

TUGAS AKHIR - TM 141585

**ANALISIS PENGARUH PERUBAHAN DIAMETER
ORIFICE DAN POSISI PELETAKAN *TUNED LIQUID
COLUMN DAMPER (TLCD)* TERHADAP RESPON
DINAMIS MODEL STRUKTUR BANGUNAN
BERTINGKAT**

IMELDA CHRISTI
NRP 0211144000090

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

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



TUGAS AKHIR – TM141585

**ANALISIS PENGARUH PERUBAHAN DIAMETER
ORIFICE DAN POSISI PELETAKAN *TUNED LIQUID
COLUMN DAMPER (TLCD)* TERHADAP RESPON
DINAMIS MODEL STRUKTUR BANGUNAN
BERTINGKAT**

IMELDA CHRISTI

NRP. 0211144000090

Dosen Pembimbing:

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

PROGRAM SARJANA

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA 2018



FINAL PROJECT – TM141585

**EFFECT ANALYSIS OF VARIATION IN ORIFICE
DIAMETER AND TUNED LIQUID COLUMN DAMPER
(TLCD) POSITION ON DYNAMIC RESPONSE OF
MULTILEVEL BUILDING STRUCTURE MODEL**

IMELDA CHRISTI

NRP. 0211144000090

Advisory Lecturer

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

BACHELOR PROGRAM

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY

SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY

SURABAYA 2018

**ANALISIS PENGARUH PERUBAHAN DIAMETER
ORIFICE DAN POSISI PELETAKAN TUNED LIQUID
COLUMN DAMPER (TLCD) TERHADAP RESPON
DINAMIS MODEL STRUKTUR BANGUNAN
BERTINGKAT**

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 :

IMELDA CHRISTI
NRP. 0211144000090

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. Ir. Julendra Bambang Ariatedja, MT (Penguji III)
NIP. 196807061999031004

SURABAYA

JULI, 2018

Analisis Pengaruh Perubahan Diameter *Orifice* dan Posisi Peletakan *Tuned Liquid Column Damper* (TLCD) terhadap Respon Dinamis Model Struktur Bangunan Bertingkat

Nama Mahasiswa : Imelda Christi
NRP : 0211144000090
Jurusan : Teknik Mesin FTI - ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Harus Laksana Guntur, ST.,
M.Eng.

Abstrak

Seiring dengan perkembangan zaman, pembangunan termasuk salah satu aspek kehidupan yang turut berkembang. Perkembangannya dapat dilihat dari bentuk dan struktur tinggi suatu bangunan yang berdiri sekarang. Indonesia merupakan salah satu negara yang memiliki jumlah bangunan yang cukup banyak. Selain itu, cukup tingginya potensi gempa yang terjadi membuat Indonesia memerlukan perhatian lebih untuk bangunannya, karena ketika suatu sistem diberikan beban dinamik yang terus menerus akan mengalami failure. Di Indonesia memiliki pedoman atau standar dalam membangun gedung, namun hal itu hanya dapat digunakan pada saat gedung baru akan dibangun, sehingga diperlukan alternatif lain yang dapat digunakan atau diaplikasikan pada struktur bangunan yang sudah berdiri. Tuned liquid column damper (TLCD) merupakan salah satu solusi dapat digunakan untuk mengontrol getaran bangunan. TLCD merupakan salah satu contoh peredam pasif yang sistem kerjanya berbasis pada pergerakan massa fluida didalam pipa serta headloss yang terjadi akibat gesekan pada permukaan pipa serta orifice.

Pada penelitian ini dilakukan simulasi dan eksperimen pada model struktur bangunan bertingkat. Simulasi dilakukan menggunakan Matlab Simulink. Pertama akan dilakukan simulasi

model struktur bangunan bertingkat tanpa penambahan TLCD lalu dilanjutkan dengan simulasi model struktur bangunan bertingkat dengan penambahan TLCD. Adapun variasi yang akan dilakukan pada simulasi antara lain variasi frekuensi dengan range 7 – 9 Hz dengan kenaikan 1 Hz, variasi ratio massa, variasi diameter orifice 1.575 cm, 1.05 cm, 0.525 cm, dan variasi posisi peletakan TLCD pada model struktur bangunan bertingkat dengan TLCD. Pada simulasi digunakan input berupa input sinusoidal. Selain itu dilakukan eksperimen untuk bahan banding hasil teoritis dengan hasil pada kondisi nyata. Untuk melakukan eksperimen, dibutuhkan beberapa macam alat antara lain pipa, lem, elbow 90, plat, batang silinder dan accelerometer. Pada eksperimen akan dilakukan eksperimen model struktur bangunan tanpa penambahan dan dengan penambahan TLCD dan juga variasi ratio massa dan frekuensi kerja dari table shaker.

Dari hasil penelitian pada model struktur bangunan bertingkat didapatkan hasil bahwa penambahan TLCD mampu mereduksi lebih baik ketika ratio massanya lebih besar, yaitu sebesar 60.84%. pada ratio massa 7%. Selain itu posisi peletakan TLCD yang paling baik adalah TLCD1 yaitu saat TLCD diletakkan pada struktur tingkat 1., reduksi yang dihasilkan sebesar 60.84% pada struktur 1 dan struktur 2 sebesar 60.02%. Serta penggunaan diameter orifice yang semakin kecil akan menghasilkan reduksi yang semakin besar. Pada frekuensi kerja 9 Hz penurunan nilai percepatan pada saat diameter 1.575 cm sebesar 43.4% dan pada saat diameter 0.575 cm terjadi reduksi percepatan sebesar 44.25%.

Kata kunci: Getaran, Orifice, Peredam, TLCD.

Effect Analysis of Variations in Orifice Diameter and Tuned Liquid Column Damper (TLCD) Position on Dynamic Response of Multilevel Building Structure Model

Name : Imelda Christi
NRP : 0211144000090
Departement : Teknik Mesin FTI - ITS
Advisory Lecturer : Dr. Harus Laksana Guntur, ST., M.Eng.

Abstract

The civil construction is one of the most developed engineering as the society progress. The shape and height of modern building are faithful reflection of its engineering advancement. Indonesia is one of the country with large number of tall building within cities. Moreover, high earthquake potential compel a higher consideration regarding the building safety. This was due to inevitable failure of structures when a continuous dynamic force are being applied. Therefore, Indonesia Government issued guidelines and standards concerning building construction. However, those are only relevant to erection of new buildings. Hence, applicable alternatives are required to manage the problem in existing buildings. Tuned liquid column damper (TLCD) is one of solution which can be utilize as a vibration control device. As passive damper, its basic working principle relies on fluid mass flow inside pipe and headloss generated from the friction force of fluid with both pipe surface and orifice. This research perform two different approaches through software simulation and experiment with intention of comparing the result. The experiment was conducted using a model of multilevel structure while the simulation was performed by using Matlab Simulink software. Furthermore, two main conditions applied in

this research were building with TLCD and building without TLCD, with frequency, mass ratio, TLCD position, and orifice diameter act as variables. Frequency range were set between 7 – 9 Hz in 1 Hz increment and orifice diameter were 1.575 cm, 1.05 cm, 0.525 cm.

The result suggested that the addition of TLCD with higher mass ratio could reduce the impact of vibration, which showed 60.84% reduction when 7% mass ratio was used. In addition, the TLCD show the best reduction capability when positioned on TLCD1, with 60.84% reduction in structure 1 and 60.02% in structure 2. Moreover, the smaller orifice diameter resulted in greater acceleration reduction of 44.25% using 0.575 cm and 43.4% reduction using 1.575 cm at 9 Hz working frequency.

Kata kunci: Vibration, Orifice, Damper, TLCD.

KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa karena atas pertolongan-Nya penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul **“ANALISIS PENGARUH PERUBAHAN DIAMETER *ORIFICE* DAN POSISI PELETAKAN TUNED LIQUID COLUMN DAMPER (TLCD) TERHADAP RESPON DINAMIS MODEL STRUKTUR BANGUNAN BERTINGKAT“** dengan baik. Tugas Akhir ini ditulis untuk memenuhi syarat memperoleh gelar Sarjana di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Selama proses penulisan dan penyelesaian Tugas Akhir ini, penulis tidak lepas dari bimbingan dan bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, Penulis menyampaikan terimakasih yang sebesar besarnya kepada semua pihak yang telah membantu dalam menyelesaikan laporan ini terutama kepada:

1. Keluarga penulis, terutama untuk Orangtua penulis yaitu Bapak Binsar Hutauruk dan Ibu Rolan Tiur. Saudari dan Saudara saya yaitu Elysa Margaret S.T, Cindy Angelica, dan Kevin Timothy Adiel yang selalu mendoakan dan mendukung saya dalam mengerjakan Tugas Akhir ini.
2. Bapak Dr.Eng. Harus Laksana Guntur ST., M.Eng. sebagai dosen pembimbing yang selalu memberikan bimbingan dan dukungan sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini
3. Ibu Dr. Wiwiek Hendrowati ST.,MT., Ibu Aida Annisa Amin Daman ST., MT., Bapak Ir. Julendra Bambang Ariatedja,. MT sebagai dosen penguji seminar dan sidang yang telah membimbing dan memberikan saran yang baik kepada penulis.
4. Dosen dan karyawan yang telah memberikan ilmu selama penulis menjalankan pendidikan di kampus Teknik Mesin.

5. Hadiyan Erawan yang selalu membantu, menemani, menghibur, dan mendukung penulis selama di Teknik Mesin.
6. Rachma, Rasyidah, Junaida, Danang, Tamara, dan Evina yang telah selalu ada untuk menemani dan mendengarkan penulis.
7. Rozina, Faradilla, dan Syaldiles yang telah mengajari saya arti sabar dan mendukung penulis dalam menyelesaikan tugas akhir.
8. Chika, Alaika, Mbak Ajeng, Mbak Lisa, Boni. Cahyo, Yoga yang telah menghibur dan mendukung untuk penulis menyelesaikan tugas akhir.
9. Teman teman di Departemen Teknik Mesin, khususnya untuk angkatan 2014 (M57) dan SC 14 yang telah menemani dan mewarnai kehidupan di kampus dari awal di Teknik Mesin hingga sekarang.
10. Serta semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu, yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.

Penulis berharap Tugas Akhir ini dapat bermanfaat untuk para pembaca dan dapat diaplikasikan dalam penentuan peredam. Penulis menyadari bahwa terdapat kekurangan dalam penulisan dan analisis Tugas Akhir, sehingga kritik dan saran sangat diharapkan untuk menyempurnakan Tugas Akhir ini.

Surabaya, Juli 2018

Penulis

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xvi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan.....	4
1.5 Manfaat.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 <i>Tuned Liquid Column Damper</i> dengan Variasi <i>Mass Ratio</i> , <i>Length Ratio</i> dan <i>Frequency Ratio</i>	5
2.2 Eksperimen <i>Tuned Liquid Column Damper</i>	10
2.3 <i>Tuned Liquid Column Damper</i> dengan Variasi Massa dan Frekuensi pada Turbin Angin	12
2.4 Eksperimen <i>Tuned Liquid Damper</i>	14
2.5 Getaran	19
2.5.1 <i>Damper</i>	20
2.5.2 Kekakuan.....	21

2.6	<i>Multidegree of Freedom Systems</i>	22
2.7	<i>Logarithmic Decrement</i>	24
2.8	<i>Tuned Liquid Column Damper (TLCD)</i>	25
2.9	<i>Internal Flow</i>	26
2.9.1	<i>Head Loss</i>	26
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		29
3.1	Metode Penelitian	29
3.2	Penjelasan Diagram Alir	30
3.2.1	Studi Literatur	30
3.2.2	Identifikasi Masalah	30
3.2.3	Eksperimen	30
3.2.3.1	Perancangan Model Eksperimen	31
3.2.3.2	Penyusunan Model Eksperimen	34
3.2.3.3	Melakukan Eksperimen	34
3.2.3.4	Analisis Hasil Eksperimen	35
3.2.4	Simulasi	36
3.2.4.1	Pemodelan Sistem Dinamis	37
3.2.4.2	Menentukan Persamaan Gerak dan <i>State Variable</i>	40
3.2.4.2.1	Model Struktur Bangunan Bertingkat Tanpa Penambahan TLCD (NTLCD)	40
3.2.4.2.2	Model Struktur Bangunan Bertingkat dengan Penambahan TLCD pada struktur tingkat 1 (TLCD1)	43

3.2.4.2.3	Model Struktur Bangunan Bertingkat dengan Penambahan TLCD pada struktur tingkat 2 (TLCD2)	46
3.2.4.3	Pembuatan blok diagram	48
3.2.4.4	Menentukan parameter	48
3.2.4.4.1	Menentukan Nilai Peredam dan Kekakuan	51
3.2.4.5	Melakukan Simulasi	54
3.2.4.6	Hasil Simulasi	55
3.2.5	Analisis Data Simulasi	55
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN		57
4.1	Pemodelan Sistem	57
4.1.1	Pemodelan Sistem Model Struktur Bangunan Bertingkat	58
4.1.1.1	Tanpa Penambahan TLCD (NTLCD)	59
4.1.1.2	Dengan penambahan TLCD pada struktur tingkat 1 (TLCD1)	61
4.1.1.3	Dengan penambahan TLCD pada struktur tingkat 2 (TLCD2)	64
4.2	Diagram Blok	69
4.3	Analisa dan Pembahasan Pemodelan Sistem	71
4.3.1	Analisis Tanpa TLCD	72
4.3.2	Analisis dengan TLCD pada Ratio Massa 5%	75
4.3.2.1	Hasil Simulasi pada Ratio Massa 5%	75
4.3.2.2	Hasil Eksperimen pada Ratio Massa 5%	78

4.3.2.3	Perbandingan pada Ratio Massa 5%.....	80
4.3.3	Analisis Hasil pada Ratio Massa 7%	82
4.3.3.1	Hasil Simulasi pada Ratio Massa 7%	82
4.3.3.2	Hasil Eksperimen pada Ratio Massa 7%	86
4.3.3.3	Perbandingan pada Ratio Massa 7%.....	88
4.3.3	Analisis Variasi <i>Orifice</i> TLCD1.....	90
4.3.4	Analisis Variasi <i>Orifice</i> TLCD2.....	95
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		101
5.1	Kesimpulan.....	101
5.2	Saran.....	102
DAFTAR PUSTAKA.....		105
LAMPIRAN		107
BIOGRAFI PENULIS		141

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 SDOF dengan <i>tuned liquid column damper</i>	5
Gambar 2. 2 Grafik respon perpindahan banding waktu SDOF dengan TLCD	6
Gambar 2. 3 (a) Perpindahan banding <i>frequency ratio</i> dengan variasi <i>length ratio</i> (b) Perpindahan banding <i>length ratio</i> dengan variasi <i>mass ratio</i>	7
Gambar 2. 4 Skematik diagram SDOF struktur dengan STLCD ..	8
Gambar 2. 5 Respon struktur banding	10
Gambar 2. 6 Skematik tower dengan <i>tuned liquid column damper</i> (TLCD)	10
Gambar 2. 7 Percepatan struktur banding <i>coefficient of headloss</i> saat $\psi = 0.5$	11
Gambar 2. 8 Skema penempatan <i>tuned liquid column damper</i> pada turbin angin	12
Gambar 2. 9 Skematik model dari sistem turbin angin	13
Gambar 2. 10 Respon perpindahan struktur dengan variasi massa	13
Gambar 2. 11 Rangkaian alat eskperimen model struktur dengan TLD	14
Gambar 2. 12 Respon perpindahan struktur terhadap variasi jenis liquid	15
Gambar 2. 13 Rangkaian alat eksperimen dengan TLD	16
Gambar 2. 14 Grafik respon model struktur (a) <i>free vibration</i> (b) <i>force vibration</i> dengan TLD (c) <i>force vibration</i> tanpa TLD	16

Gambar 2. 15 Pemodelan struktur bangunan dengan peredam dinamik	17
Gambar 2. 16 Gambar struktur uji tanpa dan dengan peredam ...	18
Gambar 2. 17 Perbandingan respon dengan frekuensi struktur tanpa dan dengan peredam dinamik	19
Gambar 2. 18 Sistem <i>single degree of freedom</i> dengan <i>viscous damper</i>	20
Gambar 2. 19 <i>Coulomb damping</i>	21
Gambar 2. 20 <i>Cantilever beam</i> dengan pembebana pada ujung batang	22
Gambar 2. 21 Sistem <i>3 degree of freedom</i>	23
Gambar 2. 22 Grafik amplitude banding waktu	24
Gambar 2. 23 <i>Tuned liquid column damper</i>	26
Gambar 3. 1 Diagram alir proses pengerjaan tugas akhir.....	29
Gambar 3. 2 Diagram alir eksperimen.....	31
Gambar 3. 3 Model struktur bangunan tanpa penambahan TLCD (a) 3D - view (b) Tampak Depan (c) Tampak Samping	32
Gambar 3. 4 Model struktur bangunan dengan penambahan TLCD pada struktur tingkat 1 (a) 3D - view (b) Tampak Depan (c) Tampak Samping	33
Gambar 3. 5 Model struktur bangunan dengan penambahan TLCD pada struktur tingkat 2 (a) 3D - view (b) Tampak Depan (c) Tampak Samping	33
Gambar 3. 6 Gambar model fisik model struktur bangunan bertingkat (a) Tanpa TLCD (NTLCD) (b) Dengan TLCD pada struktur tingkat 2 (TLCD2)	34

Gambar 3. 7 Alat untuk pengambilan data (a) <i>Inverter</i> (b) <i>Accelerometer</i> (c) <i>Oscilloscope</i>	35
Gambar 3. 8 Diagram alir proses simulasi	37
Gambar 3. 9 Model dinamis model struktur bangunan bertingkat tanpa penambahan TLCD (NTLCD).....	38
Gambar 3. 10 Model dinamis model struktur bangunan bertingkat dengan penambahan TLCD pada tingkat 1 (TLCD1)	38
Gambar 3. 11 Model dinamis model struktur bangunan bertingkat dengan penambahan TLCD pada tingkat 2 (TLCD2)	39
Gambar 3. 12 <i>Free body diagram shaker</i>	40
Gambar 3. 13 <i>Free body diagram</i> model struktur bangunan tingkat 1	41
Gambar 3. 14 <i>Free body diagram</i> model struktur bangunan tingkat 2.....	42
Gambar 3. 15 <i>Free body diagram</i> model struktur bangunan bertingkat pada tingkat 1 dengan penambahan TLCD1	44
Gambar 3. 16 <i>Free body diagram</i> fluida TLCD.....	45
Gambar 3. 17 <i>Free body diagram</i> model struktur bangunan bertingkat pada tingkat 2 dengan penambahan TLCD2	47
<i>Gambar 3. 18 Hasil eksperimen pada struktur 2</i>	53
Gambar 4. 1 Gambar model struktur bangunan bertingkat (a) tanpa TLCD (b) dengan TLCD pada tingkat 1 (c) dengan TLCD pada tingkat 2.....	58
Gambar 4. 2 Model dinamis model struktur bangunan bertingkat tanpa penambahan TLCD.....	59
Gambar 4. 3 Model dinamis model struktur bangunan bertingkat dengan penambahan TLCD pada struktur tingkat 1	62

Gambar 4. 4 Model dinamis model struktur bangunan bertingkat dengan penambahan TLCD pada struktur tingkat 2	65
Gambar 4. 5 Grafik amplitude banding frekuensi	68
Gambar 4. 6 <i>Block diagram</i> model struktur bangunan bertingkat tanpa TLCD	69
Gambar 4. 7 <i>Block diagram</i> model struktur bangunan bertingkat dengan TLCD pada tingkat.....	70
<i>Gambar 4. 8 Block diagram model struktur bangunan bertingkat dengan TLCD pada tingkat 2</i>	<i>71</i>
Gambar 4. 9 Grafik NTLCD struktur 1 (a) hasil simulasi (b) hasil eksperimen.....	73
Gambar 4. 10 Grafik NTLCD struktur 2 (a) hasil simulasi (b) hasil eksperimen	74
Gambar 4. 11 Grafik hasil simulasi struktur 1 pada frekuensi kerja 8 Hz pada ratio massa 5% (a) respon perpindahan (b) respon percepatan.....	75
Gambar 4. 12 Grafik hasil simulasi struktur 2 pada frekuensi kerja 8 Hz pada ratio massa 5% (a) respon perpindahan (b) respon percepatan.....	76
Gambar 4. 13 Respon dinamis percepatan hasil eksperimen pada frekuensi kerja 8 Hz pada ratio massa 7 % (a) Pada struktur 1 (b) Pada struktur 2.....	79
Gambar 4. 14 Grafik RMS percepatan hasil eksperimen dan simulasi banding waktu pada ratio massa 5% (a) pada struktur 1 (b) pada struktur	81
Gambar 4. 15 Grafik hasil simulasi struktur 1 pada frekuensi kerja 8 Hz pada ratio massa 7% (a) respon perpindahan (b) respon percepatan.....	83

Gambar 4. 16 Grafik hasil simulasi struktur 2 pada frekuensi kerja 8 Hz pada ratio massa 7% (a) respon perpindahan (b) respon percepatan.....	84
Gambar 4. 17 Respon dinamis percepatan hasil eksperimen pada frekuensi kerja 8 Hz pada ratio massa 7 % (a) pada struktur 1 (b) pada struktur 2.....	86
Gambar 4. 18 Grafik RMS percepatan hasil eksperimen dan simulasi banding waktu pada ratio massa 7% (a) pada struktur 1 (b) pada struktur	88
Gambar 4. 19 Grafik hasil simulasi variasi <i>orifice</i> TLCD1 pada struktur 1 pada frekuensi kerja 8 Hz (a) respon perpindahan (b) respon percepatan	91
Gambar 4. 20 Grafik hasil simulasi variasi <i>orifice</i> TLCD1 pada struktur 2 pada frekuensi kerja 8 Hz (a) respon perpindahan (b) respon percepatan	92
Gambar 4. 21 Grafik RMS percepatan banding diameter <i>orifice</i> TLCD1 dengan variasi frekuensi kerja (a) Pada struktur 1 (b) Pada struktur 2.....	93
Gambar 4. 22 Grafik hasil simulasi variasi <i>orifice</i> TLCD2 pada struktur 2 pada frekuensi kerja 8 Hz (a) respon perpindahan (b) respon percepatan	96
Gambar 4. 23 Grafik hasil simulasi variasi <i>orifice</i> TLCD2 pada struktur 2 pada frekuensi kerja 8 Hz (a) respon perpindahan (b) respon percepatan	97
Gambar 4. 24 Grafik RMS percepatan banding diameter <i>orifice</i> TLCD2 dengan variasi frekuensi kerja (a) Pada struktur 1 (b) Pada struktur 2.....	98

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Parameter model struktur gedung.....	48
Tabel 3. 2 Nilai Koefisien Redaman Sistem.....	54
Tabel 4. 1 Tabel Frekuensi Natural.....	68
Tabel 4. 2 RMS hasil simulasi pada ratio massa 5%	77
Tabel 4. 3 RMS hasil eksperimen pada ratio massa 5%	80
Tabel 4. 4 Nilai <i>error</i> pada ratio massa 5%	82
Tabel 4. 5 RMS hasil simulasi pada ratio massa 7%	85
Tabel 4. 6 RMS hasil eksperimen pada ratio massa 7%	87
Tabel 4. 7 Nilai <i>error</i> pada ratio massa 7%	89
Tabel 4. 8 Data hasil simulasi variasi <i>orifice</i> pada TLCD1.....	94
Tabel 4. 9 Data hasil simulasi variasi <i>orifice</i> pada TLCD2.....	99

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring dengan perkembangan zaman, selain teknologi pembangunan termasuk salah satu aspek yang ikut berkembang pesat. Perkembangan dalam sektor pembangunan ini dapat dilihat dari berbagai macam struktur bangunan yang berdiri saat ini, struktur yang tinggi dengan bentuk yang beraneka ragam. Pembangunan struktur gedung seperti ini bertujuan untuk mengatasi masalah mengenai peningkatan kebutuhan ruang di perkotaan. Indonesia merupakan salah satu negara dengan jumlah kota besar yang cukup banyak, beberapa contohnya seperti Jakarta, Surabaya, Medan, Bandung, Tangerang, Makasar, Batam, Palembang, Pekanbaru, Semarang, Balikpapan, dan lain lain. Kota kota besar ini memiliki jumlah gedung yang beraneka ragam, seperti Jakarta memiliki sekitar 297 gedung tinggi, Surabaya memiliki 30 gedung, Bandung memiliki 27 gedung, Medan memiliki 19 gedung tinggi dan masing masing dengan ketinggian yang berbeda beda.[15] Gedung gedung ini digunakan sebagai sarana dan prasarana kegiatan perkantoran, sekolah, perkuliahan, penginapan, hotel, rumah susun dan lain lain.

Indonesia tidak hanya memiliki struktur gedung yang tinggi, tetapi juga memiliki tingkat kerawanan gempa bumi yang cukup tinggi. Posisi Indonesia yang berada pada wilayah pertemuan 3 (tiga) lempeng aktif yaitu lempeng Hindia-Australia, Pasifik dan Eurasia menyebabkan Indonesia memiliki tingkat kerawanan gempa yang cukup tinggi. Di Indonesia, sudah banyak gempa yang terjadi dengan frekuensi gempa dan tingkat kerusakan yang bermacam macam. Dalam beberapa bulan terakhir sudah terjadi kurang lebih 60 gempa di Indonesia, antara lain gempa di Kabupaten Tasikmalaya Jawa Barat pada 15 Desember 2017 dengan kekuatan 7,3 SR, di Boalemo Gorontalo pada tanggal 16 Desember 2017 dengan kekuatan 6,9 SR, di Lebak Banten pada 23

Januari 2018 dengan kekuatan 6.4 SR dengan gempa susulan pada 23 dan 26 Januari dengan kekuatan 5 SR, di Kota Sukabumi Jawa Barat pada 16 Februari 2018 dengan kekuatan 5,1 SR, di Tual Maluku pada 19 Februari 2018 dengan kekuatan 5.6 SR, dan lain lain. [1]

Memiliki struktur yang tinggi dan bentuk yang beraneka ragam, serta potensi gempa yang cukup tinggi di Indonesia, menyebabkan meningkatnya kebutuhan akan keamanan dan kenyamanan dari gedung. Kebutuhan tersebut dapat dicapai dengan menjaga agar frekuensi gedung tetap berada di batas yang sudah ditentukan. Guna mencapai hal tersebut, dapat dilakukan beberapa macam cara, antara lain meningkatkan massa gedung untuk mereduksi perbandingan massa, meningkatkan nilai kekakuan atau natural frekuensi untuk mereduksi kecepatan angin yang non dimensional, memberi masa tambahan untuk meningkatkan nilai redaman.[2]

Di Indonesia biasanya terdapat standar tertentu untuk menciptakan gedung yang aman dan nyaman. Beberapa hal yang diatur pada standar tersebut antara lain, jenis bahan (material), nilai minimal kekakuan, lapisan tanah, dan lain lain.[3] Untuk mencapai standar yang sudah ditentukan dibutuhkan biaya yang cukup besar. Selain itu, standar ini hanya dapat di aplikasikan pada gedung yang belum berdiri. Selain itu, sudah ada juga beberapa gedung yang menggunakan peredam tambahan seperti rubber. Namun penggunaan rubber sama halnya dengan standar, yaitu hanya dapat digunakan pada bangunan yang baru akan dibuat. Oleh karena itu dibutuhkan alternatif lain yang dapat digunakan sebagai peredam pada gedung tinggi. *Tuned liquid column damper* (TLCD) merupakan salah satu peredam berbasis fluida yang bekerja dengan sistem pergerakan massa fluida serta headloss akibat gesekan pada permukaan pipa dan headloss akibat fluida yang melewati *orifice*. TLCD dengan desain yang simple, mudah dipasang dan murah dapat menjadi salah satu solusi untuk menjaga keamanan gedung.[2] Oleh karena itu pada tugas akhir ini akan dilakukan analisis struktur gedung tanpa penambahan TLCD dan dengan

penambahan TLCD, dengan variasi ratio massa fluida, diameter *orifice*, peletakan TLCD dan frekuensi kerja sehingga dapat dilihat respon dinamis dari model struktur gedung.

1.2 Rumusan Masalah

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

1. Bagaimana perbandingan respon dinamis model struktur bangunan tanpa penambahan *tuned liquid column damper* dan dengan penambahan *tuned liquid column damper*?
2. Bagaimana perbandingan respon dinamis hasil eksperimen dengan respon dinamis simulasi struktur bangunan tanpa penambahan *tuned liquid column damper* dan dengan penambahan *tuned liquid column damper*?
3. Bagaimana pengaruh perubahan diameter *orifice* pada *tuned liquid column damper* terhadap respon dinamis model struktur bangunan bertingkat?
4. Bagaimana pengaruh posisi peletakan *tuned liquid column damper* terhadap respon dinamis model struktur bangunan bertingkat?

1.3 Batasan Masalah

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

1. Fluida incompressible flow
2. Tidak terjadi perubahan suhu
3. Sistem hanya bergerak secara translasi kearah horizontal
4. Input beban yang diterima sistem berupa gempa yang diwakili oleh gaya *unbalance* pada *shaker table*
5. Material model struktur bangunan homogen

6. Parameter yang digunakan untuk simulasi pada Matlab diperoleh dari literatur

1.4 Tujuan

Adapun tujuan dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Membandingkan respon dinamis model struktur bangunan tanpa penambahan *tuned liquid column damper* dan dengan penambahan *tuned liquid column damper*.
2. Membandingkan respon dinamis hasil eksperimen dengan respon dinamis simulasi struktur bangunan tanpa penambahan *tuned liquid column damper* dan dengan penambahan *tuned liquid column damper*
3. Mengetahui pengaruh perubahan diameter *orifice* pada *tuned liquid column damper* terhadap respon dinamis model struktur bangunan bertingkat.
4. Mengetahui pengaruh posisi peletakan *tuned liquid column damper* terhadap respon dinamis model struktur bangunan bertingkat.

1.5 Manfaat

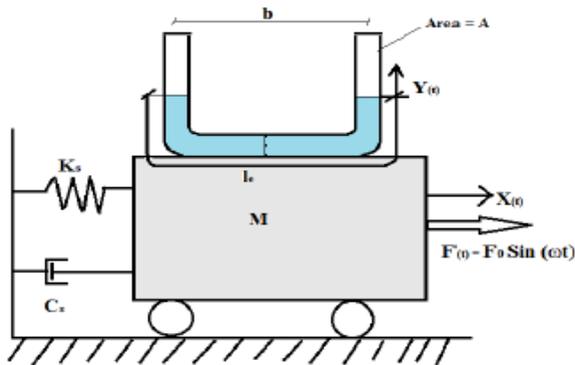
Adapun manfaat dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

Hasil tugas akhir ini dapat digunakan menjadi dasar dalam merancang *tuned liquid column damper* (TLCD) untuk mereduksi getaran pada struktur bangunan

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Tuned Liquid Column Damper dengan Variasi Mass Ratio, Length Ratio dan Frequency Ratio*

Pada tahun 2016, Kazi Iqbal Nizamoddin dan Dr Keshav K. Sangle sudah pernah melakukan penelitian mengenai *tuned liquid column damper* pada sistem SDOF yang diberi beban. Penelitian yang dilakukan bertujuan untuk mendapatkan nilai optimal dari parameter TLCD. Pada penelitian ini dilakukan beberapa variasi untuk mencapai tujuan tersebut, antara lain variasi *frequency ratio*, *length ratio* dan *mass ratio*. Dimana β adalah perbandingan frekuensi TLCD dengan frekuensi dari struktur (ω_d/ω_s), α adalah perbandingan lebar liquid dari TLCD dengan *total length of liquid* pada TLCD (b/l_e), μ adalah perbandingan massa TLCD dengan massa struktur (m/M). Gambar skematik sistem yang akan diteliti dapat dilihat pada gambar dibawah ini



Gambar 2. 1 SDOF dengan *tuned liquid column damper* [8]

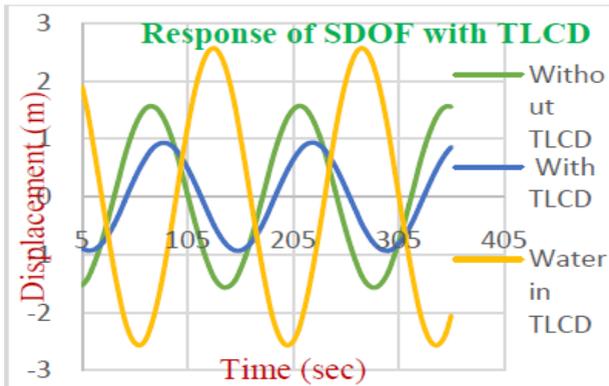
Persamaan gerak dari sistem diatas dibagi menjadi 2, yaitu persamaan 2.1 yang menggambarkan persamaan gerak dari fluida

pada TLCD dan yang kedua adalah persamaan 2.2 merupakan persamaan gerak dari struktur. Dimana ρ = massa jenis fluida, A = *cross section area* dari pipa, l = *total length liquid column*, ξ = *coefficient of headloss*, b = *width of TLCD*, M_s = massa struktur, C_s = konstanta peredam, K_s = Konstanta kekakuan, $X(t)$ = jarak perpindahan struktur, $Y(t)$ = jarak perpindahan fluida.

$$\rho Al \ddot{Y}(t) + \frac{1}{2} \rho A \xi |\dot{Y}(t)| \dot{Y}(t) + 2\rho Ag Y(t) = -\rho Ab \ddot{X}(t) \quad (2.1)$$

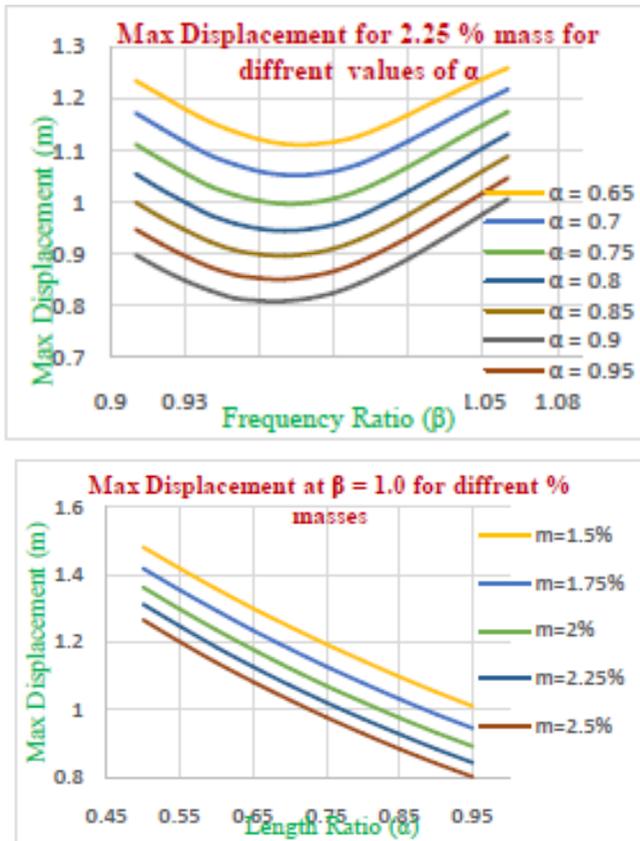
$$(M_s + \rho Al) \ddot{X} + \rho AB \dot{Y} + C_s \dot{X} + K_s X = F_e(t) \quad (2.2)$$

Gambar 2.2 dibawah merupakan hasil dari penelitian yang telah dilakukan. Grafik berwarna hijau merupakan grafik respon perpindahan dari struktur tanpa penambahan TLCD dengan nilai perpindahan sebesar 1.53 m, grafik berwarna biru merupakan grafik respon perpindahan dari struktur dengan penambahan TLCD yang memiliki perpindahan sebesar 0.931 m. Dari kedua grafik tersebut dapat dilihat bahwa grafik biru memiliki perpindahan yang lebih kecil dibanding dengan grafik yang berwarna hijau. Dari hasil penilitian ini didapatkan bahwa besarnya reduksi karena penambahan TLCD sebesar 38%.



Gambar 2. 2 Grafik respon perpindahan banding waktu SDOF dengan TLCD [8]

Selain itu juga didapatkan hasil penelitian dengan *variasi length ratio*, *mass ratio*, dan *frequency ratio* seperti gambar 3.3(a) dan gambar 3.3(b).

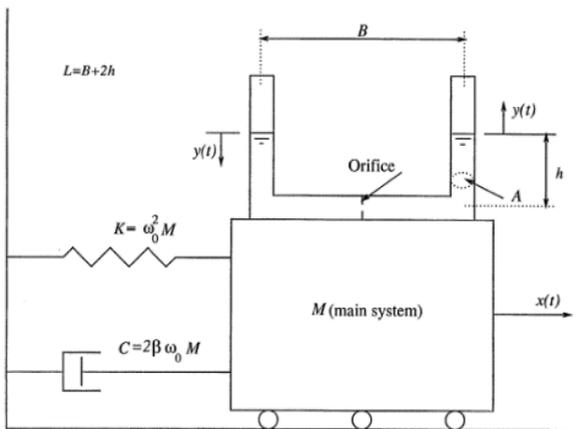


Gambar 2. 3 (a) Perpindahan banding *frequency ratio* dengan variasi *length ratio* (b) Perpindahan banding *length ratio* dengan variasi *mass ratio* [8]

Dari gambar diatas didapatkan hasil berupa grafik perpindahan maximum banding dengan *frequency ratio*, dan grafik perpindahan

maksimum banding *length ratio*. Dari grafik perpindahan maksimum banding *frequency ratio* dapat disimpulkan bahwa semakin besar *mass ratio* maka akan semakin kecil perpindahan yang terjadi dengan nilai *frequency ratio* tertentu. Dari grafik digambarkan bahwa ketika melewati titik optimal *frequency ratio* akan mengakibatkan peningkatan nilai perpindahan. Sedangkan grafik perpindahan maksimum banding *length ratio* dapat disimpulkan bahwa, semakin besar *mass ratio* dan diikuti dengan *length ratio* yang semakin besar maka perpindahan yang terjadi akan semakin kecil atau dengan kata lain reduksi yang terjadi akan semakin besar.[8]

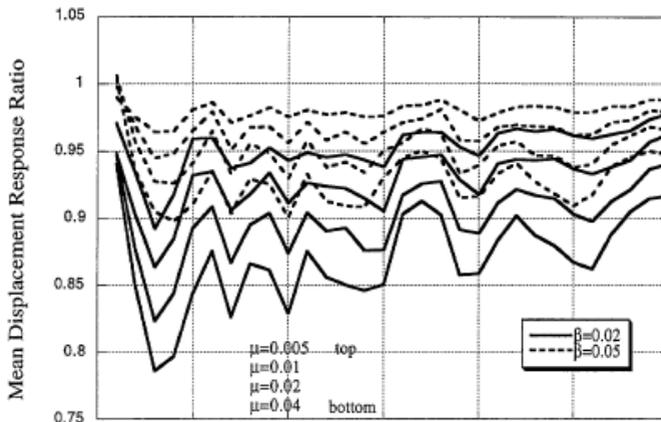
Selain itu, pada tahun 1996 Fahim Sadek, Bijan Mohraz and H.S. Lew melakukan penelitian untuk mengetahui parameter optimal *single* dan *double tuned liquid column dampers* (TLCD) dalam mereduksi respon struktur saat terkena beban gempa untuk mengetahui keefektifan dari TLCD. Adapun parameter yang akan dianalisis adalah *tuning ratio*, *tube width to liquid length ratio*, dan *headloss coefficient*.

