari sistem sebagai berikut

$$c = 2m \sqrt{\frac{k}{m}} \sqrt{\frac{1}{\left[\frac{2\pi}{\ln\left(\frac{a_n}{a_{n+1}}\right)}\right]^2 + 1}} \dots \dots \dots (3.7)$$

Pada pengambilan data dilakukan dua pengujian. Yang pertama pengujian terhadap redaman sistem TST, dan yang ke dua pengujian redaman dari sistem benda uji. Adapun *flowchart* pengambilan data eksperimen dari rasio redaman terdapat pada gambar 3.8.

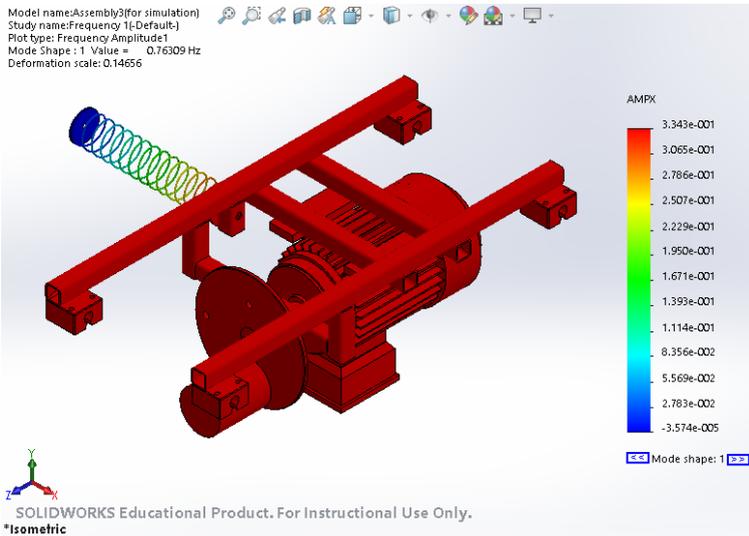




Gambar 3.8 *flowchart* pengambilan data eksperimen dari rasio redaman.

3.5. Penentuan Nilai Frekuensi Natural

Penentuan nilai frekuensi natural bertujuan untuk mengetahui dimana letak frekuensi natral dari struktur *Translational Shaking Table* yang dibuat. Sehingga dapat ditentukan pula frekuensi percobaan yang akan dilakukan dengan rentan nilai di luar dari frekuensi natural supaya tidak terjadi resonansi ketika melakukan percobaan. Penentuan nilai frekuensi natural dicari menggunakan *software Solidwork simulation professional*.

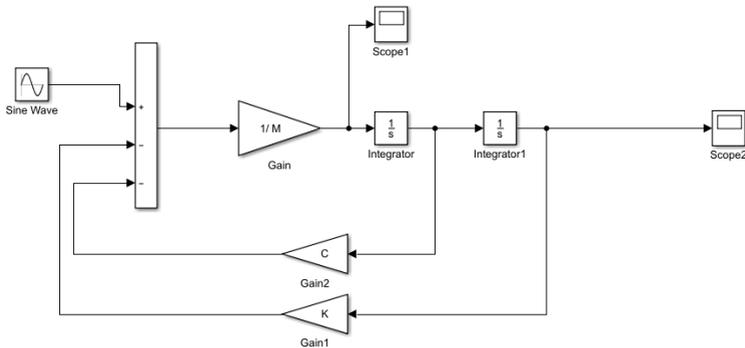


Gambar 3.9 Hasil simulasi frekuensi natural menggunakan *Solidwork Simulation Professional*

Pada gambar 3.9 ditunjukkan hasil simulasi penentuan nilai frekuensi natural menggunakan *software Solidwork simulation professional*. Di dapatkan hasil nilai frekuensi natural sebesar 0,76309 Hz. Pengujian tidak akan beresonansi karena pengujian dilakukan pada rentan frekuensi 5-15 Hz.

3.6. Pembuatan Blok Diagram

Persamaan model dinamis yang telah diubah ke bentuk persamaan state variable kemudian diubah menjadi diagram blok simulasi dengan menggunakan *software MATLAB Simulink*. Diagram blok dibentuk untuk melakukan simulasi yang nantinya akan didapatkan hasil berupa grafik respon dinamis yang ditinjau dari berbagai massa pada sistem. Hasil dari simulasi tersebut kemudian digunakan untuk memvalidasi hasil eksperimen yang telah dilakukan. Respon dinamis yang dihasilkan berupa perpindahan, kecepatan, dan percepatan dari *shaking table*. *Block diagram* yang digunakan pada *TST* terlihat pada gambar 3.10.



Gambar 3.10 Block diagram TST

3.7. Simulasi Respon TST

Dalam penelitian ini simulasi dilakukan dengan menggunakan Simulink Matlab untuk mengetahui respon dinamis dari sistem TST. Pada tahap ini semua parameter dari model sistem dan gaya input yang bekerja pada sistem dimasukkan sebagai data untuk melakukan simulasi simulink. Simulasi dengan simulink ini dilakukan untuk mengetahui respon getara yang terjadi pada sistem TST. Proses yang dilakukan dengan memvariasikan frekuensi dari gaya eksitasi, massa *unbalance*, serta jarak eksentris. Adapun variasi yang dilakukan dapat dilihat pada tabel 3.2.

Tabel 3.2 Parameter variasi simulasi

Jarak eksentris	Massa <i>unbalance</i>	Frekuensi
4 cm	400 gram	5-15 Hz
	800 gram	5-15 Hz
	1200 gram	5-15 Hz
5 cm	400 gram	5-15 Hz
	800 gram	5-15 Hz
	1200 gram	5-15 Hz

6 cm	400 gram	5-15 Hz
	800 gram	5-15 Hz
	1200 gram	5-15 Hz

3.8. Proses Manufaktur

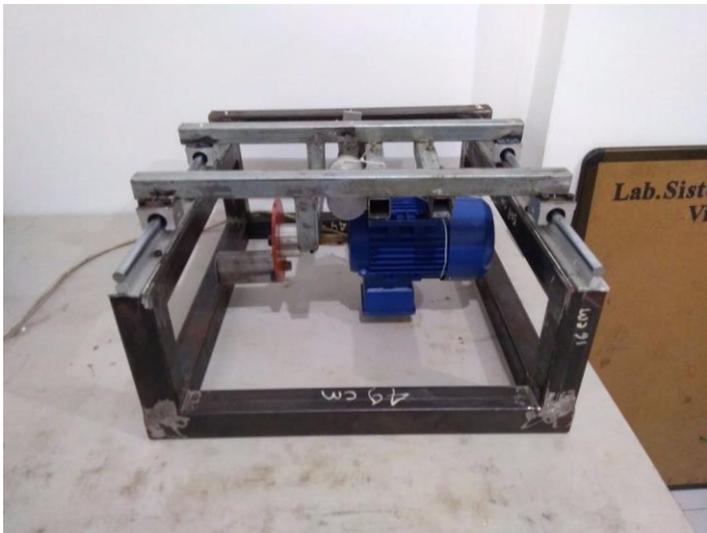
Pada tahap proses manufaktur bekerja sama dengan bengkel las di daerah Kelurahan Keputih dan bengkel Sapuangin. Pembuatan rangka dilakukan di bengkel las di daerah Keputih. Linear bearing dan railnya dibeli dari toko online. Pembuatan poros motor, *coupling*, serta massa *unbalance* dibuat sendiri di bengkel Sapuangin. Proses assembly juga dilakukan sendiri di bengkel Sapuangin. Gambar 3.11 adalah gambar jadi dari alat yang dirancang.



Gambar 3.11 Model Fisik rancangan *Translational Shaking Table*



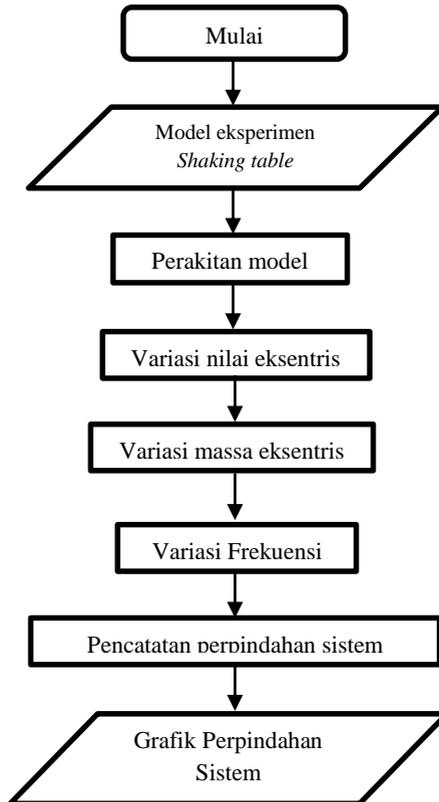
Gambar 3.12 Model Fisik rancangan *Translational Shaking Table* tampak depan



Gambar 3.13 Model Fisik rancangan *Translational Shaking Table*

3.9. Pengambilan Data Eksperimen

Pada tahap ini akan dilakukan pengujian *shaking table* dengan input berupa gaya *unbalance* dari putaran motor listrik. Gambar 3.14 menunjukkan langkah-langkah pengambilan data secara umum. Variabel yang divariasikan yaitu berupa jarak eksentris, massa *unbalance*, serta frekuensi motor listrik. Tiap variabel memiliki 3 variasi. Untuk jarak eksentris yaitu 3 mm, 4 mm, dan 5 mm. Untuk massa *unbalance* yaitu 0,4 kg; 0,8 kg; dan 1,2 kg. Untuk frekuensi yaitu 5 Hz sampai 15 Hz.



Gambar 3.14 Diagram alir pengambilan data eksperimen

Untuk menunjang pengambilan data pengujian, digunakan beberapa alat ukur yakni probe inverter, dan oscilloscope.



(a)

(b)

Gambar 3.15 (a) Probe Accelerometer (b) Inverter

Probe seperti terlihat pada gambar 3.15(a) digunakan untuk mengukur percepatan getaran dari sistem TST. Probe dipasang pada titik dimana sistem yang ingin diukur percepatannya, dan ujung kabel dipasang pada socket *input inverter*. *Inverter* gambar 3.15(b) digunakan untuk menaikkan beda potensial yang dibaca oleh probe. Output inverter disambungkan pada socket *oscilloscope* untuk kemudian dibaca grafiknya. Percepatan getaran yang dihasilkan oleh benda akan terbaca sebagai perubahan sinyal perbedaan potensial listrik pada *accelerometer*. Grafik yang terbaca berupa grafik percepatan terhadap waktu. Data yang didapat dari oscilloscope kemudian dimasukkan kedalam komputer untuk kemudian dianalisa.



Gambar 3.16 Oscilloscope

Berikut adalah penghitungan data dari pembacaan alat *accelerometer*:

$$\text{Response} = \frac{G}{V} \cdot g \cdot \frac{f}{100} \left(\frac{m}{s^2} \right) \quad (3.6)$$

Dimana G = data pembacaan accelerometer (V)

V = Sensitivitas accelerometer (0.05 Volt)

g = percepatan gravitasi ($9.81 \frac{m}{s^2}$)

f = frekuensi eksitasi yang diberikan (Hz)

100 = frekuensi kerja accelerometer pada 100 MHz

3.10. Analisa Data

Pada tahap ini akan dibahas grafik respon dinamis yang telah dihasilkan dari eksperimen maupun simulasi. Selain itu, tahap ini juga akan membahas pengaruh variasi massa *unbalance*, jarak eksentris, serta frekuensi motor listrik terhadap respon *shaking table*. Dari hasil percobaan dianalisa bagaimana nilai error dari alat yang dirancang. Apabila nilai error terlalu besar maka akan dianalisa dan dilakukan perbaikan pada rancangan *Translational Shaking Table*.

3.11. Pembuatan Grafik 3D

Setelah didapatkan hasil dari analisa data, maka akan dibuatkan grafik 3D sebagai spesifikasi dari alat *Translational Shaking Table* yang nantinya dapat digunakan sebagai acuan untuk simulasi pengujian struktur bangunan. Grafik berupa pengaruh perubahan massa *unbalance*, jarak eksentris, dan frekuensi terhadap respon dinamis *Translational Shaking Table*. Pembuatan grafik 3D akan menggunakan bantuan dari *software Matlab*.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Penentuan Parameter Simulasi

4.1.1. Nilai konstanta kekakuan pegas

Nilai konstanta kekakuan pegas dapat diketahui dengan melakukan pengujian dan pengukuran secara langsung pada pegas. Untuk melakukan pengujian ini diperlukan beberapa variasi beban yang dibaca menggunakan neraca dan jangka sorong untuk mengukur perubahan panjang pegas setelah diberi beban. Dari hasil pengujian ini kemudian dicari nilai rata-rata defleksi (Δx) yang telah diukur ketika diberikan beban.

Dalam pengambilan data pengujian dilakukan dengan memberikan tiga variasi beban. Beban yang digunakan adalah 10 N, 8 N, dan 7 N. Pada gambar 4.1 merupakan contoh pengambilan data nilai kekakuan pegas dengan mencari nilai defleksi dari pegas dengan memberikan beban. Pengujian tarik juga dilakukan pada gambar 4.2 untuk mencari nilai defleksi pegas apakah nilainya sama apabila diberikan beban tarik dengan beban tekan. Kemudian besar beban diukur menggunakan neraca. Data perubahan defleksi ini digunakan untuk menentukan nilai konstanta kekakuan pegas pada masing-masing pembebanan. Konstanta kekakuan didapatkan melalui persamaan sebagai berikut:

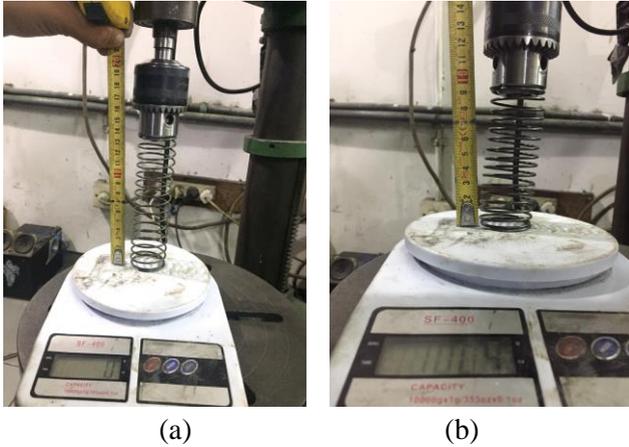
$$F = k\Delta x \dots\dots\dots(4.1)$$

Dimana:

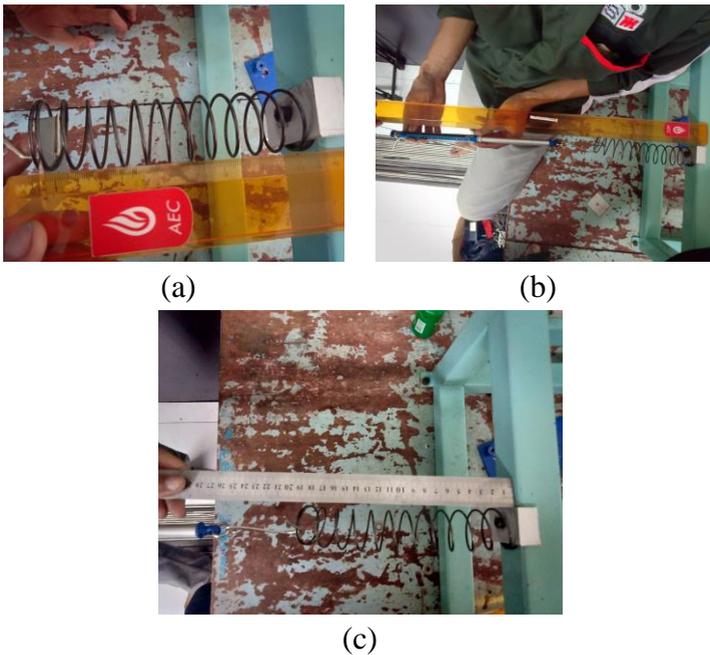
F = Gaya (N)

K = Konstanta kekakuan (Nm)

Δx = Selisih ketinggian awal terhadap ketinggian akhir (m)



Gambar 4.1 Penentuan nilai kekakuan pegas (a) sebelum dan (b) sesudah pemberian beban



Gambar 4.2 Uji tarik kekakuan pegas (a) sebelum dan (b)(c) sesudah pemberian tarik

Tabel 4.1 merupakan tabel hasil pengujian nilai kekakuan pegas:

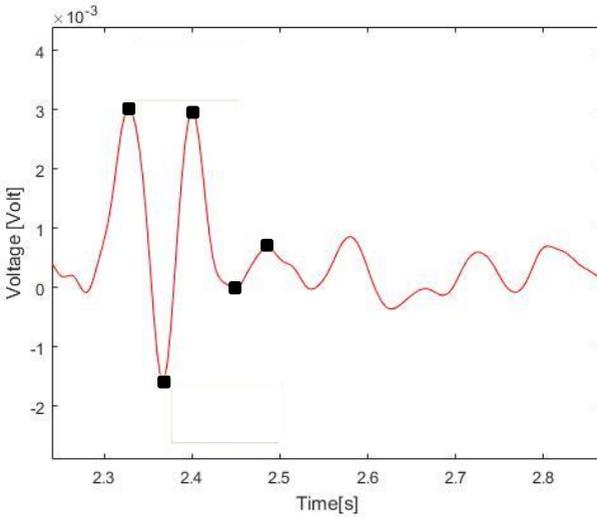
Tabel 4.1 Pengujian Kekakuan Pegas

Beban (N)	Δx (m)	K (N/m)
10	0.05	200
8	0.039	205.121
7	0.036	194.444
Kekakuan rata-rata		199.857

Dari hasil Pengujian dan pengukuran didapatkan nilai konstanta kekakuan pegas sebesar 199,857 N/m sehingga dapat dibulatkan menjadi 200 N/m.

4.1.2. Nilai konstanta redaman sistem

Nilai konstanta redaman dari sistem diperoleh dengan melakukan pengujian. Pengujian dilakukan dengan memberikan simpangan awal kepada sistem utama dan membiarkannya untuk bergetar secara bebas. Respon getaran yang terjadi dari sistem kemudian ditampilkan dan diambil dengan menggunakan *accelerometer* dan *oscilloscope* untuk diolah dengan menggunakan *logarithmic decreement* seperti terlihat pada gambar 4.3.



Gambar 4.3 Respon getaran bebas *Translational Shaking Table*

Pengolahan data dilakukan dengan mencari amplitudo rata-rata dari sebuah puncak dan sebuah lembah yang berdekatan (a_n) dan kemudian mencari rata-rata dari sebuah puncak dan sebuah lembah yang berurutan berikutnya (a_{n+1}). Dari rata-rata amplitudo pertama dan rata-rata amplitudo kedua tersebut kemudian dimasukkan ke dalam persamaan *logarithmic decreement* (δ). Nilai *logarithmic decreement* diperoleh melalui persamaan sebagai berikut:

$$\delta = \ln \frac{a_n}{a_{n+1}} \dots\dots\dots(4.2)$$

Nilai *logarithmic decreement* tersebut kemudian digunakan untuk mencari besar damping rasio yang kemudian digunakan untuk mencari nilai konstanta redaman. Nilai damping rasio dari sistem dapat dicari melalui persamaan sebagai berikut:

$$\zeta = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi}{\delta}\right)^2}} \dots\dots\dots(4.3)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan 4.2 ke persamaan 4.3, maka diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$\zeta = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi}{\ln\left(\frac{a_n}{a_{n+1}}\right)}\right)^2}} \dots\dots\dots(4.4)$$

Dari persamaan di atas, nilai redaman dapat diperoleh dengan mendistribusikan damping ratio, $\zeta = \frac{c}{2m\omega_n} = \frac{c}{2\sqrt{mk}}$, ke persamaan 4.4 sehingga diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$C = 2\sqrt{mk} \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{2\pi}{\ln\left(\frac{a_n}{a_{n+1}}\right)}\right)^2 + 1}} \dots\dots\dots(4.5)$$

Dengan memasukan semua nilai parameter pada persamaan 4.5, didapatkan data koefisien redaman seperti pada tabel 4.2.

Tabel 4.2 Koefisien redaman sistem

A1	A2	logarithmic decrement	C (Ns/m)
0.002305	0.001499	0.068366	5.988446094
0.001499	0.000352	0.224811	19.6922072
0.000352	0.000611	0.087401	7.655820253
Nilai Redaman rata-rata			11.11215785

Nilai koefisien redaman sistem rata-rata yang didapat dari hasil pengujian yaitu sebesar 11,112 Ns/m.

4.2. Analisa hasil perhitungan dan simulasi

4.2.1. Analisa simulasi frekuensi natural

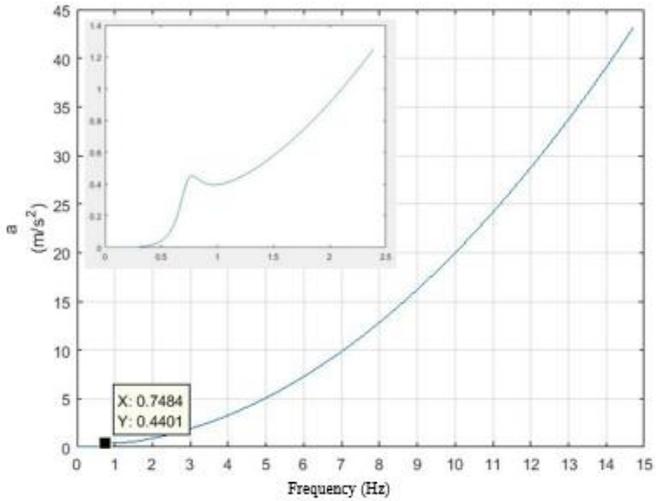
Penentuan nilai frekuensi natural bertujuan untuk mengetahui dimana letak frekuensi natural dari struktur *Translational Shaking Table* yang dibuat. Sehingga dapat ditentukan pula frekuensi percobaan yang akan dilakukan dengan rentan nilai di luar dari frekuensi natural supaya tidak terjadi resonansi ketika melakukan percobaan. Penentuan nilai frekuensi natural dicari melalui perhitungan dan menggunakan *software Solidwork simulation professional*. Untuk perhitungan nilai frekuensi natural 1 dof menggunakan rumus sebagai berikut:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \dots \dots \dots (4.6)$$

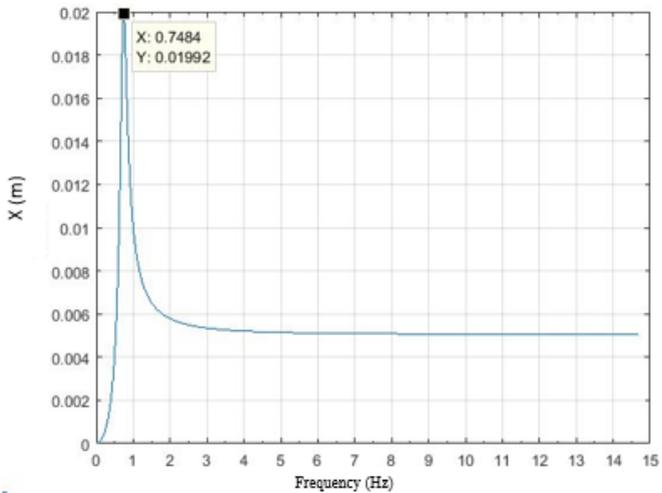
Dengan nilai k adalah kekakuan pegas sebesar 200 N/m dan nilai m adalah massa *TST* yang bergetar sebesar 9,6 kg. Maka didapatkan nilai frekuensi natural sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \omega_n &= \sqrt{\frac{200}{9,6}} \\ \omega_n &= 4,564 \frac{rad}{s} \\ \omega_n &= 0,748 \text{ Hz} \end{aligned}$$

Selain menggunakan perhitungan, penentuan nilai frekuensi natural juga disimulasikan menggunakan *software Solidwork simulation professional* yang menghasilkan nilai sebesar 0.763 Hz. Dari nilai frekuensi natural tersebut digunakan sebagai patokan untuk pengujian *TST* harus menggunakan rentang frekuensi di luar frekuensi natural supaya tidak terjadi kerusakan pada struktur *TST*.



(a)



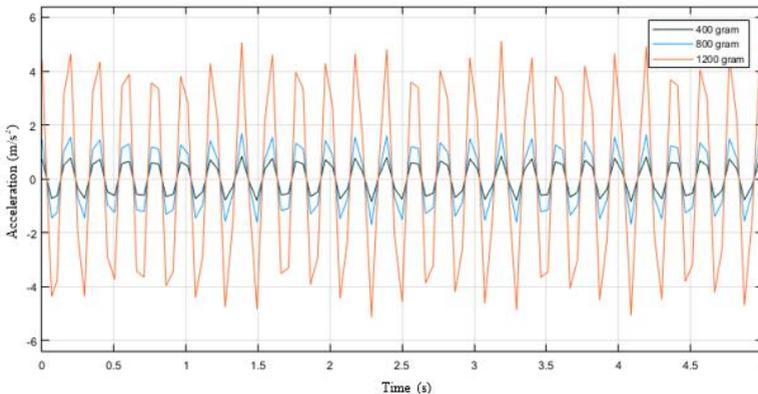
(b)

Gambar 4.4 Nilai frekuensi natural berdasarkan grafik (a) percepatan terhadap waktu (b) perpindahan terhadap waktu

Pada gambar 4.4 (a) terlihat bahwa garfik mengalami kenaikan dari titik nol hingga puncak pada frekuensi 0,7484 Hz kemudian mengalami penurunan kemudian naik kembali. Pada gambar (b) perpindahan mengalami kenaikan pula dari nol hingga puncak ketika di frekuensi 0,7484 Hz kemudian mengalami penurunan terus. Frekuensi 0,7484 merupakan frekuensi natural dari sruktur *TST*. Karena struktur *TST* memiliki satu derajat kebebasan atau *degree of freedom* maka hanya memiliki satu nilai frekuensi natural.

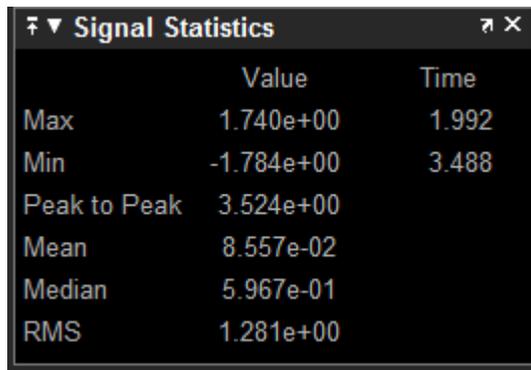
4.2.2. Analisa simulasi respon percepatan pada jarak eksentris 4 cm

Respon percepatan dari *TST* disimulasikan menggunakan *software* MATLAB *Simulink*. Ditentukan variasi massa *unbalance* sebesar 400 gram, 800 gram, dan 1200 gram. Sedangkan nilai frekuensi diambil bertahap mulai dari 5 Hz sampai 15 Hz. Dari simulasi setiap frekuensi didapatkan grafik seperti pada gambar 4.5 serta didapatkan statistik grafik seperti pada gambar 4.6.



Gambar 4.5 Grafik respon percepatan terhadap waktu pada jarak eksentris 4 cm dan frekuensi 5 Hz

Gambar 4.5 adalah grafik respon percepatan terhadap waktu pada jarak eksentris 4 cm dan frekuensi 5 Hz. Kurva hitam menunjukkan hasil simulasi dengan massa *unbalance* sebesar 400 gram. Kurva biru menunjukkan hasil simulasi dengan massa *unbalance* sebesar 800 gram. Sedangkan kurva merah menunjukkan hasil simulasi dengan massa *unbalance* sebesar 1200 gram. Dalam grafik tersebut menunjukkan bahwa semakin besar massa *unbalance* yang digunakan, maka semakin besar pula respon percepatan pada *TST*.



	Value	Time
Max	1.740e+00	1.992
Min	-1.784e+00	3.488
Peak to Peak	3.524e+00	
Mean	8.557e-02	
Median	5.967e-01	
RMS	1.281e+00	

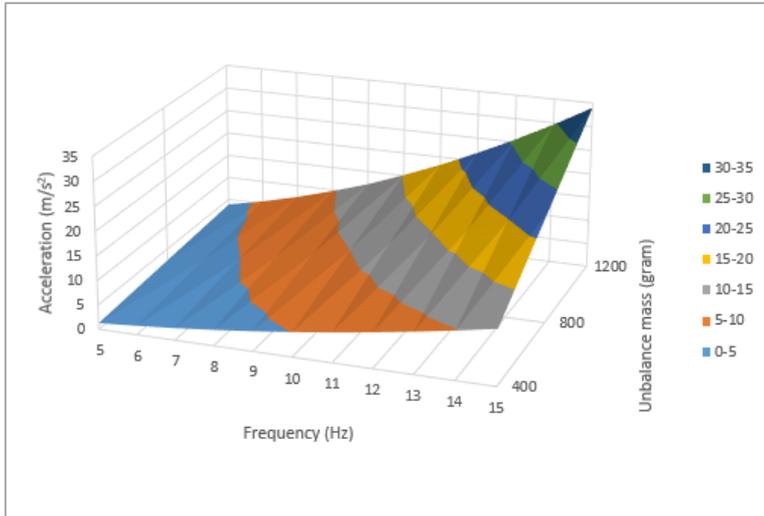
Gambar 4.6 Statistik grafik respon percepatan terhadap waktu pada jarak eksentris 4 cm, frekuensi 5 Hz, dan massa *unbalance* 400 gram

Pada gambar 4.6 dijelaskan tentang statistik grafik respon dinamis terhadap waktu pada jarak eksentris 4 cm, frekuensi 5 Hz, dan massa *unbalance* 400 gram. Dari informasi tersebut diambil nilai RMSnya yang kemudian dikumpulkan pada tiap variasi massa dan frekuensi untuk dibuat grafik kemudian dibandingkan nilainya dengan hasil percobaan. Nilai RMS dari hasil simulasi untuk jarak eksentris 4 cm, frekuensi 5 Hz, dan massa *unbalance* 400 gram adalah 1.281 m/s^2 . Dari hasil simulasi didapatkan nilai percepatan RMS pada tiap frekuensi dan massa *unbalance* pada table 4.3.