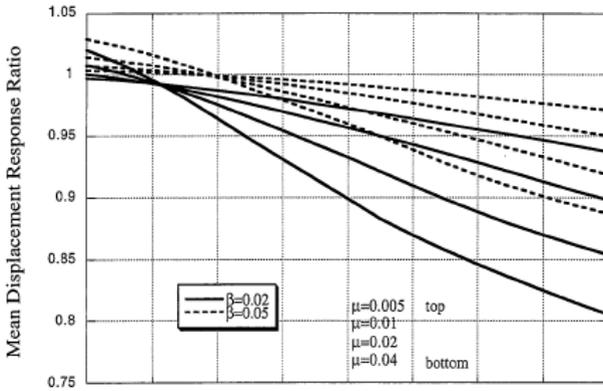


Gambar 2. 4 Skematik diagram SDOF struktur dengan Single TLCD [5]

Pada penelitiannya, Fahim akan melakukan analisis pada jembatan dan struktur *ten story*. Persamaan yang digunakan pada penelitian ini sama dengan persamaan yang digunakan oleh Kazi Iqbal Nizamoddin dan Dr. Keshav K. Sangle pada persamaan 2.1 Dan 2.2.

Gambar dibawah ini merupakan hasil dari penelitian yang telah dilakukan oleh Sadek et al. Gambar 2.5 Merupakan grafik perpindahan rata rata banding dengan waktu. Pada grafk terdapat garis putus putus yang merupakan garis dengan *damping ratio* 0.02 dan untuk garis tebal nilai *damping ratio* 0.05. Dari grafik disimpulkan bahwa saat *damping ratio* 0.05 dengan *mass ratio* 0.04, perpindahan yang terjadi lebih kecil, dengan kata lain semakin besar *mass ratio* diikuti dengan nilai *damping ratio* yang tepat dapat mereduksi getaran pada struktur. Dari hasil penelitian didapatkan hasil bahwa dengan parameter yang optimum penambahan TLCD dapat mereduksi perpindahan dan percepatan sebesar 47%. [5]

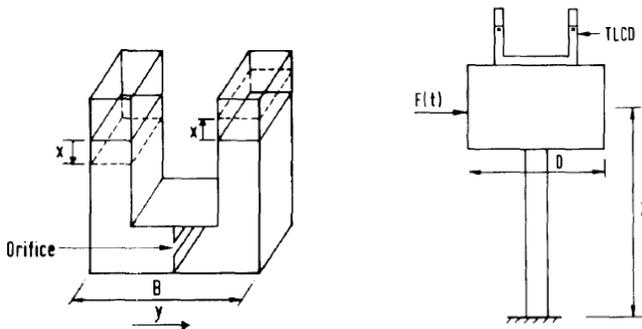




Gambar 2. 5 Respon struktur banding [5]

2.2 Eksperimen Tuned Liquid Column Damper

Pada tahun 1995, T. Balendra, C. M. Wang dan H. F. Cheong telah melakukan eksperimen mengenai keefektifan dari *tuned liquid column damper* sebagai control getaran pada *tower*. Penelitian ini bertujuan untuk mencari tahu karakteristik dari TLCD dan meninjau keefektifan TLCD pada *tower*. Eksperimen dilakukan dengan menggunakan TLCD dengan bentuk persegi seperti gambar 2.1 dibawah ini

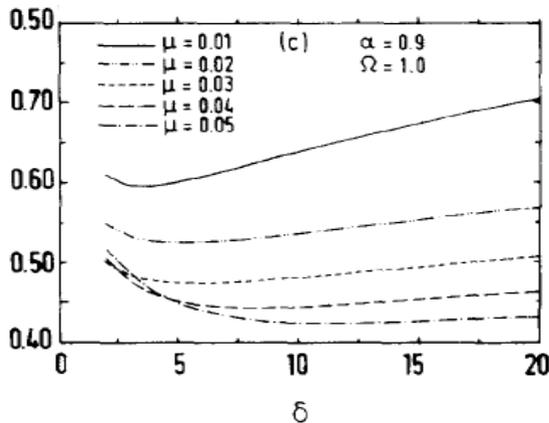


Gambar 2. 6 Skematik tower dengan *tuned liquid column damper* (TLCD) [12]

Balendra et al melakukan eksperimen dengan beberapa variasi, antara lain memvariasikan *opening ratio* dari *orifice* dan frekuensi eksitasi. Persamaan gerak yang digunakan pada penelitian ini sama dengan persamaan yang pernah digunakan oleh Sakai et al, yaitu persamaan untuk TLCN seperti persamaan 2.6. Dimana ρ = massa jenis liquid, δ = *coefficient of headloss*, A = luas pipa, g = percepatan gravitasi.

$$\rho AL \ddot{x}(t) + \frac{1}{2} \rho A \delta |\dot{x}(t)| \dot{x}(t) + 2\rho Ag x(t) = -\rho AB \ddot{y}(t) \quad (2.3)$$

Eksperimen ini dilakukan diatas *shake table* yang di sambungkan pada aktuator dinamik yang dikontrol dengan *generator function*. Pengukuran pada eksperimen ini dilakukan pada perpindahan fluida yang diukur dengan *wave probe monitor* dan percepatan pada *shake table* yang diukur dengan *accelerometer*.

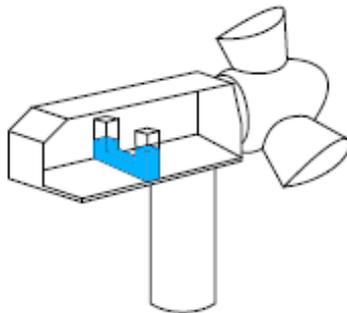


Gambar 2. 7 Percepatan struktur banding *coefficient of headloss* saat $\psi = 0.5$ [12]

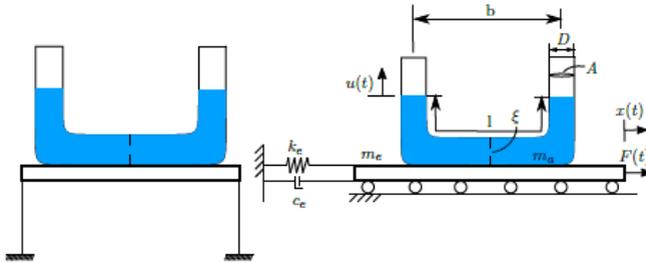
Dari hasil eksperimen yang dilakukan didapatkan hasil bahwa untuk mendapatkan hasil yang optimal *opening ratio* yang dibutuhkan antara 1 – 0.5. Selain itu, TLCD dengan perubahan nilai *ratio liquid length* dan *mass ratio* juga sangat berpengaruh dalam hal mereduksi percepatan dan *displacement* dari *tower*. Untuk performa yang lebih baik, selain mengatur *opening ratio*, mengatur frekuensi TLCD sama dengan frekuensi *tower* juga dapat meningkatkan efektifitas TLCD dalam mereduksi getaran pada struktur.[12]

2.3 *Tuned Liquid Column Damper* dengan Variasi Massa dan Frekuensi pada Turbin Angin

Pemodelan dan simulasi mengenai *tuned liquid column damper* (TLCD) juga pernah dilakukan oleh M. H. Alkhim, M.V.G de Morais, dan A.T. Fabro pada tahun 2016. Pada jurnalnya, Alkhim et al melakukan pemodelan dan simulasi TLCD pada turbin angin. Pemodelan dan simulasi dilakukan dengan tujuan untuk membandingkan model *nonlinear* dengan *linear equivalent* dan untuk mencari ke efektifan dari TLCD. Bentuk TLCD yang digunakan pada paper ini adalah bentuk U.



Gambar 2. 8 Skema penempatan *tuned liquid column damper* pada turbin angin [9]



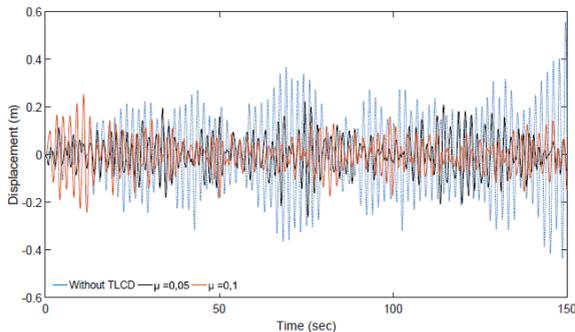
Gambar 2. 9 Skematik model dari sistem turbin angin [9]

Dari gambar skematik diatas, didapatkan bahwa persamaan gerak dari TLCd dan struktur dapat dilihat pada persamaan dibawah ini, dimana $u(t)$ adalah perpindahan dari fluida, $x(t)$ adalah perpindahan dari sistem utama, ρ adalah massa jenis fluida, ξ adalah *headloss coefficient*, A adalah luasan pipa.

$$\rho AL \ddot{u}(t) + \frac{1}{2} \rho A \xi |\dot{u}(t)| \dot{u}(t) + 2 \rho Ag u(t) = -\rho AB \ddot{x}(t) \quad (2.4)$$

$$(M_s + \rho AL) \ddot{x}(t) + \rho AB \ddot{u}(t) + C_s \dot{x}(t) + K_s x(t) = F_e(t) \quad (2.5)$$

Pada analisis ini akan dilakukan beberapa variasi, antara lain variasi gaya eksitasi, variasi perbandingan massa. Gaya eksitasi pada pemodelan dan simulasi ini akan menggunakan 2 macam tipe, yaitu *white noise* dan *first older spectrum*.



Gambar 2. 10 Respon perpindahan struktur [9]

Dan variasi massa yang digunakan adalah pada $\mu = 0.05$ dan $\mu = 0.1$. Dari pemodelan yang dilakukan didapatkan hasil bahwa pada titik optimal, TLCD dapat mengurangi getaran struktur berkisar antara 3- 11%. [9]

2.4 Eksperimen *Tuned Liquid Damper*

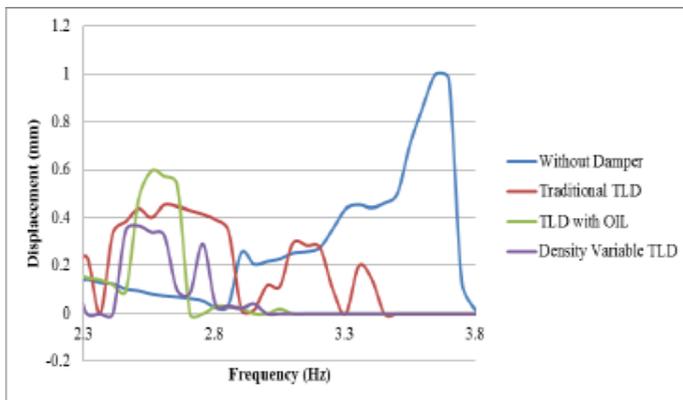
Roshni. V. Kartha dan Ritzy. R pada tahun 2005 melakukan eksperimen tentang *tuned liquid damper* (TLD). TLD merupakan salah satu jenis *tuned mass damper* (TMD), dimana perbedaannya massanya digantikan menggunakan liquid. Pada penelitian ini bertujuan untuk menentukan performance dari TLD saat diberi gaya eksitasi pada gedung tinggi. Roshni et al pada penelitiannya melakukan variasi viskositas dan densitas dari liquid yang digunakan sebagai fluida kerja pada TLD untuk mengamati perilaku fluida yang bergerak pada TLD.

Pada eksperimen yang dilakukan Roshni dibutuhkan beberapa macam alat yaitu plat persegi, silinder, kaca sebagai media penempatan fluida kerja, shake table yang digerakan dengan motor listrik.



Gambar 2. 11 Rangkaian alat eskperimen model struktur dengan TLD [14]

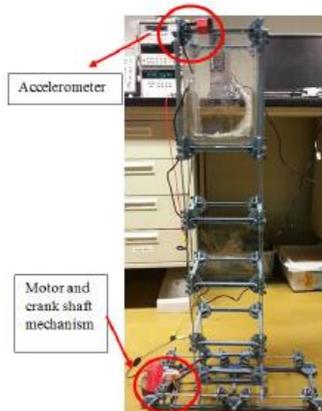
Serta untuk data hasil eksperimen akan diukur dengan menggunakan *accelerometer*. Data dari yang diperoleh dari *accelerometer* dihubungkan pada *analyzer software*. Pada eksperimen ini diharapkan didapatkan grafik respon frekuensi banding perpindahan. Pada gambar dibawah ini merupakan hasil data yang didapatkan dari hasil eksperimen. Terlihat adanya reduksi dari penambahan TLD. Dari grafik didapatkan kesimpulan antara lain adalah dengan penambahan TLD reduksi getaran yang dapat terjadi kurang lebih 55%, selain itu juga didapatkan bahwa liquid yang memiliki viskositas fluida yang lebih kecil mampu mereduksi atau menghasilkan nilai peredam yang lebih besar. [12]



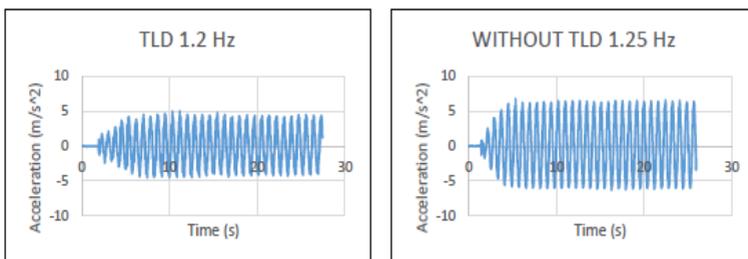
Gambar 2. 12 Respon perpindahan struktur terhadap variasi jenis fluida [14]

Selain Roshni et al, Jitaditya Mondal, Harsha Nimmala, SHameel Abdulla, dan Reza Tafreshi pada tahun 2014 juga melakukan simulasi dan eksperimen tentang *tuned liquid damper*. Penelitian ini bertujuan untuk membuktikan atau menunjukkan secara eksperimen bahwa TLD dapat menjadi peredam pada bangunan, serta juga menjaga atau meningkatkan performance dari TLD. Pada penelitian ini akan dilakukan eksperimen serta juga simulasi.. Eksperimen dilakukan dengan menggunakan rangkaian model eksperimen seperti gambar dibawah ini. Pada penelitian ini

akan dilakukan 2 jenis eksperimen yaitu eksperimen *free vibration* dan *forced vibration*. Gambar 2.14 dibawah ini merupakan hasil dari eskperimen yang sudah dilakukan, dari grafik (b) dan (c) dapat dilihat bahwa terjadi pegurangan nilai percepatan antara respon struktur dengan TLD pada frekuensi 1.2 Hz dan tanpa TLD 1.25 Hz. Dari hasil penelitian yang dilakukan oleh Jitaditya didapatkan kesimpulan bahwa TLD adalah salah satu jenis peredam yang efektif untuk mereduksi getaran saat suatu sistem atau model yang berada dibawah gaya eksitasi dan pada frekuensi resonansinya. Reduksi yang dapat dihasilkan sebesar 80%. [6]

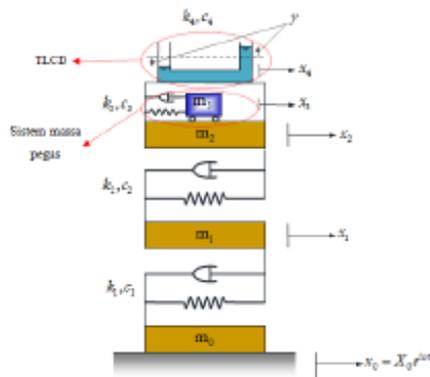


Gambar 2. 13 Rangkaian alat eksperimen dengan TLD [6]



Gambar 2. 14 Grafik respon model struktur (a) *free vibration* (b) *force vibration* dengan TLD (c) *force vibration* tanpa TLD [6]

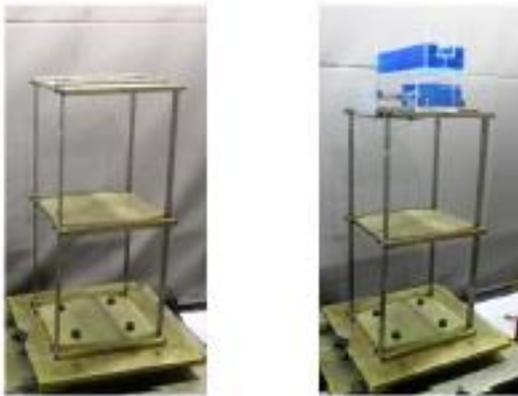
Selain itu, pada tahun 2015 Mulyadi Bur, Lovely Son, dan Ricky Yusafri Govi juga telah melakukan kaji eksperimental penerapan peredam dinamik TLCD dan TMD pada model struktur 2DOF. Menurut Mulyadi et al, yang biasa digunakan untuk mengurangi pengaruh gaya dinamik pada struktur adalah isolator getaran, namun pada struktur yang besar biaya pemasangan yang diperlukan sangat besar. Maka untuk mengatasi masalah ini dilakukan eksperimen yang bertujuan mengetahui pengaruh peletakan TLCD dan TMD pada suatu struktur. Gabungan TLCD dan TMD diharapkan dapat mengurangi respon struktur pada frekuensi natural yang pertama dan frekuensi natural yang kedua. Gambar 2.3 dibawah ini merupakan gambar model struktur bangunan dengan peredam dinamik.



Gambar 2. 15 Pemodelan struktur bangunan dengan peredam dinamik [10]

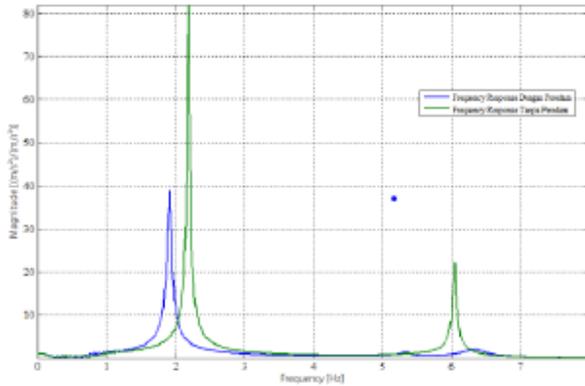
Dari gambar 2.15 terdapat beberapa jenis variable, m_0 , m_1 , m_2 , dan m_3 adalah massa berturut turut dari lantai dasar, sampai massa TMD (m_3). k_1 , k_2 , k_3 , k_4 merupakan nilai kekakuan lantai satu, dua, kekakuan pada TMD, dan kekakuan pada TLCD. Variabel c_1 , c_2 , c_3 , c_4 merupakan nilai redaman lantai 1, 2, redaman sistem TMD, dan redaman TLCD. Pada ekperimen ini

menggunakan exciter sebagai gaya gangguan pada landasan struktur. Hasil eksperimen ini dihitung dengan menggunakan dua buah sensor yang di pasang pada tumpuan dan lantai atas struktur yang selanjutnya diolah untuk mendapatkan *Frequency Reponse Function* (FRF) yang merupakan perbandingan antara respon dengan frekuensi pada lantai atas struktur dan tumpuan struktur. Gambar 2.16 dibawah memperlihatkan gambar struktur uji tanpa dan dengan peredam.



Gambar 2. 16 Gambar struktur uji tanpa dan dengan peredam [10]

Dari hasil eksperimen didapatkan gambar 2.17 seperti dibawah ini. Grafik berwarna hijau merupakan grafik respon struktur tanpa peredam, dan warna biru merupakan respon dengan peredam dinamik. Dari kedua grafik tersebut menunjukkan adanya perbedaan grafik sesudah dan sebelum penambahan peredam pada sistem dan didapatkan hasil penerapan TLCD dan TMD dapat mengurangi atau mereduksi getaran struktur sebesar 53% pada frekuensi natural yang pertama dan 95% pada frekuensi yang kedua. [10]



Gambar 2. 17 Perbandingan respon dengan frekuensi struktur tanpa dan dengan peredam dinamik [10]

2.5 Getaran

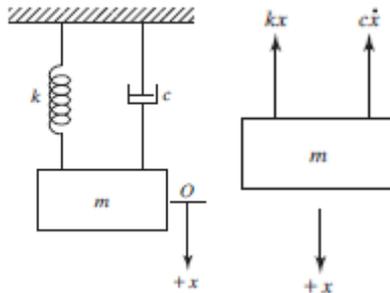
Getaran adalah gaya bolak balik yang terjadi dari titik awal menuju titik setimbangnya. Getaran memiliki beberapa parameter antara lain massa, kekakuan, dan peredam. Dimana massa dan kekakuan merupakan parameter yang berpotensi menyebabkan getaran, dan peredam parameter yang berfungsi untuk meredam getaran tersebut. Getaran dapat diklasifikasikan menjadi beberapa macam, yang pertama diklasifikasikan menurut ada tidaknya gaya eksitasi yang bekerja pada suatu sistem. Jika suatu sistem bergetar dengan sendirinya tanpa dipengaruhi oleh gaya dari luar maka getaran tersebut dapat disebut sebagai getaran bebas atau *free vibration*. Sedangkan ketika suatu sistem bergetar karena terkena gaya dari luar maka gaya tersebut dapat disebut sebagai *forced vibration*. Selain itu dapat pula diklasifikasikan menurut ada tidaknya redaman. Saat suatu sistem tidak mengalami kehilangan energi atau energi tidak terdisipasi yang disebabkan oleh gesekan selama osilasi terjadi maka dapat disebut sebagai getaran tak teredam atau *undamped vibration*, sedangkan jika terdapat kehilangan energi

pada sistem karena gesekan maka disebut sebagai getaran teredam atau *damped vibration*. [13]

2.5.1 Damper

Getaran pada suatu sistem secara bertahap berubah menjadi panas atau suara. Reduksi energi ini juga berpengaruh pada respon, yaitu secara bertahap berkurang juga. Mekanisme energi secara bertahap berubah menjadi panas atau suara disebut peredam atau dengan kata lain *damper* atau peredam dapat dikatakan sebagai suatu fenomena dimana tereduksi atau terdisipasinya suatu energi akibat gesekan. Peredam diasumsikan tidak memiliki massa maupun elastisitas. Peredam berfungsi agar hasil prediksi akan suatu sistem lebih akurat. Ada beberapa jenis peredam antara lain:

- a) *Viscous damping*, merupakan salah satu jenis peredam yang paling banyak digunakan di analisis getaran. *Viscous damping* biasanya terjadi pada media fluida seperti gas, air, minyak. Ketika suatu sistem mekanis bergetar disuatu fluida, nilai tahanan suatu fluida untuk bergerak menyebabkan energi terdisipasi.

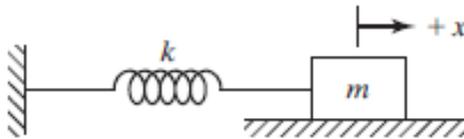


Gambar 2. 18 Sistem *single degree of freedom* dengan *viscous damper* [13]

Besarnya energi terdisipasi bergantung pada beberapa factor antara lain, ukuran dan bentuk dari benda yang bergetar, viskositas dari fluida, frekuensi getaran dan kecepatan getar dari benda. Pada jenis

peredam ini gaya redam sebanding dengan kecepatan massa bergetar.

- b) *Coulomb or Dry Friction Damping*, merupakan salah satu jenis peredam yang cara kerjanya karena adanya gesekan permukaan yang kering atau tidak terlubrikasi. Peredam ini memiliki besar yang tetap namun arahnya berlawanan dengan pergerakan sistem. [13]



Gambar 2. 19 *Coulomb damping* [13]

2.5.2 Kekakuan

Pegas merupakan salah satu jenis dari penghubung mekanik yang biasa pada penerapannya massa dan peredamnya diabaikan. Spring biasanya dapat disusun dengan 2 macam susunan, yaitu secara *parallel* dan seri. Ketika terdapat spring sejumlah n , $k_1, k_2, k_3 \dots k_n$ dan di susun secara *parallel* maka nilai kekakuan dari pegas sejumlah n itu dapat dituliskan seperti persamaan dibawah ini :

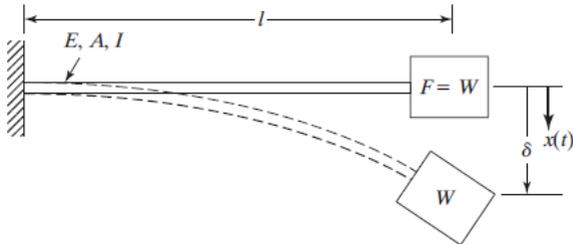
$$k_{eq} = k_1 + k_2 + k_3 + \dots + k_n \quad (2.6)$$

Sedangkan saat terdapat pegas sejumlah n , $k_1, k_2, k_3 \dots k_n$ dan disusun secara seri maka nilai kekakuan dari pegas sejumlah n itu dapat dituliskan seperti persamaan dibawah ini:

$$\frac{1}{k_{eq}} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} + \dots + \frac{1}{k_n} \quad (2.7)$$

Ada beberapa contoh *elastic or deformable body or member* yang dapat diasumsikan sebagai pegas seperti kabel, batang, poros,

dan lain lain. Gambar 2.20 dibawah ini merupakan salah satu pengaplikasian pegas pada *cantilever beam*. Defleksi yang terjadi disebabkan oleh gaya berat yang terletak pada ujung *cantilever beam*. [13] Untuk memudahkan perhitungan massa dari *beam* diabaikan. Defleksi *cantilever beam* dapat dirumuskan seperti persamaan berikut ini:



Gambar 2. 20 *Cantilever beam* dengan pembebanan pada ujung batang [13]

$$\delta = \frac{Wl^3}{3EI} \quad (2.8)$$

Keterangan :

δ = Defleksi yang terjadi

E = *Modulus Young's*

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

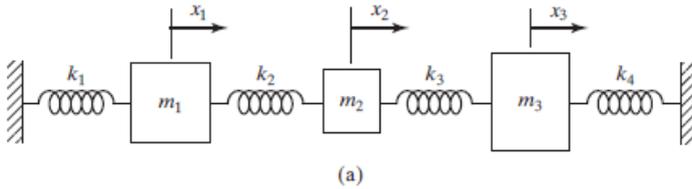
Diketahui dimana $F = k \cdot x$ maka persamaan diatas dapat dituliskan sebagai:

$$k = \frac{W}{\delta} = \frac{3EI}{l^3} \quad (2.9)$$

2.6 *Multidegree of Freedom Systems*

Sistem *multidegree of freedom* adalah suatu sistem yang terdiri dari beberapa massa yang saling terhubung. Karena adanya beberapa massa maka akan ada frekuensi natural sebanyak n yang memiliki *mode shape* masing masing. Gambar dibawah ini

merupakan salah satu contoh gambar sistem 3 *degree of freedom* [13]



Gambar 2. 21 Sistem 3 *degree of freedom* [13]

Dari persamaan ini dapat dituliskan persamaan gerak m_1 , m_2 , dan m_3 berturut turut dengan asumsi $x_1 > x_2$, $x_2 > x_3$ sebagai berikut

$$\Sigma F = 0$$

$$m_1 \ddot{x}_1 + k_1 x_1 + k_2 (x_1 - x_2) = 0$$

$$m_1 \ddot{x}_1 + (k_1 + k_2) x_1 = k_2 x_2 \quad (2.10)$$

$$\Sigma F = 0$$

$$m_2 \ddot{x}_2 - k_2 (x_1 - x_2) + k_3 (x_2 - x_3) = 0$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + (k_2 + k_3) x_2 = k_2 x_1 + k_3 x_3 \quad (2.11)$$

$$\Sigma F = 0$$

$$m_3 \ddot{x}_3 - k_3 (x_2 - x_3) + k_4 x_3 = 0$$

$$m_3 \ddot{x}_3 + (k_3 + k_4) x_3 = k_3 x_2 \quad (2.12)$$

Dari persamaan diatas dapat dituliskan bahwa

$$[m]\{\ddot{x}\} + [k]\{x\} = 0 \quad (2.13)$$

Dimana,

$$[m] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix}; [k] = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & (k_2 + k_3) & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 + k_4 \end{bmatrix}$$

Sehingga didapatkan matriks seperti persamaan dibawah ini.

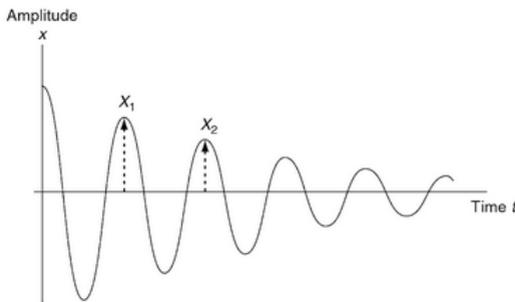
$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & (k_2 + k_3) & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 + k_4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

2.7 Logarithmic Decrement

Dalam mengestimasi nilai damping atau redaman dari suatu sistem biasanya dapat dicari dengan menggunakan *logarithmic decrement*. Karena *logarithmic decrement* berhubungan dengan *damping ratio* yang dapat dilihat dari persamaan dibawah ini

$$\begin{aligned} \delta = \ln \frac{x_1}{x_2} &= \zeta \omega_n \tau_d = \zeta \omega_n \frac{2\pi}{\sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n} \\ &= \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n} = \frac{2\pi}{\omega_d} \cdot \frac{c}{2m} \end{aligned} \quad (2.15)$$

Logarithmic decrement merupakan natural *logarithmic* dari ratio ketinggian dari dua puncak berturut turut. Dimana nilai *logarithmic decrement* ini dapat dihitung dengan menggunakan nilai laju pengurangan atau penurunan dari suatu sistem *single DOF spring-mass-damper*.



Gambar 2. 22 Grafik amplitude banding waktu [4]

Gambar 2.22 diatas merupakan gambar pengurangan atau penurunan amplitude dari suatu sistem *single DOF*. *Logarithmic*

decrement dapat dituliskan dengan persamaan 2.16 Dimana δ adalah *logarithmic decrement*, X_1 dan X_2 adalah ketinggian puncak berturut turut, dan γ adalah *damping ratio*. [4]

$$\delta = \log_e \frac{X_1}{X_2} = \frac{2\pi\gamma}{\sqrt{1-\gamma^2}} \quad (2.16)$$

Jika nilai γ bernilai kecil maka nilai *logarithmic decrement* dapat dicari dengan persamaan 2.17

$$\delta = 2\pi\gamma \quad (2.17)$$

Dimana nilai *logarithmic decrement* juga bisa ditentukan dengan mengukur 2 perpindahan yang terletak terpisah dari beberapa puncak. Nilai *logarithmic decrement* dapat dicari dengan persamaan 2.18 Dibawah ini

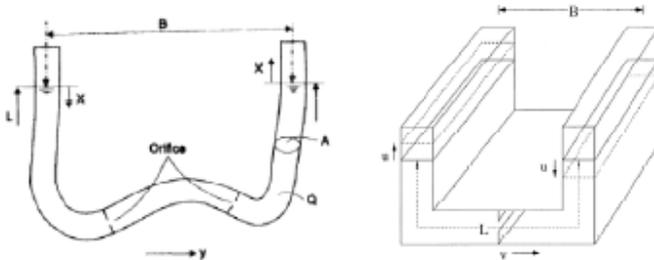
$$\delta = \frac{1}{m} \ln \frac{X_1}{X_{m+1}} \quad (2.18)$$

Setelah nilai *logarithmic decrement* didapatkan, nilai *damping ratio* pun dapat dicari dengan menggunakan persamaan [13]

$$\zeta = \frac{\delta}{\sqrt{(2\pi)^2 + \delta^2}} \quad (2.19)$$

2.8 Tuned Liquid Column Damper (TLCD)

Tuned liquid column damper (TLCD), merupakan salah satu jenis peredam yang berfungsi untuk mengontrol atau mengurangi getaran struktur dengan melibatkan pergerakan dari massa liquid didalam pipa dan efek *damping* dari *orifice* pada pipa. *Tuned liquid column damper* memiliki beberapa keuntungan, antara lain (i) dapat dibuat dalam berbagai bentuk, sehingga dapat dipasang pada struktur gedung dengan mudah, (ii) TLCD sudah mudah dipahami, karena model matematika akurat dan dapat dirumuskan, (iii) kapasitas *damper* dapat dikontrol dengan mengatur pada bagian *orifice*, (iv) frekuensi TLCD dapat diatur dengan mengatur besar *liquid column* di dalam pipa. Gambar 2.16 dibawah ini merupakan gambar TLCD.[2]



Gambar 2. 23 Tuned liquid column damper [2]

2.9 Internal Flow

Internal flow adalah aliran yang dikelilingi oleh permukaan solid. Aliran pada *internal flow* dapat berupa laminar atau turbulenta. Untuk menentukan aliran tersebut digunakan *Reynold Number*, dimana nilai Re dapat didapatkan dengan persamaan dibawah ini:

$$Re = \frac{\rho \bar{V} D}{\mu} \quad (2.20)$$

Dimana ρ adalah massa jenis fluida, \bar{V} adalah kecepatan rata rata fluida, D adalah diameter pipa, dan μ adalah *dynamic viscosity*. Nilai Re tiap media yang di lewati fluida berbeda beda, pada pipa nilai Re untuk aliran laminar adalah $Re \leq 2300$, dan untuk turbulenta $Re > 2300$. Contoh internal flow seperti aliran pada pipa, *ducts*, *nozzle*, *diffuser*, *sudden contractions and expansions*, katup, dan *fittings*. *Internal flow* memiliki kerugian yang biasanya disebut dengan *headloss*, dimana *headloss* di hasilkan dari berbagai macam faktor.[11]

2.9.1 Head Loss

Headloss adalah nilai atau ukuran kerugian energi mekanik pada fluida bergerak yang disebabkan oleh beberapa macam faktor. Ada 2 macam *headloss* yaitu *major headloss* dan *minor headloss*.

Major headloss adalah kerugian yang terjadi akibat gesekan pada pipa. Sedangkan *minor headloss* adalah kerugian yang disebabkan karena sambungan pada pipa seperti katup, *elbow*, dan lain lain.[11] Pada tugas akhir ini salah satu contoh sambungan atau halangan yang digunakan adalah *orifice*. *Orifice* merupakan salah satu contoh halangan yang dapat digunakan untuk mereduksi energi. Fluida yang melewati *orifice* menyebabkan energi fluida yang melewatinya terdisipasi atau tereduksi sehingga terbentuklah *headloss*. *Coefficient of headloss* dari *orifice* dapat dicari dengan menggunakan persamaan 2.14. Dimana η adalah *coefficient of headloss* dan ψ adalah *area blocking ratio* pada *orifice*. [7]

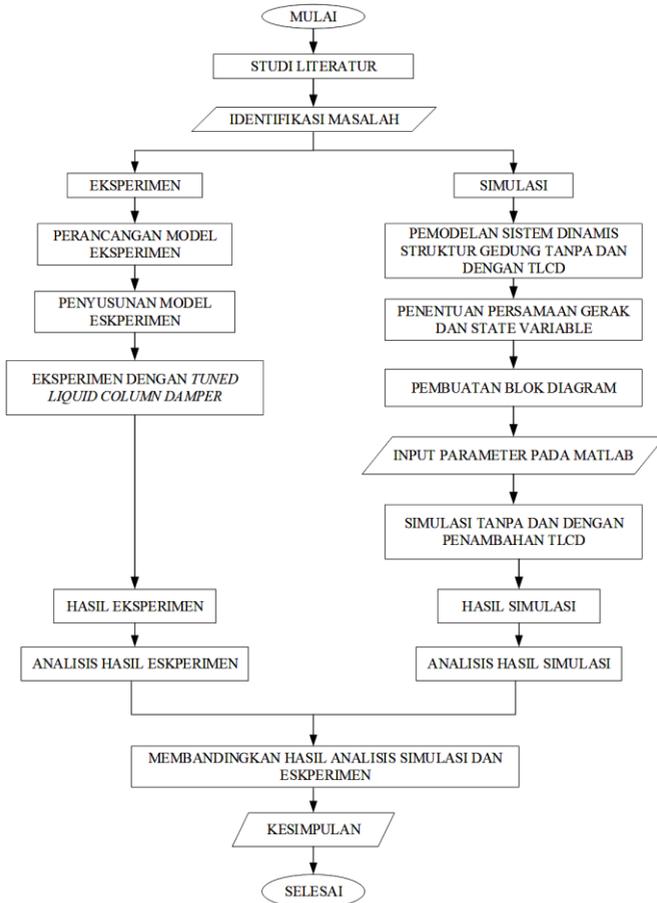
$$\eta = (-0.6\psi + 2.1\psi^{0.1})^{1.6} (1 - \psi)^{-2} \quad (2.21)$$

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Dalam proses analisis perlu dilakukan beberapa langkah yang ditunjukkan pada diagram alir pada gambar 3.1



Gambar 3. 1 Diagram alir proses pengerjaan tugas akhir

3.2 Penjelasan Diagram Alir

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

3.2.1 Studi Literatur

Guna menunjang kebutuhan referensi untuk penulisan tugas akhir dalam menganalisis TLCD pada model struktur bangunan, dilakukan studi literatur untuk menambah wawasan, pengetahuan dan landasan mengenai permasalahan yang akan dibahas. Referensi untuk studi literatur diperoleh dari buku jurnal ilmiah, maupun penelitian penelitian terdahulu yang berkaitan. Adapun materi yang mendukung penulisan tugas akhir ini yaitu mekanika getaran, pemodelan sistem dinamis, sistem mekanis getaran translasi, pembuatan blok diagram pada MATLAB Simulink, TLCD. Untuk beberapa nilai parameter didapatkan dari jurnal penelitian terdahulu dan yang berkaitan dengan penelitian tugas akhir.