Tabel 4.3 Respon percepatan pada simulasi dengan jarak eksentris 4 cm

Frekuensi (Hz)	Percepatan RMS (m/s ²)		
	400 gram	800 gram	1200 gram
5	1.281	2.562	3.843
6	1.834	3.667	5.501
7	2.487	4.973	7.46
8	3.241	6.482	9.723
9	4.095	8.19	12.19
10	5.05	10.1	15.15
11	6.105	12.21	18.31
12	7.263	14.53	21.79
13	8.519	17.04	25.56
14	9.876	19.75	29.63
15	11.33	22.67	34

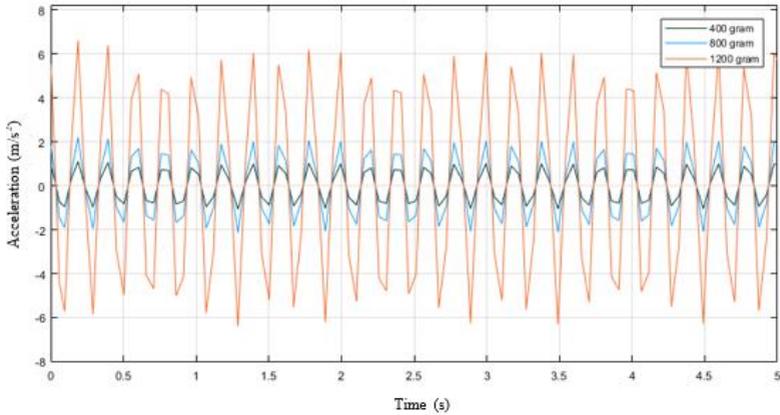
Dari tabel 4.3 didapatkan grafik pada gambar 4.7. Pada grafik tersebut menjelaskan bahwa semakin tinggi nilai frekuensi maka semakin tinggi pula respon percepatan. Kemudian semakin tinggi massa *unbalance* maka semakin tinggi pula respon percepatan.



Gambar 4.7 Respon percepatan pada simulasi dengan jarak eksentris 4 cm

4.2.3. Analisa simulasi respon percepatan pada jarak eksentris 5 cm

Respon percepatan dari *TST* disimulasikan menggunakan *software* MATLAB *Simulink*. Ditentukan variasi massa *unbalance* sebesar 400 gram, 800 gram, dan 1200 gram. Sedangkan nilai frekuensi diambil bertahap mulai dari 5 Hz sampai 15 Hz. Dari simulasi setiap frekuensi didapatkan grafik seperti pada gambar 4.8 serta didapatkan statistik grafik seperti pada gambar 4.9.



Gambar 4.8 Grafik respon percepatan terhadap waktu pada jarak eksentris 5 cm dan frekuensi 5 Hz

Gambar 4.8 adalah grafik respon percepatan terhadap waktu pada jarak eksentris 5 cm dan frekuensi 5 Hz. Kurva hitam menunjukkan hasil simulasi dengan massa *unbalance* sebesar 400 gram. Kurva biru menunjukkan hasil simulasi dengan massa *unbalance* sebesar 800 gram. Sedangkan kurva merah menunjukkan hasil simulasi dengan massa *unbalance* sebesar 1200 gram. Dalam grafik tersebut menunjukkan bahwa semakin besar massa *unbalance* yang digunakan, maka semakin besar pula respon percepatan *TST*.

	Value	Time
Max	2.307e+00	0.183
Min	-2.131e+00	1.275
Peak to Peak	4.438e+00	
Mean	1.030e-01	
Median	2.136e-01	
RMS	1.603e+00	

Gambar 4.9 Statistik grafik respon percepatan terhadap waktu pada jarak eksentris 5 cm, frekuensi 5 Hz, dan massa *unbalance* 400 gram

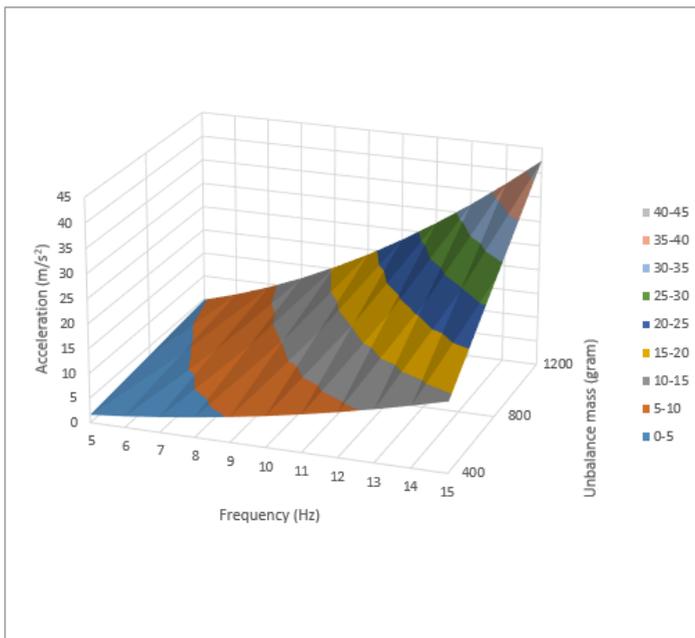
Pada gambar 4.9 dijelaskan tentang statistik grafik respon dinamis terhadap waktu pada jarak eksentris 5 cm, frekuensi 5 Hz, dan massa *unbalance* 400 gram. Dari informasi tersebut diambil nilai RMSnya yang kemudian dikumpulkan pada tiap variasi massa dan frekuensi untuk dibuat grafik kemudian dibandingkan nilainya dengan hasil percobaan. Nilai RMS dari hasil simulasi untuk jarak eksentris 5 cm, frekuensi 5 Hz, dan massa *unbalance* 400 gram adalah 1.603 m/s^2 . Dari hasil simulasi didapatkan nilai percepatan RMS pada tiap frekuensi dan massa *unbalance* pada tabel 4.4.

Tabel 4.4 Respon percepatan pada simulasi dengan jarak eksentris 5 cm

Frekuensi (Hz)	Percepatan RMS (m/s ²)		
	400 gram	800 gram	1200 gram
5	1.602	3.203	4.805
6	2.292	4.584	6.876
7	3.108	6.216	9.324
8	4.051	8.102	12.15

9	5.124	10.25	15.37
10	6.312	12.62	18.94
11	7.634	15.27	22.9
12	9.079	18.16	27.24
13	10.65	21.3	31.95
14	12.35	24.69	37.04
15	14.17	28.33	42.5

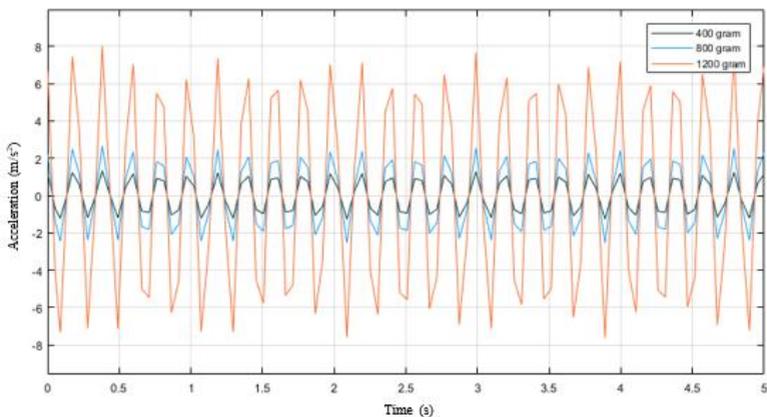
Dari tabel 4.4 didapatkan grafik pada gambar 4.10. Pada grafik tersebut menjelaskan bahwa semakin tinggi nilai frekuensi maka semakin tinggi pula respon percepatan. Kemudian semakin tinggi massa *unbalance* maka semakin tinggi pula respon percepatan.



Gambar 4.10 Respon percepatan pada simulasi dengan jarak eksentris 5 cm

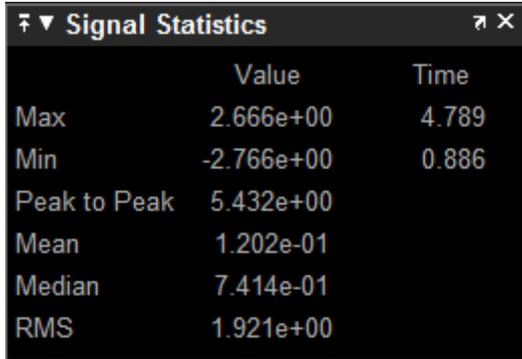
4.2.4. Analisa simulasi respon percepatan pada jarak eksentris 6 cm

Respon percepatan dari *TST* disimulasikan menggunakan *software* MATLAB *Simulink*. Ditetapkan variasi massa *unbalance* sebesar 400 gram, 800 gram, dan 1200 gram. Sedangkan nilai frekuensi diambil bertahap mulai dari 5 Hz sampai 15 Hz. Dari simulasi setiap frekuensi didapatkan grafik seperti pada gambar 4.11 serta didapatkan statistik grafik seperti pada gambar 4.12.



Gambar 4.11 Grafik respon percepatan terhadap waktu pada jarak eksentris 6 cm dan frekuensi 5 Hz

Gambar 4.11 adalah grafik respon percepatan terhadap waktu pada jarak eksentris 6 cm dan frekuensi 5 Hz. Kurva hitam menunjukkan hasil simulasi dengan massa *unbalance* sebesar 400 gram. Kurva biru menunjukkan hasil simulasi dengan massa *unbalance* sebesar 800 gram. Sedangkan kurva merah menunjukkan hasil simulasi dengan massa *unbalance* sebesar 1200 gram. Dalam grafik tersebut menunjukkan bahwa semakin besar massa *unbalance* yang digunakan, maka semakin besar pula respon percepatan *TST*.



	Value	Time
Max	2.666e+00	4.789
Min	-2.766e+00	0.886
Peak to Peak	5.432e+00	
Mean	1.202e-01	
Median	7.414e-01	
RMS	1.921e+00	

Gambar 4.12 Statistik grafik respon percepatan terhadap waktu pada jarak eksentris 6 cm, frekuensi 5 Hz, dan massa *unbalance* 400 gram

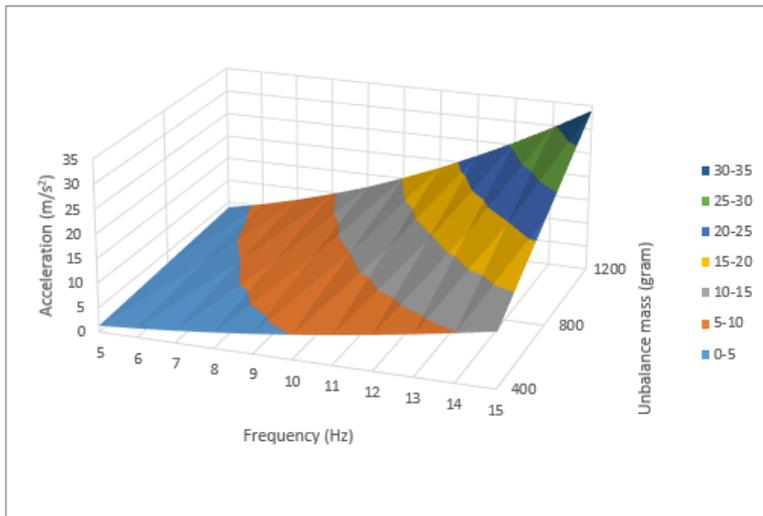
Pada gambar 4.12 dijelaskan tentang statistik grafik respon dinamis terhadap waktu pada jarak eksentris 4 cm, frekuensi 5 Hz, dan massa *unbalance* 400 gram. Dari informasi tersebut diambil nilai RMSnya yang kemudian dikumpulkan pada tiap variasi massa dan frekuensi untuk dibuat grafik kemudian dibandingkan nilainya dengan hasil percobaan. Nilai RMS dari hasil simulasi untuk jarak eksentris 6 cm, frekuensi 5 Hz, dan massa *unbalance* 400 gram adalah 1.921 m/s^2 . Dari hasil simulasi didapatkan nilai percepatan RMS pada tiap frekuensi dan massa *unbalance* pada tabel 4.5.

Tabel 4.5 Respon percepatan pada simulasi dengan jarak eksentris 6 cm

Frekuensi (Hz)	Percepatan RMS (m/s ²)		
	400 gram	800 gram	1200 gram
5	1.922	3.844	5.766
6	2.751	5.501	8.252
7	3.731	7.462	11.19
8	4.861	9.723	14.58

9	6.143	12.29	18.43
10	7.577	15.15	22.73
11	9.16	18.32	27.48
12	10.89	21.79	32.68
13	12.78	25.56	38.34
14	14.81	29.63	44.44
15	17.01	34.01	51.02

Dari tabel 4.5 didapatkan grafik pada gambar 4.13. Pada grafik tersebut menjelaskan bahwa semakin tinggi nilai frekuensi maka semakin tinggi pula respon percepatan. Kemudian semakin tinggi massa *unbalance* maka semakin tinggi pula respon percepatan.



Gambar 4.13 Respon percepatan pada simulasi dengan jarak eksentris 6 cm

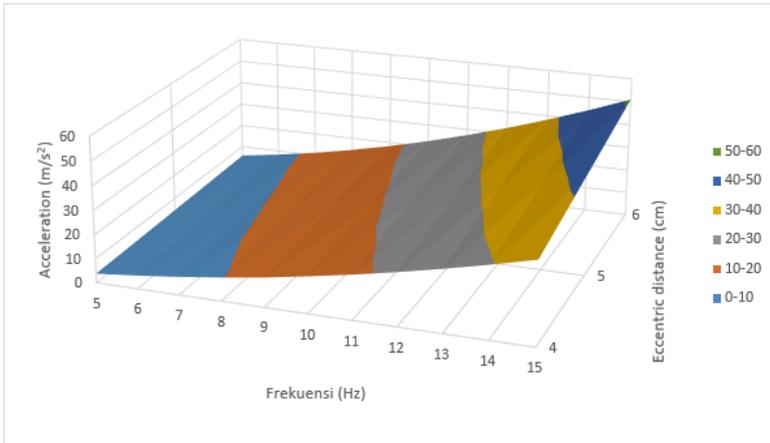
4.2.5. Analisa simulasi respon percepatan pada massa unbalance 1200 gram

Setelah dilakukan simulasi menggunakan software MATLAB dengan variasi jarak eksentris dari 4 cm, 5 cm, dan 6 cm dan mendapatkan hasil seperti pada subbab 4.2.2, 4.2.3, dan 4.2.4, maka hasil tersebut dikelompokkan menjadi satu massa unbalance untuk dilihat perubahan respon percepatan terhadap variasi perubahan jarak eksentris. Pada tabel 4.6 menunjukkan nilai respon percepatan pada massa unbalance 1200 gram dengan jarak eksentris 4 cm, 5 cm, dan 6 cm serta frekuensi 5-15 Hz.

Tabel 4.6 Respon percepatan pada simulasi dengan massa unbalance 1200 gram

Frekuensi (Hz)	Percepatan RMS (m/s ²)		
	4 cm	5 cm	6 cm
5	3.843	4.805	5.766
6	5.501	6.876	8.252
7	7.46	9.324	11.19
8	9.723	12.15	14.58
9	12.19	15.37	18.43
10	15.15	18.94	22.73
11	18.31	22.9	27.48
12	21.79	27.24	32.68
13	25.56	31.95	38.34
14	29.63	37.04	44.44
15	34	42.5	51.02

Dari tabel 4.6 didapatkan grafik pada gambar 4.14. Pada grafik tersebut menjelaskan bahwa semakin tinggi nilai frekuensi maka semakin tinggi pula respon percepatan. Kemudian semakin tinggi jarak eksentris maka semakin tinggi pula respon percepatan.



Gambar 4.14 Respon percepatan pada simulasi dengan massa *unbalance* 1200 gram

4.3. Analisa hasil pengambilan data eksperimen

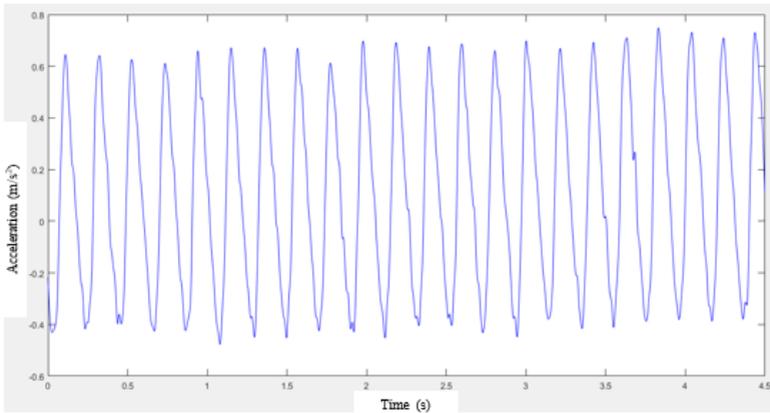
Setelah dilakukan pengambilan data, maka data tersebut diolah dan dilakukan analisis. Pengolahan data dilakukan dengan *software* Microsoft Excel dan juga MATLAB. Data yang didapatkan dari *oscilloscope* tidak dapat langsung digunakan sebagai hasil akhir karena terdapat terlalu banyak *noise* yang muncul pada saat pengujian. *Noise* yang muncul tersebut dapat di minimalkan dengan menggunakan program *filtering* dan *smoothing* yang tersedia dalam *software* MATLAB. Variasi yang dilakukan adalah variasi jarak eksentris 4 cm, 5 cm, dan 6 cm; massa *unbalance* 400 gram, 800 gram, dan 1200 gram; serta frekuensi 5 Hz sampai 15 Hz.

4.3.1. Analisa respon percepatan pada jarak eksentris 4 cm

Respon percepatan *TST* didapatkan dari *probe accelerometer* yang dipasang pada rangka atas *TST* yang ikut bergetar. *Accelerometer* tersebut mengirimkan data ke *inverter* dan sinyal yang diterima diperbesar, sehingga *oscilloscope* dapat

membaca hasil yang didapatkan dari *accelerometer*. Hasil yang didapatkan pada *oscilloscope* berupa voltase, sehingga perlu dilakukan pengolahan lagi dalam *software* Microsoft Excel untuk mendapatkan respon percepatan. Persamaan yang digunakan untuk mendapatkan respon percepatan dari hasil *oscilloscope* ditunjukkan pada persamaan 3.6.

Setelah data dari pengujian diolah dengan mengkonversikan tegangan menjadi percepatan maka didapatkan grafik pada gambar 4.15. Dari pengolahan data tersebut didapatkan nilai percepatan RMS pada tiap frekuensi dan massa *unbalance* yang digunakan untuk membandingkan perbedaan respon percepatan pada tiap variasi jarak eksentris, massa *unbalance* dan frekuensi. Hasil percepatan RMS pada jarak eksentris 4 cm dijabarkan pada tabel 4.6.

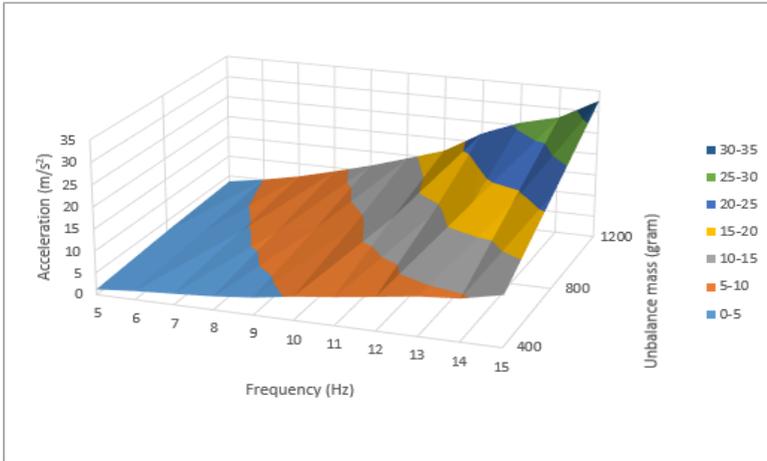


Gambar 4.15 Grafik percepatan terhadap waktu pada jarak eksentris 4 cm, massa *unbalance* 1200 gram, frekuensi 10 Hz

Tabel 4.7 Respon percepatan pada percobaan dengan jarak eksentris 4 cm

Frekuensi (Hz)	Percepatan RMS (m/s ²)		
	400 gram	800 gram	1200 gram
5	1.106211273	2.36962	3.240701
6	1.79959872	3.134063	4.580302
7	2.293228407	4.202876	6.191032
8	2.808410764	5.358395	8.256413
9	3.60568512	6.781043	10.43402
10	4.86019664	8.400618	12.92028
11	5.81317056	11.0245	15.52996
12	6.922582865	12.76874	20.21079
13	8.070283898	16.07082	23.38167
14	8.719175564	17.09542	25.37417
15	10.48385782	20.0652	29.71324

Dari tabel 4.3 didapatkan grafik pada gambar 4.16. Pada grafik tersebut menjelaskan bahwa semakin tinggi nilai frekuensi maka semakin tinggi pula respon percepatan. Kemudian semakin tinggi massa *unbalance* maka semakin tinggi pula respon percepatan *TST*.



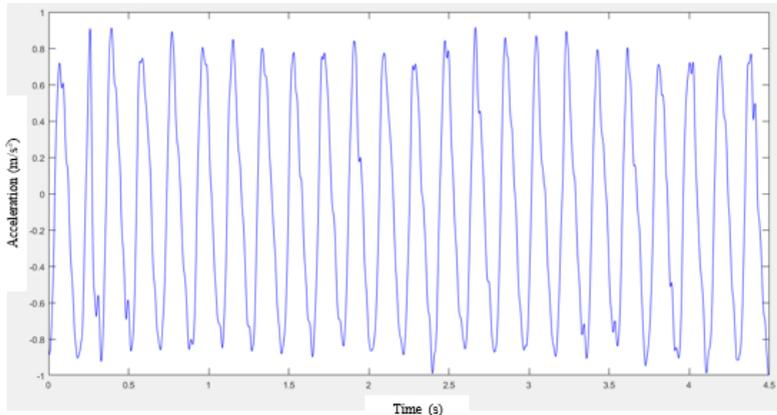
Gambar 4.16 Respon percepatan pada percobaan dengan jarak eksentris 4 cm

4.3.2. Analisa respon percepatan pada jarak eksentris 5 cm

Respon percepatan *TST* didapatkan dari *probe accelerometer* yang dipasang pada rangka atas *TST* yang ikut bergetar. *Accelerometer* tersebut mengirimkan data ke *inverter* dan sinyal yang diterima diperbesar, sehingga *oscilloscope* dapat membaca hasil yang didapatkan dari *accelerometer*. Hasil yang didapatkan pada *oscilloscope* berupa voltase, sehingga perlu dilakukan pengolahan lagi dalam *software* Microsoft Excel untuk mendapatkan respon percepatan. Persamaan yang digunakan untuk mendapatkan respon percepatan dari hasil *oscilloscope* ditunjukkan pada persamaan 3.6.

Setelah data dari pengujian diolah dengan mengkonversikan tegangan menjadi percepatan maka didapatkan grafik pada gambar 4.17. Dari pengolahan data tersebut didapatkan nilai percepatan RMS pada tiap frekuensi dan massa *unbalance* yang digunakan untuk membandingkan perbedaan respon percepatan pada tiap variasi jarak eksentris, massa *unbalance* dan

frekuensi. Hasil percepatan RMS pada jarak eksentris 5 cm dijabarkan pada tabel 4.7.



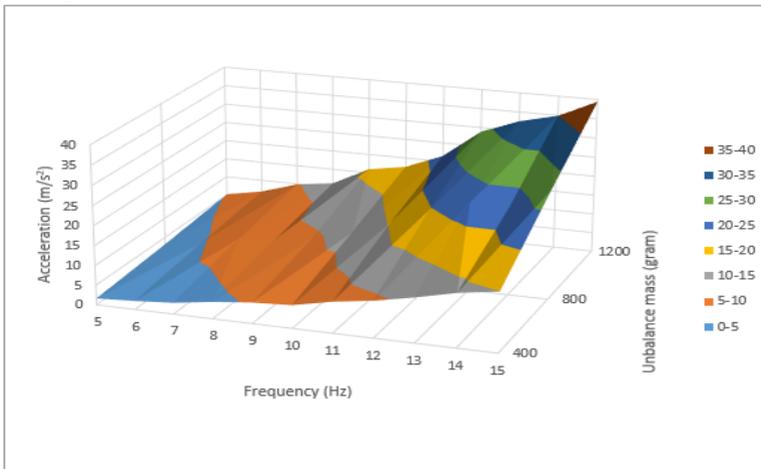
Gambar 4.17 Grafik percepatan terhadap waktu pada jarak eksentris 4 cm, massa *unbalance* 1200 gram, frekuensi 10 Hz

Tabel 4.8 Respon percepatan pada percobaan dengan jarak eksentris 5 cm

Frekuensi (Hz)	Percepatan RMS (m/s^2)		
	400 gram	800 gram	1200 gram
5	1.509955	2.915651	4.655751
6	1.965543	4.292143	6.269268
7	2.61581	6.172376	8.981137
8	3.885694	7.175767	10.16167
9	4.810903	8.569388	14.54391
10	5.291572	10.58127	16.03151
11	7.128349	13.92962	19.582
12	8.420704	18.00996	26.29307

13	10.20611	20.43522	29.61961
14	12.2777	20.52942	31.75438
15	13.61557	25.10272	35.86037

Dari tabel 4.7 didapatkan grafik pada gambar 4.18. Pada grafik tersebut menjelaskan bahwa semakin tinggi nilai frekuensi maka semakin tinggi pula respon percepatan. Kemudian semakin tinggi massa *unbalance* maka semakin tinggi pula respon percepatan *TST*.



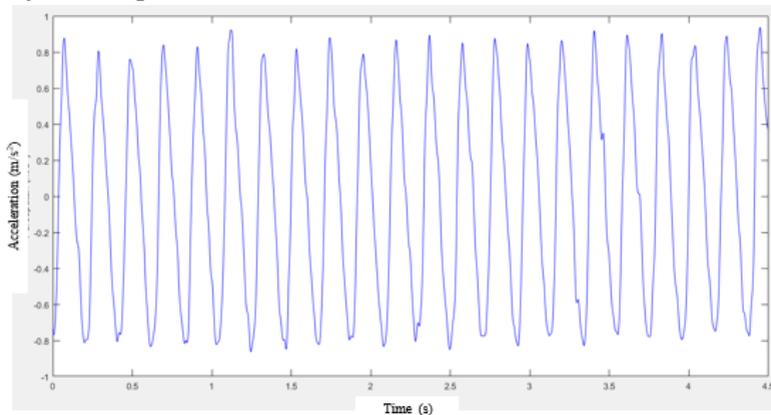
Gambar 4.18 Respon percepatan pada percobaan dengan jarak eksentris 5 cm

4.3.3. Analisa respon percepatan pada jarak eksentris 6 cm

Respon percepatan *TST* didapatkan dari *probe accelerometer* yang dipasang pada rangka atas *TST* yang ikut bergetar. *Accelerometer* tersebut mengirimkan data ke *inverter* dan sinyal yang diterima diperbesar, sehingga *oscilloscope* dapat membaca hasil yang didapatkan dari *accelerometer*. Hasil yang didapatkan pada *oscilloscope* berupa voltase, sehingga perlu

dilakukan pengolahan lagi dalam *software* Microsoft Excel untuk mendapatkan respon percepatan. Persamaan yang digunakan untuk mendapatkan respon percepatan dari hasil *oscilloscope* ditunjukkan pada persamaan 3.6.

Setelah data dari pengujian diolah dengan mengkonversikan tegangan menjadi percepatan maka didapatkan grafik pada gambar 4.19. Dari pengolahan data tersebut didapatkan nilai percepatan RMS pada tiap frekuensi dan massa *unbalance* yang digunakan untuk membandingkan perbedaan respon percepatan pada tiap variasi jarak eksentris, massa *unbalance* dan frekuensi. Hasil percepatan RMS pada jarak eksentris 6 cm dijabarkan pada tabel 4.8.