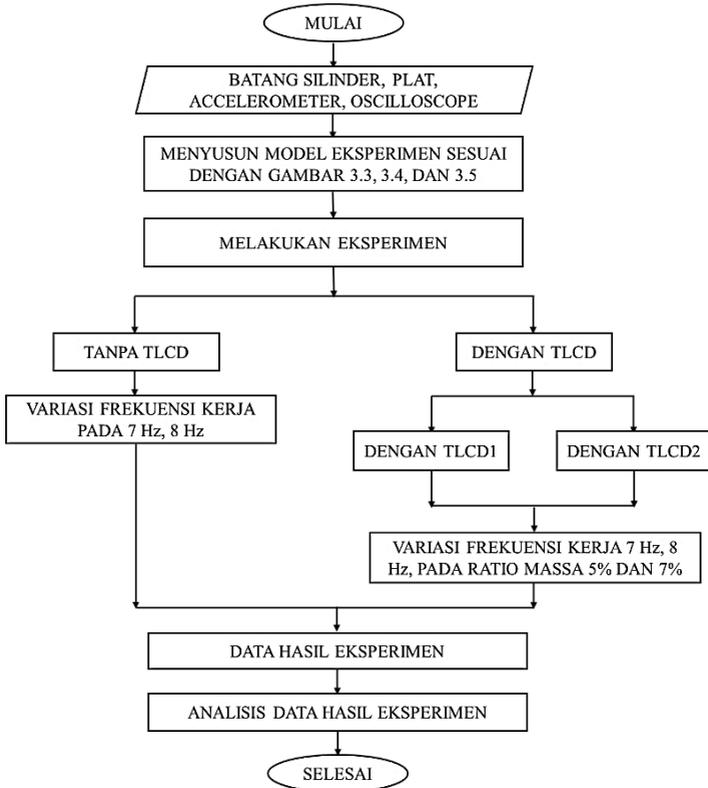
3.2.2 Identifikasi Masalah

Permasalahan yang diangkat pada tugas akhir ini adalah pengaruh penambahan TLCD terhadap respon dinamis model struktur gedung dengan variasi frekuensi, ratio massa, diameter *orifice* pada TLCD, dan posisi peletakan TLCD pada model struktur bangunan bertingkat. Adapun inputan yang diberikan pada sistem utama berupa frekuensi gempa yang disimulasikan atau diwakilkan dengan *shaker table*.

3.2.3 Eksperimen

Pada tugas akhir ini akan dilakukan eksperimen untuk membandingkan hasil simulasi dengan hasil simulasi yang akan dilakukan. Tahap eksperimen ini dilakukan untuk membandingkan

hasil simulasi dengan kondisi sebenarnya yang diwakilkan dengan alat uji berupa *shaker table* dan model struktur bangunan. Pada tahap ini akan dilakukan dalam beberapa tahap, yaitu pemodelan struktur model eksperimen, persiapan alat alat eksperimen, penyusunan model eksperimen, melakukan eksperimen dengan dan tanpa TLCD, analisis data, dan penarikan kesimpulan.

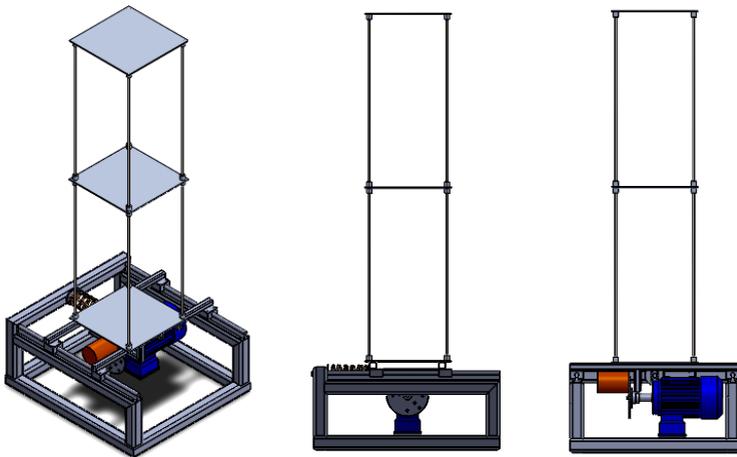


Gambar 3. 2 Diagram alir eksperimen

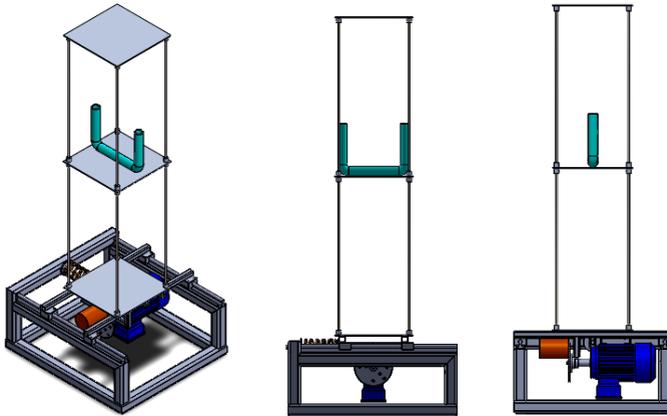
3.2.3.1 Perancangan Model Eksperimen

Pada tahap pemodelan struktur dilakukan analisis mengenai bentuk model struktur yang akan digunakan saat eksperimen.

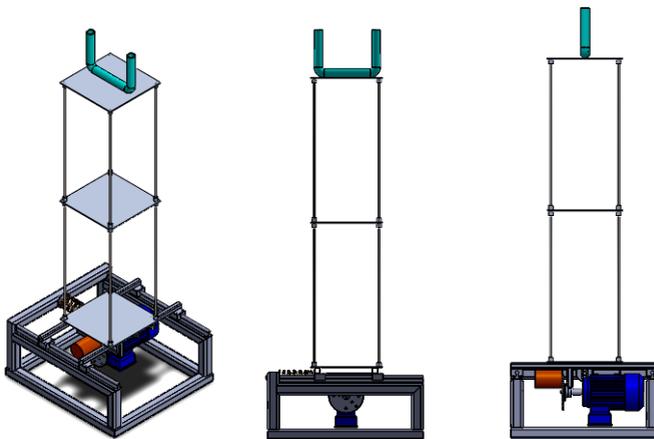
Untuk eksperimen pada tugas akhir ini akan dilakukan eksperimen dengan bentuk sesuai dengan struktur eksperimen yang pernah dilakukan oleh Jutsditya et al. Gambar model struktur yang akan digunakan pada eksperimen dapat dilihat pada gambar 3.3, 3.4 dan 3.5. Ukuran yang digunakan pada eksperimen ini didapatkan melalui perhitungan, dan menyesuaikan dengan jurnal yang sudah ada. Pada proses eksperimen digunakan perbandingan massa fluida terhadap massa struktur sebesar 5% sehingga dengan berat struktur 2.091 kg didapatkan ukuran pipa yang akan digunakan pada eksperimen ini adalah 0.0211 m. Pipa yang digunakan pada eksperimen ini menggunakan bahan akrilik agar pergerakan fluida pada pipa dapat dilihat. Untuk panjang batang digunakan sepanjang 50 cm bertujuan agar jarak perpindahan yang terjadi pada saat eksperimen dapat terlihat. Untuk ukuran plat yang berada diatas batang berukuran 25 x 25 cm, karena mengikuti ruang yang tersedia pada *shaker table*.



Gambar 3. 3 Model struktur bangunan tanpa penambahan TLCD
(a) 3D - view (b) Tampak Depan (c) Tampak Samping



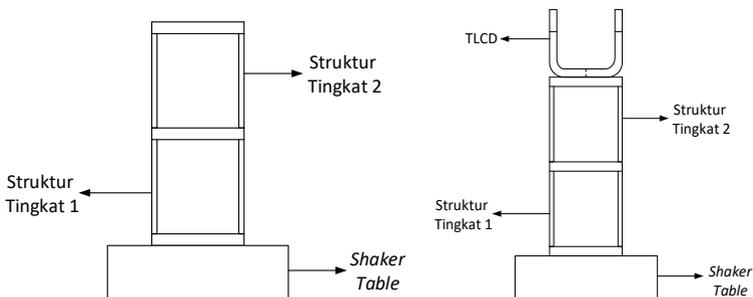
Gambar 3. 4 Model struktur bangunan dengan penambahan TLCD pada struktur tingkat 1 (a) 3D - view (b) Tampak Depan (c) Tampak Samping



Gambar 3. 5 Model struktur bangunan dengan penambahan TLCD pada struktur tingkat 2 (a) 3D - view (b) Tampak Depan (c) Tampak Samping

3.2.3.2 Penyusunan Model Eksperimen

Setelah pemodelan struktur dilakukan, kemudian alat alat yang diperlukan disiapkan. Adapun alat alat yang dibutuhkan antara lain pipa akrilik, *elbow* 90, lem, batang alumunium, papan alumunium, *shaker table*, *accelerometer*, dan air. Kemudian, setelah semua alat telah disiapkan, dilakukan penyusunan model seperti gambar 3.5 (a) untuk model struktur tanpa penambahan TLCD dan gambar 3.5 (b) untuk model struktur dengan penambahan TLCD. Untuk eksperimen tanpa penambahan TLCD langkah awal yang dilakukan adalah pemasangan batang alumunium pada tiap sudut plat, kemudian dipasang pada *shaker table*. Sedangkan untuk eksperimen dengan penambahan TLCD langkah awal yang akan dilakukan adalah melakukan pemasangan pipa pada plat, digunakan lem untuk menyambungkan pipa dengan plat agar pipa tidak bergeser. Kemudian setelah itu dipasang keempat batang pada tiap sudut plat. Setelah terpasang kemudian struktur tersebut dipasang pada *shaker table*.

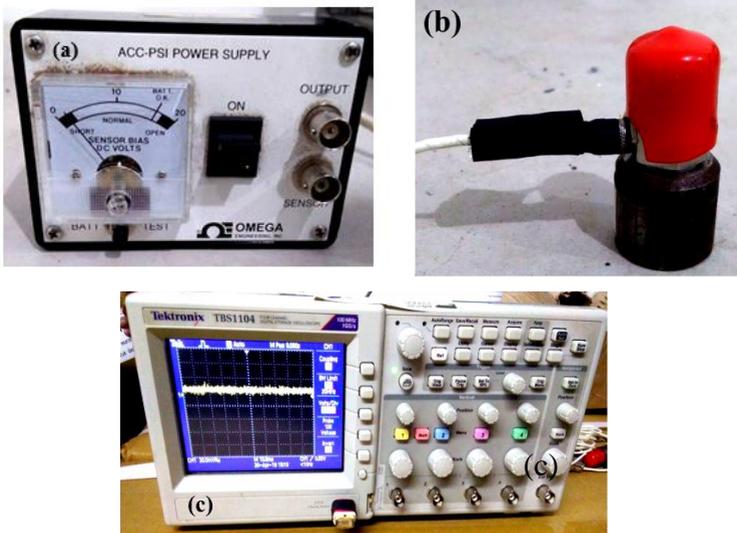


Gambar 3. 6 Gambar model fisik model struktur bangunan bertingkat (a) Tanpa TLCD (NTLCD) (b) Dengan TLCD pada struktur tingkat 2 (TLCD2)

3.2.3.3 Melakukan Eksperimen

Eksperimen dilakukan 2 macam yaitu yang pertama akan dilakukan eksperimen model struktur bangunan bertingkat tanpa penambahan TLCD, dan yang kedua dilakukan eksperimen

struktur bangunan bertingkat dengan adanya penambahan TLCD. Selain itu akan divariasikan frekuensi kerja *shaker* dan ratio massa fluida. Hasil eksperimen akan diamati melalui *oscilloscope*. Berikut merupakan gambar alat alat yang digunakan untuk pengambilan data eksperimen. Gambar (b) adalah *accelerometer* yang merupakan sensor percepatan yang akan membaca nilai percepatan suatu system dan akan disalurkan ke *oscilloscope* untuk dibaca dalam bentuk grafik. Gambar (b) adalah inverter berfungsi untuk menguatkan sinyal dari *accelerometer* ke *oscilloscope*. Dan gambar (c) adalah *oscilloscope* yang merupakan media penerima data dari *accelerometer*.



Gambar 3. 7 Alat untuk pengambilan data (a) *Inverter* (b) *Accelerometer* (c) *Oscilloscope*

3.2.3.4 Analisis Hasil Eksperimen

Dari eksperimen yang dilakukan, akan didapatkan hasil berupa grafik tegangan banding waktu yang dihasilkan *oscilloscope*. Hasil simulasi yang dilakukan berupa grafik respon

perpindahan, kecepatan ataupun percepatan. Sehingga agar dapat dibandingkan dibutuhkan rumus atau persamaan yang dapat digunakan untuk mengkonversi dari tegangan ke percepatan. Persamaan 3. Dibawah ini dapat mengkonversi dari tegangan ke percepatan. Setelah dikonversi barusalah dapat dianalisa dan dibandingkan dengan hasil simulasi yang dilakukan.

$$Response = \frac{G}{V} \times g \times \frac{f}{100} \quad (3.1)$$

Keterangan :

G = Data yang akan diolah (V)

V = Sensitivitas *accelerometer* (0.05 Volt)

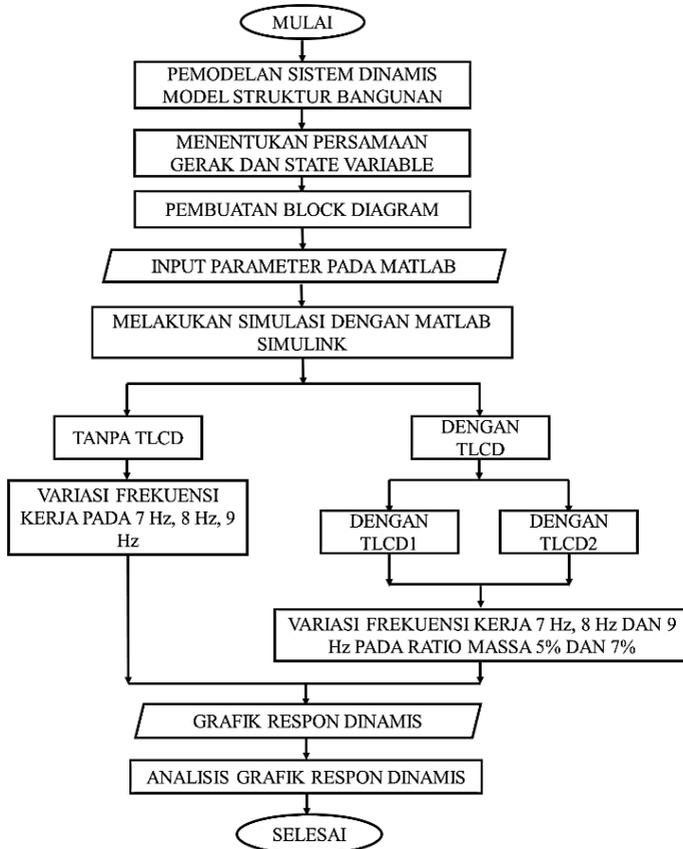
G = Percepatan gravitasi (9.81 m/s²)

f = Frekuensi eksitasi yang diberikan (Hz)

100 = Frekuensi kerja *accelerometer* pada saat 100 MHz

3.2.4 Simulasi

Pada tugas akhir ini model yang dieksperimenkan akan disimulasikan juga. Selain simulasi model yang dieksperimenkan, pada tahap simulasi ini dilakukan variasi tanpa dan dengan TLCD, variasi frekuensi, variasi ratio massa fluida, diameter *orifice*, dan juga variasi perubahan posisi peletakan TLCD pada model struktur bangunan bertingkat. Adapun nilai *orifice* yang akan disimulasikan adalah 75%, 50%, dan 25% dari diameter pipa, sedangkan untuk posisi peletakan TLCD akan diletakkan pada model struktur bangunan bertingkat di tingkat 1 dan tingkat 2. Simulasi ini dilakukan untuk mendapatkan hasil respon dinamis suatu struktur terhadap gaya yang bekerja pada struktur tersebut. Dari variasi yang dilakukan akan didapatkan respon perpindahan, dan percepatan. Pada simulasi ini diasumsikan bahwa sistem hanya bergerak ke arah translasi.

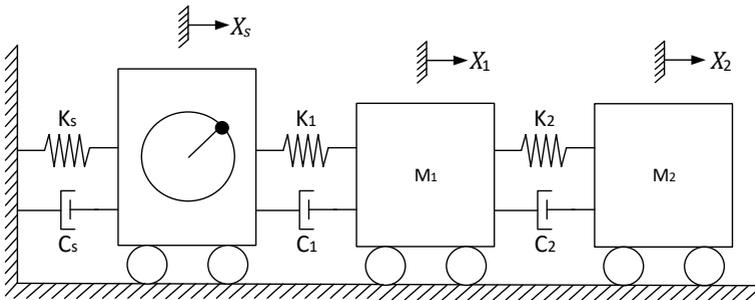


Gambar 3. 8 Diagram alir proses simulasi

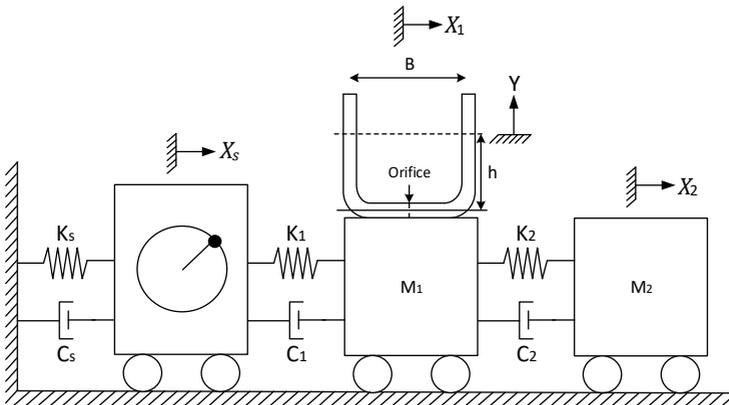
3.2.4.1 Pemodelan Sistem Dinamis

Pada tahap ini dilakukan pemodelan sistem dinamis pada model struktur gedung yang akan dianalisis. Pemodelan dinamis dilakukan dengan menggambarkan gaya-gaya yang bekerja pada sistem model struktur. Pada simulasi ini akan dilakukan 2 macam pemodelan sistem dinamis, yaitu yang pertama pemodelan tanpa

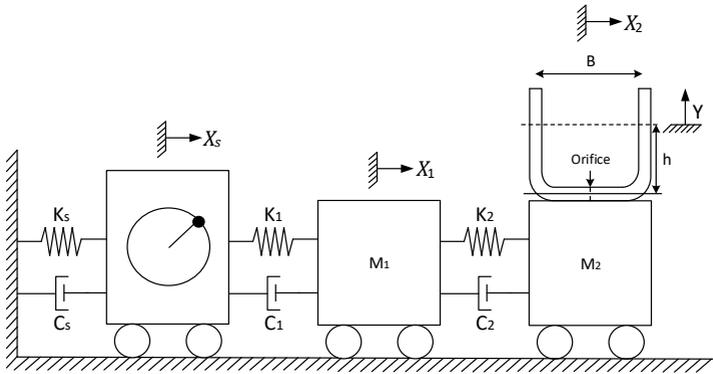
TLCD (NTLCD) dan yang kedua dengan TLCD. Model sistem dinamis model struktur bangunan bertingkat tanpa TLCD dapat dilihat pada gambar 3.7 dibawah ini, sedangkan untuk model dinamis dengan penambahan TLCD dapat dilihat pada gambar 3.8 dan 3.9. Dimana pada gambar 3.8 menunjukkan model dinamis dengan penambahan TLCD pada struktur tingkat 1 (TLCD1), dan gambar 3.9 menunjukkan model dinamis dengan penambahan TLCD pada struktur tingkat 2 (TLCD2).



Gambar 3. 9 Model dinamis model struktur bangunan bertingkat tanpa penambahan TLCD (NTLCD)



Gambar 3. 10 Model dinamis model struktur bangunan bertingkat dengan penambahan TLCD pada tingkat 1 (TLCD1)



Gambar 3. 11 Model dinamis model struktur bangunan bertingkat dengan penambahan TLCD pada tingkat 2 (TLCD2)

Keterangan:

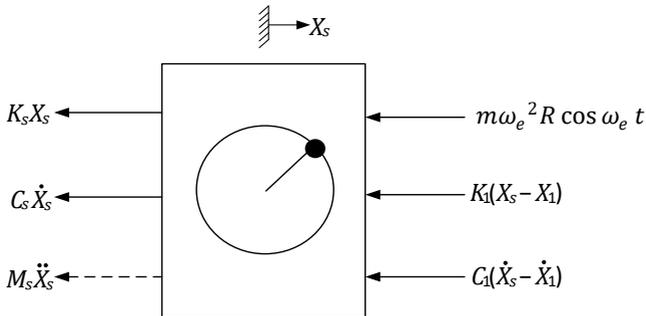
- M_s = massa *shaker* [kg]
- M_1 = massa struktur tingkat 1 [kg]
- M_2 = massa struktur tingkat 2 [kg]
- M_f = massa fluida [kg]
- m = massa *unbalance* [kg]
- C_s = redaman *shaker* [N.s/m]
- C_1 = redaman struktur tingkat 1 [N.s/m]
- C_2 = redaman struktur tingkat 2 [N.s/m]
- C_f = redaman fluida [N.s/m]
- K_s = kekakuan *shaker* [N/m]
- K_1 = kekakuan struktur tingkat 1 [N/m]
- K_2 = kekakuan struktur tingkat 2 [N/m]
- K_f = kekakuan fluida [N/m]
- h = panjang liquid ke arah vertikal
- B = panjang liquid ke arah horizontal
- L = panjang total liquid
- X = perpindahan ke arah horizontal
- Y = perpindahan ke arah vertikal

3.2.4.2 Menentukan Persamaan Gerak dan *State Variable*

Model dinamis sistem pada gambar 3.7 merupakan sistem 3 DOF dimana terdiri dari satu 3 massa yaitu massa *shaker*, massa struktur tingkat 1, dan massa struktur tingkat 2 beserta dengan nilai kekakuan dan peredam masing masing dengan pergerakan translasi kearah horizontal. Sedangkan pada gambar 3.8 dan 3.9 merupakan sistem 4 DOF karena adanya penambahan TLCD. Dibawah ini akan diuraikan penentuan persamaan gerak dan *state variable* masing masing model sistem.

3.2.4.2.1 Model Struktur Bangunan Bertingkat Tanpa Penambahan TLCD (NTLCD)

Gambar dibawah ini merupakan *free body diagram* dari *shaker*, dimana pada sistem ini diasumsikan pergerakan X_s lebih besar dari pergerakan ke arah X_1 sehingga didapatkan *free body diagram* seperti pada gambar 3.10 dibawah ini



Gambar 3. 12 *Free body diagram shaker*

Dari *free body diagram shaker* pada gambar 3.10, didapatkan persamaan gerak sebagai berikut:

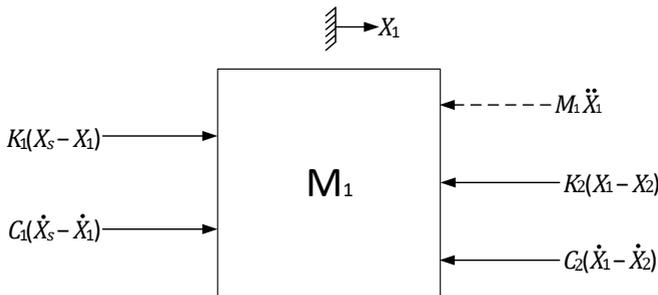
$$\begin{aligned} \Sigma F &= 0 \\ M_s \ddot{X}_s + C_s \dot{X}_s + K_s X_s + C_1 (\dot{X}_s - \dot{X}_1) + K_1 (X_s - X_1) \\ &- m \omega_e^2 R \cos \omega_e t = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M_s \ddot{X}_s + C_s \dot{X}_s + K_s X_s + C_1 \dot{X}_s - C_1 \dot{X}_1 + K_1 X_s - K_1 X_1 \\
- m\omega_e^2 R \cos \omega_e t = 0 \\
M_s \ddot{X}_s + (C_s + C_1) \dot{X}_s + (K_s + K_1) X_s - C_1 \dot{X}_1 - K_1 X_1 \\
- m\omega_e^2 R \cos \omega_e t = 0 \\
M_s \ddot{X}_s + (C_s + C_1) \dot{X}_s + (K_s + K_1) X_s = C_1 \dot{X}_1 + K_1 X_1 + \\
m\omega_e^2 R \cos \omega_e t \quad (3.2)
\end{aligned}$$

State Variable dari *free body diagram shaker* yaitu sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
\dot{X}_s &= V_s \\
\dot{X}_s &= \dot{V}_s \\
\dot{V}_s &= \frac{1}{M_s} \left(- (C_s + C_1) \dot{X}_s - (K_s + K_1) X_s + C_1 \dot{X}_1 + \right. \\
&\quad \left. K_1 X_1 + m\omega_e^2 R \cos \omega_e t \right) \quad (3.3)
\end{aligned}$$

Selanjutnya adalah pada gambar 3.11 ini merupakan *free body diagram* dari struktur bangunan tingkat 1 sebelum ditambahkan TLCD, pada sistem ini diasumsikan pergerakan X_1 lebih besar dari pergerakan ke arah X_2 sehingga dapat didapatkan *free body diagram* seperti pada gambar dibawah ini



Gambar 3. 13 *Free body diagram* model struktur bangunan tingkat 1

Dari *free body diagram* model struktur pada gambar 3.11, didapatkan persamaan gerak sebagai berikut :

$$\Sigma F = 0$$

$$M_1 \ddot{X}_1 - C_1 (\dot{X}_s - \dot{X}_1) - K_1 (X_s - X_1) + C_2 (\dot{X}_1 - \dot{X}_2) + K_2 (X_1 - X_2) = 0$$

$$M_1 \ddot{X}_1 - C_1 \dot{X}_s + C_1 \dot{X}_1 - K_1 X_s + K_1 X_1 + C_2 \dot{X}_1 - C_2 \dot{X}_2 + K_2 X_1 - K_2 X_2 = 0$$

$$M_1 \ddot{X}_1 + (C_1 + C_2) \dot{X}_1 + (K_1 + K_2) X_1 - C_1 \dot{X}_s - C_2 \dot{X}_2 - K_1 X_s + K_2 X_2 = 0$$

$$M_1 \ddot{X}_1 + (C_1 + C_2) \dot{X}_1 + (K_1 + K_2) X_1 = C_1 \dot{X}_s + C_2 \dot{X}_2 + K_1 X_s + K_2 X_2 \quad (3.4)$$

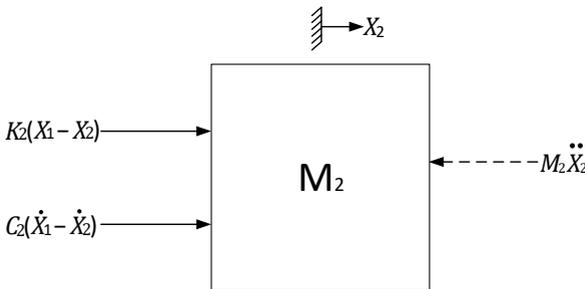
State Variable dari *free body diagram* model struktur bangunan bertingkat tingkat 1 dengan penambahan TLCD adalah sebagai berikut:

$$\dot{X}_1 = V_1$$

$$\ddot{X}_1 = \dot{V}_1$$

$$\dot{V}_1 = \frac{1}{M_1} \left(-(C_1 + C_2) \dot{X}_1 - (K_1 + K_2) X_1 + C_1 \dot{X}_s + C_2 \dot{X}_2 + K_1 X_s + K_2 X_2 \right) \quad (3.5)$$

Lalu pada gambar 3.12 ini merupakan *free body diagram* dari struktur bangunan tingkat 2 sebelum ditambahkan TLCD, dimana pergerakan X_1 lebih besar dari pergerakan ke arah X_2 sehingga didapatkan *free body diagram* seperti pada gambar dibawah ini



Gambar 3. 14 *Free body diagram* model struktur bangunan tingkat 2

Dari *free body diagram* model struktur pada gambar 3.12, didapatkan persamaan gerak sebagai berikut :

$$\begin{aligned}\Sigma F &= 0 \\ M_2 \ddot{X}_2 - C_2 (\dot{X}_1 - \dot{X}_2) - K_2 (X_1 - X_2) &= 0 \\ M_2 \ddot{X}_2 - C_2 \dot{X}_1 + C_2 \dot{X}_2 - K_2 X_1 + K_2 X_2 &= 0 \\ M_2 \ddot{X}_2 + C_2 \dot{X}_2 + K_2 X_2 &= C_2 \dot{X}_1 + K_2 X_1\end{aligned}\quad (3.6)$$

State Variable dari *free body diagram* model struktur bangunan bertingkat tingkat 2 tanpa penambahan TLCD adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\dot{X}_2 &= V_2 \\ \ddot{X}_2 &= \dot{V}_2 \\ \dot{V}_2 &= \frac{1}{M_2} (-C_2 \dot{X}_2 - K_2 X_2 + C_2 \dot{X}_1 + K_2 X_1)\end{aligned}\quad (3.7)$$

Dari ketiga persamaan diatas yaitu persamaan gerak *shaker*, struktur pada tingkat 1 dan struktur pada tingkat 2 dapat dituliskan dalam bentuk matriks seperti persamaan dibawah ini:

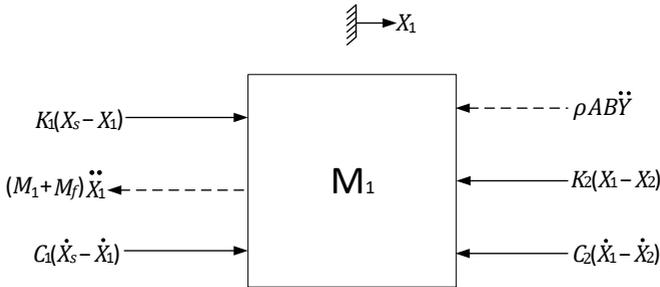
$$\begin{bmatrix} M_s & 0 & 0 \\ 0 & M_1 & 0 \\ 0 & 0 & M_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{X}_s \\ \ddot{X}_1 \\ \ddot{X}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_s + C_1 & -C_1 & 0 \\ -C_1 & (C_1 + C_2) & -C_2 \\ 0 & -C_2 & C_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{X}_s \\ \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} (K_s + K_1) & -K_1 & 0 \\ -K_1 & (K_1 + K_2) & -K_2 \\ 0 & -K_2 & K_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_s \\ X_1 \\ X_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} m\omega_e^2 R \cos \omega_e t \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}\quad (3.8)$$

3.2.4.2.2 Model Struktur Bangunan Bertingkat dengan Penambahan TLCD pada struktur tingkat 1 (TLCD1)

Pada model struktur bangunan bertingkat dengan penambahan TLCD ini hanya akan menjelaskan *free body diagram* pada struktur yang akan diberi penambahan TLCD saja, yaitu pada struktur tingkat 1 dan struktur tingkat 2. Untuk *free body diagram* pada *shaker* sama seperti persamaan 3.3 Karena pada *shaker* tidak

terjadi perubahan. Dari setiap struktur bertingkat akan memiliki 2 macam *free body diagram*, yaitu *free body diagram* dari fluida dan *free body diagram* dari struktur itu sendiri.

Yang pertama adalah *free body diagram* pada struktur tingkat 1. Sama dengan asumsi saat sebelum ditambahkan TLCD, yaitu dimana pergerakan X_1 lebih besar dari pergerakan ke arah X_2 sehingga didapatkan *free body diagram* seperti pada gambar 3.13 dibawah ini



Gambar 3. 15 Free body diagram model struktur bangunan bertingkat pada tingkat 1 dengan penambahan TLCD1

Dari *free body diagram* model struktur pada gambar 3.11, didapatkan persamaan gerak struktur bangunan bertingkat pada tingkat 1 sebagai berikut :

$$\Sigma F = 0$$

$$(M_1 + M_f) \ddot{X}_1 + \rho AB \ddot{Y} - C_1 (\dot{X}_s - \dot{X}_1) - K_1 (X_s - X_1) + C_2 (\dot{X}_1 - \dot{X}_2) + K_2 (X_1 - X_2) = 0$$

$$(M_1 + M_f) \ddot{X}_1 + \rho AB \ddot{Y} - C_1 \dot{X}_s + C_1 \dot{X}_1 - K_1 X_s + K_1 X_1 + C_2 \dot{X}_1 - C_2 \dot{X}_2 + K_2 X_1 - K_2 X_2 = 0$$

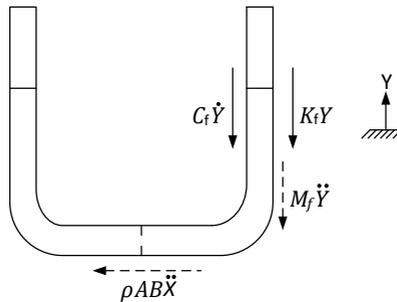
$$(M_1 + M_f) \ddot{X}_1 + \rho AB \ddot{Y} + (C_1 + C_2) \dot{X}_1 + (K_1 + K_2) X_1 - C_1 \dot{X}_s - C_2 \dot{X}_2 - K_1 X_s - K_2 X_2 = 0$$

$$(M_1 + M_f) \ddot{X}_1 + (C_1 + C_2) \dot{X}_1 + (K_1 + K_2) X_1 = C_1 \dot{X}_s + C_2 \dot{X}_2 + K_1 X_s + K_2 X_2 - \rho AB \ddot{Y} \quad (3.9)$$

State Variable dari *free body diagram* model struktur bangunan bertingkat pada tingkat 1 dengan penambahan TLCD:

$$\begin{aligned}\dot{X}_1 &= V_1 \\ \ddot{X}_1 &= \dot{V}_1 \\ \dot{V}_1 &= \frac{1}{M_1 + M_f} \left(- (C_1 + C_2) \dot{X}_1 - (K_1 + K_2) X_1 + C_1 \dot{X}_s + C_2 \dot{X}_2 + \right. \\ &\quad \left. K_1 X_s + K_2 X_2 - \rho AB \ddot{Y} \right) \quad (3.10)\end{aligned}$$

Selanjutnya adalah *free body diagram* untuk TLCD, dimana gambar 3.12 dibawah ini merupakan gambar *free body diagram* dari pergerakan fluida TLCD kearah vertikal.



Gambar 3. 16 *Free body diagram* fluida TLCD

Dari *free body diagram* TLCD diatas dapat dituliskan bahwa persamaan gerak dari TLCD sebagai berikut :

$$\begin{aligned}\Sigma F &= 0 \\ M_f \ddot{Y}(t) + \rho AB \ddot{X}(t) + C_f \dot{Y}(t) + K_f Y(t) &= 0 \\ M_f \ddot{Y}(t) + C_f \dot{Y}(t) + K_f Y(t) &= - \rho AB \ddot{X}(t) \quad (3.11)\end{aligned}$$

Dimana nilai M_f , C_f , dan K_f dapat ditentukan dengan persamaan dibawah ini,

$$M_f = \rho AL \quad (3.12)$$

$$K_f = 2\rho Ag \quad (3.13)$$

$$C_f = \frac{4\rho\xi A_e \omega_e}{3\pi} \quad (3.14)$$

State Variable dari *free body* diagram TLCD pada model struktur gedung bertingkat adalah sebagai berikut:

$$\dot{Y} = V_y$$

$$\dot{Y} = \dot{V}_y$$

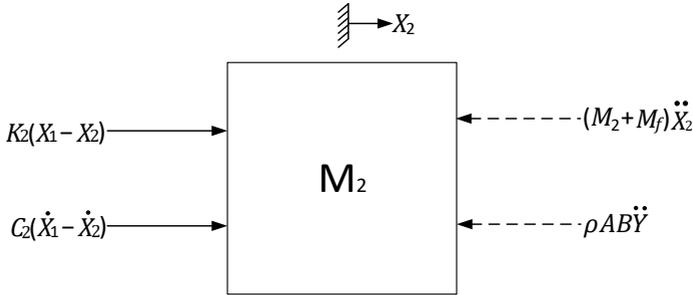
$$\dot{V}_y = \frac{1}{\rho AL} [-\rho AB \ddot{X}(t) - C_f \dot{Y}(t) - K_f Y(t)] \quad (3.15)$$

Dari keempat persamaan diatas yaitu persamaan *shaker*, struktur pada tingkat 1, dan struktur tingkat 2 dengan TLCD dapat dituliskan dalam bentuk matriks seperti persamaan dibawah ini:

$$\begin{bmatrix} M_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_1 + M_f & 0 & \rho AB \\ 0 & 0 & M_2 & 0 \\ 0 & \rho AB & 0 & M_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{X}_s \\ \ddot{X}_1 \\ \ddot{X}_2 \\ \dot{Y} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_s + C_1 & -C_1 & 0 & 0 \\ -C_1 & (C_1 + C_2) & -C_2 & 0 \\ 0 & -C_2 & C_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{X}_s \\ \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \\ \dot{Y} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} (K_s + K_1) & -K_1 & 0 & 0 \\ -K_1 & (K_1 + K_2) & -K_2 & 0 \\ 0 & -K_2 & K_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_s \\ X_1 \\ X_2 \\ Y \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} m\omega_e^2 R \cos \omega_e t \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3.16)$$

3.2.4.2.3 Model Struktur Bangunan Bertingkat dengan Penambahan TLCD pada struktur tingkat 2 (TLCD2)

Yang kedua adalah *free body diagram* pada struktur tingkat 2, dengan asumsi pergerakan X_1 lebih besar dari pergerakan ke arah X_2 sehingga didapatkan *free body diagram* seperti pada gambar 3.13 dibawah ini



Gambar 3. 17 *Free body diagram* model struktur bangunan bertingkat pada tingkat 2 dengan penambahan TLCD2

Dari *free body diagram* model struktur pada gambar 3.6, didapatkan persamaan gerak struktur bangunan pada tingkat 2 sebagai berikut :

$$\Sigma F = 0$$

$$(M_2 + M_f) \ddot{X}_2 + \rho AB \ddot{Y} - C_2 (\dot{X}_1 - \dot{X}_2) - K_2 (X_1 - X_2) = 0$$

$$(M_2 + M_f) \ddot{X}_2 + \rho AB \ddot{Y} - C_2 \dot{X}_1 + C_2 \dot{X}_2 - K_2 X_1 + K_2 X_2 = 0$$

$$(M_2 + M_f) \ddot{X}_2 + C_2 \dot{X}_2 + K_2 X_2 = C_2 \dot{X}_1 + K_2 X_1 - \rho AB \ddot{Y} \quad (3.17)$$

State Variable dari *free body diagram* model struktur bangunan bertingkat pada tingkat 2 adalah sebagai berikut:

$$\dot{X}_2 = V_2$$

$$\ddot{X}_2 = \dot{V}_2$$

$$\dot{V}_2 = \frac{1}{M_2 + M_f} (-C_2 \dot{X}_2 - K_2 X_2 + C_2 \dot{X}_1 + K_2 X_1 - \rho AB \ddot{Y}) \quad (3.18)$$

Untuk persamaan TLCD pada struktur bangunan bertingkat pada tingkat 2 sama dengan persamaan pada struktur tingkat 1, sehingga dapat dilihat dari persamaan 3.11 – 3.15. Dari keempat persamaan diatas yaitu persamaan *shaker*, struktur pada tingkat 1 dengan TLCD, dan struktur tingkat 2 dapat dituliskan dalam bentuk matriks seperti persamaan dibawah ini:

$$\begin{bmatrix} M_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_2 + M_f & \rho AB \\ 0 & 0 & \rho AB & M_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{X}_s \\ \ddot{X}_1 \\ \ddot{X}_2 \\ \ddot{Y} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_s + C_1 & -C_1 & 0 & 0 \\ -C_1 & (C_1 + C_2) & -C_2 & 0 \\ 0 & -C_2 & C_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{X}_s \\ \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \\ \dot{Y} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} (K_s + K_1) & -K_1 & 0 & 0 \\ -K_1 & (K_1 + K_2) & -K_2 & 0 \\ 0 & -K_2 & K_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_s \\ X_1 \\ X_2 \\ Y \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} m\omega_e^2 R \cos \omega_e t \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3.20)$$

3.2.4.3 Pembuatan blok diagram

Setelah *state variable* didapatkan, selanjutnya akan dilakukan pembuatan blok diagram pada MATLAB Simulink. Blok diagram yang akan dibuat terdiri dari blok diagram model struktur tanpa penambahan TLCD dan dengan penambahan TLCD. Simulasi ini dilakukan untuk mendapatkan respon dinamis dari pemodelan tanpa penambahan TLCD dan dengan TLCD. Input yang digunakan pada simulasi ini berupa *input sinusoidal* (harmonic).

3.2.4.4 Menentukan parameter

Hal yang akan dilakukan setelah blok diagram telah dibuat adalah menentukan nilai parameter yang akan digunakan saat simulasi. Pada simulasi ini akan digunakan parameter parameter seperti table 3.1 dibawah ini

Tabel 3. 1 Parameter model struktur gedung

Parameter	Nilai	Satuan
Massa <i>Shaker</i>	9.591	Kg
Massa <i>Unbalance</i>	0.8	Kg
Massa Struktur 1	1.056	Kg
Massa Struktur 1 dengan TLCD	1.264	Kg

Massa Struktur 2	1.035	Kg
Massa Struktur 2 dengan TLCD	1.243	Kg
Jarak Eksentrisitas	6	Cm
Kekakuan <i>Shaker</i>	200	N/m
Kekakuan Struktur 1	781.7	N/m
Kekakuan Struktur 2	969.7	N/m
Peredam <i>Shaker</i>	11.1126	N.s/m
Peredam Struktur 1	1.8541	N.s/m
Peredam Struktur 2	2.2012	N.s/m
Massa Jenis Fluida	1000	kg/m^3
<i>Liquid column</i> kearah horizontal	22.5	cm
<i>Liquid column</i> kearah vertikal	5.5	cm
<i>Total length liquid column</i>	33.5	cm
Percepatan gravitasi	9.81	m/s^2

Nilai parameter didapatkan dari jurnal, buku dan juga perhitungan. Untuk nilai massa jenis air, percepatan gravitasi, nilai modulus elastisitas didapatkan dari jurnal dan buku. Untuk parameter lainnya didapatkan dari perhitungan dengan rumus dengan asumsi asumsi tertentu. Berikut ini merupakan penjelasan dari perhitungan nilai parameter seperti tabel diatas.

- a. Massa Struktur, didapatkan dari perhitungan jumlah massa batang, massa plat, dan massa

baut. Pada tugas akhir ini digunakan plat berukuran 25 x 25 cm, silinder berdiameter 5 mm dengan panjang 50 cm, dan material yang digunakan untuk plat adalah aluminium dan untuk tiang adalah *stainless steel*.

- b. Massa fluida didapatkan dari perbandingan massa sebesar 5% yang didapatkan dari jurnal yang ditulis oleh Balendra et al. Dimana 5% tersebut akan dikalikan dengan jumlah massa struktur tingkat 1 dan massa struktur tingkat 2. Pada penelitian ini akan dilakukan 2 macam variasi massa fluida, yaitu 5% dan 7%. Pada ratio massa 5% didapatkan massa fluida sebesar 0.10455 kg.
- c. Diameter pipa didapatkan dari perhitungan rumus massa fluida. Sehingga dengan menggunakan persamaan 3.27 didapatkan nilai diameter pipa sebesar 0.021 m atau sebesar 21 mm.

$$M_f = \rho \cdot A L \quad (3.25)$$

$$A = \frac{\rho \cdot L}{M_f} \quad (3.26)$$

$$A = \frac{1000 \cdot 0.3}{0.10455} = 0.0003485 \text{ m}^2$$

$$A = \frac{\pi d^2}{4}; d = \sqrt{\frac{4 \times A}{\pi}} \quad (3.27)$$

- d. Untuk *coefficient of headloss* ditentukan dengan menggunakan persamaan dari jurnal Wu et al dituliskan persamaan seperti dibawah ini

$$\xi = (-0.6\psi + 2.1\psi^{0.1})^{1.6} (1 - \psi)^{-2} \quad (3.28)$$

ψ merupakan area blocking ratio yang dapat ditentukan dengan menggunakan rumus dibawah ini, dimana d_o merupakan diameter *orifice* dan d_t adalah diameter pipa

$$\psi = \frac{d_p - d_o}{d_p} \quad (3.29)$$

Pada penelitian ini dilakukan variasi diameter *orifice* yaitu 25%, 50%, dan 75% terhadap diameter pipa, sehingga

didapatkan nilai variasi diameter sebesar 1.575 cm, 1.05 cm, 0.525 cm

3.2.4.4.1 Menentukan Nilai Peredam dan Kekakuan

Selain menentukan massa *shaker*, massa struktur, diameter pipa, *coefficient of headloss*, diperlukan juga nilai peredam dan kekakuan pada masing masing struktur. Untuk nilai peredam dan kekakuan dari TLCD dapat ditentukan dari persamaan 3.13 Dan 3.14 Sedangkan untuk nilai redaman dan kekakuan pada *shaker* dan struktur akan dicari dengan melakukan eksperimen. Pertama adalah mencari nilai kekakuan dari *shaker* dan struktur. Untuk menentukan nilai kekakuan juga akan dilakukan eskperimen. Pada eksperimen akan diberi gaya dengan menggunakan newton meter dan melihat besar nilai defleksi yang terjadi. Kemudian eksperimen ini akan dilakukan paling sedikit 3 kali untuk mengurangi eror yang terjadi. Setelah eksperimen dilakukan akan ditentukanlah nilai kekakuan dengan rumus.

$$F = k \cdot x \quad (3.32)$$

$$k = \frac{F}{x} \quad (3.33)$$

Eskperimen dilakukan sebanyak 3 kali disetiap strukturnya, dengan pembebanan yang sama yaitu 10 N. Pada struktur 1 didapatkan nilai perpindahan yang terjadi adalah 1.3 cm, 1.2 cm, dan 1.3 cm. Karena eksperimen dilakukan lebih dari satu kali maka nilai k dapat dicari dengan persamaan 3.34 dibawah ini

$$k = \frac{\sum F}{\sum x} \quad (3.34)$$

$$k = \frac{10 + 10 + 10}{(1.1 + 1.3 + 1.5) \times 10^{-2}} = 781.7\text{N/m}$$

Sehingga dapat dihasilkan nilai k untuk struktur 1 sebesar 781.7 N/m. Kemudian untuk struktur tingkat 2, didapatkan hasil nilai perpindahan yang terjadi adalah 1 cm, 1 cm, dan 1.1 cm secara berturut turut. Sehingga didapatkan nilai k sebesar 969.7N/m.

$$k = \frac{10 + 10 + 10}{(1 + 1 + 1) \times 10^{-2}} = 969.7 \text{ N/m}$$

Dan kemudian nilai kekakuan spring pada *shaker* dihitung. Metode yang dilakukan sama dengan menghitung kekakuan yang lain yaitu dengan menggunakan persamaan 3.34. Dari hasil uji tarik yang dilakukan didapatkan bahwa perpindahan yang terjadi adalah 5 cm dengan gaya sebesar 10 N, lalu 3.9 dengan gaya sebesar 8 N, dan 3.6 dengan pemberian gaya sebesar 7 N. Dari hasil didapatkan nilai *K shaker* sebesar 199.8575 dibulatkan menjadi 200 N/m.

$$k = \frac{10 + 8 + 7}{(5 + 3.9 + 3.6) \times 10^{-2}} = 199.8575 \text{ N/m}$$

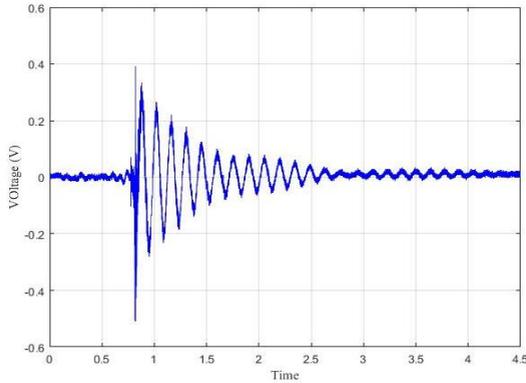
Selanjutnya untuk menentukan nilai redaman akan dilakukan eksperimen berupa pemberian gaya dari luar dan kemudian membiarkan suatu sistem bergerak bebas. Kemudian getaran yang terjadi akan diamati pada oscilloscope. Setelah dilakukan eksperimen data akan diolah kembali dengan menggunakan rumus *logarithmic decrement* pada persamaan 3.30

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \frac{X_1}{X_{n+1}} \quad (3.30)$$

$$\zeta = \frac{\delta}{2\pi} \quad (3.31)$$

$$\zeta = \frac{c}{c_c} = \frac{c}{2.m.\omega_n} ; c = 2.\zeta.m.\omega_n \quad (3.32)$$

Dari gambar 3.17 dibawah ini akan dilakukan pencarian puncak awal (X_1) dan puncak yang berdekatan (X_{n+1}) untuk dapat menentukan besar *logarithmic decrement*. Kemudian setelah itu akan dilakukan perhitungan nilai *damping ratio* dan yang kemudian akan dilanjutkan dengan menghitung nilai redaman struktur itu sendiri dengan menggunakan persamaan 3.32. Berikut merupakan contoh salah satu perhitungan



Gambar 3. 18 Hasil eksperimen pada struktur 2

Mencari nilai rata rata puncak dan lembah awal dari struktur 2:

$$X_1 = \frac{\text{puncak}_n - \text{lembah}_n}{2}$$

$$X_1 = \frac{0.336 - (-0.28)}{2} = 0.308$$

Mencari nilai rata rata puncak dan lembah kedua dari struktur 2:

$$X_{n+1} = \frac{\text{puncak}_n - \text{lembah}_n}{2}$$

$$X_{n+1} = \frac{0.264 - (-0.232)}{2} = 0.248$$

Kemudian menghitung nilai *logarithmic decrement*

$$\delta = \frac{1}{1} \ln \frac{X_1}{X_2} = \ln \frac{0.308}{0.248} = 0.216$$

Lalu mencari nilai damping ratio

$$\zeta = \frac{\delta}{2\pi} = \frac{0.216}{2\pi} = 0.0344$$

Yang terakhir adalah menghitung nilai koefisien redaman

$$c = 2 \cdot \zeta \cdot m \cdot \omega_n$$

$$C = 2 \times 0.0344 \times 1.035 \times \sqrt{\frac{969.7}{1.035}} = 2.184$$

Berikut adalah data data pencarian nilai redaman *shaker*, struktur 1, dan struktur 2:

Tabel 3. 2 Nilai Koefisien Redaman Sistem

	Data ke	Kekakuan	Massa	Decrement	Damping (N.m/s)
<i>Shaker</i>	1	200	9.591	0.430	5.988
	2	200	9.591	1.4489	19.69
	3	200	9.591	-0.550	7.65
	Nilai Rata Rata				
Struktur 1	1	781.66	1.056	0.157	1.438
	2	781.66	1.056	0.2324	2.1253
	3	781.66	1.056	0.218	1.997
	Nilai Rata Rata				
Struktur 2	1	969.70	1.035	0.216	2.184
	2	969.70	1.035	0.2051	2.068
	3	969.70	1.035	0.233	2.3501
	Nilai Rata Rata				

3.2.4.5 Melakukan Simulasi

Setelah blok diagram dibuat dan parameter telah ditentukan barulah simulasi dapat dilakukan. Simulasi akan dilakukan beberapa kali, yang pertama akan dilakukan simulasi model struktur tanpa penambahan TLCD, kemudian akan dilakukan simulasi dengan penambahan TLCD dengan variasi diameter *orifice* sebesar 1.575 cm, 1.05 cm, 0.525 cm, dengan input sinusoidal.

3.2.4.6 Hasil Simulasi

Dari simulasi yang dilakukan akan didapatkan berapa hasil. Dari simulasi dengan input *sinusoidal* akan didapatkan hasil simulasi berupa respon dinamis tanpa penambahan TLCD dan dengan penambahan TLCD. Selain itu juga didapatkan respon dinamis struktur bangunan variasi diameter *orifice*. Melalui simulasi akan didapatkan beberapa grafik antara lain grafik respon perpindahan banding waktu, grafik respon kecepatan banding waktu, dan grafik respon percepatan banding waktu. Selain itu juga akan didapatkan grafik amplitude banding gaya.

3.2.5 Analisis Data Simulasi

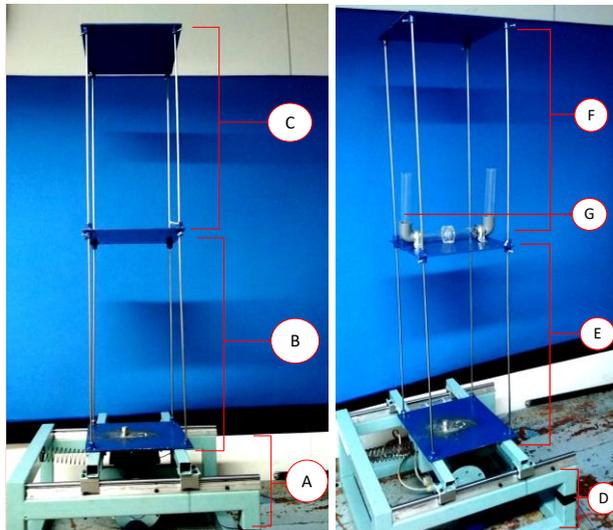
Setelah simulasi telah dilakukan, selanjutnya akan dilakukan analisis hasil data yang didapatkan. Analisis awal yang akan dilakukan adalah pada hasil simulasi dan eksperimen adalah analisis respon dinamis tanpa dan dengan penambahan TLCD. Selanjutnya dilakukan perbandingan hasil eksperimen dengan hasil simulasi tanpa TLCD dan dengan penambahan TLCD. Selanjutnya juga akan dilakukan analisis hasil simulasi dengan variasi frekuensi, ratio massa fluida, diameter *orifice* dan posisi peletakan TLCD. Setelah analisis telah dilakukan, akan dilakukan penarikan kesimpulan dari hasil analisis

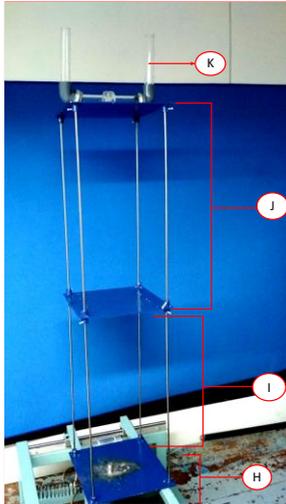
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Pemodelan Sistem

Pada tugas akhir ini akan dilakukan 2 macam pemodelan, yang pertama adalah pemodelan sistem utama dan yang kedua adalah sistem peredam. Pada sistem utama yang akan dianalisis terdiri dari *shaker*, struktur bangunan tingkat 1 dan struktur bangunan tingkat 2. Selanjutnya yang kedua adalah sistem peredam, dimana peredam yang digunakan merupakan *Tuned Liquid Column Damper*. Gambar 4.1 dibawah ini merupakan gambar model struktur bangunan tanpa TLCD (NTLCD), dengan TLCD pada struktur bangunan tingkat 1 (TLCD1) dan dengan TLCD pada struktur bangunan tingkat 2 (TLCD2).





Gambar 4. 1 Gambar model struktur bangunan bertingkat (a) tanpa TLCD (b) dengan TLCD pada tingkat 1 (c) dengan TLCD pada tingkat 2

Keterangan :

A, D, H : *Shaker*

B, E, I : Struktur tingkat 1

C, F, J : Struktur tingkat 2

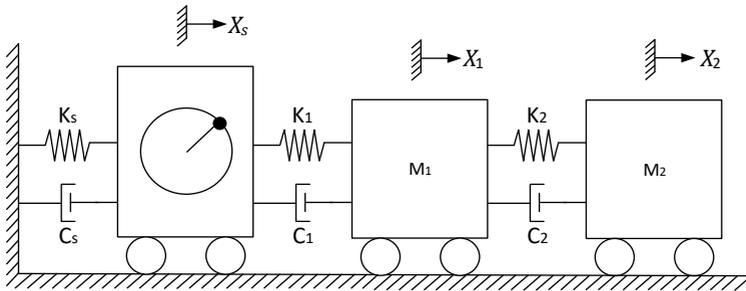
G, K : TLCD

4.1.1 Pemodelan Sistem Model Struktur Bangunan Bertingkat

Pemodelan sistem model struktur bangunan bertingkat akan dibagi menjadi 3 macam yaitu sistem model struktur bangunan bertingkat tanpa penambahan TLCD, sistem model struktur bangunan bertingkat dengan penambahan TLCD pada struktur tingkat 1, dan sistem model struktur bangunan bertingkat dengan penambahan TLCD pada struktur tingkat 2.

4.1.1.1 Tanpa Penambahan TLCD (NTLCD)

Pada tugas akhir ini, model struktur bangunan bertingkat memiliki sistem multi dof yaitu 3 *degree of freedom*. Sistem ini terdiri dari *shaker* yang berfungsi sebagai gaya eksitasi yang bekerja pada sistem, struktur tingkat 1, dan struktur tingkat 2 dengan pergerakan sistem translasi ke arah x. Pemodelan sistem model struktur bangunan bertingkat tanpa TLCD dilakukan sebagai bahan banding yang akan digunakan untuk membandingkan hasil perhitungan matematis dan simulasi dari Matlab Simulink antara sistem tanpa TLCD dan sistem dengan penambahan TLCD.



Gambar 4. 2 Model dinamis model struktur bangunan bertingkat tanpa penambahan TLCD

Analisa gaya gaya yang bekerja pada sistem model dinamis pada gambar 4.2 diatas dilakukan untuk mengetahui persamaan gerak translasi yang bekerja pada sistem. Dari analisa gaya tersebut didapatkan persamaan gerak sebagai berikut:

Persamaan gerak *shaker*

$$M_s \ddot{X}_s + (C_s + C_1) \dot{X}_s + (K_s + K_1) X_s = C_1 \dot{X}_1 + K_1 X_1 + m\omega_e^2 R \cos \omega_e t \quad (4.1)$$

Persamaan gerak struktur bangunan tingkat 1

$$M_1 \ddot{X}_1 + (C_1 + C_2) \dot{X}_1 + (K_1 + K_2) X_1 = C_1 \dot{X}_s + C_2 \dot{X}_2 + K_1 X_s + K_2 X_2 \quad (4.2)$$

Persamaan gerak struktur bangunan tingkat 2

$$M_2 \ddot{X}_2 + C_2 \dot{X}_2 + K_2 X_2 = C_2 \dot{X}_1 + K_2 X_1 \quad (4.3)$$

Dari persamaan gerak diatas akan dilakukan analisis untuk mengetahui nilai frekuensi natural dari sistem tersebut. Dari ketiga persamaan diatas, dapat dituliskan dalam bentuk matriks 3 x 3 seperti persamaan dibawah ini

$$\begin{bmatrix} M_s & 0 & 0 \\ 0 & M_1 & 0 \\ 0 & 0 & M_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{X}_s \\ \ddot{X}_1 \\ \ddot{X}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_s + C_1 & -C_1 & 0 \\ -C_1 & (C_1 + C_2) & -C_2 \\ 0 & -C_2 & C_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{X}_s \\ \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} (K_s + K_1) & -K_1 & 0 \\ -K_1 & (K_1 + K_2) & -K_2 \\ 0 & -K_2 & K_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_s \\ X_1 \\ X_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} m\omega_e^2 R \cos \omega_e t \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (4.4)$$

Untuk menentukan nilai frekuensi natural akan dilakukan analisa menggunakan analisa fundamental, untuk menyelesaikan persamaan ini digunakan asumsi redaman dan eksitasi diabaikan. Sehingga didapatkan persamaan matriks baru sebagai berikut

$$\begin{bmatrix} M_s & 0 & 0 \\ 0 & M_1 & 0 \\ 0 & 0 & M_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{X}_s \\ \ddot{X}_1 \\ \ddot{X}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} (K_s + K_1) & -K_1 & 0 \\ -K_1 & (K_1 + K_2) & -K_2 \\ 0 & -K_2 & K_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_s \\ X_1 \\ X_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Dengan asumsi M_s , M_1 , dan M_2 bergerak secara harmonik, sehingga dapat dituliskan bahwa

$$\begin{aligned} X_s(t) &= X_s \cos(\omega t + \phi) & \ddot{X}_s(t) &= -\omega^2 X_s \cos(\omega t + \phi) \\ X_1(t) &= X_1 \cos(\omega t + \phi) & \ddot{X}_1(t) &= -\omega^2 X_1 \cos(\omega t + \phi) \\ X_2(t) &= X_2 \cos(\omega t + \phi) & \ddot{X}_2(t) &= -\omega^2 X_2 \cos(\omega t + \phi) \end{aligned} \quad (4.5)$$

Kemudian persamaan diatas, disubstitusikan pada persamaan gerak, sehingga didapatkan persamaan sebagai berikut

$$\begin{aligned} &\left(\begin{bmatrix} -\omega^2 M_s & 0 & 0 \\ 0 & -\omega^2 M_1 & 0 \\ 0 & 0 & -\omega^2 M_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (K_s + K_1) & -K_1 & 0 \\ -K_1 & (K_1 + K_2) & -K_2 \\ 0 & -K_2 & K_2 \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} X_s \\ X_1 \\ X_2 \end{Bmatrix} = 0 \\ &\left(\begin{bmatrix} (K_s + K_1) - \omega^2 M_s & -K_1 & 0 \\ -K_1 & (K_1 + K_2) - \omega^2 M_1 & -K_2 \\ 0 & -K_2 & K_2 - \omega^2 M_2 \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} X_s \\ X_1 \\ X_2 \end{Bmatrix} = 0 \end{aligned}$$

Untuk menentukan nilai frekuensi natural dari sistem, matriks persamaan gerak diatas akan dideterminankan = 0, dan dengan mengasumsikan $\lambda = \omega^2$ dapat dituliskan persamaan seperti berikut

$$\det \begin{vmatrix} (K_s + K_1) - \lambda M_s & -K_1 & 0 \\ -K_1 & (K_1 + K_2) - \lambda M_1 & -K_2 \\ 0 & -K_2 & K_2 - \lambda M_2 \end{vmatrix} = 0$$

$$\det \begin{vmatrix} (200 + 781.7) - 9.591\lambda & -781.7 & 0 \\ -781.7 & (781.7 + 969.7) - 1.056\lambda & -969.7 \\ 0 & -969.7 & 969.7 - 1.035\lambda \end{vmatrix} = 0$$

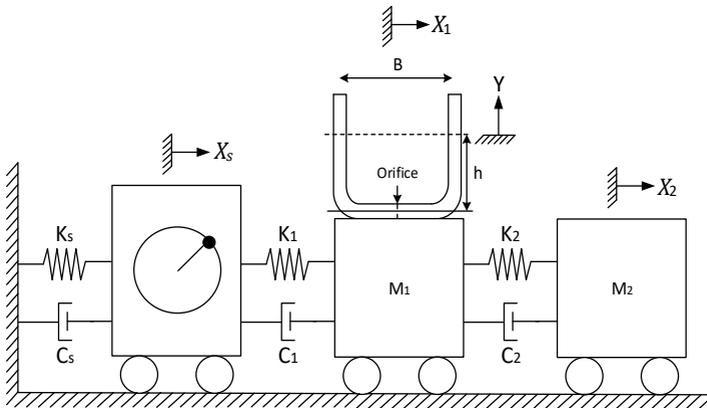
Hasil determinan dari persamaan diatas dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} & \{((200 + 781.7) - 9.591\lambda)(781.7 + 969.7) - 1.056\lambda(969.7 - 1.035\lambda)\} - \{(-969.7)(-969.7)((200 + 781.7) - 9.591\lambda)\} - \\ & \{(-781.7)(-781.7)(969.7 - 1.035\lambda)\} = 0 \\ & -10.4825 \lambda^3 + 28279.299 \lambda^2 + 9422007.96\lambda + 151595214.4 = 0 \end{aligned}$$

Dari persamaan diatas didapatkan nilai $\lambda_1 = 16.94, \lambda_2 = 369.17, \lambda_3 = 2311.62$ dimana $\lambda = -\omega^2$, sehingga didapatkan nilai frekuensi natural dari sistem model struktur bangunan bertingkat tanpa penambahan TLCD sebagai berikut $\omega_1 = 4.1165 \text{ rad/s}$, $\omega_2 = 19.214 \text{ rad/s}$, $\omega_3 = 48.079 \text{ rad/s}$.

4.1.1.2 Dengan penambahan TLCD pada struktur tingkat 1 (TLCD1)

Pemodelan struktur bangunan bertingkat dengan penambahan TLCD pada struktur tingkat 1 merupakan sistem yang memiliki 4 *degree of freedom*. Terdiri dari massa utama yaitu *shaker*, struktur tingkat 1, struktur tingkat 2, dan massa peredam yaitu TLCD yang diletakaan pada struktur tingkat 1. Dibawah ini merupakan model dinamis dari model struktur bangunan bertingkat dengan penambahan TLCD.



Gambar 4. 3 Model dinamis model struktur bangunan bertingkat dengan penambahan TLCD pada struktur tingkat 1

Dari hasil analisis gaya yang dilakukan pada model dinamis diatas, didapatkan persamaan gerak *shaker*, struktur tingkat 1, dan struktur tingkat 2, serta TLCD. Dimana persamaan gerak *shaker*, dan struktur tingkat 2 sama dengan persamaan gerak tanpa penambahan TLCD pada persamaan 4.1 dan persamaan 4.3. Persamaan gerak untuk struktur tingkat 1 dan TLCD adalah sebagai berikut:

Persamaan gerak struktur tingkat 1:

$$(M_1 + M_f) \ddot{X}_1 + (C_1 + C_2) \dot{X}_1 + (K_1 + K_2) X_1 = C_1 \dot{X}_s + C_2 \dot{X}_2 + K_1 X_s + K_2 X_2 - \rho AB \ddot{Y} \quad (4.6)$$

Persamaan gerak TLCD:

$$M_f \ddot{Y}(t) + C_f \dot{Y}(t) + K_f Y(t) = -\rho AB \ddot{X}(t) \quad (4.7)$$

Dari persamaan gerak diatas akan dilakukan analisis untuk mengetahui nilai frekuensi natural dari sistem tersebut. Dari empat persamaan diatas, dapat dituliskan dalam bentuk matriks 4 x 4 seperti persamaan dibawah ini

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} M_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_1 + M_f & 0 & \rho AB \\ 0 & 0 & M_2 & 0 \\ 0 & \rho AB & 0 & M_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{X}_s \\ \ddot{X}_1 \\ \ddot{X}_2 \\ \ddot{Y} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_s + C_1 & -C_1 & 0 & 0 \\ -C_1 & (C_1 + C_2) & -C_2 & 0 \\ 0 & -C_2 & C_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{X}_s \\ \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \\ \dot{Y} \end{Bmatrix} + \\
& \begin{bmatrix} (K_s + K_1) & -K_1 & 0 & 0 \\ -K_1 & (K_1 + K_2) & -K_2 & 0 \\ 0 & -K_2 & K_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_s \\ X_1 \\ X_2 \\ Y \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} m\omega_e^2 R \cos \omega_e t \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (4.8)
\end{aligned}$$

Untuk model struktur dengan penambahan TLCD pada struktur tingkat 1 akan dilakukan perhitungan untuk mengetahui nilai frekuensi natural menggunakan analisa fundamental, untuk menyelesaikan persamaan ini digunakan asumsi redaman dan eksitasi diabaikan. Sehingga didapatkan persamaan matriks baru sebagai berikut

$$\begin{bmatrix} M_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_1 + M_f & 0 & \rho AB \\ 0 & 0 & M_2 & 0 \\ 0 & \rho AB & 0 & M_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{X}_s \\ \ddot{X}_1 \\ \ddot{X}_2 \\ \ddot{Y} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} (K_s + K_1) & -K_1 & 0 & 0 \\ -K_1 & (K_1 + K_2) & -K_2 & 0 \\ 0 & -K_2 & K_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_s \\ X_1 \\ X_2 \\ Y \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Dengan asumsi M_s , M_1 , M_2 dan M_f bergerak secara harmonik, sehingga dapat dituliskan bahwa nilai $X_s(t)$, $X_1(t)$, $X_2(t)$, dan $Y(t)$ sama dengan persamaan 4.5. Selanjutnya persamaan 4.5 Di substitusikan pada persamaan gerak, sehingga didapatkan persamaan sebagai berikut

$$\begin{aligned}
& \begin{pmatrix} \begin{bmatrix} -\omega^2 M_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\omega^2 (M_1 + M_f) & 0 & -\omega^2 \rho AB \\ 0 & -K_2 & -\omega^2 M_2 & 0 \\ 0 & -\omega^2 \rho AB & 0 & -\omega^2 M_f \end{bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} (K_s + K_1) & -K_1 & 0 & 0 \\ -K_1 & (K_1 + K_2) & -K_2 & 0 \\ 0 & -K_2 & K_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_f \end{bmatrix} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} X_s \\ X_1 \\ X_2 \\ Y \end{Bmatrix} = 0 \\
& \begin{bmatrix} (K_s + K_1) - \omega^2 M_s & -K_1 & 0 & 0 \\ -K_1 & (K_1 + K_2) - \omega^2 (M_1 + M_f) & -K_2 & -\omega^2 \rho AB \\ 0 & -K_2 & K_2 - \omega^2 M_2 & 0 \\ 0 & -\omega^2 \rho AB & 0 & K_f - \omega^2 M_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_s \\ X_1 \\ X_2 \\ Y \end{Bmatrix} = 0
\end{aligned}$$

Untuk menentukan nilai frekuensi natural dari sistem, matriks persamaan gerak diatas akan dideterminankan = 0, dan dengan mengasumsikan $\lambda = \omega^2$ dapat dituliskan persamaan seperti berikut

$$\det \begin{vmatrix} (K_s + K_1) - \lambda M_s & -K_1 & 0 & 0 \\ -K_1 & (K_1 + K_2) - \lambda(M_1 + M_f) & -K_2 & -\lambda \rho AB \\ 0 & -K_2 & K_2 - \lambda M_2 & 0 \\ 0 & -\lambda \rho AB & 0 & K_f - \lambda M_f \end{vmatrix} = 0$$

$$\det \begin{vmatrix} (200 + 781.7) - 9.591\lambda & -781.7 & 0 & 0 \\ -781.7 & (781.7 + 969.7) - \lambda & -969.7 & -0.0779\lambda \\ 0 & -969.7 & 969.7 - 1.035\lambda & 0 \\ 0 & -0.0778\lambda & 0 & 6.972 - 0.116\lambda \end{vmatrix} = 0$$

Dari persamaan diatas didapatkan nilai $\lambda_1 = 16.42, \lambda_2 = 58.77, \lambda_3 = 349.92$, dan $\lambda_4 = 1994.095818$ dimana $\lambda = -\omega^2$, sehingga didapatkan nilai frekuensi natural dari sistem model struktur bangunan bertingkat tanpa penambahan TLCD sebagai berikut $\omega_1 = 4.0525 \text{ rad/s}$, $\omega_2 = 7.6662 \text{ rad/s}$, $\omega_3 = 18.7062 \text{ rad/s}$, dan $\omega_4 = 44.6553 \text{ rad/s}$. Sedangkan untuk ratio massa 7%, didapatkan persamaan determinan sebagai berikut:

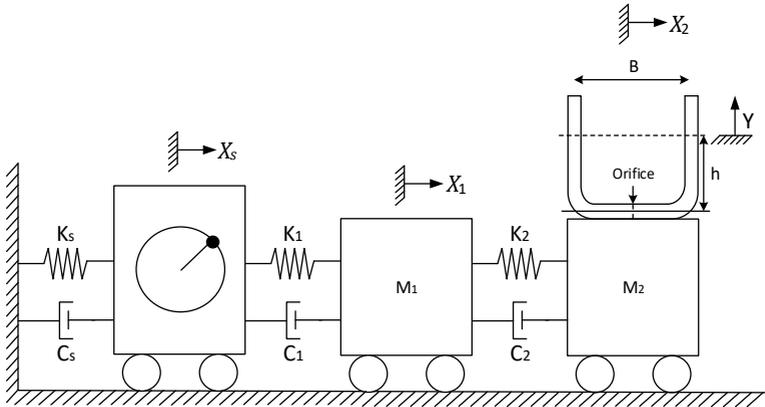
$$\det \begin{vmatrix} (200 + 781.7) - 9.591\lambda & -781.7 & 0 & 0 \\ -781.7 & (781.7 + 969.7) - (1.264 + 0.154)\lambda & -969.7 & -0.07789\lambda \\ 0 & -969.7 & 969.7 - 1.035\lambda & 0 \\ 0 & -0.07789\lambda & 0 & 6.792 - 0.154\lambda \end{vmatrix} = 0$$

Dari persamaan diatas didapatkan nilai $\lambda_1 = 16.3628, \lambda_2 = 44.2805, \lambda_3 = 346.064$, dan $\lambda_4 = 1948.2955$ dimana $\lambda = -\omega^2$, sehingga didapatkan nilai frekuensi natural dari sistem model struktur bangunan bertingkat tanpa penambahan TLCD sebagai berikut $\omega_1 = 4.0451 \text{ rad/s}$, $\omega_2 = 6.6547 \text{ rad/s}$, $\omega_3 = 18.6028 \text{ rad/s}$, dan $\omega_4 = 44.1395 \text{ rad/s}$.

4.1.1.3 Dengan penambahan TLCD pada struktur tingkat 2 (TLCD2)

Pemodelan sistem model struktur bangunan bertingkat dengan penambahan TLCD pada struktur tingkat 2 merupakan sistem 4 *degree of freedom*, sistem ini terdiri dari *shaker*, struktur

tingkat 1, struktur tingkat 2, dan massa peredam yaitu TLCD yang diletakkan pada struktur tingkat 2. Dibawah ini merupakan model dinamis dari model struktur bangunan bertingkat dengan penambahan TLCD.