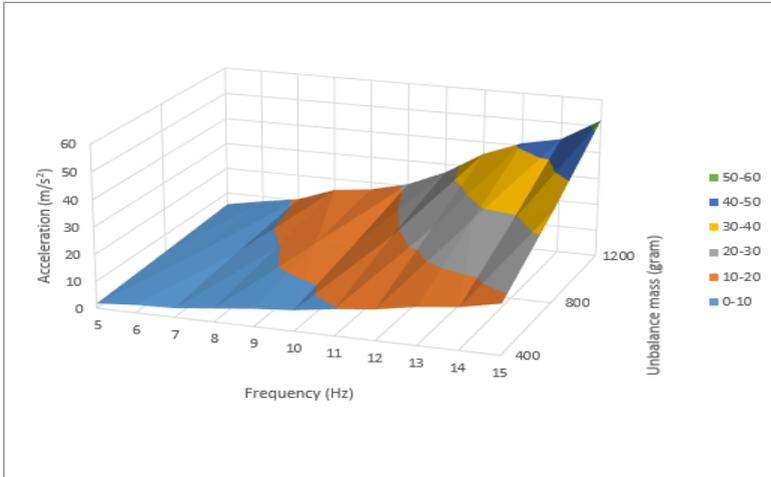
Gambar 4.19 Grafik percepatan terhadap waktu pada jarak eksentris 4 cm, massa *unbalance* 1200 gram, frekuensi 10 Hz

Tabel 4.9 Respon percepatan pada percobaan dengan jarak eksentris 6 cm

Frekuensi (Hz)	Percepatan RMS (m/s^2)		
	400 gram	800 gram	1200 gram
5	1.625487	3.210704	4.951375

6	2.673419	5.160274	7.348011
7	3.101687	6.37524	9.47676
8	4.513155	8.872838	14.15684
9	5.955376	11.77568	15.69851
10	7.002529	12.58521	18.86751
11	8.886386	17.30552	24.41738
12	10.36602	21.20463	32.24042
13	12.68597	25.37008	37.18126
14	14.11655	26.32933	39.86955
15	16.83008	31.24931	47.53248

Dari tabel 4.8 didapatkan grafik pada gambar 4.20. Pada grafik tersebut menjelaskan bahwa semakin tinggi nilai frekuensi maka semakin tinggi pula respon percepatan. Kemudian semakin tinggi massa *unbalance* maka semakin tinggi pula respon percepatan *TST*.



Gambar 4.20 Respon percepatan pada percobaan dengan jarak eksentris 6 cm

4.3.4. Analisa respon percepatan pada massa *unbalance* 1200 gram

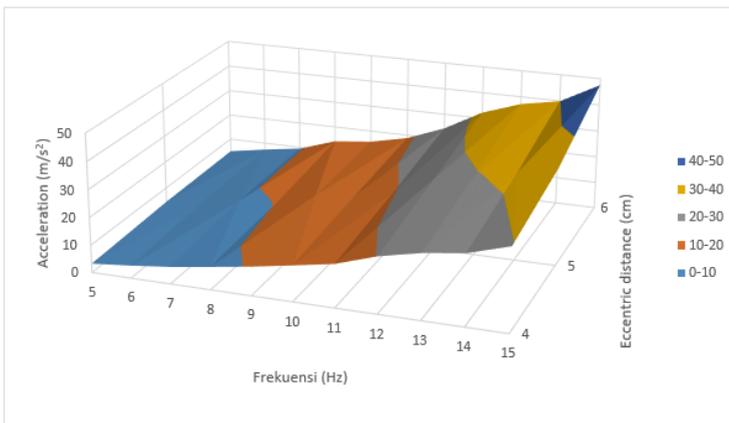
Setelah dilakukan eksperimen dan dilakukan pengolahan data dengan variasi jarak eksentris dari 4 cm, 5 cm, dan 6 cm dan mendapatkan hasil seperti pada subbab 4.3.1, 4.3.2, dan 4.3.3, maka hasil tersebut dikelompokkan menjadi satu massa unbalance untuk dilihat perubahan respon percepatan terhadap variasi perubahan jarak eksentris. Pada tabel 4.10 menunjukkan nilai respon percepatan pada massa unbalance 1200 gram dengan jarak eksentris 4 cm, 5 cm, dan 6 cm serta frekuensi 5-15 Hz.

Tabel 4.10 Respon percepatan pada simulasi dengan massa unbalance 1200 gram

Frekuensi (Hz)	Percepatan RMS (m/s ²)		
	4 cm	5 cm	6 cm
5	3.240701	4.655751	4.951375

6	4.580302	6.269268	7.348011
7	6.191032	8.981137	9.47676
8	8.256413	10.16167	14.15684
9	10.43402	14.54391	15.69851
10	12.92028	16.03151	18.86751
11	15.52996	19.582	24.41738
12	20.21079	26.29307	32.24042
13	23.38167	29.61961	37.18126
14	25.37417	31.75438	39.86955
15	29.71324	35.86037	47.53248

Dari tabel 4.10 didapatkan grafik pada gambar 4.21. Pada grafik tersebut menjelaskan bahwa semakin tinggi nilai frekuensi maka semakin tinggi pula respon percepatan. Kemudian semakin tinggi jarak eksentris maka semakin tinggi pula respon percepatan.



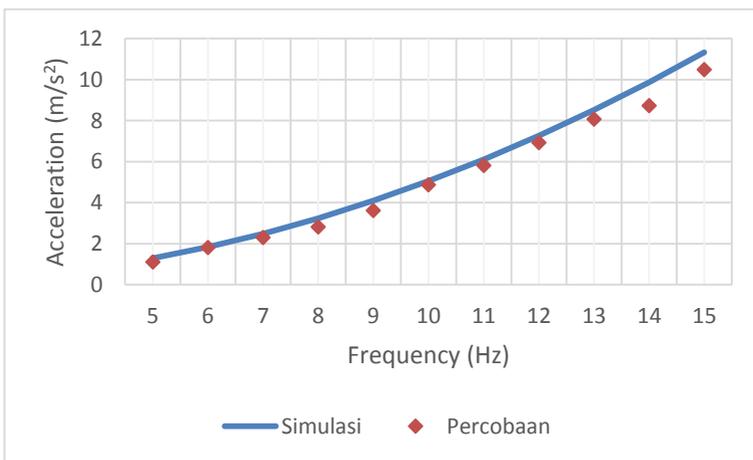
Gambar 4.21 Respon percepatan pada simulasi dengan massa *unbalance* 1200 gram

4.4. Validasi hasil simulasi dengan eksperimen

Validasi data hasil simulasi perlu dilakukan untuk membuktikan bahwa hasil simulasi dapat mewakili kondisi fisik dari sistem *TST*. Validasi data dilakukan dengan pengambilan data pada jarak eksentris 4 cm, 5 cm, dan 6 cm; massa *unbalance* 400 gram, 800 gram, dan 1200 gram; serta rentang frekuensi 5 Hz sampai 15 Hz. Validasi dilakukan untuk mendapatkan berapa persen nilai eror dari perbandingan hasil eksperimen dengan hasil simulasi.

4.4.2. Hasil respon percepatan dengan jarak eksentris 4 cm

4.4.2.1. Hasil respon percepatan dengan massa *unbalance* 400 gram



Gambar 4.22 Grafik perbandingan respon percepatan hasil simulasi dengan percobaan terhadap frekuensi pada jarak eksentris 4 cm dan massa *unbalance* 400 gram

Eksitasi periodik diberikan baik pada simulasi maupun pada eksperimen. Jarak eksentris yang diberikan adalah 4 cm dengan massa *unbalance* 400 gram dan variasi frekuensi 5 Hz

sampai 15 Hz. Berdasarkan gambar 4.22, respon percepatan hasil eksperimen memiliki kecenderungan trendline yang sama dengan hasil simulasi sistem *TST*. Persentase selisih antara hasil simulasi dengan eksperimen dirangkum dalam tabel 4.9. Pada gambar 4.22 terlihat jelas bahwa nilai puncak RMS percepatan dari hasil eksperimen adalah sebesar 10,483 m/s², sedangkan nilai puncak RMS percepatan dari hasil simulasi sebesar 11,33 m/s². Dengan demikian secara perhitungan besar eror yang terjadi pada puncak dari RMS percepatan adalah sebesar:

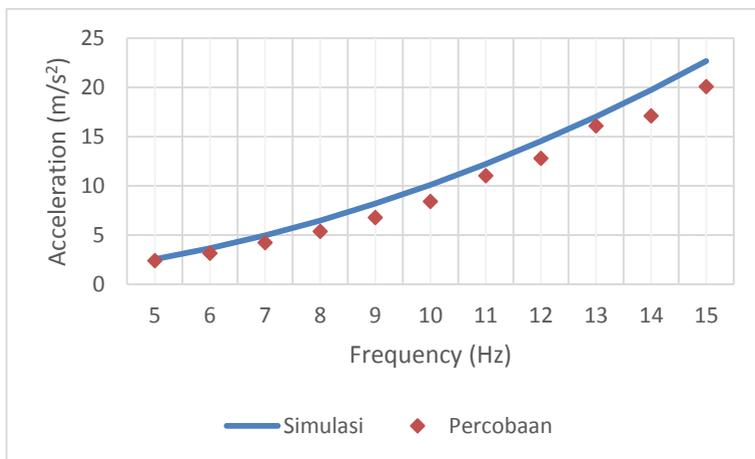
$$\%error = \frac{11,33 - 10,483}{11,33} \times 100\% = 7,47\%$$

Tabel 4.11 Hasil perbandingan RMS percepatan pada jarak eksentris 4 cm dan massa *unbalance* 400 gram

Frekuensi (Hz)	Percepatan		% error
	Simulasi (m/s ²)	Eksperimen (m/s ²)	
5	1.281	1.106	13.64
6	1.834	1.800	1.88
7	2.487	2.293	7.79
8	3.241	2.808	13.35
9	4.095	3.606	11.95
10	5.05	4.860	3.76
11	6.105	5.813	4.78
12	7.263	6.923	4.69
13	8.519	8.070	5.27
14	9.876	8.719	11.71
15	11.33	10.484	7.47
Error rata-rata			7.84

Perbandingan RMS percepatan hasil eksperimen dan simulasi sistem *TST* menunjukkan RMS percepatan pada eksperimen lebih kecil dari pada RMS percepatan simulasi ketika diberikan frekuensi yang semakin besar. Hal ini disebabkan karena pegas yang digunakan pada sistem kerja *TST* memiliki nilai kekakuan yang tidak linear sehingga pada hasil percobaan memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan simulasi ketika frekuensi semakin tinggi. Selain itu struktur *TST* memiliki nilai redaman yang tidak linear sehingga semakin tinggi frekuensi yang diberikan, semakin tinggi pula nilai redamannya sehingga menyebabkan grafik respon percepatan pada percobaan memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan simulasi ketika frekuensinya semakin bertambah.

4.4.2.2. Hasil respon percepatan dengan massa *unbalance* 800 gram



Gambar 4.23 Grafik perbandingan respon percepatan hasil simulasi dengan percobaan terhadap frekuensi pada jarak eksentris 4 cm dan massa *unbalance* 800 gram

Eksitasi periodik diberikan baik pada simulasi maupun pada eksperimen. Jarak eksentris yang diberikan adalah 4 cm dengan massa *unbalance* 800 gram dan variasi frekuensi 5 Hz sampai 15 Hz. Berdasarkan gambar 4.23, respon percepatan hasil eksperimen memiliki kecenderungan trendline yang sama dengan hasil simulasi sistem *TST*. Persentase selisih antara hasil simulasi dengan eksperimen dirangkum dalam tabel 4.10. Pada gambar 4.23 terlihat jelas bahwa nilai puncak RMS percepatan dari hasil eksperimen adalah sebesar 20,605 m/s², sedangkan nilai puncak RMS percepatan dari hasil simulasi sebesar 22,67 m/s². Dengan demikian secara perhitungan besar eror yang terjadi pada puncak dari RMS percepatan adalah sebesar:

$$\%error = \frac{22,67 - 20,605}{22,67} \times 100\% = 11,49\%$$

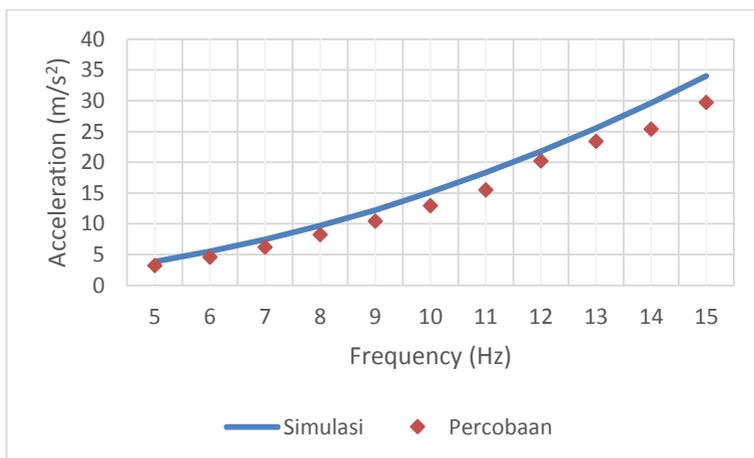
Tabel 4.12 Hasil perbandingan RMS percepatan pada jarak eksentris 4 cm dan massa *unbalance* 800 gram

Frekuensi (Hz)	Percepatan		% error
	Simulasi (m/s ²)	Eksperimen (m/s ²)	
5	2.562	2.370	7.51
6	3.667	3.134	14.53
7	4.973	4.203	15.49
8	6.482	5.358	17.33
9	8.19	6.781	17.20
10	10.1	8.401	16.83
11	12.21	11.024	9.71
12	14.53	12.769	12.12
13	17.04	16.071	5.69
14	19.75	17.095	13.44
15	22.67	20.065	11.49

Error rata-rata	12.85
-----------------	-------

Perbandingan RMS percepatan hasil eksperimen dan simulasi sistem *TST* menunjukkan RMS percepatan pada eksperimen lebih kecil dari pada RMS percepatan simulasi ketika diberikan frekuensi yang semakin besar. Hal ini disebabkan karena pegas yang digunakan pada sistem kerja *TST* memiliki nilai kekakuan yang tidak linear sehingga pada hasil percobaan memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan simulasi ketika frekuensi semakin tinggi. Selain itu struktur *TST* memiliki nilai redaman yang tidak linear sehingga semakin tinggi frekuensi yang diberikan, semakin tinggi pula nilai redamannya sehingga menyebabkan grafik respon percepatan pada percobaan memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan simulasi ketika frekuensinya semakin bertambah.