Gambar 4. 4 Model dinamis model struktur bangunan bertingkat dengan penambahan TLCD pada struktur tingkat 2

Analisis gaya gaya yang bekerja pada sistem model dinamis diatas menghasilkan persamaan gerak *shaker*, struktur tingkat 1, dan struktur tingkat 2, serta TLCD. Persamaan gerak *shaker*, dan struktur tingkat 1 sama dengan persamaan gerak tanpa penambahan TLCD pada persamaan 4.1 dan persamaan 4.3 dan persamaan TLCD sama dengan persamaan 4. Persamaan gerak untuk struktur tingkat 2 adalah sebagai berikut:

Persamaan gerak struktur tingkat 2:

$$(M_2 + M_f) \ddot{X}_2 + C_2 \dot{X}_2 + K_2 X_2 = C_2 \dot{X}_1 + K_2 X_1 - \rho AB \ddot{Y} \quad (4.9)$$

Dari persamaan gerak diatas akan dilakukan analisis untuk mengetahui nilai frekuensi natural dari sistem tersebut. Dari ketiga persamaan diatas, dapat dituliskan dalam bentuk matriks 4 x 4 seperti persamaan dibawah ini

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} M_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_2 + M_f & \rho AB \\ 0 & 0 & \rho AB & M_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{X}_s \\ \ddot{X}_1 \\ \ddot{X}_2 \\ \ddot{Y} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_s + C_1 & -C_1 & 0 & 0 \\ -C_1 & (C_1 + C_2) & -C_2 & 0 \\ 0 & -C_2 & C_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{X}_s \\ \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \\ \dot{Y} \end{Bmatrix} + \\
& \begin{bmatrix} (K_s + K_1) & -K_1 & 0 & 0 \\ -K_1 & (K_1 + K_2) & -K_2 & 0 \\ 0 & -K_2 & K_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_s \\ X_1 \\ X_2 \\ Y \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} m\omega_e^2 R \cos \omega_e t \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (4.10)
\end{aligned}$$

Pada model struktur dengan penambahan TLCD pada struktur tingkat 1 akan dilakukan perhitungan untuk mengetahui nilai frekuensi natural menggunakan analisa fundamental, untuk menyelesaikan persamaan ini digunakan asumsi redaman dan eksitasi diabaikan. Sehingga didapatkan persamaan matriks baru sebagai berikut

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} M_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_2 + M_f & \rho AB \\ 0 & 0 & \rho AB & M_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{X}_s \\ \ddot{X}_1 \\ \ddot{X}_2 \\ \ddot{Y} \end{Bmatrix} + \\
& \begin{bmatrix} (K_s + K_1) & -K_1 & 0 & 0 \\ -K_1 & (K_1 + K_2) & -K_2 & 0 \\ 0 & -K_2 & K_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_s \\ X_1 \\ X_2 \\ Y \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (4.11)
\end{aligned}$$

Dengan asumsi M_s , M_1 , M_2 dan M_f bergerak secara harmonik, sehingga dapat dituliskan bahwa nilai $X_s(t)$, $X_1(t)$, $X_2(t)$, dan $Y(t)$ sama dengan persamaan 4.5. Selanjutnya persamaan 4.5 disubstitusikan pada persamaan gerak, sehingga didapatkan persamaan sebagai berikut

$$\begin{aligned}
& \left(\begin{bmatrix} -\omega^2 M_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\omega^2 M_1 & 0 & 0 \\ 0 & -K_2 & -\omega^2 (M_2 + M_f) & -\omega^2 \rho AB \\ 0 & 0 & -\omega^2 \rho AB & -\omega^2 M_f \end{bmatrix} \right. \\
& \left. + \begin{bmatrix} (K_s + K_1) & -K_1 & 0 & 0 \\ -K_1 & (K_1 + K_2) & -K_2 & 0 \\ 0 & -K_2 & K_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_f \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} X_s \\ X_1 \\ X_2 \\ Y \end{Bmatrix} = 0
\end{aligned}$$

$$\left(\begin{pmatrix} (K_s + K_1) - \omega^2 M_s & -K_1 & 0 & 0 \\ -K_1 & (K_1 + K_2) - \omega^2 M_1 & -K_2 & 0 \\ 0 & -K_2 & K_2 - \omega^2 (M_2 + M_f) & -\omega^2 \rho AB \\ 0 & 0 & -\omega^2 \rho AB & K_f - \omega^2 M_f \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_s \\ X_1 \\ X_2 \\ Y \end{pmatrix} \right) = 0$$

Untuk menentukan nilai frekuensi natural dari sistem, matriks persamaan gerak diatas akan dideterminankan = 0, dan dengan mengasumsikan $\lambda = \omega^2$ dapat dituliskan persamaan seperti berikut

$$\det \begin{vmatrix} (K_s + K_1) - \lambda M_s & -K_1 & 0 & 0 \\ -K_1 & (K_1 + K_2) - \lambda M_1 & -K_2 & 0 \\ 0 & -K_2 & K_2 - \lambda (M_2 + M_f) & -\lambda \rho AB \\ 0 & 0 & -\lambda \rho AB & K_f - \lambda M_f \end{vmatrix} = 0$$

$$\det \begin{vmatrix} (200 + 781.7) - 9.591\lambda & -781.7 & 0 & 0 \\ -781.7 & (781.7 + 969.7) - 1.056\lambda & -969.7 & 0 \\ 0 & -969.7 & 969.7 - (1.243 + 0.116)\lambda & -0.07789\lambda \\ 0 & 0 & -0.07789\lambda & 6.792 - 0.116\lambda \end{vmatrix} = 0$$

Dari persamaan diatas didapatkan nilai $\lambda_1 = 16.4$, $\lambda_2 = 58.61$, $\lambda_3 = 322.0015$, dan $\lambda_4 = 2166.82$ dimana $\lambda = -\omega^2$, sehingga didapatkan nilai frekuensi natural dari sistem model struktur bangunan bertingkat tanpa penambahan TLCD sebagai berikut $\omega_1 = 4.04 \text{ rad/s}$, $\omega_2 = 17.94 \text{ rad/s}$, $\omega_3 = 17.94 \text{ rad/s}$, dan $\omega_4 = 46.55 \text{ rad/s}$. Sedangkan untuk ratio massa 7%, didapatkan persamaan determinan sebagai berikut

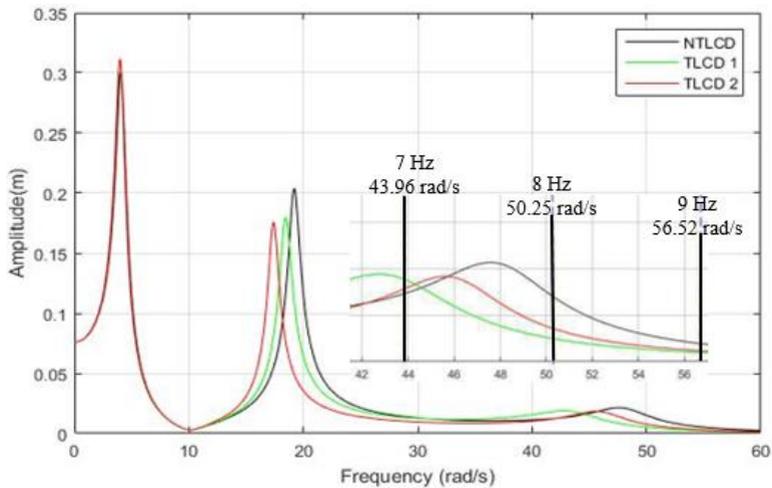
$$\det \begin{vmatrix} (200 + 781.7) - 9.591\lambda & -781.7 & 0 & 0 \\ -781.7 & (781.7 + 969.7) - 1.056\lambda & -969.7 & 0 \\ 0 & -969.7 & 969.7 - (1.243 + 0.154)\lambda & -0.07789\lambda \\ 0 & 0 & -0.07789\lambda & 6.792 - 0.154\lambda \end{vmatrix} = 0$$

Dari persamaan diatas didapatkan nilai $\lambda_1 = 16.34$, $\lambda_2 = 44.23$, $\lambda_3 = 313.53$, dan $\lambda_4 = 2146.4$ dimana $\lambda = -\omega^2$, sehingga didapatkan nilai frekuensi natural dari sistem model struktur bangunan bertingkat tanpa penambahan TLCD sebagai berikut $\omega_1 = 4.0421 \text{ rad/s}$, $\omega_2 = 6.65 \text{ rad/s}$, $\omega_3 = 17.71 \text{ rad/s}$, dan $\omega_4 = 46.33 \text{ rad/s}$

Tabel 4. 1 Tabel Frekuensi Natural

Ratio Massa	(rad/s)	Frekuensi natural tanpa TLCD	Frekuensi natural dengan TLCD1	Frekuensi natural dengan TLCD2
5%	ω_1	4.1222	4.0525	4.049
	ω_2	19.275	7.6662	7.65
	ω_3	48.5565	18.7062	17.94
	ω_4		44.6553	46.55
7%	ω_1	4.1222	4.0451	4.0421
	ω_2	19.275	6.6547	6.65
	ω_3	48.5565	18.6028	17.71
	ω_4		44.1395	46.33

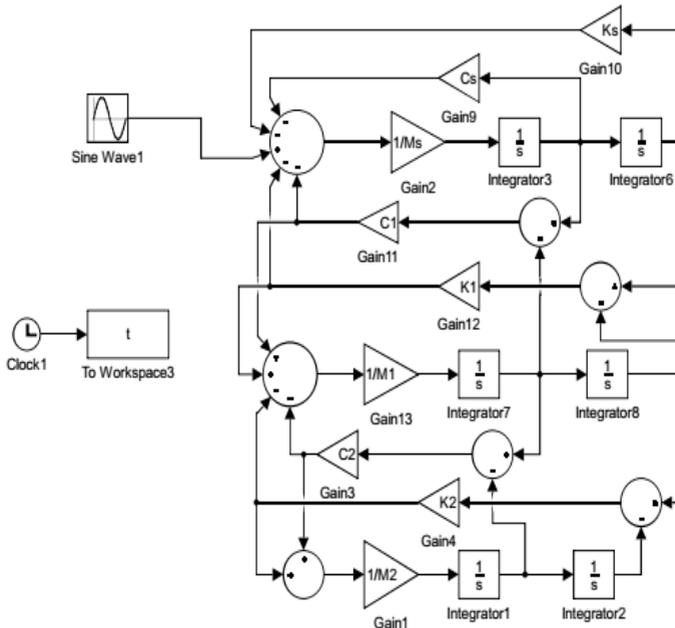
Nilai frekuensi natural dari ketiga sistem yang telah dihitung diatas dapat dilihat pada tabel 4.1 dan juga pada gambar 4.5 dibawah.



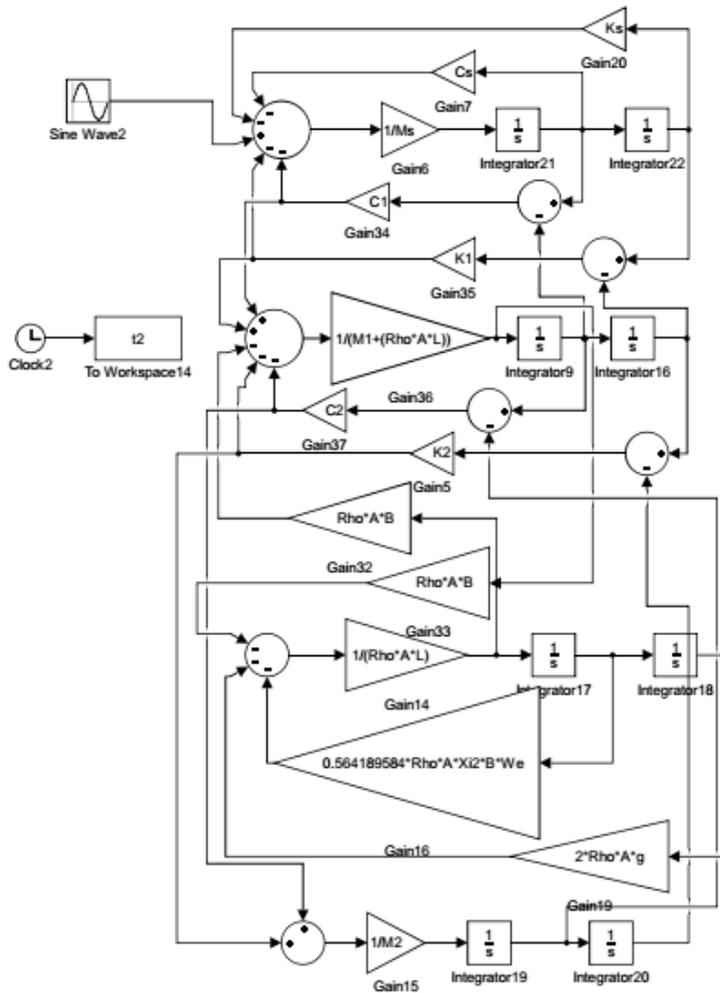
Gambar 4. 5 Grafik amplitude banding frekuensi

4.2 Diagram Blok

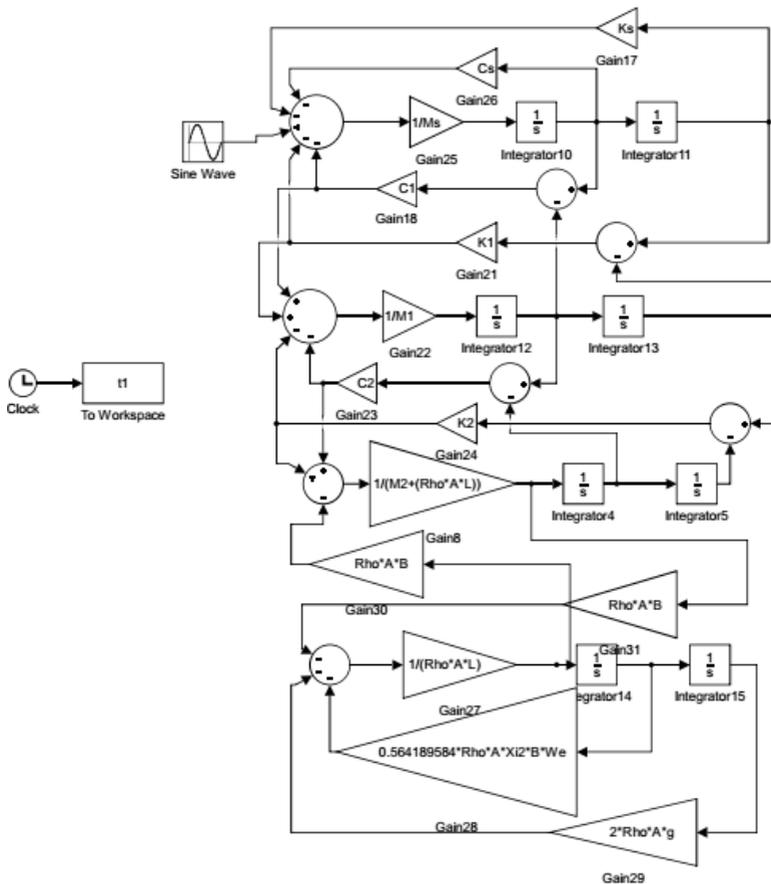
Diagram blok dibuat pada Matlab Simulink menggunakan persamaan state variable yang sudah didapatkan dari hasil analisis gaya yang dilakukan. Simulasi ini bertujuan untuk mendapatkan grafik respon dinamis dari model struktur bangunan bertingkat. Pada tugas akhir ini akan terdapat 3 macam diagram blok, yang pertama yaitu diagram blok dari model struktur bangunan bertingkat tanpa TLCD, model struktur bangunan bertingkat dengan penambahan TLCD pada struktur tingkat 1, dan model struktur bangunan bertingkat dengan penambahan TLCD pada struktur tingkat 2. Parameter yang digunakan untuk melakukan simulasi terdapat pada tabel 3.2. Gambar 4.5, 4.6 dan 4.7 Merupakan gambar diagram blok dari masing masing variasi.



Gambar 4. 6 *Block diagram* model struktur bangunan bertingkat tanpa TLCD



Gambar 4. 7 Block diagram model struktur bangunan bertingkat dengan TLCD pada tingkat



Gambar 4. 8 Block diagram model struktur bangunan bertingkat dengan TLCD pada tingkat 2

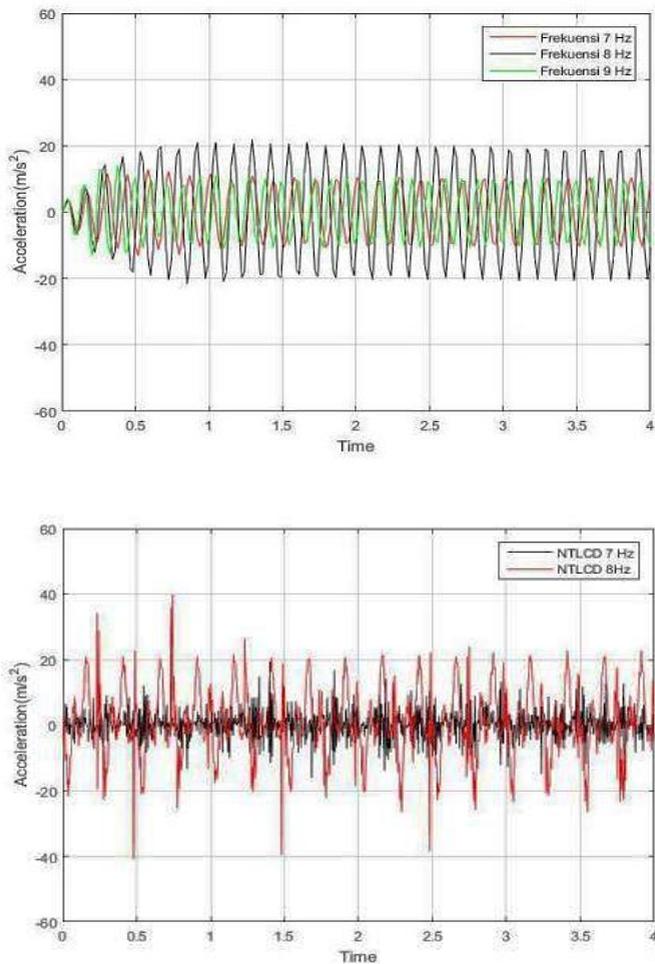
4.3 Analisa dan Pembahasan Pemodelan Sistem

Pada tugas akhir ini dilakukan pemodelan sistem pada model struktur bangunan bertingkat 2. Yang akan dianalisa pada tugas akhir ini adalah sistem tanpa penambahan TLCD dan dengan penambahan TLCD. Untuk menganalisa model ini, dilakukan 2

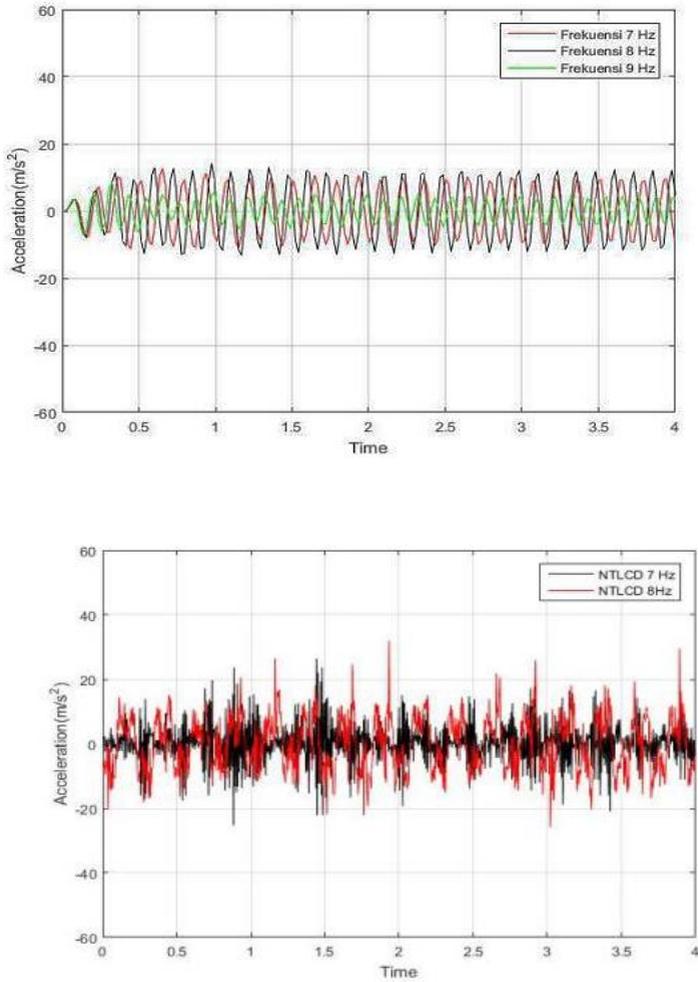
macam metode pencarian data, yang pertama adalah melalui eksperimen yang dilakukan dengan memvariasikan frekuensi yaitu 7 Hz dan 8 Hz, variasi peletakan TLCD dan ratio massa pada 5%, dan 7% dari TLCD, yang kedua adalah dengan simulasi menggunakan Matlab simulink. Pada simulasi akan dilakukan simulasi dengan input sinusoidal dengan beberapa macam variasi, yaitu variasi frekuensi kerja yaitu pada 7, 8, dan 9 Hz. Selain itu, dilakukan variasi ratio massa yang sama dengan eksperimen, kemudian akan dilakukan juga variasi diameter *orifice* pada 1.575 cm, 1.05 cm, 0.525 cm, serta juga dilakukan variasi peletakan TLCD. Pada eksperimen maupun simulasi akan dilakukan 2 macam pengambilan data, yaitu tanpa penambahan TLCD dan dengan penambahan TLCD.

4.3.1 Analisis Tanpa TLCD

Gambar 4.9 dan 4.10 dibawah ini merupakan gambar hasil simulasi dan eksperimen dari model struktur bangunan tanpa penambahan TLCD (NTLCD). Pada gambar 4.9 merupakan respon dinamis struktur 1 dan gambar 4.10 respon dinamis struktur 2. Pada keduanya terdapat 2 gambar, yaitu gambar (a) merupakan hasil simulasi, dan gambar (b) gambar hasil eksperimen. hasil simulasi didapatkan nilai RMS NTLCD struktur 1 pada frekuensi kerja 7 Hz adalah 7.3616 m/s^2 , pada 8 Hz sebesar 14.6713 m/s^2 , dan pada 9 HZ adalah 7.2714 m/s^2 , dan dari hasil eksperimen didapatkan nilai RMS pada frekuensi kerja 7 Hz adalah sebesar 4.4571 m/s^2 , dan RMS pada frekuensi kerja 8 Hz sebesar 10.3838 m/s^2 . Sedangkan RMS hasil simulasi pada struktur 2 pada frekuensi kerja 7 Hz adalah 6.9029 m/s^2 , pada 8 Hz adalah 8.7401 m/s^2 , dan yang terakhir pada frekuensi kerja 9 Hz dengan nilai RMS sebesar 3.1045 m/s^2 . Sedangkan nilai RMS pada eksperimen pada frekuensi kerja 7 Hz nilai RMS percepatannya adalah 6.8901 m/s^2 , dan pada frekuensi kerja 8 Hz sebesar 8.3343 m/s^2 . Peningkatan nilai pada frekuensi 8 Hz karena frekuensi ini mendekati frekuensi naturalnya.



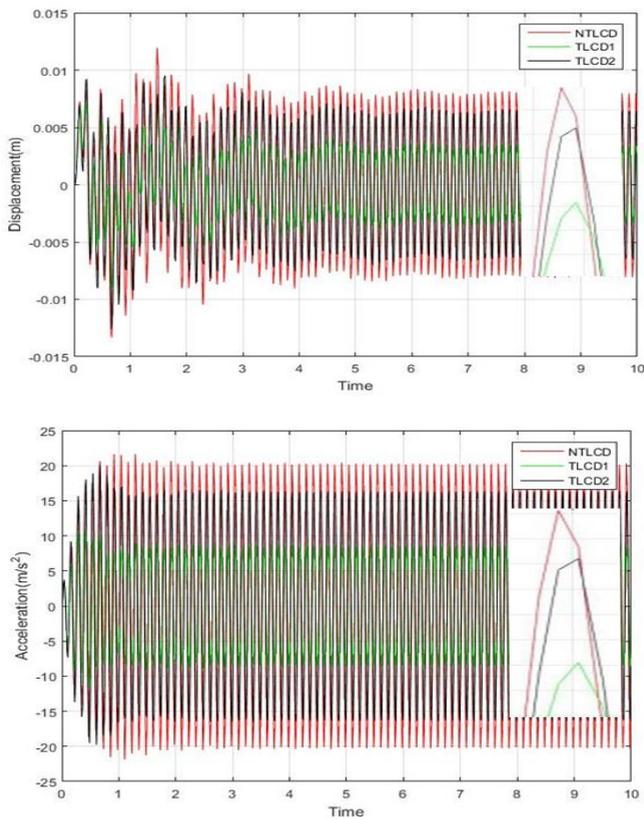
Gambar 4. 9 Grafik NTLCD struktur 1 (a) hasil simulasi (b) hasil eksperimen



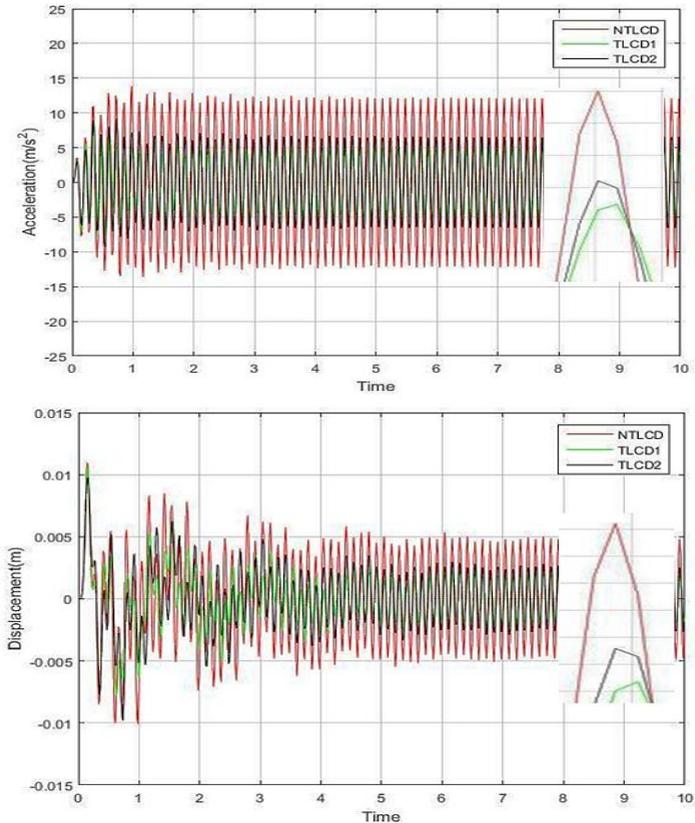
Gambar 4. 10 Grafik NTLCD struktur 2 (a) hasil simulasi (b) hasil eksperimen

4.3.2 Analisis dengan TLCD pada Ratio Massa 5%

4.3.2.1 Hasil Simulasi pada Ratio Massa 5%



Gambar 4. 11 Grafik hasil simulasi struktur 1 pada frekuensi kerja 8 Hz pada ratio massa 5% (a) respon perpindahan (b) respon percepatan



Gambar 4. 12 Grafik hasil simulasi struktur 2 pada frekuensi kerja 8 Hz pada ratio massa 5% (a) respon perpindahan (b) respon percepatan

Gambar diatas merupakan gambar grafik hasil simulasi pada frekuensi kerja 8 Hz, pada ratio massa 5 %. Gambar 4.11 merupakan gambar simulasi pada struktur 1, dan gambar 4.12 pada struktur 2. Dimana gambar (a) merupakan respon perpindahan dan (b) respon percepatan. Pada gambar ini terdapat 3 grafik yaitu grafik NTLCD yang merupakan grafik saat sistem belum diberi

tambahan peredam (TLCD) yang ditunjukkan dengan garis berwarna merah, TLCD1 yang merupakan grafik saat suatu system diberi tambah peredam TLCD pada struktur 1 yang ditunjukkan dengan garis berwarna hijau, dan TLCD2 merupakan hasil grafik saat system diberi peredam pada struktur 2 yang ditunjukkan dengan garis berwarna hitam.

Pada struktur 1 terlihat pada TLCD1 terjadi reduksi yang besar namun TLCD2 kecil, hal ini disebabkan karena penempatan TLCD pada struktur 2 membuat energi yang seharusnya bergetar ke struktur 2 malah terdispersi ke struktur 1. Sedangkan pada struktur 2 penggunaan TLCD1 dan TLCD2 menghasilkan reduksi yang sama sama besar. Hal ini dapat dilihat dari data RMS masing masing grafik. Dari hasil simulasi pada frekuensi kerja 8 Hz didapatkan nilai RMS percepatan masing masing grafik, antara lain NTLCD dengan nilai 14.3818 m/s^2 , TLCD1 dengan nilai 5.6314 m/s^2 , dan TLCD2 dengan nilai 11.8837 m/s^2 . Pada frekuensi 9 Hz mengalami fenomena yang sama, yaitu penambahan TLCD dapat mereduksi. Sedangkan pada frekuensi 7 Hz mengalami peningkatan nilai percepatan dengan adanya penambahan TLCD, karena pada bode diagram garis NTLCD berada diatas garis TLCD1 dan TLCD2. Dimana grafik untuk 7 Hz dan 9 Hz dapat dilihat pada lampiran, dan untuk nilai RMS percepatan dan besar reduksi nilai percepatan pada tabel 4.2, dimana nilai minus menunjukkan bahwa tidak terjadi reduksi, malah mengalami peningkatan nilai percepatan.

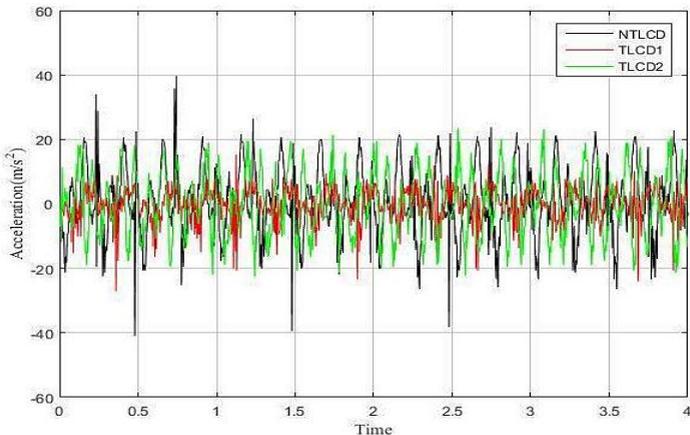
Tabel 4. 2 RMS hasil simulasi pada ratio massa 5%

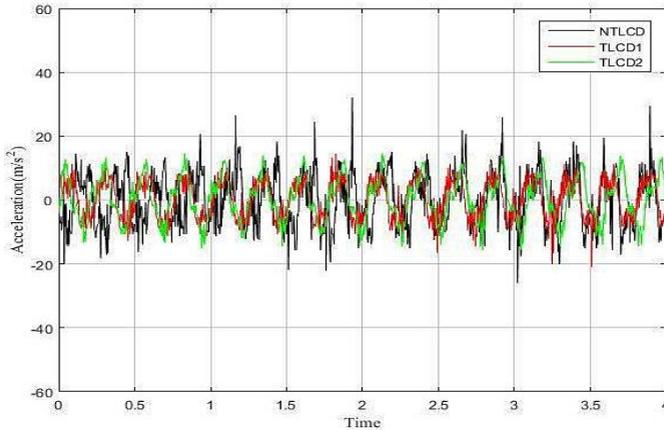
Frek.		Struktur 1	Struktur 2	% Reduksi	
		(rad/s)	(rad/s)	Struktur 1	Struktur 2
7 Hz	NTLCD	7.2813	6.7627	-	-
	TLCD1	11.6848	10.9565	-60.48	62.01

	TLCD2	12.338	7.1886	-69.45	6.3
8 Hz	NTLCD	14.6163	8.7278	-	-
	TLCD1	6.0181	3.6757	58.83	57.89
	TLCD2	12.1236	4.9053	17.05	43.8
9 Hz	NTLCD	7.1189	3.0904	-	-
	TLCD1	3.9501	1.7679	44.51	42.79
	TLCD2	6.568	2.0043	7.73	35.14

4.3.2.2 Hasil Eksperimen pada Ratio Massa 5%

Gambar dibawah menunjukkan hasil eksperimen pada frekuensi kerja 8 Hz dan ratio massa 5%. Gambar 4.13 terdiri dari 2 gambar yaitu gambar 4.13 (a) merupakan gambar hasil eksperimen dari struktur 1, dan gambar 4.13 (b) adalah gambar hasil eksperimen dari struktur 2. Pada gambar diatas terdapat 3 grafik yaitu grafik NTLCD, TLCD1, dan TLCD2. Dimana NTLCD adalah grafik saat sistem belum diberi tambahan peredam (TLCD), TLCD1 adalah saat suatu system diberi tambah peredam TLCD pada struktur 1, dan TLCD2 adalah saat system diberi peredam pada struktur 2.





Gambar 4. 13 Respon dinamis percepatan hasil eksperimen pada frekuensi kerja 8 Hz pada ratio massa 7 % (a) Pada struktur 1 (b) Pada struktur 2

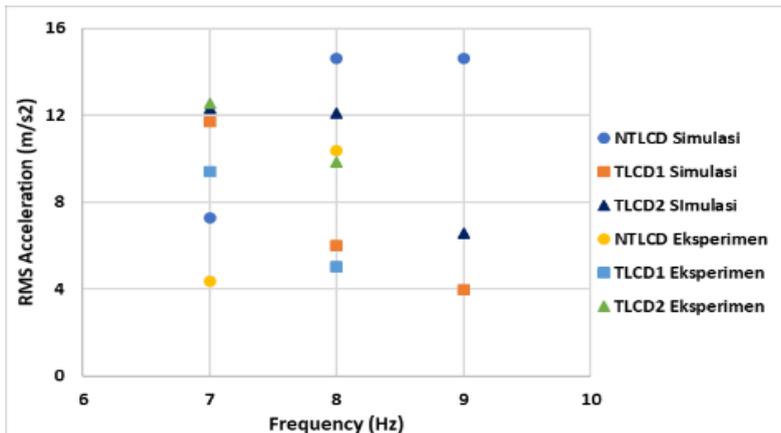
Pada gambar (a) grafik NTLCD ditunjukkan dengan garis berwarna hitam, grafik TLCD1 dengan warna merah dan TLCD2 dengan garis berwarna hijau. Dari hasil eksperimen didapatkan bahwa nilai RMS NTLCD pada struktur 1 sebesar 10.3838 m/s^2 , RMS TLCD1 adalah 5.0031 m/s^2 , dan TLCD2 adalah 9.8515 m/s^2 . Dari ketiga nilai RMS dapat dilihat bahwa nilai RMS terendah ditunjukkan oleh TLCD1 dan nilai RMS tertinggi ditunjukkan oleh NTLCD. Sedangkan pada frekuensi 7 Hz, penambahan TLCD mengakibatkan peningkatan nilai percepatan, dimana grafik 7 Hz dapat dilihat pada lampiran. Sedangkan untuk nilai RMS frekuensi lain dan besar nilai reduksi percepatan dapat dilihat pada tabel 4.3 dibawah ini, dimana nilai minus menunjukkan bahwa tidak terjadi reduksi, malah mengalami peningkatan nilai percepatan.

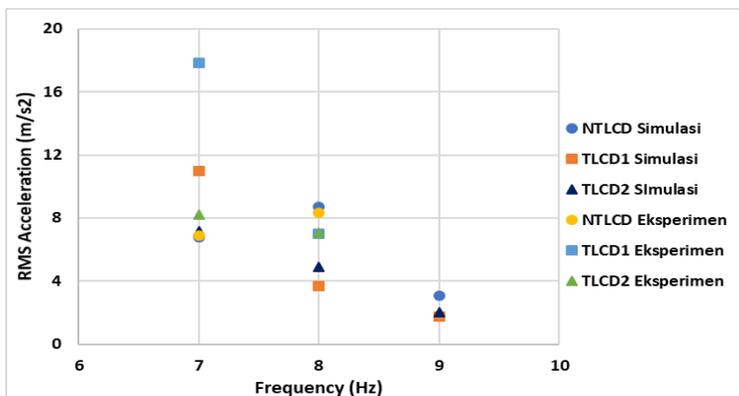
Tabel 4. 3 RMS hasil eksperimen pada ratio massa 5%

Frek.		Struktur 1	Struktur 2	% Reduksi	
		(rad/s)	(rad/s)	Struktur 1	Struktur 2
7 Hz	NTLCD	4.3571	3.437	-	-
	TLCD1	9.423	8.4147	-116.27	-142.95
	TLCD2	12.5442	7.4669	-187.9	-115.59
8 Hz	NTLCD	10.384	8.334		
	TLCD1	5.002	7.0218	51.82	15.75
	TLCD2	9.851	7.0461	5.13	15.46

4.3.2.3 Perbandingan pada Ratio Massa 5%

Dari hasil simulasi dan eksperimen pada ratio massa 5% didapatkan grafik seperti gambar 4.14. Gambar dibawah merupakan grafik RMS percepatan banding frekuensi, dimana gambar (a) merupakan hasil dari struktur tingkat 1, dan (b) merupakan hasil dari struktur tingkat 2.





Gambar 4. 14 Grafik RMS percepatan hasil eksperimen dan simulasi banding waktu pada ratio massa 5% (a) pada struktur 1 (b) pada struktur

Pada gambar diatas terdiri dari beberapa grafik, antara lain grafik NTLCD yang ditunjukkan dengan symbol lingkaran, TLCD1 yang ditunjukkan dengan symbol persegi, dan TLCD2 yang ditunjukkan dengan symbol segitiga. Dari grafik diatas terlihat dari frekuensi 7 Hz ke 8 Hz terjadi peningkatan nilai percepatan, hal ini terjadi karena frekuensi 8 Hz terletak dekat dengan nilai frekuensi naturalnya sehingga nilai perpindahan dan percepatan yang dihasilkan besar.

Dari grafik diatas menunjukkan bahwa hasil simulasi dan eksperimen memiliki *trendline* yang sama, misal pada struktur 1 pada gambar (a) dapat dilihat bahwa pada grafik NTLCD simulasi dan eksperimen memiliki *trendline* sama sama naik dari frekuensi 7 ke 8 Hz, lalu pada *trendline* TLCD1 dan TLCD2 memiliki *trendline* yang sama sama turun begitu juga pada struktur 2. Namun pada grafik terlihat terdapat perbedaan nilai RMS antara hasil eksperimen dan simulasi. Pada tabel 4.4 terlihat bahwa nilai *error* tiap grafik bermacam macam. Perbedaan nilai yang cukup signifikan ini diakibatkan karena ketidaksesuaian parameter eksperimen dan parameter simulasi cukup besar, dan juga keadaan

alat eksperimen yang kurang baik menyebabkan hasil eksperimen terdapat banyak *noise*.

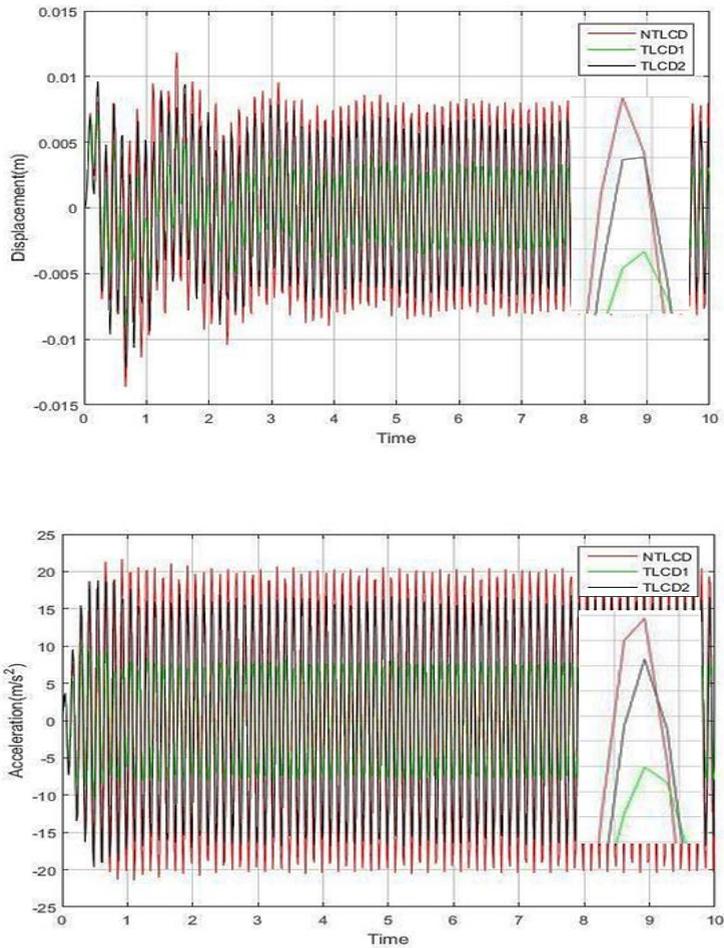
Tabel 4. 4 Nilai *error* pada ratio massa 5%

Frek.		% <i>Error</i>	
		Struktur 1	Struktur 2
7 Hz	NTLCD	40.16	1.88
	TLCD1	19.35	63.03
	TLCD2	1.67	14.36
8 Hz	NTLCD	28.95	4.51
	TLCD1	16.87	91.03
	TLCD2	18.74	43.64

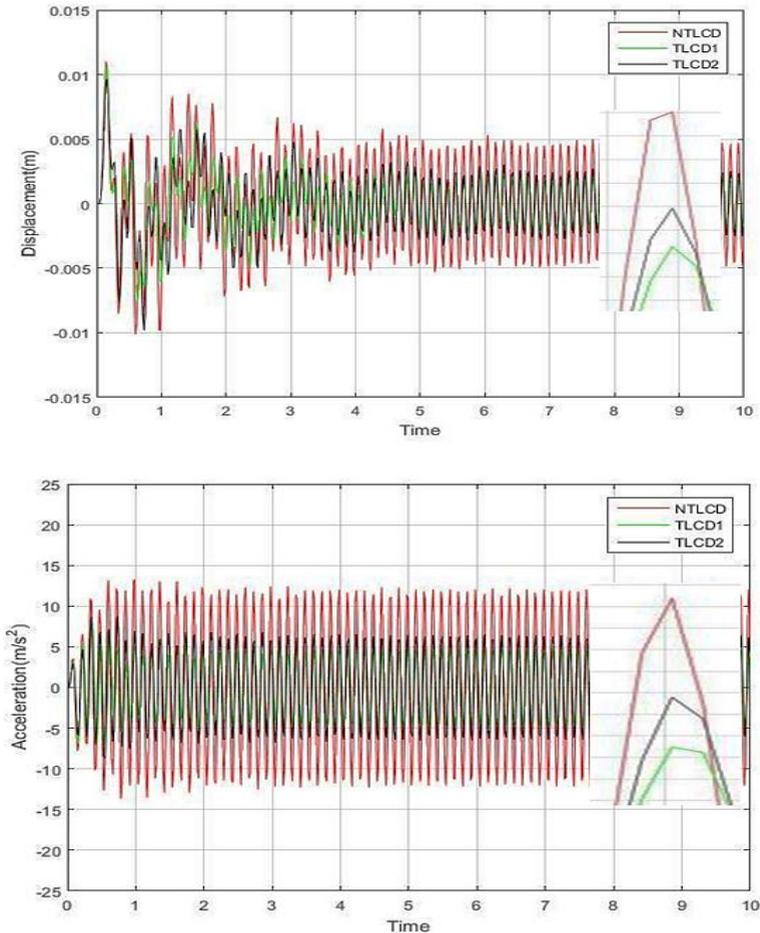
4.3.3 Analisis Hasil pada Ratio Massa 7%

4.3.3.1 Hasil Simulasi pada Ratio Massa 7%

Gambar dibawah ini merupakan gambar grafik hasil simulasi pada frekuensi kerja 8 Hz, pada ratio massa 7 %. Gambar 4.16 dan 4.17 adalah grafik hasil simulasi untuk struktur tingkat 1 dan struktur tingkat 2. Gambar (a) adalah hasil respon perpindahan, dan gambar (b) adalah respon percepatan. Pada gambar ini terdapat 3 grafik yaitu grafik NTLCD yang merupakan grafik saat sistem belum diberi tambahan peredam (TLCD) yang ditunjukkan dengan garis berwarna merah, TLCD1 yang merupakan grafik saat suatu system diberi tambah peredam TLCD pada struktur 1 yang ditunjukkan dengan garis berwarna hijau, dan TLCD2 merupakan hasil grafik saat system diberi peredam pada struktur 2 yang ditunjukkan dengan garis berwarna hitam.



Gambar 4. 15 Grafik hasil simulasi struktur 1 pada frekuensi kerja 8 Hz pada ratio massa 7% (a) respon perpindahan (b) respon percepatan



Gambar 4. 16 Grafik hasil simulasi struktur 2 pada frekuensi kerja 8 Hz pada ratio massa 7% (a) respon perpindahan (b) respon percepatan

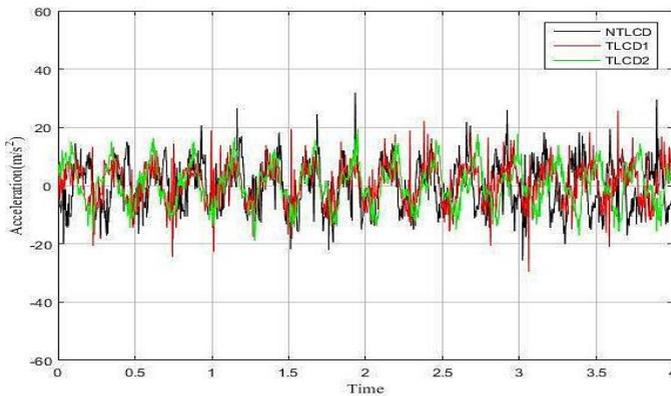
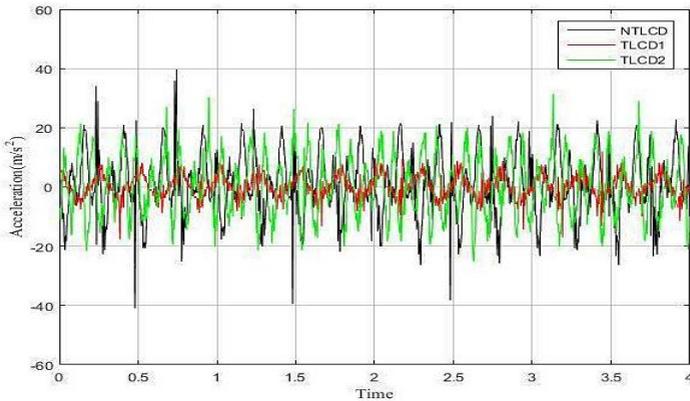
Pada struktur 1 terlihat pada TLCD1 terjadi reduksi yang besar namun TLCD2 kecil, hal ini disebabkan karena penempatan TLCD pada struktur 2 membuat energi yang seharusnya bergetar

ke struktur 2 malah terdispasi ke struktur 1. Sedangkan pada struktur 2 penggunaan TLCD1 dan TLCD2 menghasilkan reduksi yang sama sama besar. Hal ini dapat dilihat dari data RMS masing masing grafik. Dari hasil simulasi pada frekuensi kerja 8 Hz didapatkan nilai RMS masing masing grafik, antara lain NTLCD dengan nilai 14.3818 m/s^2 , TLCD1 dengan nilai 5.6314 m/s^2 , dan TLCD2 dengan nilai 11.8837 m/s^2 . Pada frekuensi 9 Hz pada kedua struktur mengalami fenomena yang sama dengan 8 Hz, yaitu penambahan TLCD menyebabkan mereduksi. Sedangkan pada frekuensi 7 Hz mengalami peningkatan nilai percepatan dengan adanya penambahan TLCD, karena pada bode diagram garis NTLCD berada diatas garis TLCD1 dan TLCD2. Grafik untuk 7 Hz dan 9 Hz dapat dilihat pada lampiran, dan untuk nilai RMS percepatan dan besar reduksi setiap frekuensinya dapat dilihat pada tabel 4.5 dibawah ini. Dimana nilai minus pada tabel menunjukkan bahwa tidak terjadi reduksi, malah mengalami peningkatan nilai percepatan. Nilai minus menunjukkan bahwa tidak terjadi reduksi, malah mengalami peningkatan nilai percepatan.

Tabel 4. 5 RMS hasil simulasi pada ratio massa 7%

Frek.		Struktur 1	Struktur 2	% Reduksi	
		(rad/s)	(rad/s)	Struktur 1	Struktur 2
7 Hz	NTLCD	7.28	6.799	-	-
	TLCD1	11.48	10.79	-57.55	-58.75
	TLCD2	12.87	7.22	-76.68	-6.23
8 Hz	NTLCD	14.38	8.55	-	-
	TLCD1	5.6314	3.42	60.84	60.02
	TLCD2	11.88	4.606	17.37	46.18
9 Hz	NTLCD	7.1821	3.09	-	-
	TLCD1	3.8056	1.697	47.01	45.13
	TLCD2	6.599	1.932	8.12	37.53

4.3.3.2 Hasil Eksperimen pada Ratio Massa 7%



Gambar 4. 17 Respon dinamis percepatan hasil eksperimen pada frekuensi kerja 8 Hz pada ratio massa 7 % (a) pada struktur 1 (b) pada struktur 2

Gambar 4.17 diatas merupakan hasil eksperimen pada frekuensi kerja 8 Hz pada ratio massa 7%. Gambar 4.17 (a) merupakan gambar hasil eksperimen dari struktur 1, dan gambar

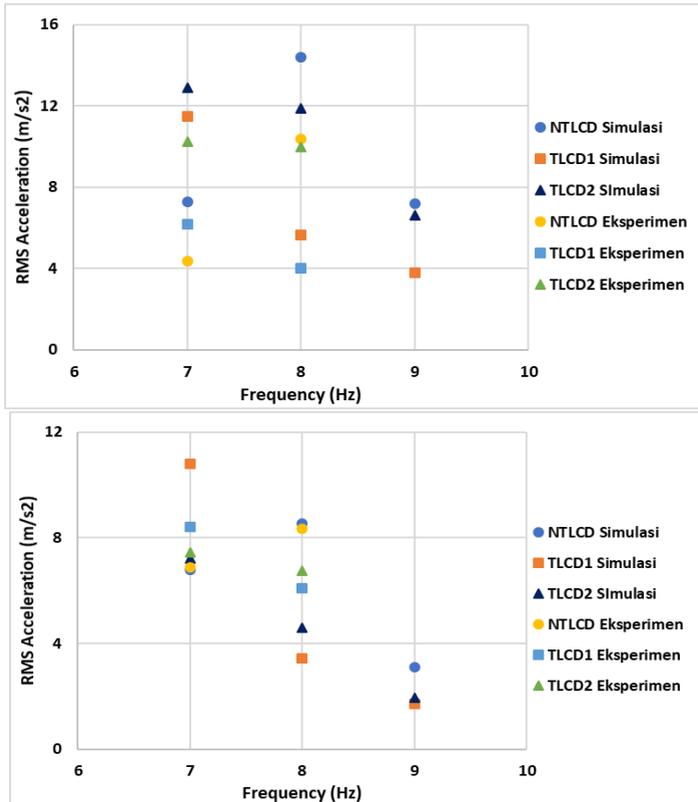
4.17 (b) adalah gambar hasil eksperimen dari struktur 2. Pada gambar terdapat 3 grafik yaitu grafik NTLCD, TLCD1, dan TLCD2. Grafik NTLCD ditunjukkan dengan garis berwarna hitam, grafik TLCD1 dengan warna merah dan TLCD2 dengan garis berwarna hijau. Dimana NTLCD adalah grafik saat sistem belum diberi tambahan peredam (TLCD), TLCD1 adalah saat suatu sistem diberi tambah peredam TLCD pada struktur 1, dan TLCD2 adalah saat sistem diberi peredam pada struktur 2.

Dari hasil eksperimen didapatkan bahwa nilai RMS NTLCD pada struktur 1 sebesar 10.3838 m/s^2 , RMS TLCD1 adalah 4.0233 m/s^2 , dan TLCD2 adalah 9.9939 m/s^2 , begitupun pada struktur 2 nilai RMS NTLCD sebesar 8.3343 m/s^2 , RMS TLCD1 sebesar 6.901 m/s^2 dan RMS TLCD2 sebesar 6.7542 m/s^2 . Dari ketiga nilai RMS pada setiap struktur dapat dilihat bahwa nilai RMS tertinggi terjadi pada grafik NTLCD sedangkan grafik terendah terjadi pada grafik TLCD1. Sedangkan pada frekuensi 7 Hz terjadi peningkatan percepatan setelah ditambahkan TLCD. Hal ini dapat dilihat pada tabel 4.6 dibawah ini. Nilai minus pada tabel menunjukkan bahwa terjadi peningkatan nilai percepatan.

Tabel 4. 6 RMS hasil eksperimen pada ratio massa 7%

Frek.		Struktur 1	Struktur 2	% Reduksi	
		(rad/s)	(rad/s)	Struktur 1	Struktur 2
7 Hz	NTLCD	4.3571	6.8901		
	TLCD1	6.1806	17.86	-41.85	-159.25
	TLCD2	10.25	8.23	-135.23	-19.31
8 Hz	NTLCD	10.384	8.334		
	TLCD1	5.002	7.0218	61.25	26.93
	TLCD2	9.851	7.0461	3.8	18.96

4.3.3.3 Perbandingan pada Ratio Massa 7%



Gambar 4. 18 Grafik RMS percepatan hasil eksperimen dan simulasi banding waktu pada ratio massa 7% (a) pada struktur 1 (b) pada struktur

Grafik diatas merupakan grafik RMS percepatan banding frekuensi yang menggambarkan hasil dari simulasi dan eksperimen. Dimana NTLCD ditunjukkan dengan symbol lingkaran, TLCD1 ditunjukkan dengan symbol persegi, dan TLCD2 ditunjukkan dengan symbol segitiga. Pada gambar dapat dilihat bahwa simulasi dan eksperimen memiliki *trendline* yang

sama. Misal pada struktur 1, *trendline* NTLCD sama sama naik dari frekuensi 7 ke 8 Hz, dan TLCD1 dan TLCD2 yang memiliki *trendline* yang sama sama turun. Selain itu dari gambar tersebut terlihat peningkatan nilai RMS pada 8 Hz, hal ini disebabkan karena frekuensi 8 dekat dengan frekuensi naturalnya.

Pada gambar diatas eksperimen terjadi pada 2 titik frekuensi kerja yaitu pada 7 Hz dan 8 Hz, dan simulasi terjadi pada 3 titik frekuensi kerja yaitu pada 7, 8, dan 9 Hz. Grafik diatas menunjukkan bahwa hasil simulasi dan eksperimen memiliki *trendline* yang sama pada struktur 1 maupun struktur 2. *Trendline* grafik NTLCD simulasi dan eksperimen sama sama naik dari frekuensi 7 ke 8 Hz, dan *trendline* TLCD1 dan TLCD2 hasil eksperimen dan simulasi memiliki *trendline* yang sama sama turun. Tabel dibawah merupakan tabel RMS hasil eksperimen dan simulasi pada ratio massa 7 %, dan disertai dengan nilai *error* perbedaan hasil simulasi dan eksperimen. Terlihat bahwa *error* tiap grafik bermacam macam. Salah satunya pada frekuensi 7 Hz pada struktur tingkat 2 nilai *error* NTLCD sebesar 1.34%, pada TLCD1 sebesar 22.4%, dan pada TLCD2 sebesar 3.38%. Perbedaan nilai yang cukup signifikan ini diakibatkan karena ketidaksesuaian nilai parameter eksperimen dan parameter simulasi yang cukup dan juga keadaan alat yang kurang baik menyebabkan hasil eksperimen terdapat banyak *noise*.

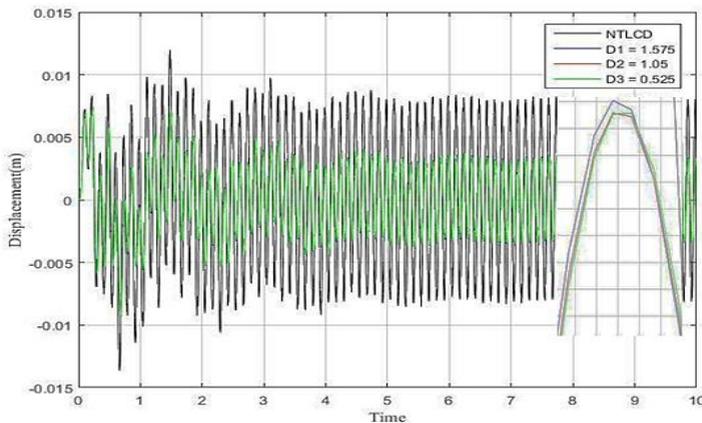
Tabel 4. 7 Nilai *error* pada ratio massa 7%

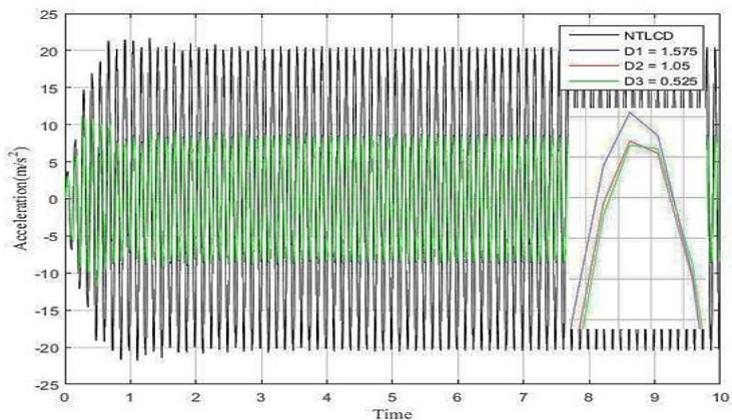
Frek.		% Error	
		Struktur 1	Struktur 2
7 Hz	NTLCD	40.22	1.34
	TLCD1	46.18	22.04
	TLCD2	20.42	3.38
8 Hz	NTLCD	27.79	2.61
	TLCD1	28.56	78
	TLCD2	15.9	46.64

Walaupun hasil eksperimen dan simulasi memiliki nilai *error* yang cukup besar, dari kedua data pada tabel 4.3 dan tabel 4.5 dapat dilihat pengaruh perubahan ratio massa terhadap respon dinamis pada struktur. Data RMS percepatan hasil eksperimen dan simulasi mengalami reduksi yang lebih besar pada saat ratio massa 7% dibandingkan dengan 5%. Selain itu juga dapat dilihat hasil dari variasi peletakan posisi TLCD pada struktur, dimana dari hasil simulasi pada struktur tingkat 1 dan tingkat 2 terlihat bahwa nilai reduksi dengan TLCD1 menghasilkan reduksi yang lebih besar dibandingkan dengan TLCD2.

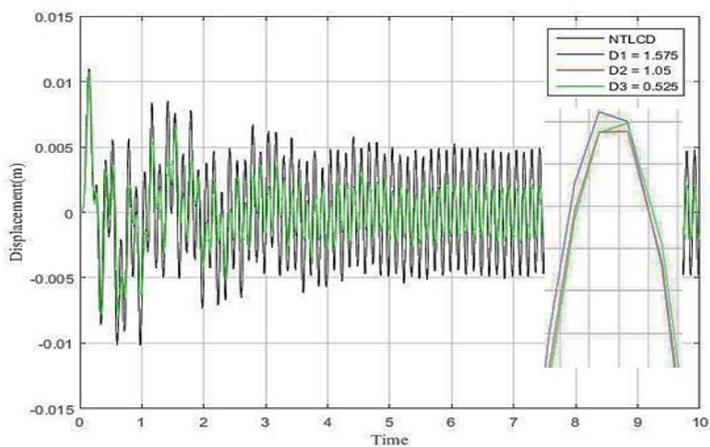
4.3.3 Analisis Variasi *Orifice* TLCD1

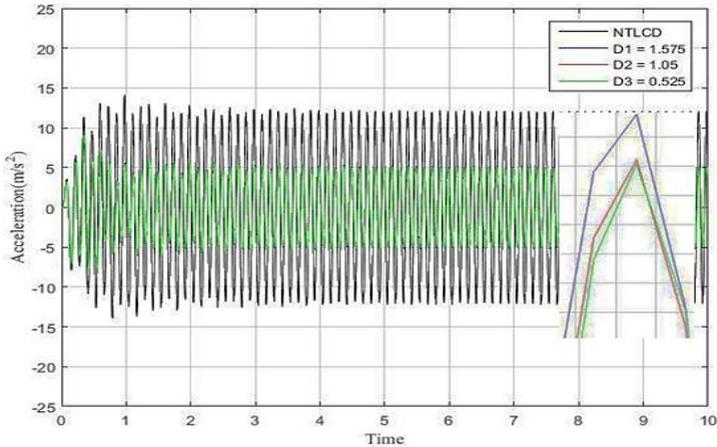
Grafik dibawah ini merupakan grafik hasil simulasi pada frekuensi kerja 8 Hz, dengan variasi *orifice* $D1 = 1.575$ cm, $D2 = 1.05$ cm, dan $D3 = 0.525$ cm. Dari grafik diatas terlihat bahwa pada frekuensi 8 Hz grafik NTLCD yang ditunjukkan dengan grafik berwarna hijau memiliki range yang besar daripada grafik TLCD1 yang ditunjukkan dengan grafik berwarna hitam. Sedangkan pada frekuensi 7 Hz dan 9 Hz, dapat dilihat pada lampiran grafik variasi *orifice*.





Gambar 4. 19 Grafik hasil simulasi variasi *orifice* TLCD1 pada struktur 1 pada frekuensi kerja 8 Hz (a) respon perpindahan (b) respon percepatan



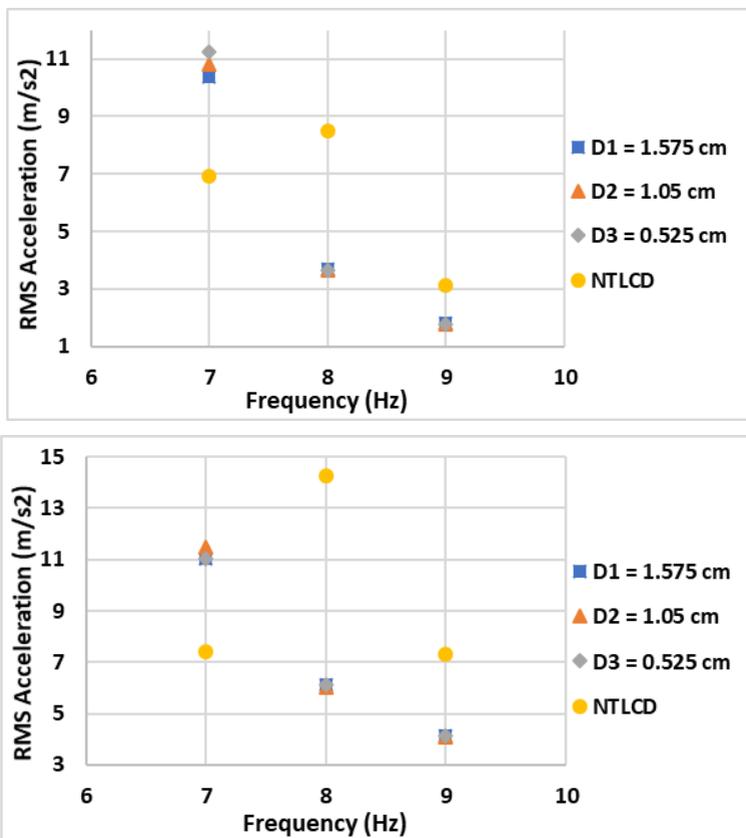


Gambar 4. 20 Grafik hasil simulasi variasi *orifice* TLCD1 pada struktur 2 pada frekuensi kerja 8 Hz (a) respon perpindahan (b) respon percepatan

Pada tabel hasil simulasi variasi *orifice* TLCD1 pada lampiran, dapat terlihat bahwa nilai perpindahan tidak berubah seiring dengan mengecilnya nilai diameter. Hal ini dikarenakan nilai amplitude dipengaruhi oleh posisi pada bode diagram, semakin mendekati dengan frekuensi naturalnya maka reduksi yang terjadi akan semakin besar.

Dari ketiga hasil simulasi didapatkan grafik dibawah ini. Gambar 4.21 merupakan gambar grafik RMS percepatan TLCD1 banding diameter *orifice* dengan variasi frekuensi kerja yaitu 7 Hz, 8 Hz, 9 Hz dengan variasi diameter. Pada simulasi ini digunakan 3 macam diameter *orifice* antara lain $D1 = 1.575$ cm, $D2 = 1.05$ cm, dan $D3 = 0.525$ cm. Pada gambar 4.21 diatas terdapat 2 gambar yaitu gambar (a) merupakan grafik variasi *orifice* TLCD1 pada struktur 1 dan gambar (b) merupakan grafik variasi *orifice* TLCD1 pada struktur 2. Pada gambar terdiri dari 4 macam grafik, yaitu grafik NTLCD yang ditunjukkan dengan symbol lingkaran kuning, lalu D1 ditunjukkan dengan symbol persegi berwarna biru,

kemudian D2 dengan symbol segitiga berwarna orange, dan yang terakhir adalah D3 dengan symbol diamond berwarna abu abu. Dari kedua gambar diatas menunjukkan *trendline* yang sama disetiap variasi frekuensinya.



Gambar 4. 21 Grafik RMS percepatan banding diameter *orifice* TLCD1 dengan variasi frekuensi kerja (a) Pada struktur 1 (b) Pada struktur 2

Pada frekuensi kerja 7 Hz menunjukkan nilai RMS percepatan terus meningkat, diikuti dengan nilai diameter *orifice* yang semakin kecil, besar nilai reduksi dapat dilihat pada tabel 4.8. Hal ini terjadi karena pada 7 Hz, pada bode diagram garis amplitude NTLCD berada diatas grafik TLCD1. Sedangkan pada frekuensi kerja 8 Hz dan 9 Hz menunjukkan penurunan nilai percepatan seiring dengan mengecilnya nilai diameter, penurunan nilai tersebut dapat dilihat pada tabel 4.8 Menurut teori semakin kecil diameter *orifice* yang digunakan, maka semakin besar nilai redaman yang terjadi. Dimana semakin besar nilai redaman, maka semakin besar reduksi respon dinamis yang terjadi. Namun pada frekuensi kerja 8 Hz, pada diameter *orifice* 0.525 terjadi sedikit peningkatan dari RMS percepatan daari $D2 = 1.05$ cm. Meningkatnya nilai RMS percepatan tersebut disebabkan karena pergerakan fluida pada TLCD yang seharusnya berlawanan arah dengan pergerakan sistem utama menjadi bergerak searah dengan massa utama. Percepatan struktur yang besar dan dengan diameter *orifice* yang kecil menyebabkan tidak semua fluida yang seharusnya bergerak melewati lubang *orifice* bisa lewat, namun hanya sebagian yang dapat lewat dan fluida yang dapat melewati lubang *orifice*. Sedangkan fluida yang tidak dapat melewati lubang *orifice* malah menabrak dinding *orifice* dan bergerak ke arah yang sebaliknya.

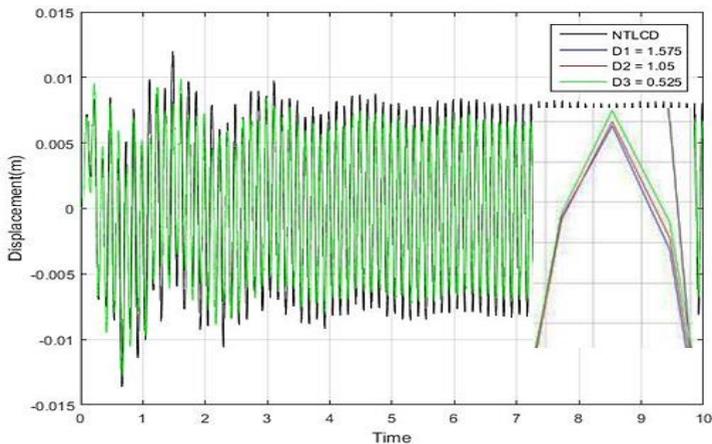
Tabel 4. 8 Data hasil simulasi variasi *orifice* pada TLCD1

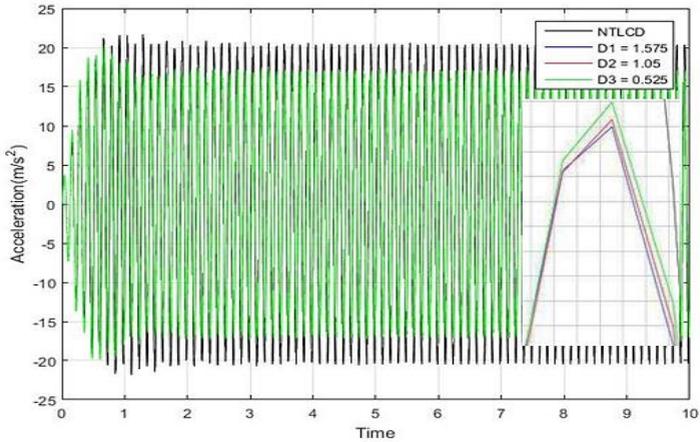
Frek.		Struktur 1	Struktur 2	% Reduksi	
		(rad/s)	(rad/s)	Struktur 1	Struktur 2
7 Hz	NTLCD	7.40	6.93	-	-
	D1	11.02	10.37	-49.07	-49.60
	D2	11.47	10.78	-55.05	-55.61
	D3	11.94	11.22	-61.39	-61.97
8 Hz	NTLCD	14.27	8.49	-	-

	D1	6.12	3.69	57.08	56.55
	D2	6.04	3.64	57.68	57.11
	D3	6.04	3.64	57.67	57.08
9 Hz	NTLCD	7.29	3.11	-	-
	D1	4.13	1.81	43.40	41.84
	D2	4.08	1.79	44.11	42.43
	D3	4.07	1.79	44.25	42.49

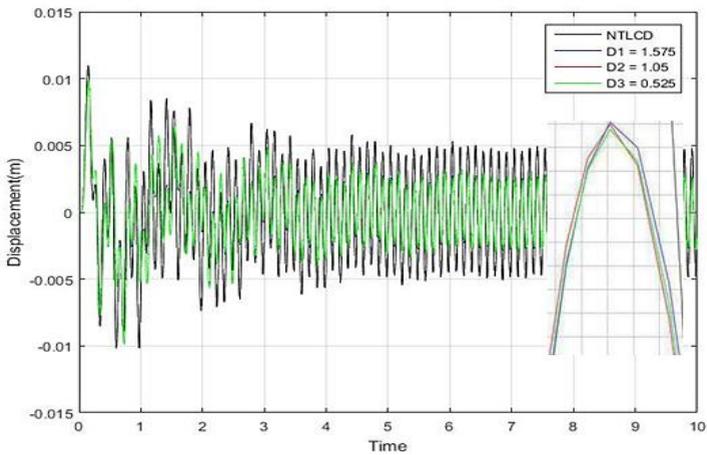
4.3.4 Analisis Variasi Orifice TLCD2

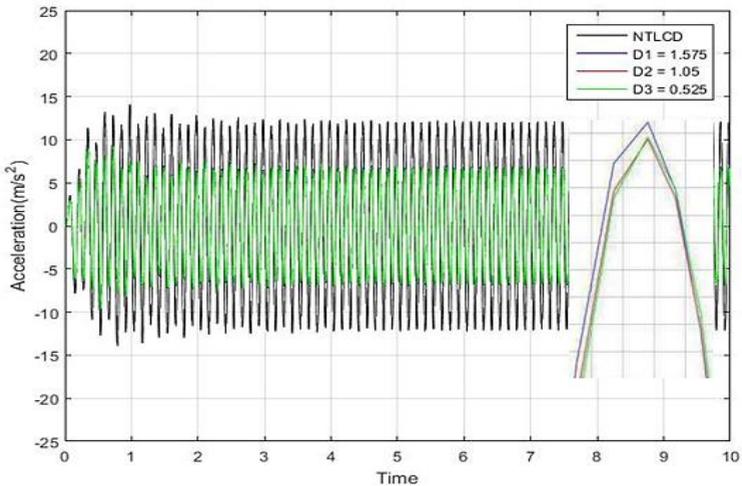
Grafik dibawah merupakan grafik hasil simulasi pada frekuensi kerja 8 Hz, dengan variasi *orifice* D1 = 1.575 cm, D2 = 1.05 cm, dan D3 = 0.525 cm. Dari grafik diatas terlihat bahwa pada frekuensi 8 Hz grafik NTLCD yang ditunjukkan dengan grafik berwarna hitam yang memiliki range yang besar pada hasil perpindahan maupun percepatan, sedangkan grafik TLCD1 memiliki nilai yang kecil yang ditunjukkan dengan grafik berwarna hitam.





Gambar 4. 22 Grafik hasil simulasi variasi *orifice* TLCD2 pada struktur 2 pada frekuensi kerja 8 Hz (a) respon perpindahan (b) respon percepatan



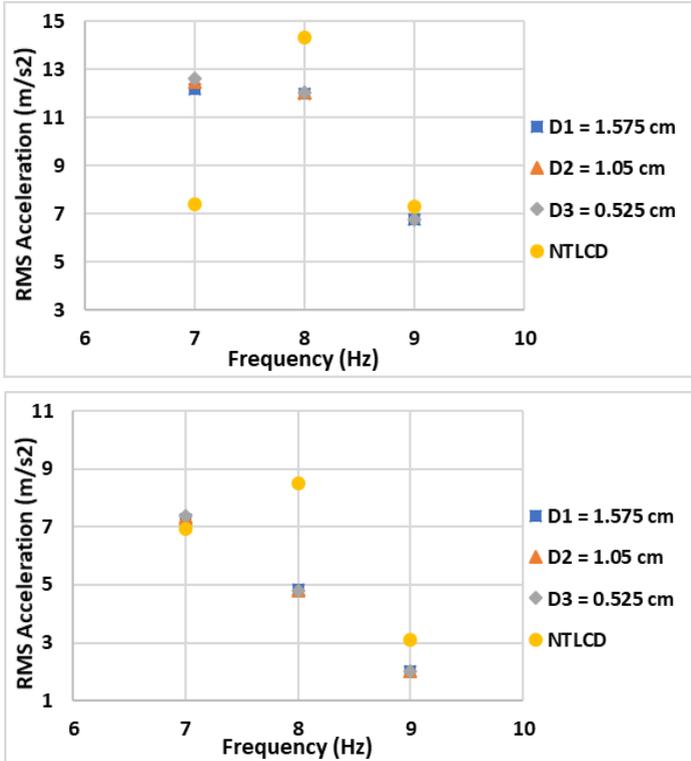


Gambar 4. 23 Grafik hasil simulasi variasi *orifice* TLCD2 pada struktur 2 pada frekuensi kerja 8 Hz (a) respon perpindahan (b) respon percepatan

Sedangkan pada frekuensi 7 Hz dan 9 Hz, dapat dilihat pada lampiran variasi *orifice*. Pada tabel variasi *orifice* TLCD2 pada lampiran, dapat terlihat bahwa nilai perpindahan tidak berubah seiring dengan mengecilnya nilai diameter. Hal ini dikarenakan nilai amplitude dipengaruhi oleh posisi pada bode diagram, semakin mendekati dengan frekuensi naturalnya maka reduksi yang terjadi akan semakin besar.

Dari ketiga hasil simulasi didapatkan grafik RMS percepatan TLCD2 banding frekuensi. Pada gambar 4.25 diatas terdapat 2 gambar yaitu gambar (a) merupakan grafik variasi *orifice* TLCD2 pada struktur 1 dan gambar (b) merupakan grafik variasi *orifice* TLCD2 pada struktur 2. Pada gambar terdiri dari 4 macam grafik, yaitu grafik NTLCD yang ditunjukkan dengan symbol lingkaran kuning, lalu D1 ditunjukkan dengan symbol

persegi berwarna biru, kemudian D2 dengan symbol segitiga berwarna orange, dan yang terakhir adalah D3 dengan symbol diamond berwarna abu abu. Dari kedua gambar diatas menunjukkan *trendline* yang sama disetiap variasi frekuensinya.



Gambar 4. 24 Grafik RMS percepatan banding diameter *orifice* TLCD2 dengan variasi frekuensi kerja (a) Pada struktur 1 (b) Pada struktur 2

Pada frekuensi kerja 7 Hz menunjukkan nilai RMS percepatan terus meningkat, diikuti dengan nilai diameter *orifice*

yang semakin kecil. Hal ini terjadi karena pada 7 Hz, pada bode diagram garis amplitude NTLCD berada diatas grafik TLCD1. Sedangkan pada frekuensi kerja 8 Hz dan 9 Hz menunjukkan penurunan nilai percepatan seiring dengan mengecilnya nilai diameter, penurunan nilai tersebut dapat dilihat pada tabel 4.9 Menurut teori semakin kecil diameter *orifice* yang digunakan, maka semakin besar nilai redaman yang terjadi. Dimana semakin besar nilai redaman, maka semakin besar reduksi respon dinamis yang terjadi. Namun pada frekuensi kerja 8 Hz, pada diameter *orifice* 0.525 terjadi sedikit peningkatan dari RMS percepatan daari D2 = 1.05 cm. Meningkatnya nilai RMS percepatan tersebut disebabkan karena pergerakan fluida pada TLCD yang seharusnya berlawanan arah dengan pergerakan sistem utama menjadi bergerak searah dengan massa utama. Percepatan struktur yang besar dan dengan diameter *orifice* yang kecil menyebabkan tidak semua fluida yang seharusnya bergerak melewati lubang *orifice* bisa lewat, namun hanya sebagian yang dapat lewat dan fluida yang dapat melewati lubang *orifice*. Sedangkan fluida yang tidak dapat melewati lubang *orifice* malah menabrak dinding *orifice* dan bergerak ke arah sebaliknya.

Tabel 4. 9 Data hasil simulasi variasi *orifice* pada TLCD2

Frek.		Struktur 1	Struktur 2	% Reduksi	
		(rad/s)	(rad/s)	Struktur 1	Struktur 2
7 Hz	NTLCD	7.39	6.94	-	-
	D1	12.19	7.26	-64.72	-4.56
	D2	12.45	7.32	-68.33	-5.56
	D3	12.61	7.39	-70.42	-6.49
8 Hz	NTLCD	14.33	8.51	-	-
	D1	11.99	4.85	16.29	43.08
	D2	12.01	4.79	16.21	43.63
	D3	12.06	4.80	15.89	43.6

9 Hz	NTLCD	7.29	3.08	-	-
	D1	6.746	2.02	7.43	34.52
	D2	6.742	2.00	7.48	35.16
	D3	6.746	1.99	7.43	35.28

Dari hasil analisis kedua posisi peletakan TLCD dengan variasi *orifice* yang sama, yaitu pada diameter 1.575 cm, 1.05 cm, dan 0.525 cm didapatkan hasil bahwa posisi peletakan TLCD yang lebih baik adalah pada struktur 1 (TLCD1) karena dari hasil analisis data simulasi yang telah dilakukan menunjukkan bahwa reduksi yang terjadi lebih besar dibanding dengan pada saat posisi peletakan TLCD pada struktur 2 (TLCD2). Karena peletakan TLCD pada struktur 2 mengakibatkan struktur 2 teredam dan getaran yang seharusnya terjadi pada struktur 2 terdisipasi ke struktur 1.

Selain analisis mengenai posisi peletakan TLCD, didapatkan juga hasil analisis dari variasi diameter *orifice* pada kedua struktur dan kedua posisi peletakan TLCD bahwa pada frekuensi tertentu atau frekuensi yang memiliki percepatan yang kecil, apabila menggunakan diameter yang semakin kecil akan menghasilkan nilai reduksi yang semakin besar karena semakin kecil diameter *orifice* yang digunakan akan menghasilkan redaman yang semakin besar juga. Namun pada frekuensi tertentu atau frekuensi yang menghasilkan percepatan yang besar, penggunaan diameter yang semakin kecil tidak selalu menghasilkan nilai reduksi yang semakin besar juga. Karena pada frekuensi tertentu dengan percepatan yang besar akan menyebabkan fungsi dari *orifice* itu sendiri tidak bisa bekerja dengan optimal.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian mengenai respon dinamis pada model struktur bangunan bertingkat dengan metode eksperimen dan simulasi yang sudah dilakukan, didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Penggunaan TLCD pada model struktur bangunan bertingkat mampu mereduksi respon dinamis yang terjadi pada suatu struktur, dan semakin besar ratio massa fluida yang digunakan akan menghasilkan reduksi yang semakin besar juga. Pada 8 Hz struktur 1 saat ratio massa 5% reduksi yang terjadi sebesar 58.83%, sedangkan pada saat ratio massa 7% reduksi yang terjadi mencapai 60.84%. Begitu juga pada eksperimen, pada struktur 1 pada saat ratio massa 5% pada TLCD1 percepatannya turun sebesar 51.82%, dan pada saat ratio massa 7% turun sebesar 61.25%.
2. Nilai faktor koreksi antara hasil eksperimen dan simulasi memiliki nilai yang cukup besar dan bervariasi. Pada frekuensi kerja 8 Hz, pada struktur 1 faktor koreksi NTLCD sebesar 40.76%, pada TLCD1 sebesar 20.29%, dan pada TLCD2 sebesar 23.06%. Sedangkan pada struktur 2 NTLCD memiliki nilai koreksi sebesar 4.72%, pada TLCD1 sebesar 47.65%, dan pada TLCD2 sebesar 30.38%. Perbedaan faktor koreksi yang cukup signifikan ini diakibatkan karena ketidaksesuaian nilai parameter eksperimen dan parameter simulasi yang cukup dan juga keadaan alat yang kurang baik menyebabkan hasil eksperimen terdapat banyak *noise*.
3. Posisi peletakan TLCD pada struktur 1 (TLCD1) merupakan posisi yang lebih baik dibanding dengan posisi peletakan TLCD pada struktur 2 (TLCD2), karena dapat

mereduksi lebih besar. Pada simulasi ratio massa 7% pada frekuensi kerja 8 Hz pada struktur 1 TLCD1 mampu mereduksi percepatan struktur sebesar 60.84%, dan TLCD2 mereduksi sebesar 17.37%. Dan pada struktur 2 TLCD1 mereduksi sebesar 60.02%, dan TLCD2 mereduksi 46.17%. Hal ini dapat terjadi karena peletakan suatu peredam mendekati sumber getaran akan menyebabkan getaran yang akan tersalurkan ke struktur atas sudah teredam terlebih dahulu. Namun lebih baik lagi ketika di setiap struktur diberi peredam.