4.4.2.3. Hasil respon percepatan dengan massa *unbalance* 1200 gram



Gambar 4.24 Grafik perbandingan respon percepatan hasil simulasi dengan percobaan terhadap frekuensi pada jarak eksentris 4 cm dan massa *unbalance* 1200 gram

Eksitasi periodik diberikan baik pada simulasi maupun pada eksperimen. Jarak eksentris yang diberikan adalah 4 cm dengan massa *unbalance* 1200 gram dan variasi frekuensi 5 Hz sampai 15 Hz. Berdasarkan gambar 4.24, respon percepatan hasil eksperimen memiliki kecenderungan trendline yang sama dengan hasil simulasi sistem *TST*. Persentase selisih antara hasil simulasi dengan eksperimen dirangkum dalam tabel 4.11. Pada gambar 4.24 terlihat jelas bahwa nilai puncak RMS percepatan dari hasil eksperimen adalah sebesar 29,713 m/s², sedangkan nilai puncak RMS percepatan dari hasil simulasi sebesar 34 m/s². Dengan demikian secara perhitungan besar eror yang terjadi pada puncak dari RMS percepatan adalah sebesar:

$$\%error = \frac{34 - 29,713}{34} \times 100\% = 13,78\%$$

Tabel 4.13 Hasil perbandingan RMS percepatan pada jarak eksentris 4 cm dan massa *unbalance* 1200 gram

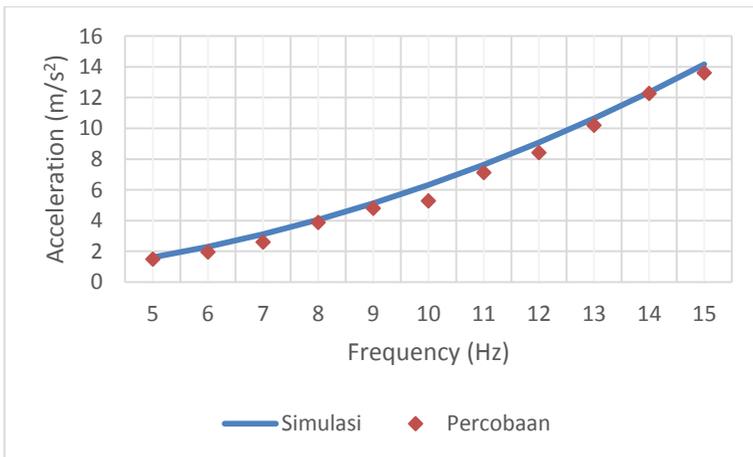
Frekuensi (Hz)	Percepatan		% error
	Simulasi (m/s ²)	Eksperimen (m/s ²)	
5	3.843	3.241	15.67
6	5.501	4.580	16.74
7	7.46	6.191	17.01
8	9.723	8.256	15.08
9	12.19	10.434	14.41
10	15.15	12.920	14.72
11	18.31	15.530	15.18
12	21.79	20.211	7.25
13	25.56	23.382	8.52
14	29.63	25.374	14.36
15	34	29.713	12.61

Error rata-rata	13.78
-----------------	-------

Perbandingan RMS percepatan hasil eksperimen dan simulasi sistem *TST* menunjukkan RMS percepatan pada eksperimen lebih kecil dari pada RMS percepatan simulasi ketika diberikan frekuensi yang semakin besar. Hal ini disebabkan karena pegas yang digunakan pada sistem kerja *TST* memiliki nilai kekakuan yang tidak linear sehingga pada hasil percobaan memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan simulasi ketika frekuensi semakin tinggi. Selain itu struktur *TST* memiliki nilai redaman yang tidak linear sehingga semakin tinggi frekuensi yang diberikan, semakin tinggi pula nilai redamannya sehingga menyebabkan grafik respon percepatan pada percobaan memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan simulasi ketika frekuensinya semakin bertambah.

4.4.3. Hasil respon percepatan dengan jarak eksentris 5 cm

4.4.3.1. Hasil respon percepatan dengan massa *unbalance* 400 gram



Gambar 4.25 Grafik perbandingan respon percepatan hasil simulasi dengan percobaan terhadap frekuensi pada jarak eksentris 5 cm dan massa *unbalance* 400 gram

Eksitasi periodik diberikan baik pada simulasi maupun pada eksperimen. Jarak eksentris yang diberikan adalah 5 cm dengan massa *unbalance* 400 gram dan variasi frekuensi 5 Hz sampai 15 Hz. Berdasarkan gambar 4.25, respon percepatan hasil eksperimen memiliki kecenderungan trendline yang sama dengan hasil simulasi sistem *TST*. Persentase selisih antara hasil simulasi dengan eksperimen dirangkum dalam tabel 4.12. Pada gambar 4.25 terlihat jelas bahwa nilai puncak RMS percepatan dari hasil eksperimen adalah sebesar 13,616 m/s², sedangkan nilai puncak RMS percepatan dari hasil simulasi sebesar 14,17 m/s². Dengan demikian secara perhitungan besar eror yang terjadi pada puncak dari RMS percepatan adalah sebesar:

$$\%error = \frac{14,17 - 13,616}{14,17} \times 100\% = 3,91\%$$

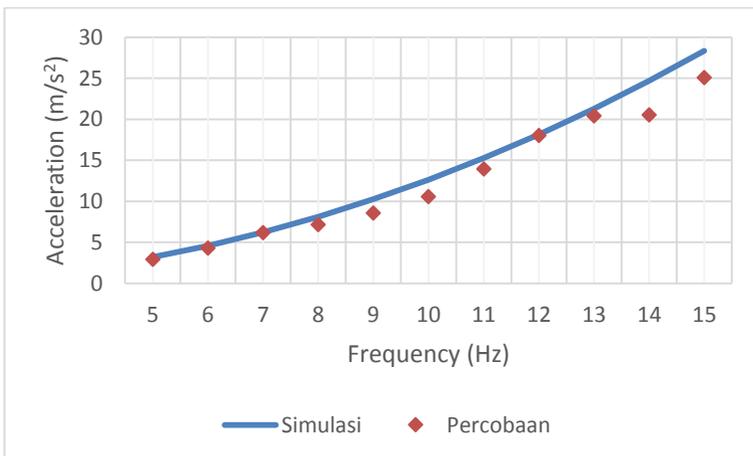
Tabel 4.14 Hasil perbandingan RMS percepatan pada jarak eksentris 5 cm dan massa *unbalance* 400 gram

Frekuensi (Hz)	Percepatan		% error
	Simulasi (m/s ²)	Eksperimen (m/s ²)	
5	1.602	1.510	5.75
6	2.292	1.966	14.24
7	3.108	2.616	15.84
8	4.051	3.886	4.08
9	5.124	4.811	6.11
10	6.312	5.292	16.17
11	7.634	7.128	6.62
12	9.079	8.421	7.25
13	10.65	10.206	4.17
14	12.35	12.278	0.59
15	14.17	13.616	3.91

Error rata-rata	7.70
-----------------	------

Perbandingan RMS percepatan hasil eksperimen dan simulasi sistem *TST* menunjukkan RMS percepatan pada eksperimen lebih kecil dari pada RMS percepatan simulasi ketika diberikan frekuensi yang semakin besar. Hal ini disebabkan karena pegas yang digunakan pada sistem kerja *TST* memiliki nilai kekakuan yang tidak linear sehingga pada hasil percobaan memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan simulasi ketika frekuensi semakin tinggi. Selain itu struktur *TST* memiliki nilai redaman yang tidak linear sehingga semakin tinggi frekuensi yang diberikan, semakin tinggi pula nilai redamannya sehingga menyebabkan grafik respon percepatan pada percobaan memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan simulasi ketika frekuensinya semakin bertambah.

4.4.3.2. Hasil respon percepatan dengan massa *unbalance* 800 gram



Gambar 4.26 Grafik perbandingan respon percepatan hasil simulasi dengan percobaan terhadap frekuensi pada jarak eksentris 5 cm dan massa *unbalance* 800 gram

Eksitasi periodik diberikan baik pada simulasi maupun pada eksperimen. Jarak eksentris yang diberikan adalah 5 cm dengan massa *unbalance* 800 gram dan variasi frekuensi 5 Hz sampai 15 Hz. Berdasarkan gambar 4.26, respon percepatan hasil eksperimen memiliki kecenderungan trendline yang sama dengan hasil simulasi sistem *TST*. Persentase selisih antara hasil simulasi dengan eksperimen dirangkum dalam tabel 4.13. Pada gambar 4.26 terlihat jelas bahwa nilai puncak RMS percepatan dari hasil eksperimen adalah sebesar 25,103 m/s², sedangkan nilai puncak RMS percepatan dari hasil simulasi sebesar 28,33 m/s². Dengan demikian secara perhitungan besar eror yang terjadi pada puncak dari RMS percepatan adalah sebesar:

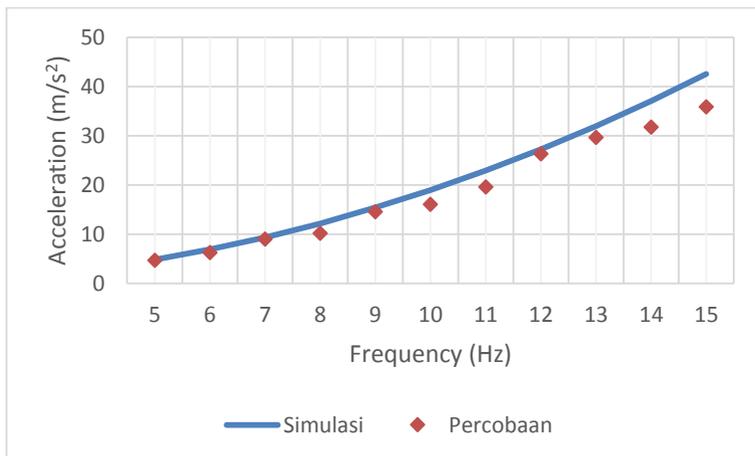
$$\%error = \frac{28,33 - 25,103}{28,33} \times 100\% = 11,39\%$$

Tabel 4.15 Hasil perbandingan RMS percepatan pada jarak eksentris 5 cm dan massa *unbalance* 800 gram

Frekuensi (Hz)	Percepatan		% error
	Simulasi (m/s ²)	Eksperimen (m/s ²)	
5	3.203	2.916	8.97
6	4.584	4.292	6.37
7	6.216	6.172	0.70
8	8.102	7.176	11.43
9	10.25	8.569	16.40
10	12.62	10.581	16.15
11	15.27	13.930	8.78
12	18.16	18.010	0.83
13	21.3	20.435	4.06
14	24.69	20.529	16.85
15	28.33	25.103	11.39

Perbandingan RMS percepatan hasil eksperimen dan simulasi sistem *TST* menunjukkan RMS percepatan pada eksperimen lebih kecil dari pada RMS percepatan simulasi ketika diberikan frekuensi yang semakin besar. Hal ini disebabkan karena pegas yang digunakan pada sistem kerja *TST* memiliki nilai kekakuan yang tidak linear sehingga pada hasil percobaan memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan simulasi ketika frekuensi semakin tinggi. Selain itu struktur *TST* memiliki nilai redaman yang tidak linear sehingga semakin tinggi frekuensi yang diberikan, semakin tinggi pula nilai redamannya sehingga menyebabkan grafik respon percepatan pada percobaan memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan simulasi ketika frekuensinya semakin bertambah.

4.4.3.3. Hasil respon percepatan dengan massa *unbalance* 1200 gram



Gambar 4.27 Grafik perbandingan respon percepatan hasil simulasi dengan percobaan terhadap frekuensi pada jarak eksentris 5 cm dan massa *unbalance* 1200 gram

Eksitasi periodik diberikan baik pada simulasi maupun pada eksperimen. Jarak eksentris yang diberikan adalah 5 cm dengan massa *unbalance* 1200 gram dan variasi frekuensi 5 Hz sampai 15 Hz. Berdasarkan gambar 4.27, respon percepatan hasil eksperimen memiliki kecenderungan trendline yang sama dengan hasil simulasi sistem *TST*. Persentase selisih antara hasil simulasi dengan eksperimen dirangkum dalam tabel 4.14. Pada gambar 4.27 terlihat jelas bahwa nilai puncak RMS percepatan dari hasil eksperimen adalah sebesar $35,86 \text{ m/s}^2$, sedangkan nilai puncak RMS percepatan dari hasil simulasi sebesar $42,5 \text{ m/s}^2$. Dengan demikian secara perhitungan besar eror yang terjadi pada puncak dari RMS percepatan adalah sebesar:

$$\%error = \frac{42,5 - 35,86}{42,5} \times 100\% = 15,62\%$$

Tabel 4.16 Hasil perbandingan RMS percepatan pada jarak eksentris 5 cm dan massa *unbalance* 1200 gram

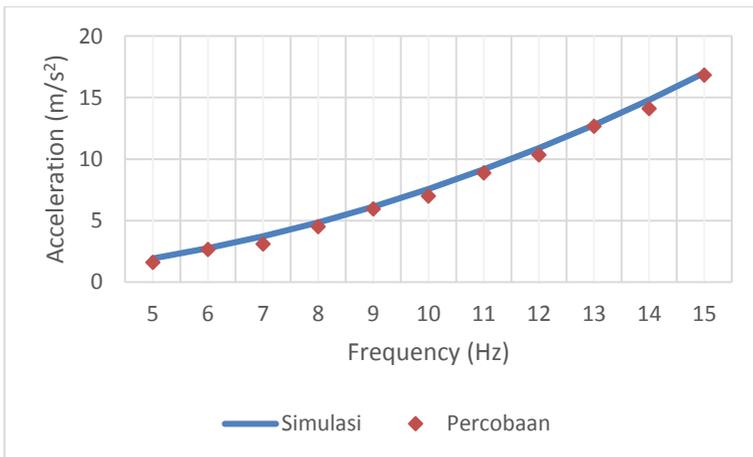
Frekuensi (Hz)	Percepatan		% error
	Simulasi (m/s^2)	Eksperimen (m/s^2)	
5	4.805	4.656	3.11
6	6.876	6.269	8.82
7	9.324	8.981	3.68
8	12.15	10.162	16.36
9	15.37	14.544	5.37
10	18.94	16.032	15.36
11	22.9	19.582	14.49
12	27.24	26.293	3.48
13	31.95	29.620	7.29
14	37.04	31.754	14.27
15	42.5	35.860	15.62

Error rata-rata	9.80
-----------------	------

Perbandingan RMS percepatan hasil eksperimen dan simulasi sistem *TST* menunjukkan RMS percepatan pada eksperimen lebih kecil dari pada RMS percepatan simulasi ketika diberikan frekuensi yang semakin besar. Hal ini disebabkan karena pegas yang digunakan pada sistem kerja *TST* memiliki nilai kekakuan yang tidak linear sehingga pada hasil percobaan memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan simulasi ketika frekuensi semakin tinggi. Selain itu struktur *TST* memiliki nilai redaman yang tidak linear sehingga semakin tinggi frekuensi yang diberikan, semakin tinggi pula nilai redamannya sehingga menyebabkan grafik respon percepatan pada percobaan memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan simulasi ketika frekuensinya semakin bertambah.

4.4.4. Hasil respon percepatan dengan jarak eksentris 6 cm

4.4.4.1. Hasil respon percepatan dengan massa *unbalance* 400 gram



Gambar 4.28 Grafik perbandingan respon percepatan hasil simulasi dengan percobaan terhadap frekuensi pada jarak eksentris 5 cm dan massa *unbalance* 400 gram

Eksitasi periodik diberikan baik pada simulasi maupun pada eksperimen. Jarak eksentris yang diberikan adalah 6 cm dengan massa *unbalance* 400 gram dan variasi frekuensi 5 Hz sampai 15 Hz. Berdasarkan gambar 4.28, respon percepatan hasil eksperimen memiliki kecenderungan trendline yang sama dengan hasil simulasi sistem *TST*. Persentase selisih antara hasil simulasi dengan eksperimen dirangkum dalam tabel 4.15. Pada gambar 4.28 terlihat jelas bahwa nilai puncak RMS percepatan dari hasil eksperimen adalah sebesar 16,83 m/s², sedangkan nilai puncak RMS percepatan dari hasil simulasi sebesar 17,01 m/s². Dengan demikian secara perhitungan besar eror yang terjadi pada puncak dari RMS percepatan adalah sebesar:

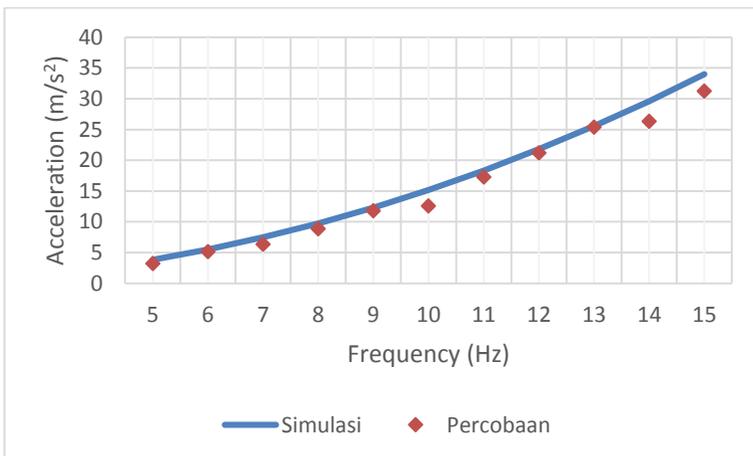
$$\%error = \frac{17,01 - 16,83}{17,01} \times 100\% = 1,06\%$$

Tabel 4.17 Hasil perbandingan RMS percepatan pada jarak eksentris 6 cm dan massa *unbalance* 400 gram

Frekuensi (Hz)	Percepatan		% error
	Simulasi (m/s ²)	Eksperimen (m/s ²)	
5	1.922	1.625	15.43
6	2.751	2.673	2.82
7	3.731	3.102	16.87
8	4.861	4.513	7.16
9	6.143	5.955	3.05
10	7.577	7.003	7.58
11	9.16	8.886	2.99
12	10.89	10.366	4.81
13	12.78	12.686	0.74
14	14.81	14.117	4.68
15	17.01	16.830	1.06

Perbandingan RMS percepatan hasil eksperimen dan simulasi sistem *TST* menunjukkan RMS percepatan pada eksperimen lebih kecil dari pada RMS percepatan simulasi ketika diberikan frekuensi yang semakin besar. Hal ini disebabkan karena pegas yang digunakan pada sistem kerja *TST* memiliki nilai kekakuan yang tidak linear sehingga pada hasil percobaan memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan simulasi ketika frekuensi semakin tinggi. Selain itu struktur *TST* memiliki nilai redaman yang tidak linear sehingga semakin tinggi frekuensi yang diberikan, semakin tinggi pula nilai redamannya sehingga menyebabkan grafik respon percepatan pada percobaan memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan simulasi ketika frekuensinya semakin bertambah.

4.4.4.2. Hasil respon percepatan dengan massa *unbalance* 800 gram



Gambar 4.29 Grafik perbandingan respon percepatan hasil simulasi dengan percobaan terhadap frekuensi pada jarak eksentris 5 cm dan massa *unbalance* 800 gram

Eksitasi periodik diberikan baik pada simulasi maupun pada eksperimen. Jarak eksentris yang diberikan adalah 6 cm dengan massa *unbalance* 800 gram dan variasi frekuensi 5 Hz sampai 15 Hz. Berdasarkan gambar 4.29, respon percepatan hasil eksperimen memiliki kecenderungan trendline yang sama dengan hasil simulasi sistem *TST*. Persentase selisih antara hasil simulasi dengan eksperimen dirangkum dalam tabel 4.16. Pada gambar 4.29 terlihat jelas bahwa nilai puncak RMS percepatan dari hasil eksperimen adalah sebesar 31,249 m/s², sedangkan nilai puncak RMS percepatan dari hasil simulasi sebesar 34,01 m/s². Dengan demikian secara perhitungan besar eror yang terjadi pada puncak dari RMS percepatan adalah sebesar:

$$\%error = \frac{34,01 - 31,249}{34,01} \times 100\% = 8,12\%$$

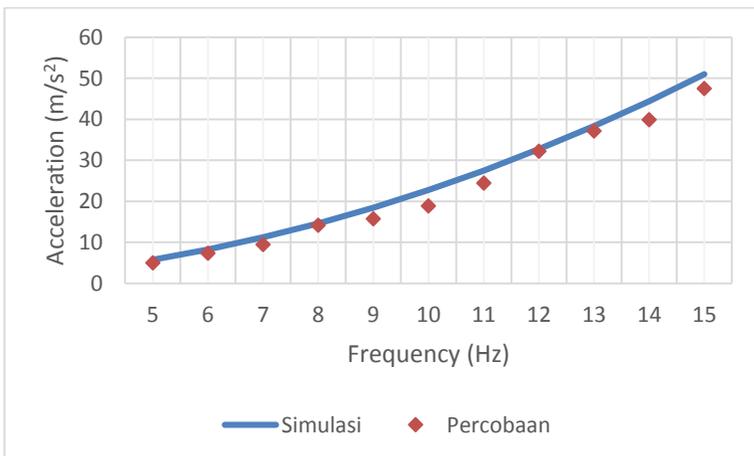
Tabel 4.18 Hasil perbandingan RMS percepatan pada jarak eksentris 6 cm dan massa *unbalance* 800 gram

Frekuensi (Hz)	Percepatan		% error
	Simulasi (m/s ²)	Eksperimen (m/s ²)	
5	3.844	3.211	16.47
6	5.501	5.160	6.19
7	7.462	6.375	14.56
8	9.723	8.873	8.74
9	12.29	11.776	4.18
10	15.15	12.585	16.93
11	18.32	17.306	5.54
12	21.79	21.205	2.69
13	25.56	25.370	0.74
14	29.63	26.329	11.14
15	34.01	31.249	8.12

Error rata-rata	8.66
-----------------	------

Perbandingan RMS percepatan hasil eksperimen dan simulasi sistem *TST* menunjukkan RMS percepatan pada eksperimen lebih kecil dari pada RMS percepatan simulasi ketika diberikan frekuensi yang semakin besar. Hal ini disebabkan karena pegas yang digunakan pada sistem kerja *TST* memiliki nilai kekakuan yang tidak linear sehingga pada hasil percobaan memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan simulasi ketika frekuensi semakin tinggi. Selain itu struktur *TST* memiliki nilai redaman yang tidak linear sehingga semakin tinggi frekuensi yang diberikan, semakin tinggi pula nilai redamannya sehingga menyebabkan grafik respon percepatan pada percobaan memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan simulasi ketika frekuensinya semakin bertambah.

4.4.4.3. Hasil respon percepatan dengan massa *unbalance* 1200 gram



Gambar 4.30 Grafik perbandingan respon percepatan hasil simulasi dengan percobaan terhadap frekuensi pada jarak eksentris 6 cm dan massa *unbalance* 1200 gram

Eksitasi periodik diberikan baik pada simulasi maupun pada eksperimen. Jarak eksentris yang diberikan adalah 6 cm dengan massa *unbalance* 1200 gram dan variasi frekuensi 5 Hz sampai 15 Hz. Berdasarkan gambar 4.30, respon percepatan hasil eksperimen memiliki kecenderungan trendline yang sama dengan hasil simulasi sistem *TST*. Persentase selisih antara hasil simulasi dengan eksperimen dirangkum dalam tabel 4.17. Pada gambar 4.30 terlihat jelas bahwa nilai puncak RMS percepatan dari hasil eksperimen adalah sebesar 47,532 m/s², sedangkan nilai puncak RMS percepatan dari hasil simulasi sebesar 51,02 m/s². Dengan demikian secara perhitungan besar eror yang terjadi pada puncak dari RMS percepatan adalah sebesar:

$$\%error = \frac{51,02 - 47,532}{51,02} \times 100\% = 6,84\%$$

Tabel 4.19 Hasil perbandingan RMS percepatan pada jarak eksentris 6 cm dan massa *unbalance* 1200 gram

Frekuensi (Hz)	Percepatan		% error
	Simulasi (m/s ²)	Eksperimen (m/s ²)	
5	5.766	4.951	14.13
6	8.252	7.348	10.95
7	11.19	9.477	15.31
8	14.58	14.157	2.90
9	18.43	15.699	14.82
10	22.73	18.868	16.99
11	27.48	24.417	11.14
12	32.68	32.240	1.35
13	38.34	37.181	3.02
14	44.44	39.870	10.28
15	51.02	47.532	6.84

Error rata-rata	9.79
-----------------	------

Perbandingan RMS percepatan hasil eksperimen dan simulasi sistem *TST* menunjukkan RMS percepatan pada eksperimen lebih kecil dari pada RMS percepatan simulasi ketika diberikan frekuensi yang semakin besar. Hal ini disebabkan karena pegas yang digunakan pada sistem kerja *TST* memiliki nilai kekakuan yang tidak linear sehingga pada hasil percobaan memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan simulasi ketika frekuensi semakin tinggi. Selain itu struktur *TST* memiliki nilai redaman yang tidak linear sehingga semakin tinggi frekuensi yang diberikan, semakin tinggi pula nilai redamannya sehingga menyebabkan grafik respon percepatan pada percobaan memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan simulasi ketika frekuensinya semakin bertambah.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan, maka kesimpulan yang dapat diambil adalah sebagai berikut:

1. Telah dirancang *Translational Shaking Table* yang sesuai dengan frekuensi dan amplitudo yang dibutuhkan. Dapat digunakan untuk rentang frekuensi 5 Hz sampai 15 Hz. Memiliki gaya hingga 1200 N, serta percepatan maksimal 50 m/s^2 .
2. Variasi massa *unbalance* mempengaruhi respon dinamis *translational shakinng table*. Semakin tinggi massa *unbalance* yang digunakan maka respon percepatan yang dihasilkan semakin tinggi pula sesuai dengan fungsi linier. Pada jarak eksentris 5 cm dan frekuensi 10 Hz dengan massa *unbalance* berturut-turut sebesar 400 gram, 800 gram, dan 1200 gram memiliki respon percepatan berturut-turut sebesar 5,291 m/s^2 ; 10,581 m/s^2 ; dan 16.031 m/s^2 .
3. Variasi jarak eksentris mempengaruhi respon dinamis *translational shakinng table*. Semakin tinggi jarak eksentris yang digunakan maka respon percepatan yang dihasilkan semakin tinggi pula sesuai dengan fungsi linier. Pada massa *unbalance* sebesar 800 gram dan frekuensi 10 Hz dengan jarak eksentris berturut-turut sebesar 4 cm, 5 cm, dan 6 cm memiliki respon percepatan berturut-turut sebesar 8,4 m/s^2 ; 10,581 m/s^2 ; 12,585 m/s^2 .
4. Variasi frekuensi mempengaruhi respon dinamis *translational shakinng table*. Semakin tinggi frekuensi yang digunakan maka respon percepatan yang dihasilkan semakin tinggi pula sesuai dengan fungsi kuadrat. Pada jarak eksentris sebesar 4 cm dan massa *unbalance* sebesar 1200 gram dengan rentang frekuensi

5 Hz sampai 15 Hz memiliki respon percepatan berturut-turut 1,625; 2,673; 3,102; 4,513; 5,955; 7,003; 8,886; 10,366; 12,686; 14.117; 16,830 m/s².

5.2. Saran

Saran-saran yang dapat diberikan untuk pengembangan penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

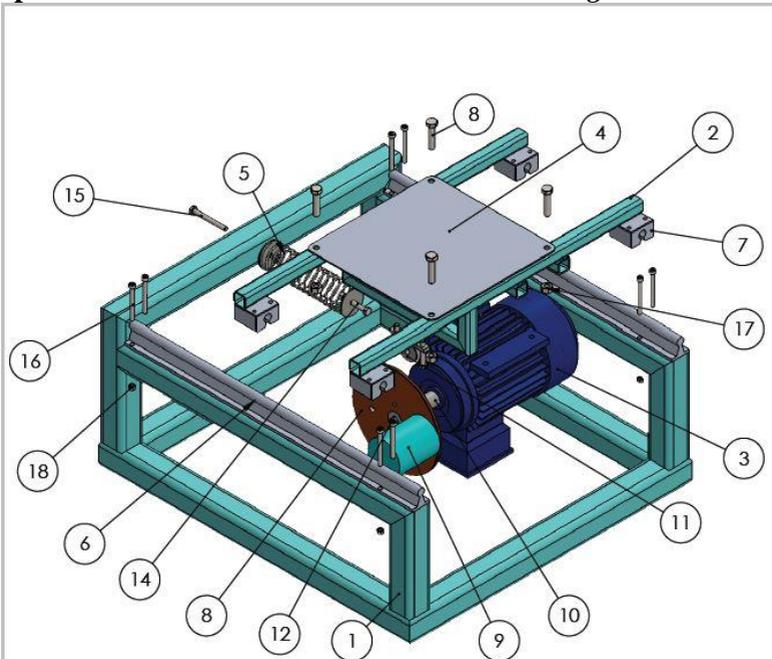
1. Dalam perakitan linear rail bearing memerlukan kepresisian yang tinggi karena apabila rail kanan dan kiri tidak sejajar maka akan memiliki nilai redaman yang berbeda di setiap titiknya.
2. Pemasangan piringan sensor *octocoupler* perlu dipasang satu pusat putaran dengan poros sehingga pembacaan frekuensi putaran lebih akurat.