4. Penggunaan diameter *orifice* yang semakin kecil akan menghasilkan reduksi yang semakin besar, namun pada percepatan yang tinggi semakin besar diameter *orifice* tidak selalu menghasilkan reduksi yang besar. Pada frekuensi kerja 9 Hz penurunan nilai percepatan pada saat diameter 1.575 cm sebesar 43.4%, saat diameter *orifice* 1.05 cm terjadi reduksi percepatan sebesar 44.11%, dan pada saat diameter 0.575 cm terjadi reduksi percepatan sebesar 44.25%. Sedangkan pada 8 Hz TLCD1 D1 sebesar 57.0832% dari nilai percepatan NTLCD, lalu pada TLCD1 D2 mengalami penurunan percepatan sebesar 55.68% dari nilai percepatan NTLCD, dan pada TLCD1 D3 mengalami penurunan percepatan sebesar 57.67% dari nilai percepatan NTLCD.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian mengenai respon dinamis pada model struktur bangunan bertingkat dengan metode eksperimen dan simulasi yang sudah dilakukan, didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Melakukan kalibrasi ulang alat alat yang akan digunakan untuk melakukan eksperimen, agar hasil eksperimen yang didapatkan lebih baik.

2. Melakukan perbaikan pada *table shaker* agar dapat dilakukan eksperimen diberbagai frekuensi, tidak hanya pada frekuensi tertentu.
3. Bagian pengunci antara plat dan batang penyangga model struktur bangunan perlu dilakukan untuk mengurangi *noise* yang terjadi pada struktur.
4. Mengkaji ulang parameter simulasi dan eksperimen, agar lebih sesuai.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

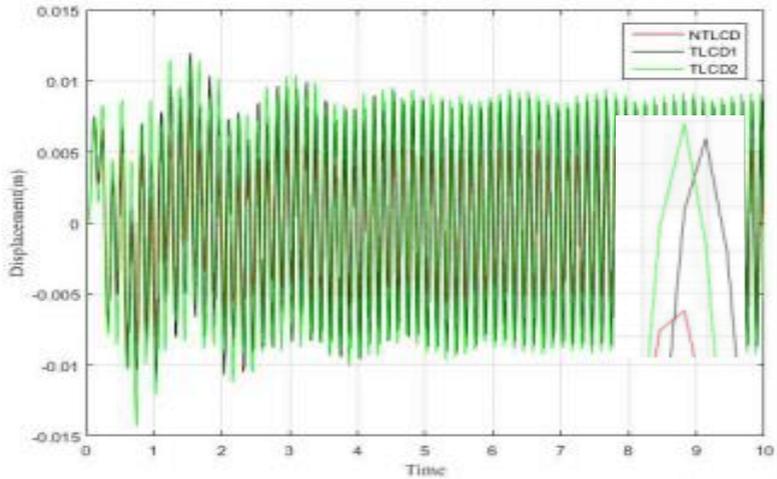
DAFTAR PUSTAKA

- [1] BMKG. 2018. **Gempa Bumi Terkini ($M \geq 5$)**, <URL: <http://www.bmkg.go.id/> >.
- [2] Nanda, B., 2010. “Aplication of Tuned Liquid Damper for Controlling Structural Vibration”. **Departement of Civil Engineering**.
- [3] Departemen Pemukiman dan Prasarana Wilayah. 2002. **Standar Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung**. SNI-1726-2002.
- [4] Douglas Thorby. 2008. **Structural Dynamics and Vibration in Practice An Engineering Handbook**. British: Library of Congress Catalog Number: 2007941701
- [5] Sadek, F., Mohraz,B., and Lew, H., 1996. “Single and Multiple Tuned Liquid Column Dampers for Seismic Applications”. **National Institute of Standards and Technology**
- [6] Mondal, J., and Nimmala, H., 2014. “Tuned Liquid Damper”. Proceeding of the **3rd International Conference on Mechanical Engineering and Mechatronics Prague, Czech Republic Paper No.68**.
- [7] Wu, J., and Shih, M., 2005. “Design Guidelines fot Tuned Liquid Column Damper for Structures Responding to Wind”. **Engineering Structures 27**.
- [8] Nizamoddin, K., and Sangle, K., 2016. “Optimal Parameter of Tuned Liquid Column Damper Attached to SDOF System Subjected to Periodic Loading”. **International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication** Volume: 4, Issue: 6.

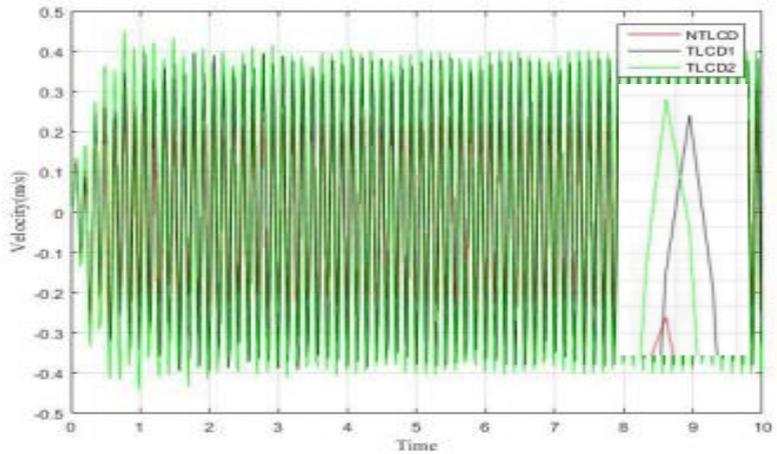
- [9] Alkhim, M., Morais, M., and Fabro, A., 2016. "Vibration Reduction of Wind Turbines Using Tuned Liquid Column Damper Using Stochastic Analysis". **Journal of Physics: Conference Series** 744 012178.
- [10] Bur, M., Son, L., dan Yusufri, R., 2015. "Kaji Eksperimental Penerapan Peredam Dinamik TLCD dan TMD pada Model Struktur Geser Dua Derajat Kebebasan". **Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XIV (SNTTM XIV)**. Banjarmasin, 7-8 Oktober
- [11] Philip, J. 2011. **Fox and McDonald's Introduction to Fluid Mechanics Eight Edition**. John Wiley and Sons, Inc
- [12] Balendra, T., Wang, C., and Cheong, H., 1995. "Effectiveness of Tuned Liquid Column Dampers for Vibration Control of Towers". **Engineering Structures** Vol. 17 No. 9, pp. 668 – 675.
- [13] Rao, S. S., 2011. **Mechanical Vibration**. Miami: Pearson Education, Inc..
- [14] Kartha, R., and Ritzy. R., 2005. "Parametric Studies on Tuned Liquid Damper by Horizontal Shake Table Experiments". **IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)**, Vol 12, pp 41-47
- [15] Media, S., 2018. **Global Cities and Building Data Base**, <URL:<http://skyscraperpage.com/>>.

LAMPIRAN

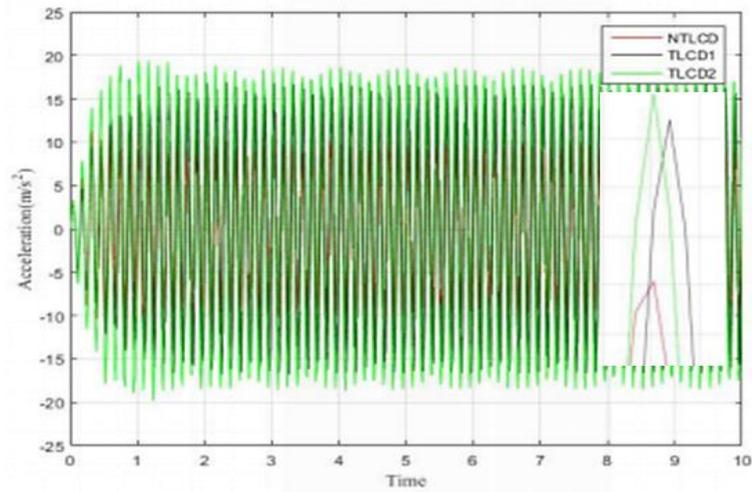
Respon perpindahan struktur 1, 7 Hz (Ratio Massa 5%)



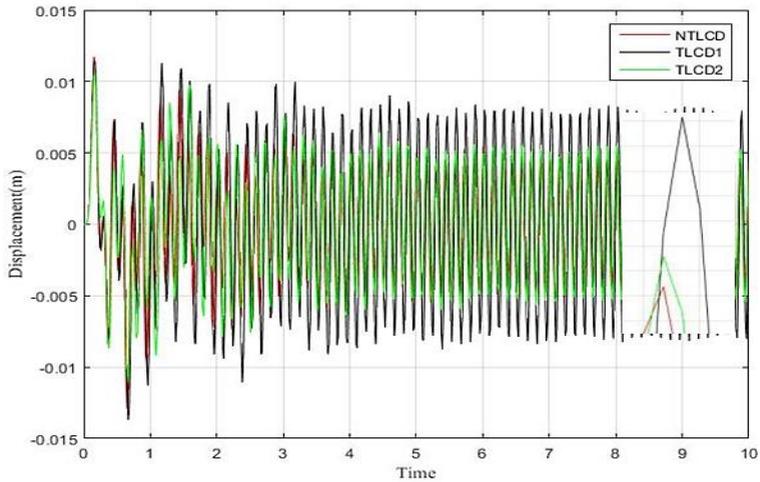
Respon kecepatan Struktur 1, 7Hz (Ratio Massa 5%)



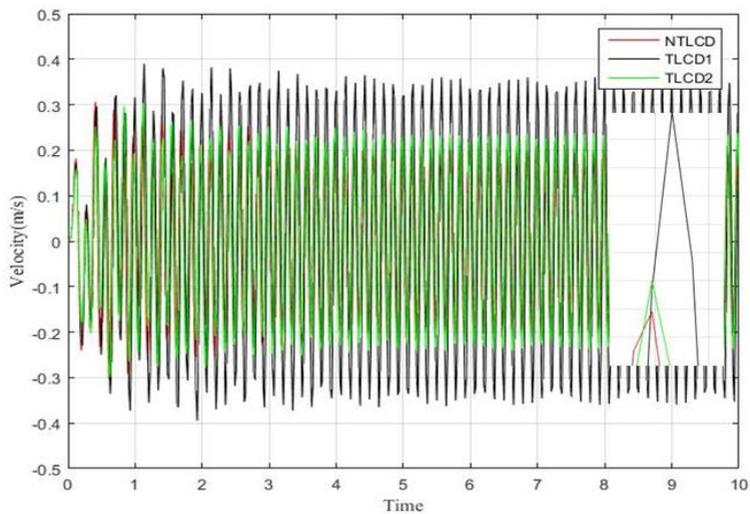
Respon percepatan Struktur 1, 7 Hz (Ratio Massa 5%)



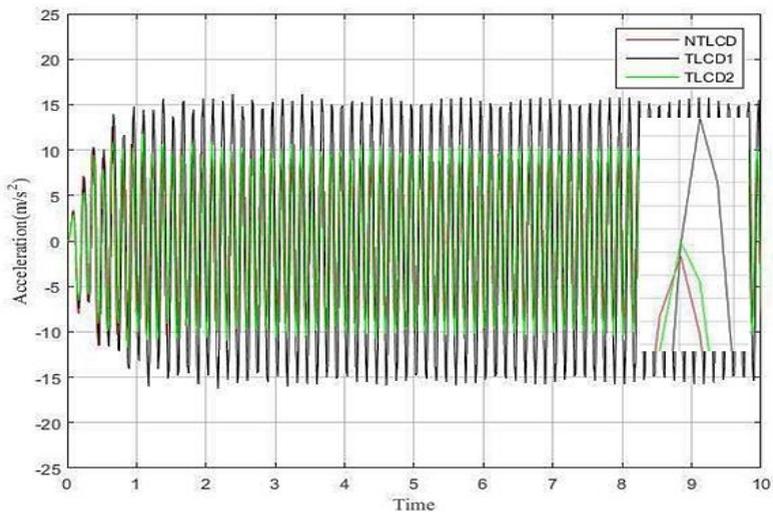
Respon perpindahan Struktur 2, 7 Hz (Ratio Massa 5%)



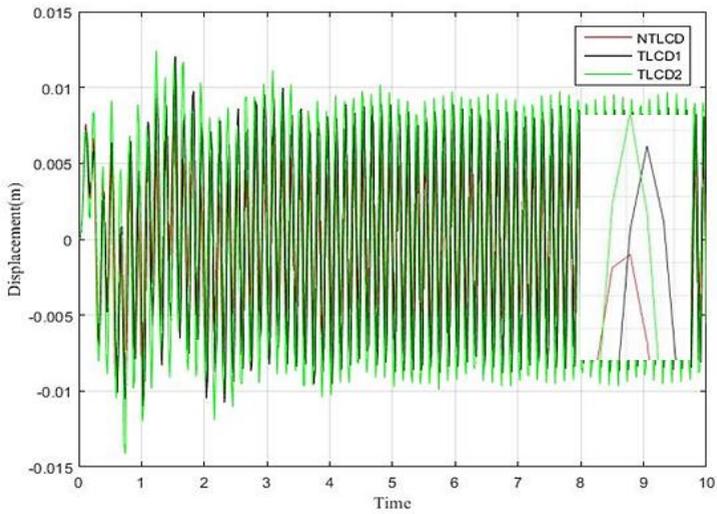
Respon kecepatan Struktur 2, 7Hz (Ratio Massa 5%)



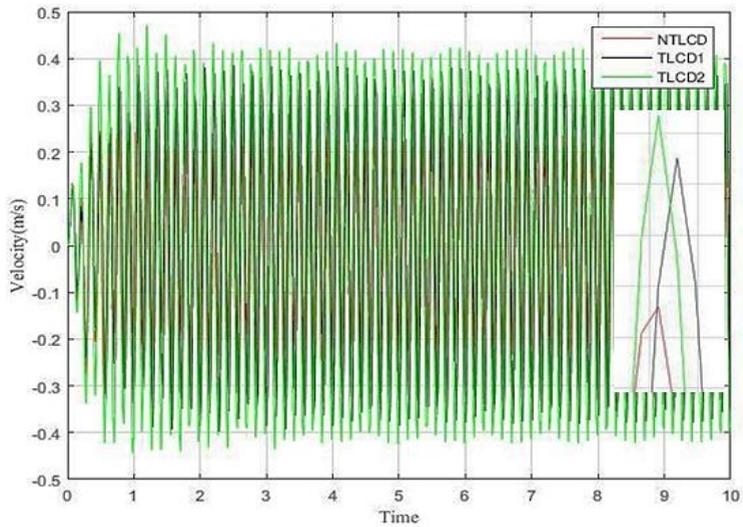
Respon percepatan Struktur 1, 7 Hz (Ratio Massa 5%)



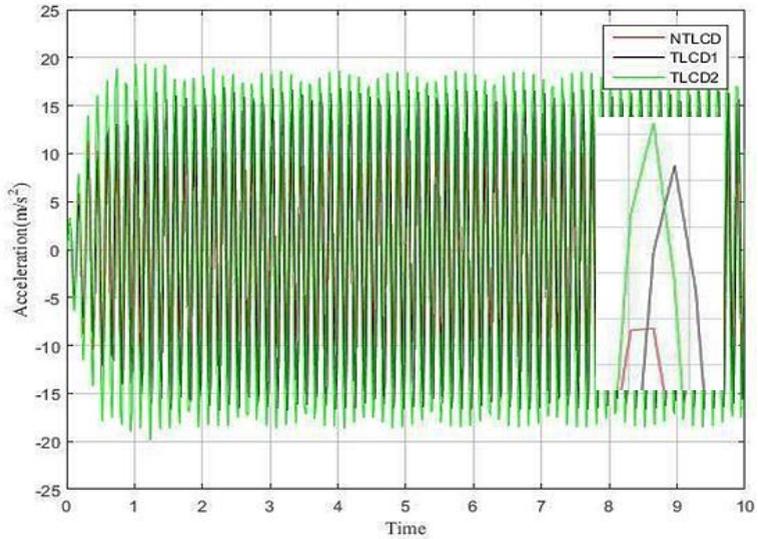
Respon perpindahan struktur 1, 7 Hz (Ratio Massa 7%)



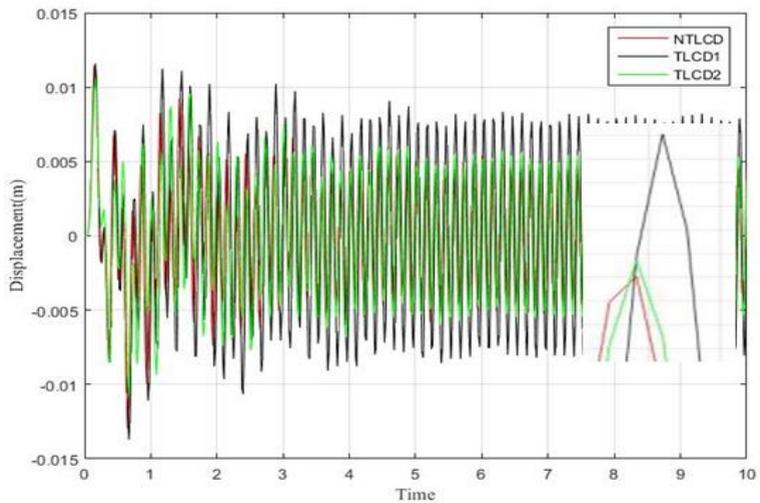
Respon kecepatan Struktur 1, 7Hz (Ratio Massa 7%)



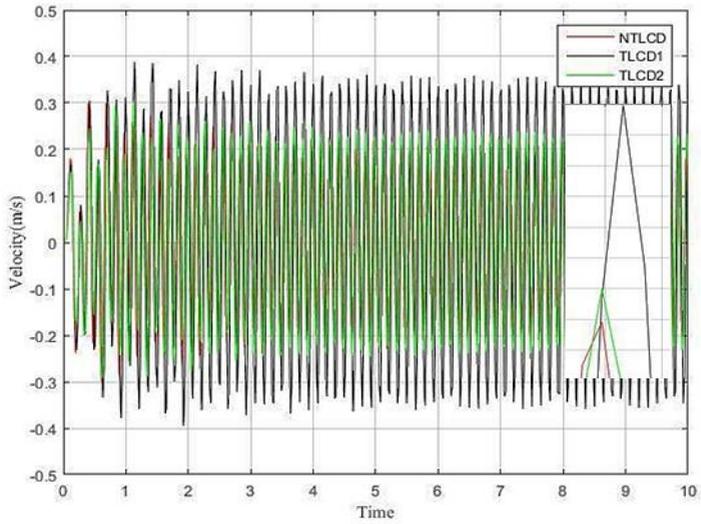
Respon percepatan Struktur 1, 7 Hz (Ratio Massa 7%)



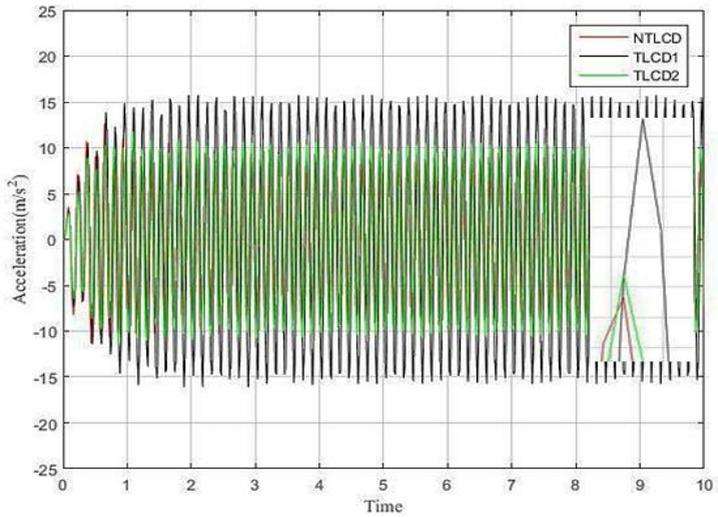
Respon perpindahan struktur 2, 7 Hz (Ratio Massa 7%)



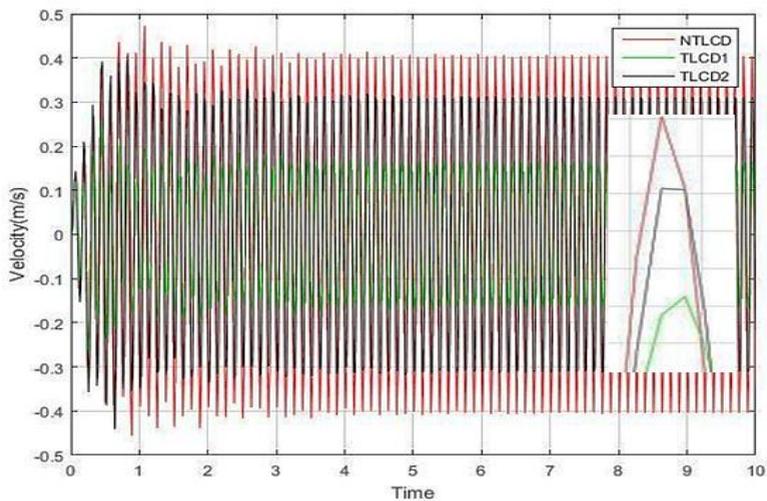
Respon kecepatan Struktur 2, 7Hz (Ratio Massa 7%)



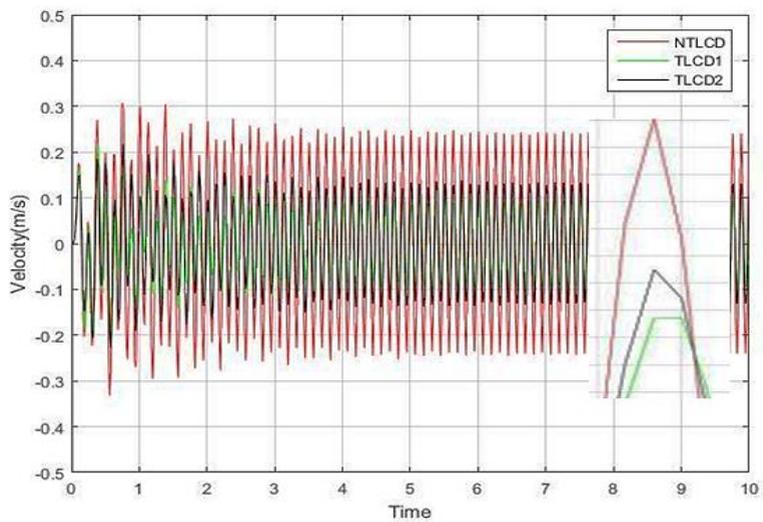
Respon percepatan Struktur 2, 7 Hz (Ratio Massa 7%)



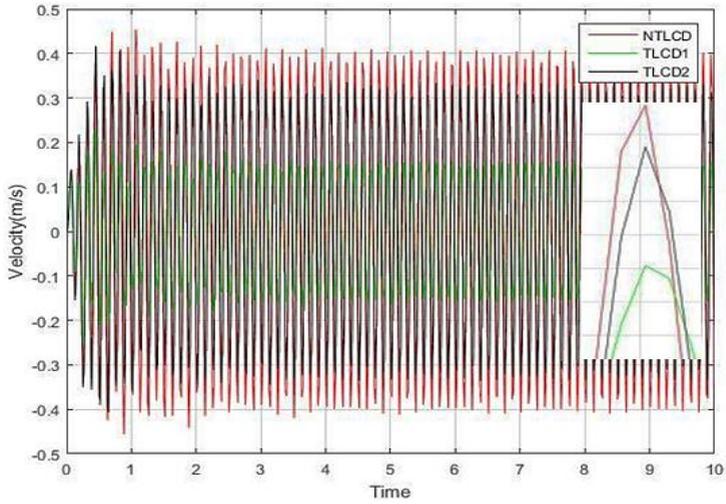
Respon kecepatan Struktur 1, 8 Hz (Ratio Massa 5%)



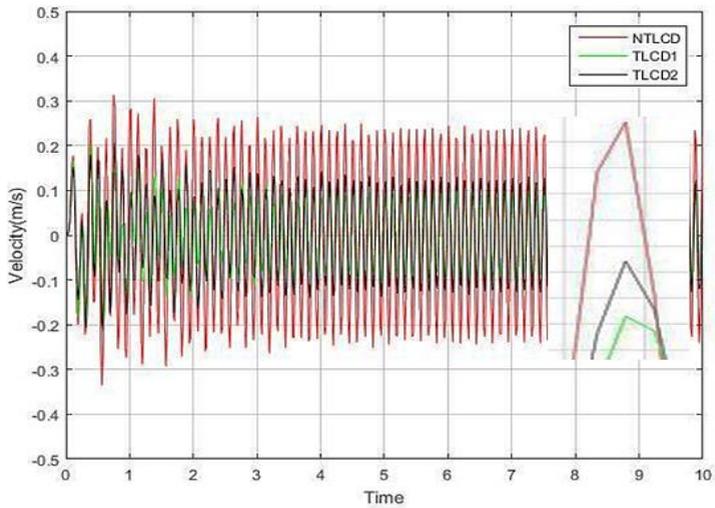
Respon kecepatan Struktur 2, 8 Hz (Ratio Massa 5%)



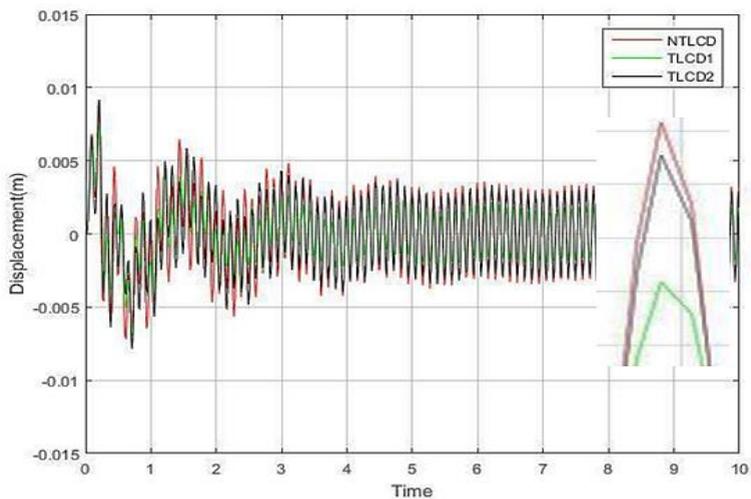
Respon kecepatan Struktur 1, 8 Hz (Ratio Massa 7%)



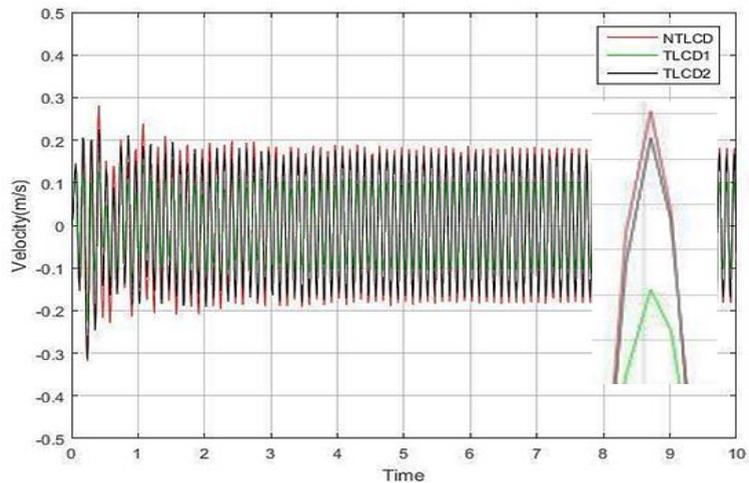
Respon kecepatan Struktur 2, 8 Hz (Ratio Massa 7%)



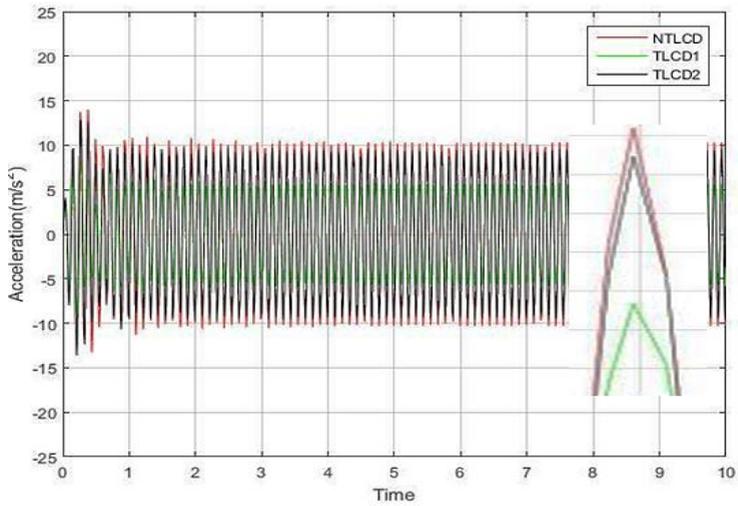
Respon perpindahan struktur 1, 9 Hz (Ratio Massa 5%)



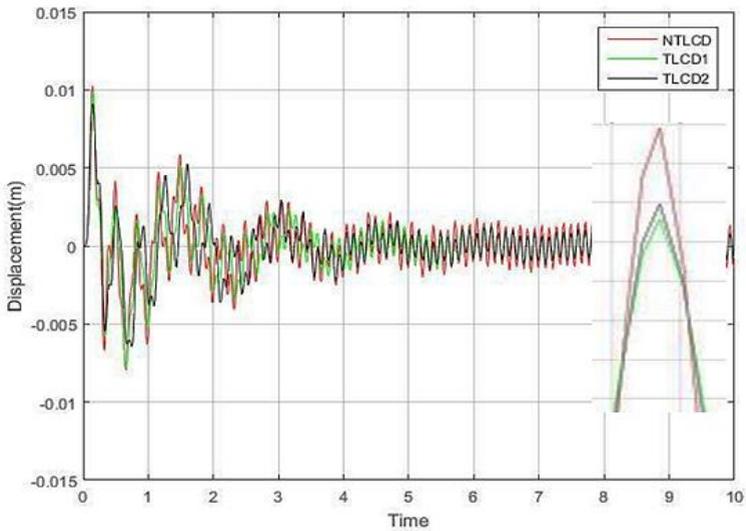
Respon kecepatan Struktur 1, 9 Hz (Ratio Massa 5%)



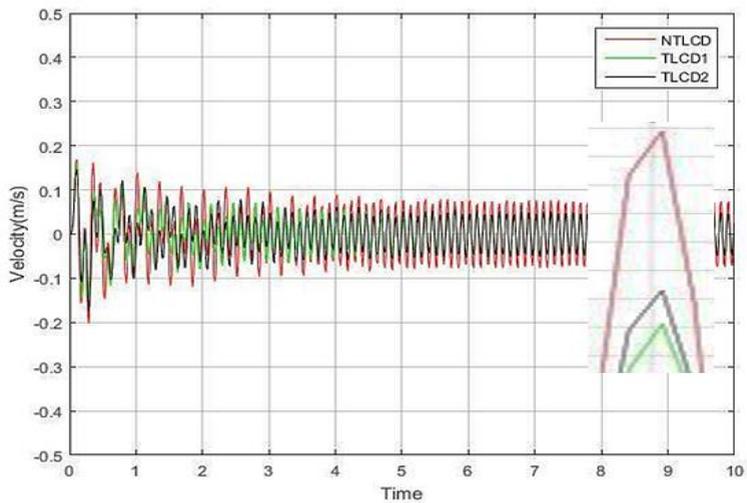
Respon percepatan Struktur 1, 9 Hz (Ratio Massa 5%)



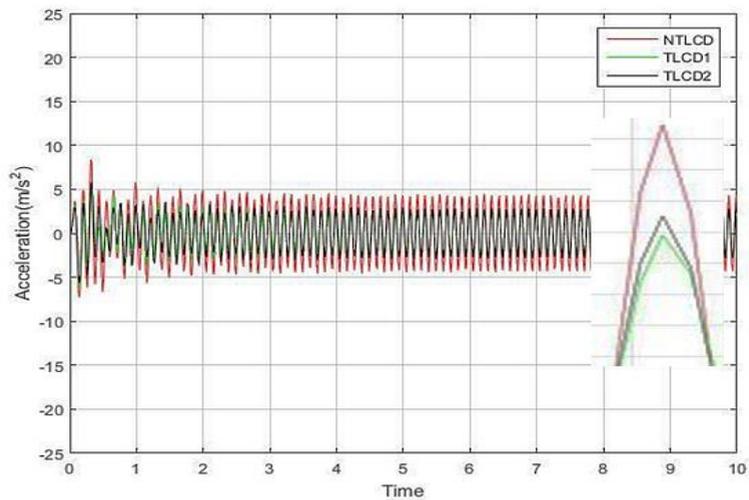
Respon perpindahan struktur 2, 9 Hz (Ratio Massa 5%)



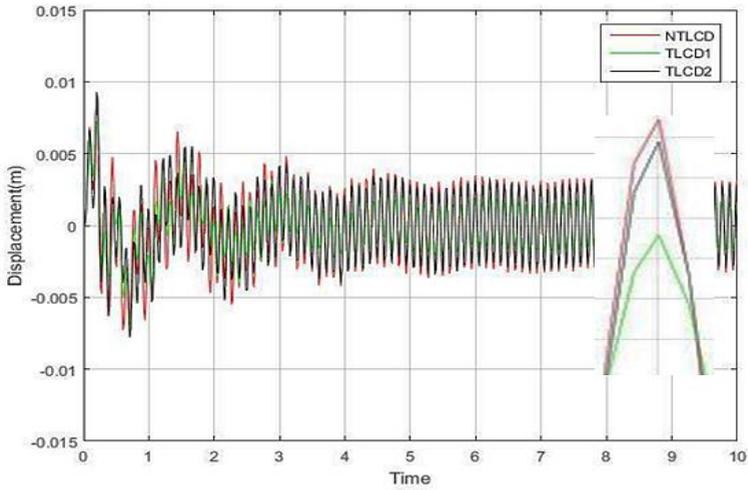
Respon kecepatan Struktur 2, 9 Hz (Ratio Massa 5%)



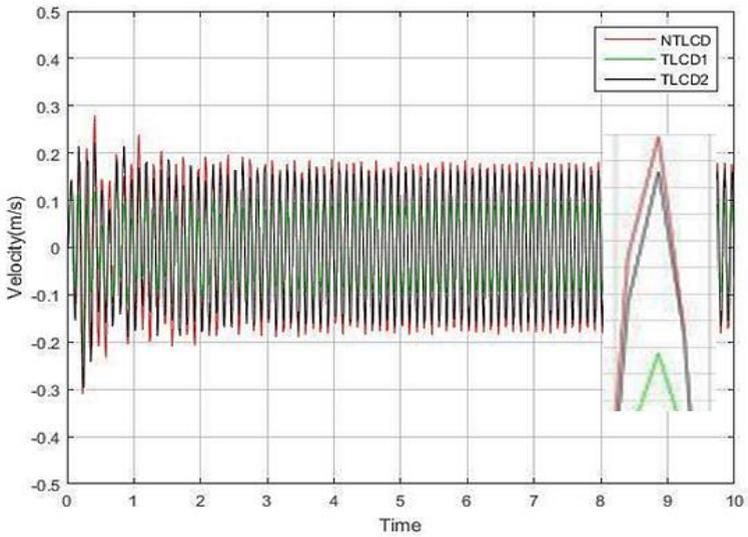
Respon percepatan Struktur 2, 9 Hz (Ratio Massa 5%)



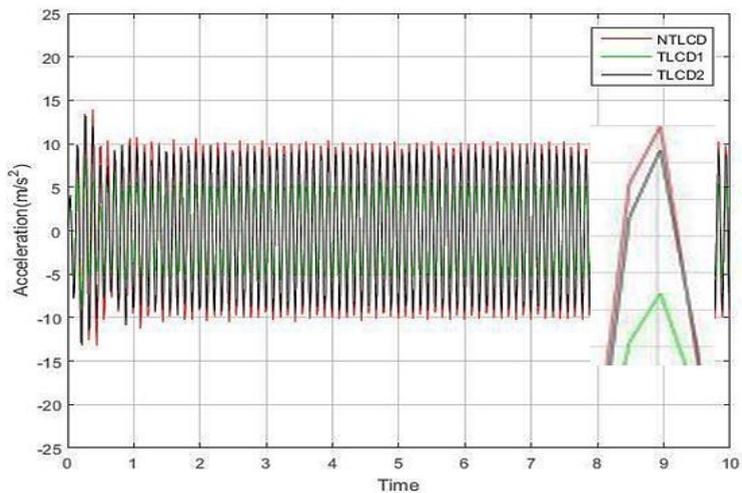
Respon perpindahan Struktur 1, 9 Hz (Ratio Massa 7%)