DAFTAR PUSTAKA

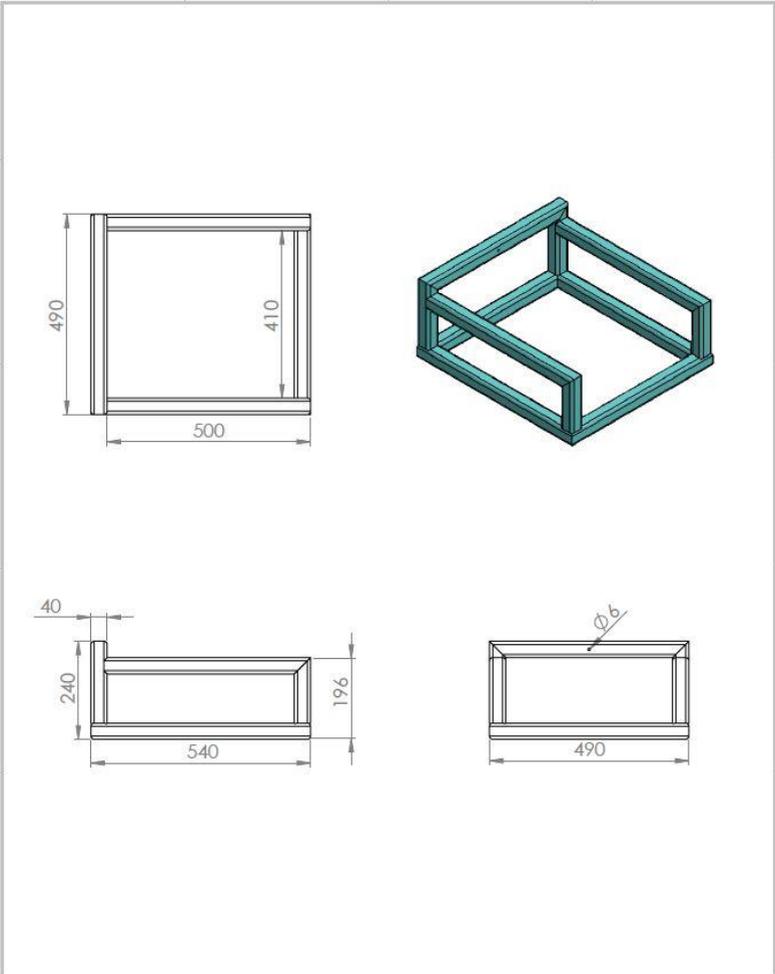
- [1] J. P. Conte, "Large High Performance Outdoor Shake Table," dalam *Engineering Mechanics Conference*, Delaware, 2004.
- [2] H. Dwiarti, "Pengembangan Sistem Isolasi Seismik pada Struktur Bangunan yang Dikenai Beban Gempa sebagai Solusi untuk Membatasi Respon Dinamik," *Jurnal Teknik Sipil*, 2012.
- [3] N. Anekar, V. Ruiwale, S. Nimbalkar dan P. Rao, "DESIGN AND TESTING OF UNBALANCED MASS MECHANICAL VIBRATION EXCITER," *International Journal of Research in Engineering and Technology*, vol. 03, no. 08, p. 107, 2014.
- [4] C. M. Harris dan A. G., Harris" Shock and Vibration Handbook, California: McGraw-Hill, 2002.
- [5] P. A., V. S., P. S., B. A. dan S. K., "Design and Fabrication of Mechanical Vibration Exciter," *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)*, vol. 7, pp. 58-75, 2016.
- [6] J. Pluta dan P. Orkisz, "Bi-axial exciter of mechanical vibrations," p. 568, 2012.
- [7] P. Righettini, R. Strada, S. Valilou dan E. Khademolama, "Gray-box acceleration modeling of an electro hydraulic servo shaking," *2017 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, p. 1388, 2017.
- [8] S. S. RAO, Mechanical Vibration, Prentice Hall: University of Miami, 2011.

Halaman ini sengaja dikosongkan

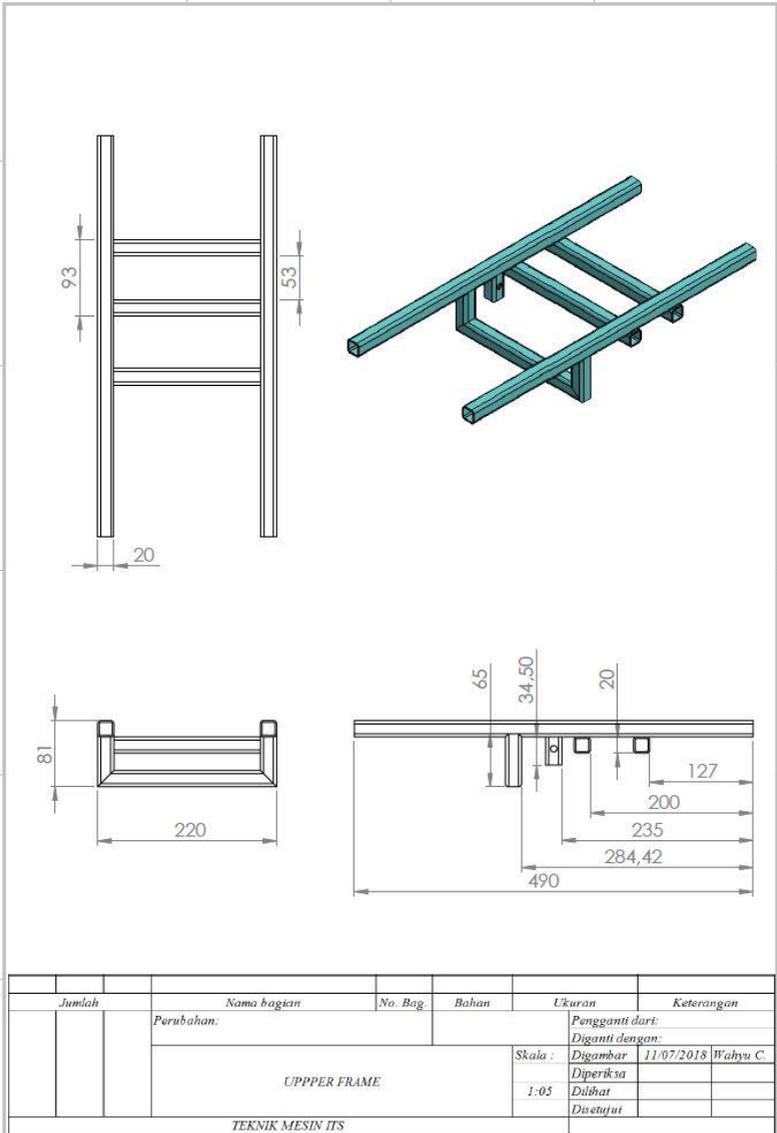
Lampiran 1 : Gambar teknik *Translational Shaking Table*

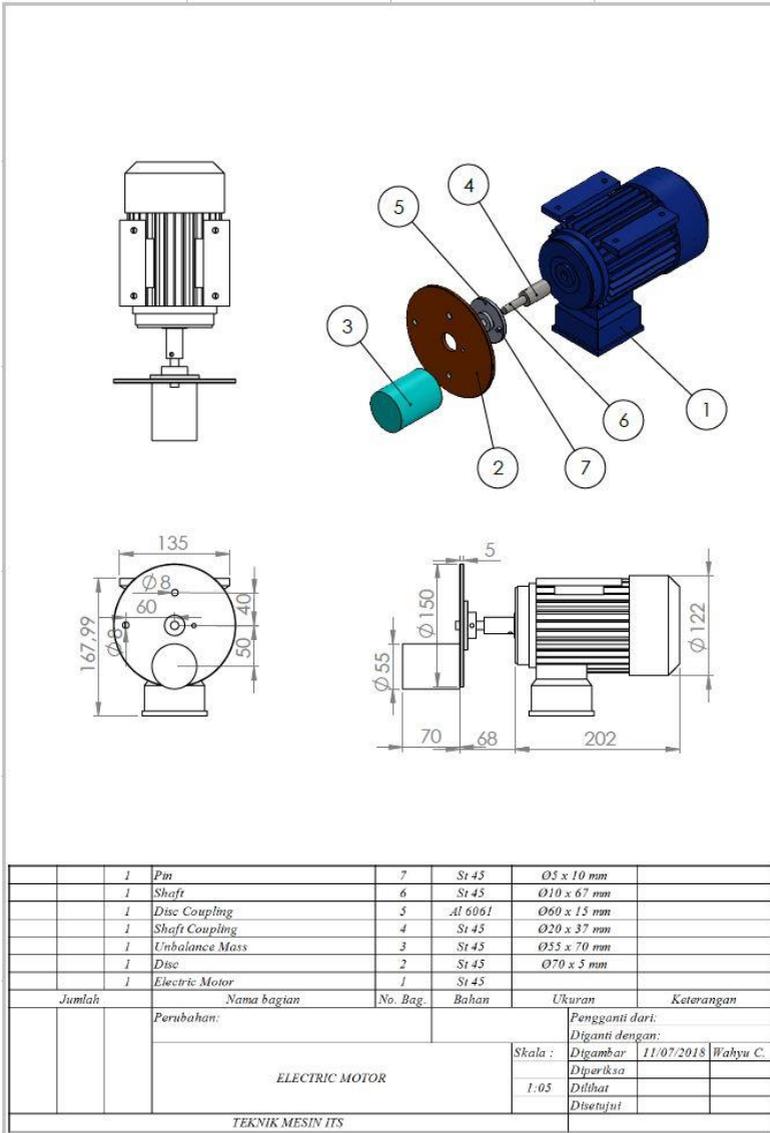


	12	M6 Nut	18	St 45			
	4	M8 Nut	17	St 45			
	8	M6 Bolt	16	St 45	50 mm		
	1	M6 Bolt	15	St 45	55 mm		
	3	M6 Bolt	14	St 45	35 mm		
	4	M8 Bolt	13	St 45	35 mm		
	1	Shaft	12	St 45	Ø10 x 67 mm		
	1	Block Bearing	11	St 45			
	1	Coupling	10	St 46	Ø20 x 37 mm		
	1	Unbalance Mass	9	St 45	Ø55 x 70 mm		
	1	Disc	8	St 45	Ø70 x 5 mm		
	4	Linear Bearing	7	Al 6061	40 x 40 x 24 mm		
	2	Bearing Rail	6	Al 6061	500 mm		
	1	Spring	5	St 45	Ø40 x 140 mm		
	1	Plate	4	Al 6061	220 x 220 x 2 mm		
	1	Electric Motor	3	St 45			
	1	Upper Frame	2	St 45	490 x 220 x 81 mm		
	1	Lower Frame	1	St 45	540 x 490 x 240 mm		
	Jumlah	Nama bagian	No. Bag.	Bahan	Ukuran	Keterangan	
		Perubahan:				Pengganti dari:	
						Diganti dengan:	
					Skala :	Digambar 11/07/2018 Wahyu C.	
						Diperiksa	
						Dilihat	
						Disetujui	
		TRANSLATIONAL SHAKING TABLE					

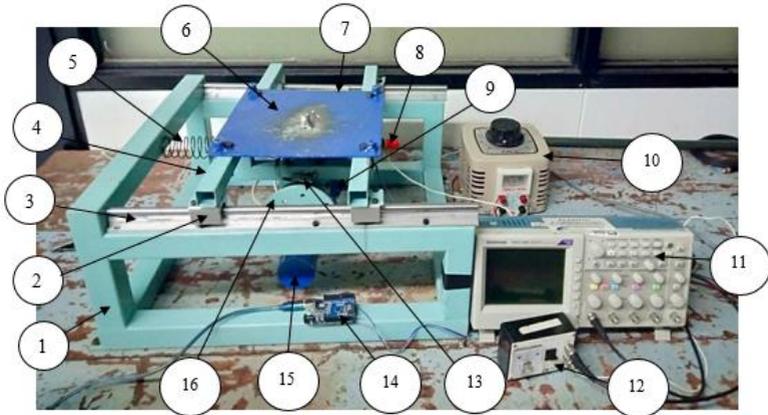


Jumlah	Nama bagian	No. Bag.	Bahan	Ukuran	Keterangan	
	Perubahan:				Pengganti dari:	
	LOWER FRAME				Diganti dengan:	
				Skala :	Digambar 11/07/2018 Wahyu C.	
				1:10	Diperiksa	
					Dilihat	
					Disetujui	
TEKNIK MESIN ITS						





Lampiran 2 : Peralatan kerja *Translational Shaking Table*



Keterangan :

1. Rangka dasar *TST*
2. Linear bearing
3. Rail
4. Rangka atas *TST*
5. Pegas
6. Plat
7. Kapasitor
8. *Probe accelerometer*
9. Motor listrik
10. Voltage regulator
11. Oscilloscope
12. Inverter
13. Octocoupler
14. Arduino
15. Massa *unbalance*
16. Piringan

Halaman ini sengaja dikosongkan

Lampiran 3 : Pengukuran nilai massa eksetris menggunakan neraca

Gambar 1. Massa *unbalance* pertama yaitu 400 gram



Gambar 2. Massa *unbalance* kedua yaitu 800 gram



Gambar 3. Massa *unbalance* ketiga yaitu 1200 gram



Gambar 4. Massa *Translational Shaking Table* yang bergetar yaitu 9,6 kg

Lampiran 4 : Tabel nilai percepatan (m/s^2) dengan berbagai macam variasi jarak eksentris, massa *unbalance*, serta frekuensi

		Percepatan (m/s^2)											
Jarak eksentris (cm)		4				5				6			
Massa <i>unbalance</i> (gram)		400	800	1200	400	800	1200	400	800	1200	400	800	1200
Frekuensi (Hz)													
5	1.106	2.370	3.241	1.510	2.916	4.656	1.625	3.211	4.951				
6	1.800	3.134	4.580	1.966	4.292	6.269	2.673	5.160	7.348				
7	2.293	4.203	6.191	2.616	6.172	8.981	3.102	6.375	9.477				
8	2.808	5.358	8.256	3.886	7.176	10.162	4.513	8.873	14.157				
9	3.606	6.781	10.434	4.811	8.569	14.544	5.955	11.776	15.699				
10	4.860	8.401	12.920	5.292	10.581	16.032	7.003	12.585	18.868				
11	5.813	11.024	15.530	7.128	13.930	19.582	8.886	17.306	24.417				
12	6.923	12.769	20.211	8.421	18.010	26.293	10.366	21.205	32.240				
13	8.070	16.071	23.382	10.206	20.435	29.620	12.686	25.370	37.181				
14	8.719	17.095	25.374	12.278	20.529	31.754	14.117	26.329	39.870				
15	10.484	20.065	29.713	13.616	25.103	35.860	16.830	31.249	47.532				

Halaman ini sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Wahyu Cahyo Utomo yang akrab disapa Cahyo. Penulis merupakan anak kedua dari dua bersaudara, terlahir di Kabupaten Kediri pada tanggal 18 Juli 1995. Penulis menempuh pendidikan di MI Muhammadiyah 1 Pare lulus tahun 2008, SMPN 2 Pare lulus tahun 2011, dan SMAN 2 Pare, lulus tahun 2014. Pendidikan sarjana ditempuh di Jurusan Teknik Mesin ITS melalui jalur SBMPTN 2014. Selama aktif menjadi mahasiswa, penulis bergabung dalam organisasi kemahasiswaan Lembaga Bengkel Mahasiswa Mesin-ITS selama periode 2015-2018 sebagai Staff dalam Divisi Umum. Selain itu, penulis juga tergabung dalam kegiatan mahasiswa ITS Team Sapuangin selama periode 2016-2018. Penulis tergabung dalam divisi *vehicle dynamic* pada periode 2016-2017 dan sebagai *Technical Manager* pada periode 2017-2018. Selain aktif dalam berorganisasi, penulis juga aktif dalam kegiatan akademik sebagai asisten Laboratorium Vibrasi dan Sistem Dinamis selama periode 2017-2018. Bidang minat penulis dalam mengerjakan tugas akhir adalah Desain. Penulis dapat dihubungi di email wahyucahyo1995@gmail.com.

Halaman ini sengaja dikosongkan