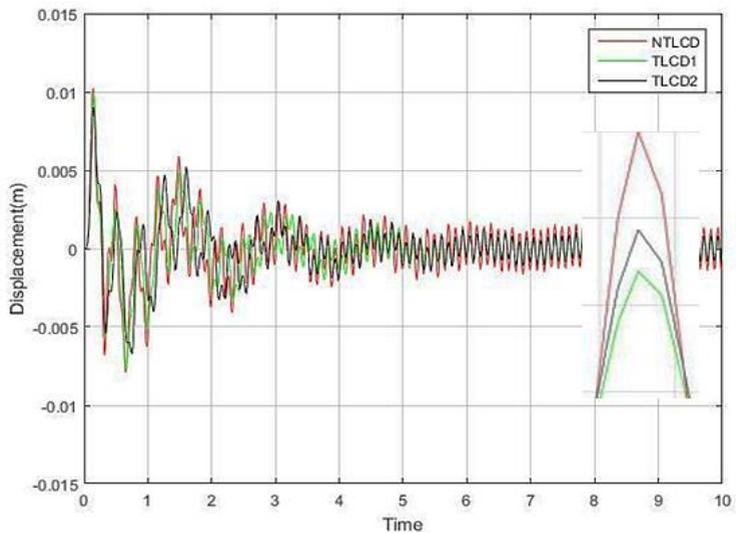
Respon kecepatan Struktur 1, 9 Hz (Ratio Massa 7%)



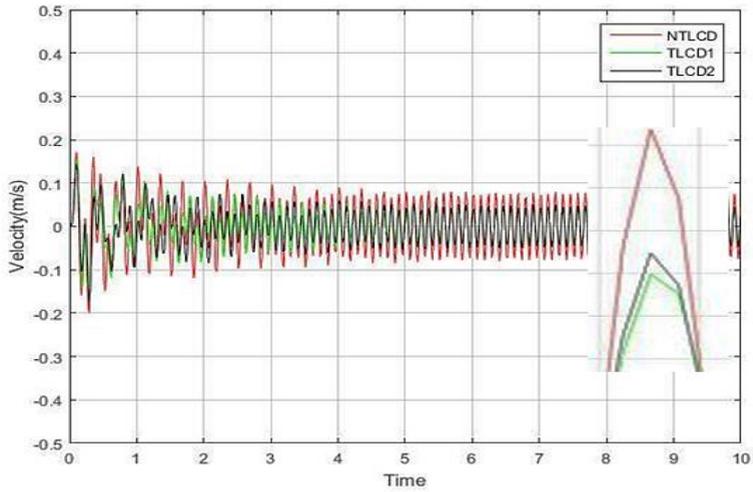
Respon percepatan Struktur 1, 9 Hz (Ratio Massa 7%)



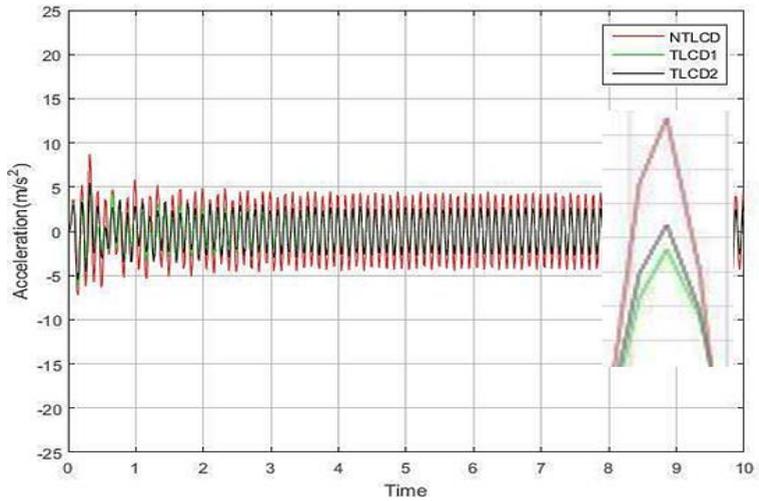
Respon perpindahan Struktur 2, 9 Hz (Ratio Massa 7%)

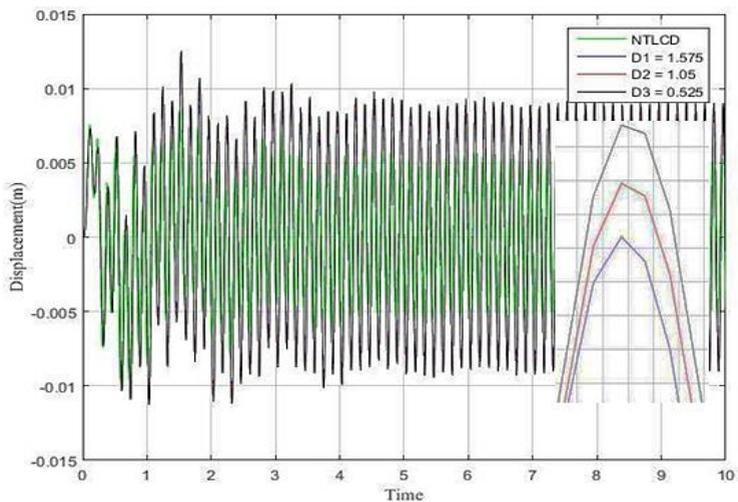
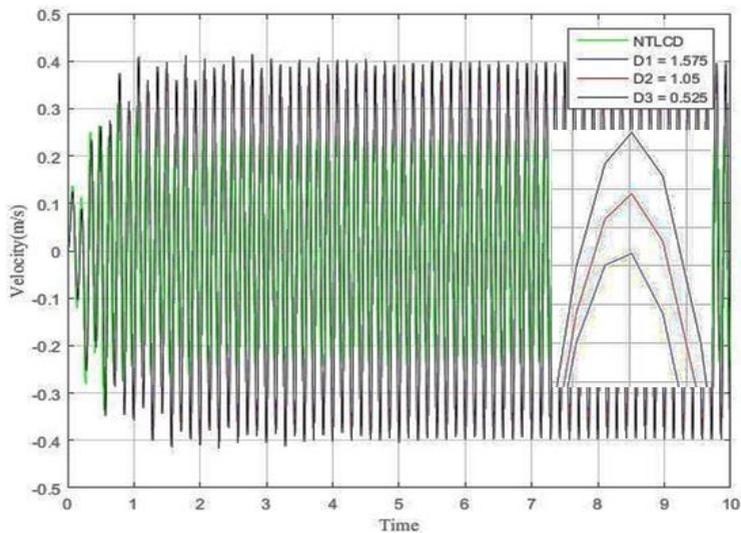


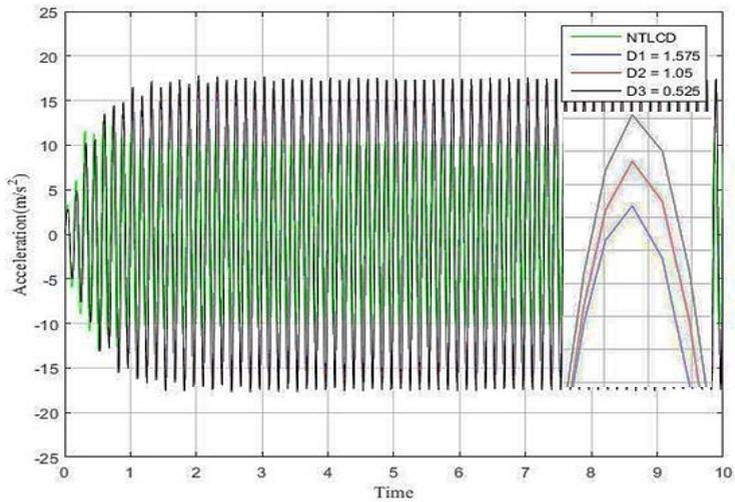
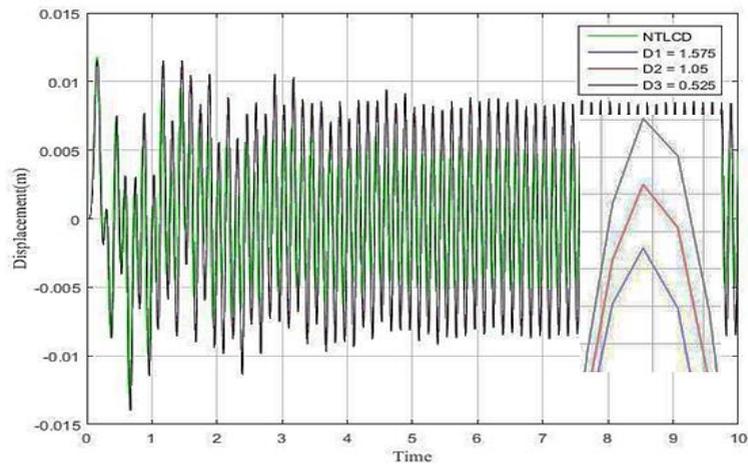
Respon kecepatan Struktur 2, 9 Hz (Ratio Massa 7%)



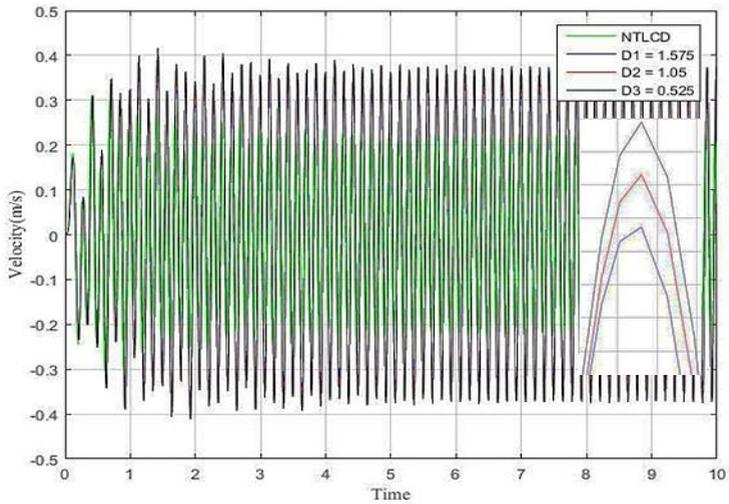
Respon percepatan Struktur 2, 9 Hz (Ratio Massa 7%)



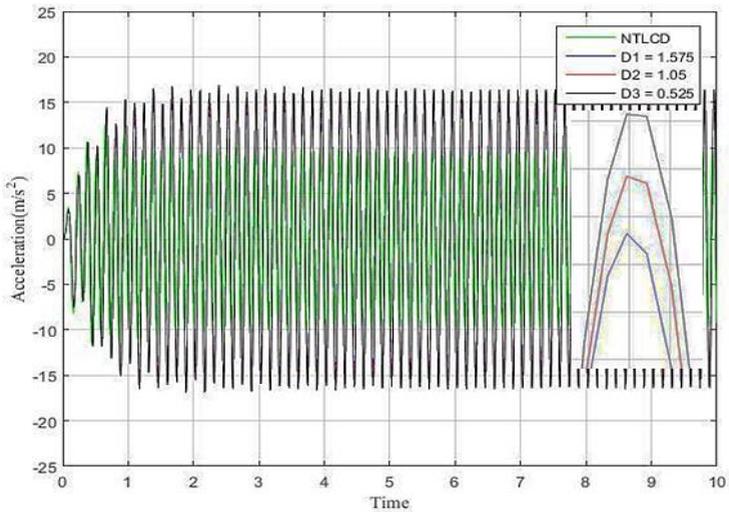
Perpindahan Struktur 1, 7 Hz (Variasi *Orifice* TLCD1)Kecepatan Struktur 1, 7 Hz (Variasi *Orifice* TLCD1)

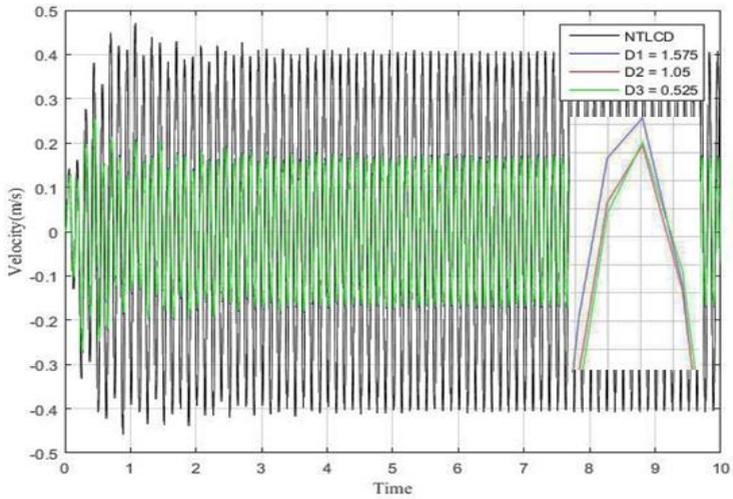
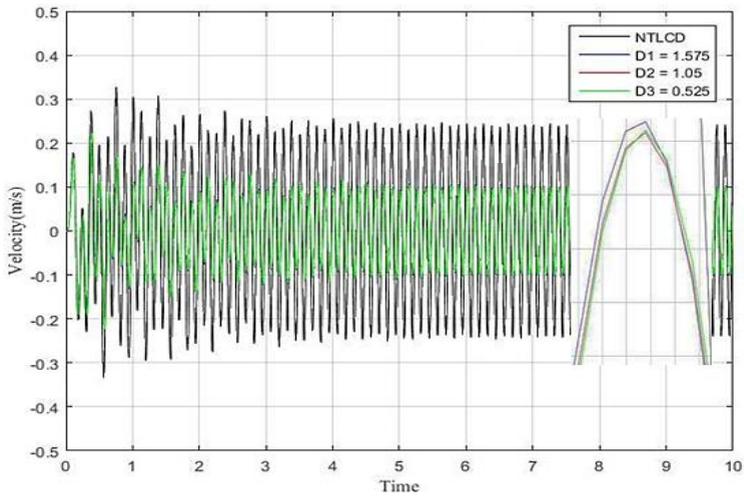
Percepatan Struktur 1, 7 Hz (Variasi *Orifice TLCD1*)Perpindahan Struktur 2, 7 Hz (Variasi *Orifice TLCD1*)

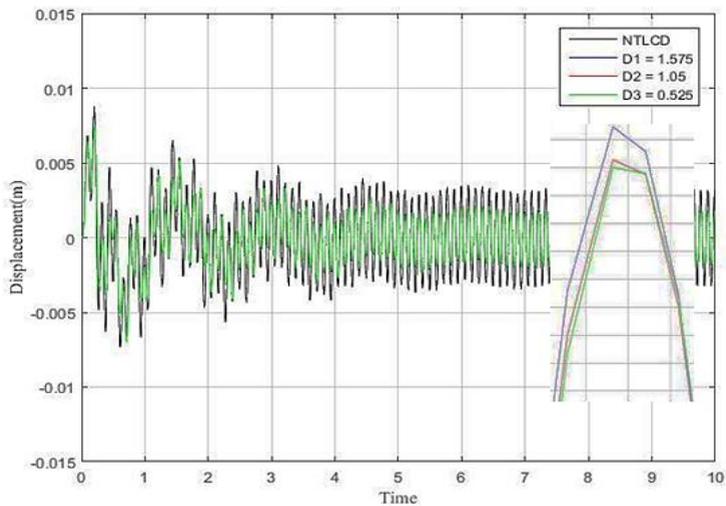
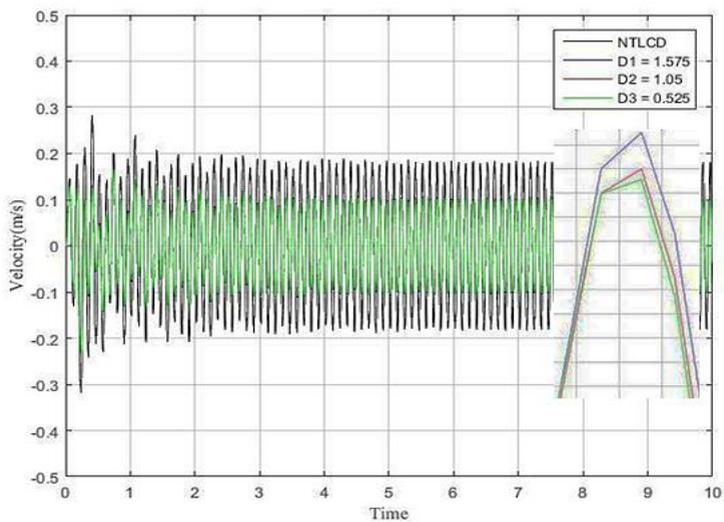
Kecepatan Struktur 2, 7 Hz (Variasi Orifice TLCD1)

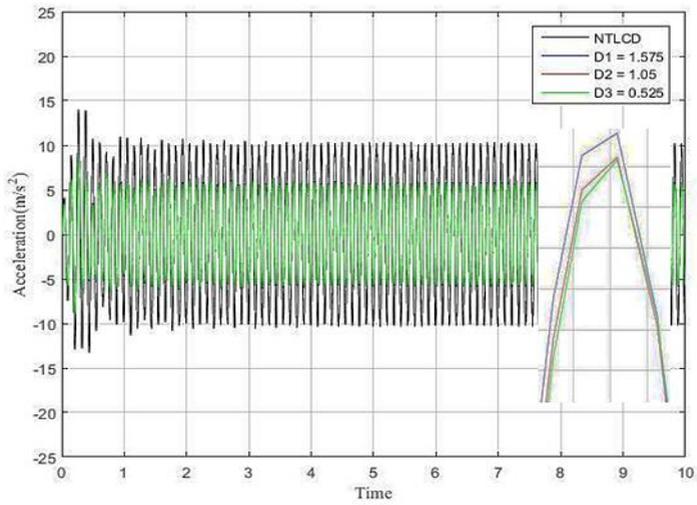
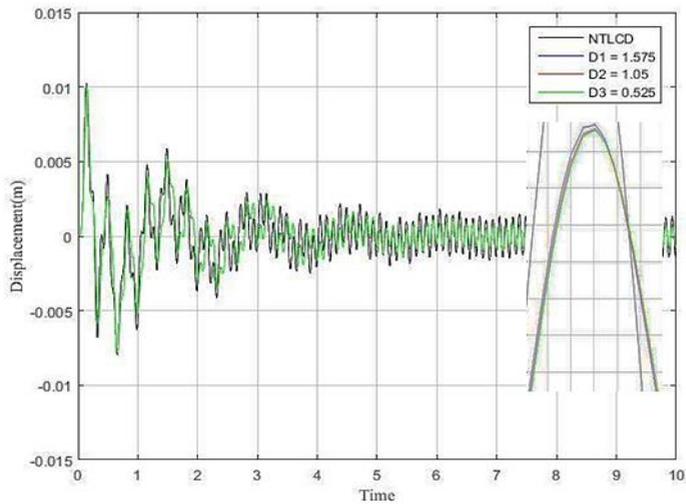


Percepatan Struktur 2, 7 Hz (Variasi Orifice TLCD1)

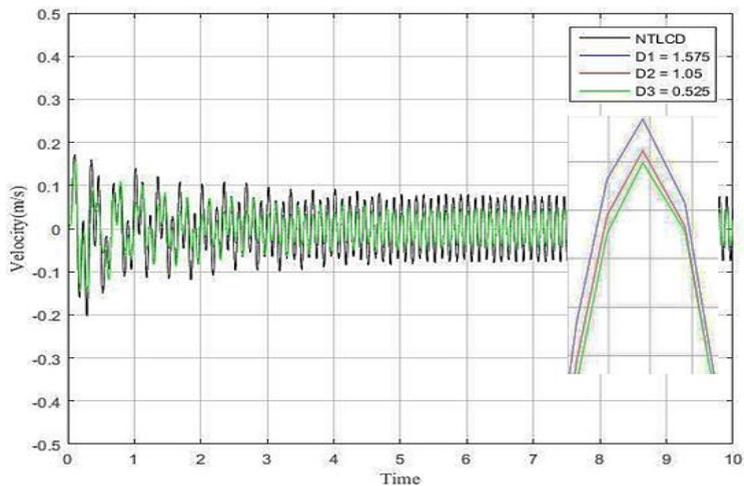


Kecepatan Struktur 1, 8 Hz (Variasi *Orifice* TLCD1)Kecepatan Struktur 2, 8 Hz (Variasi *Orifice* TLCD1)

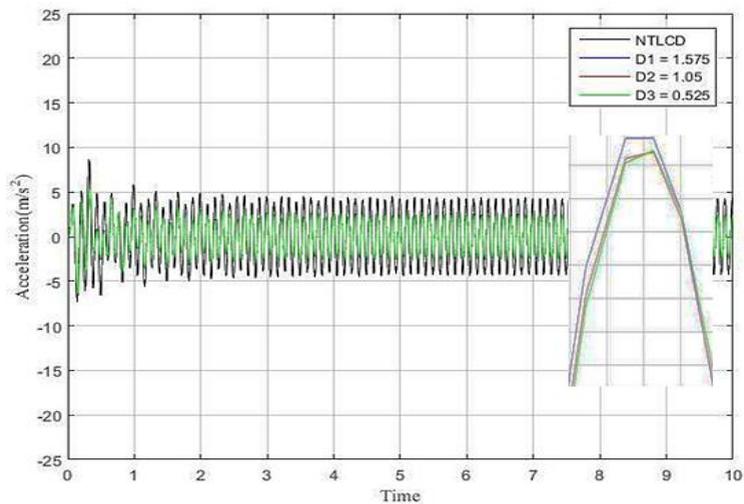
Perpindahan Struktur 1, 9 Hz (Variasi *Orifice* TLCD1)Kecepatan Struktur 1, 9 Hz (Variasi *Orifice* TLCD1)

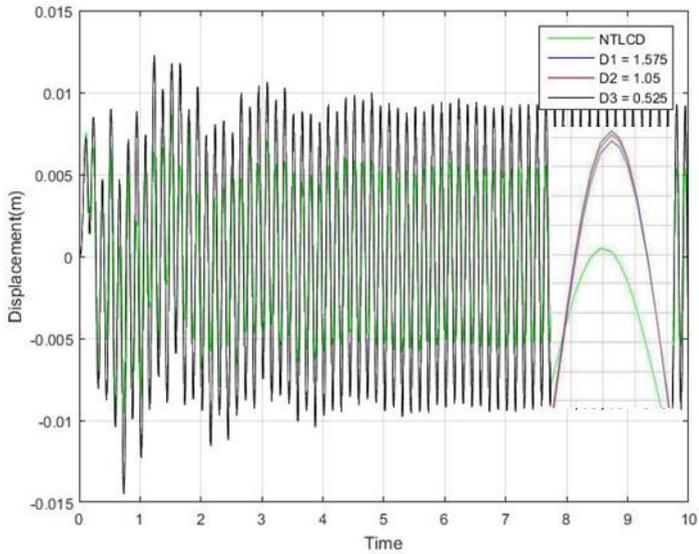
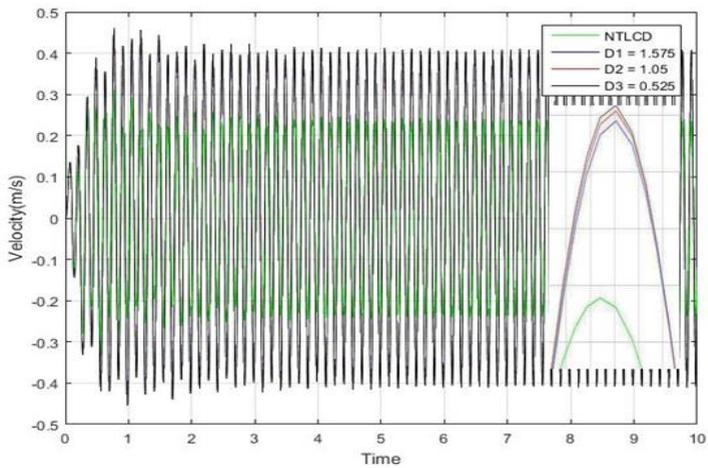
Percepatan Struktur 1, 9 Hz (Variasi *Orifice* TLCD1)Perpindahan Struktur 2, 9 Hz (Variasi *Orifice* TLCD1)

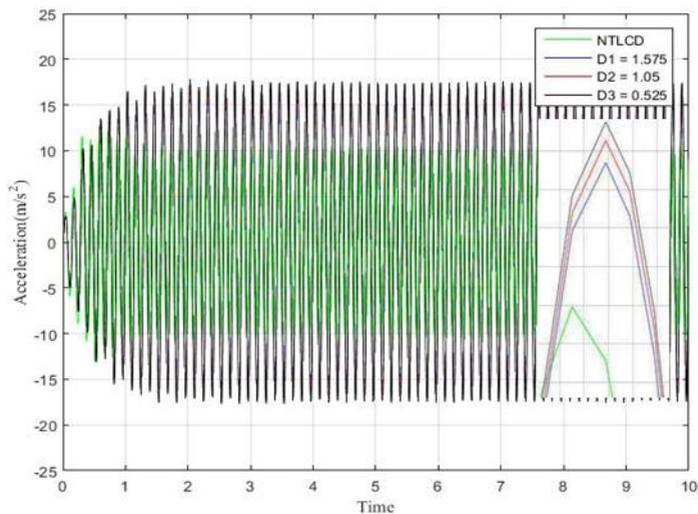
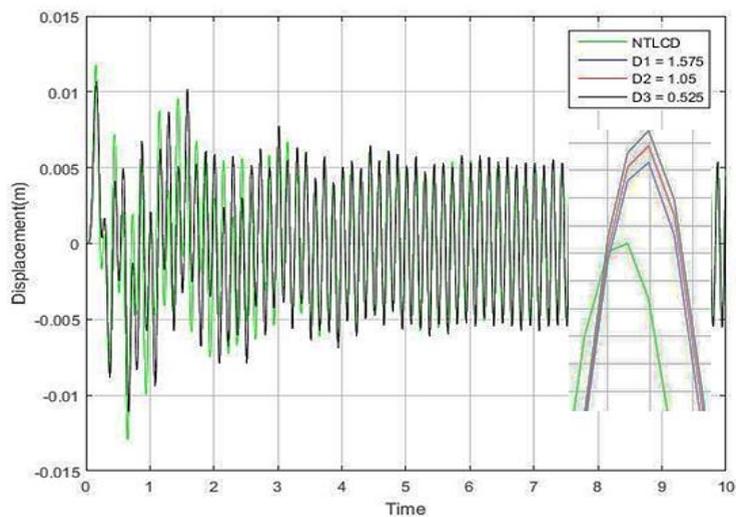
Kecepatan Struktur 2, 9 Hz (Variasi Orifice TLCD1)

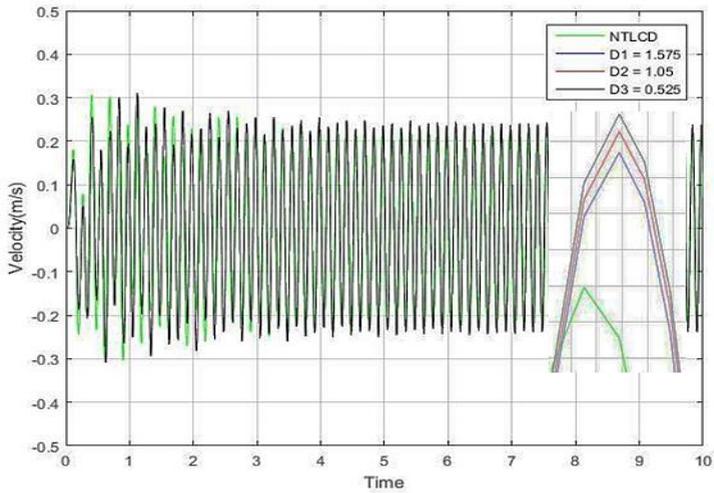
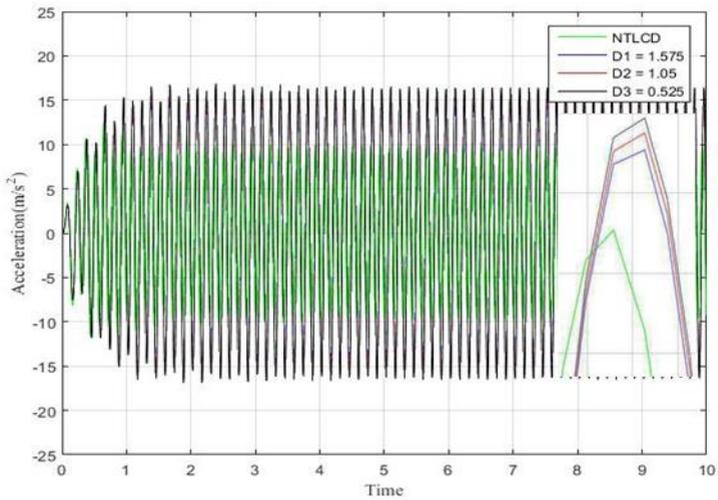


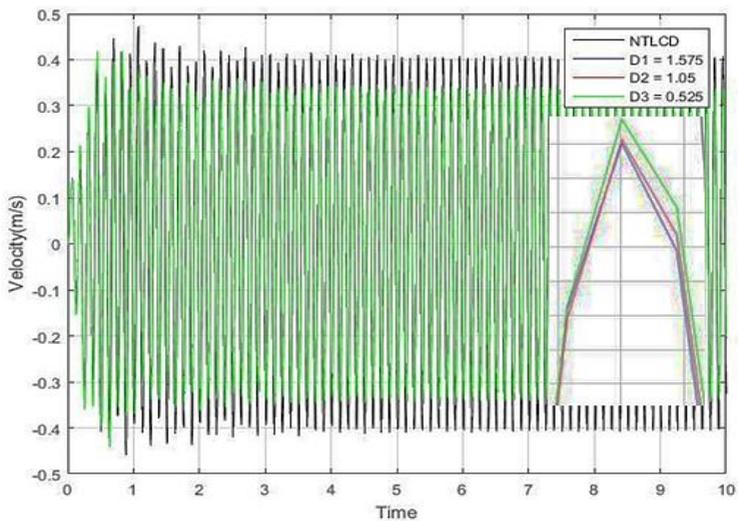
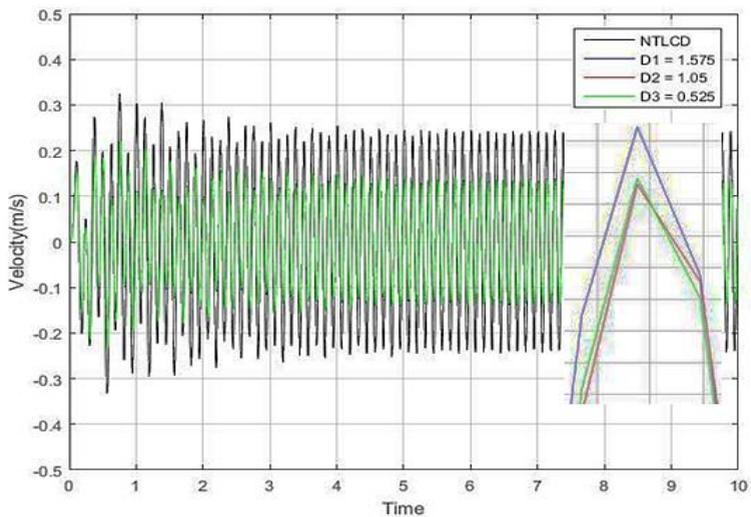
Percepatan Struktur 2, 9 Hz (Variasi Orifice TLCD1)

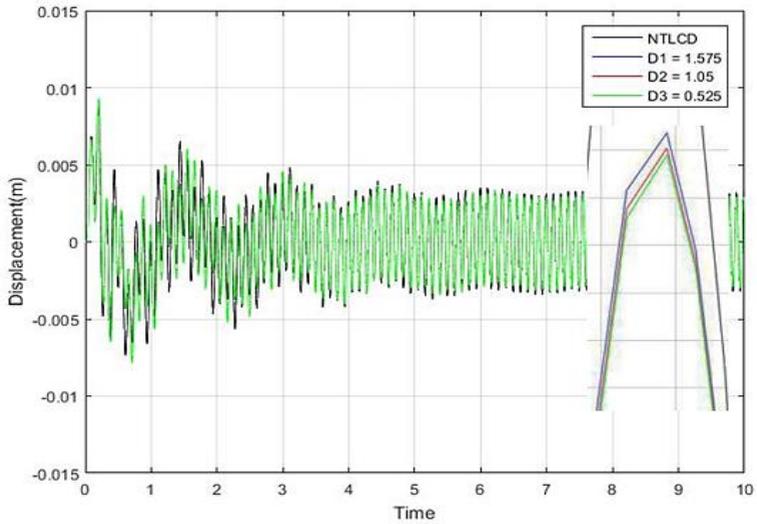
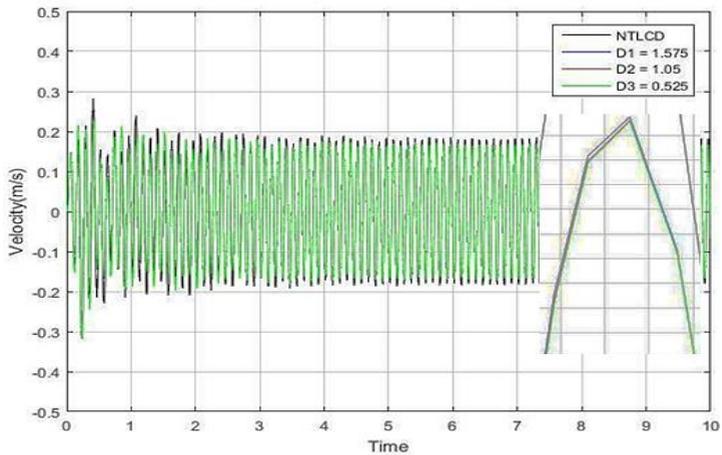


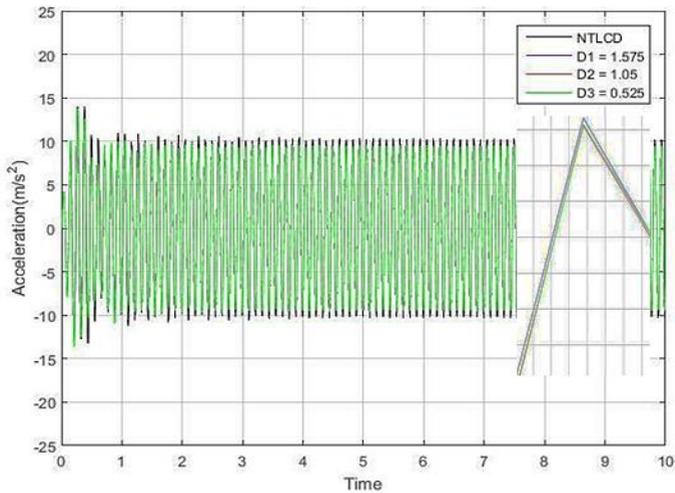
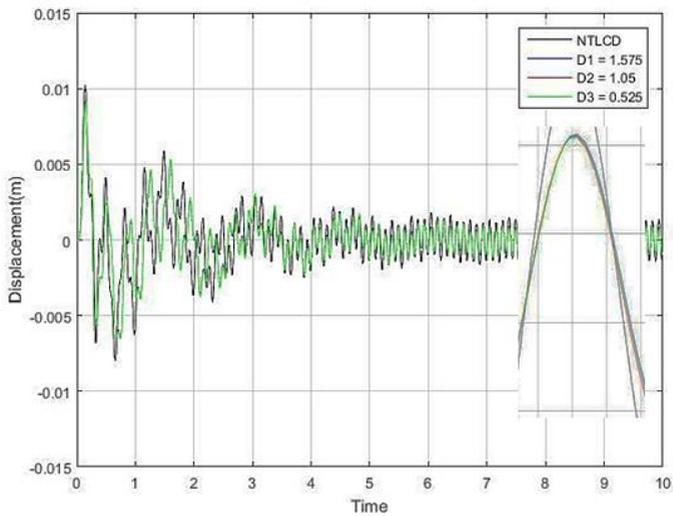
Perpindahan Struktur 1, 7 Hz (Variasi *Orifice TLCD2*)Kecepatan Struktur 1, 7 Hz (Variasi *Orifice TLCD2*)

Percepatan Struktur 1, 7 Hz (Variasi *Orifice TLCD2*)Perpindahan Struktur 2, 7 Hz (Variasi *Orifice TLCD2*)

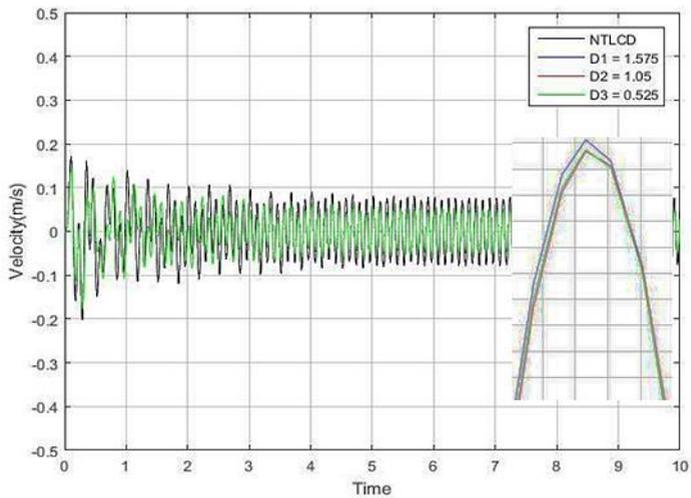
Kecepatan Struktur 2, 7 Hz (Variasi *Orifice* TLCD2)Percepatan Struktur 2, 7 Hz (Variasi *Orifice* TLCD2)

Kecepatan Struktur 1, 8 Hz (Variasi *Orifice* TLCD2)Kecepatan Struktur 2, 8 Hz (Variasi *Orifice* TLCD2)

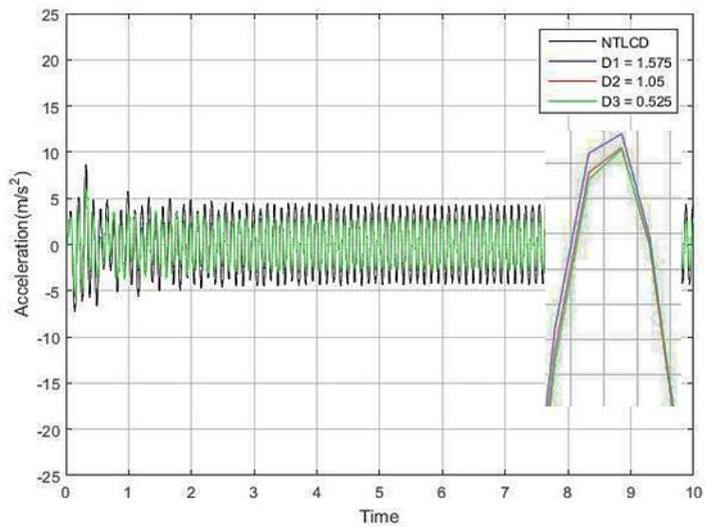
Perpindahan Struktur 1, 9 Hz (Variasi *Orifice TLCD2*)Kecepatan Struktur 1, 9 Hz (Variasi *Orifice TLCD2*)

Percepatan Struktur 1, 9 Hz (Variasi *Orifice TLCD2*)Perpindahan Struktur 2, 9 Hz (Variasi *Orifice TLCD2*)

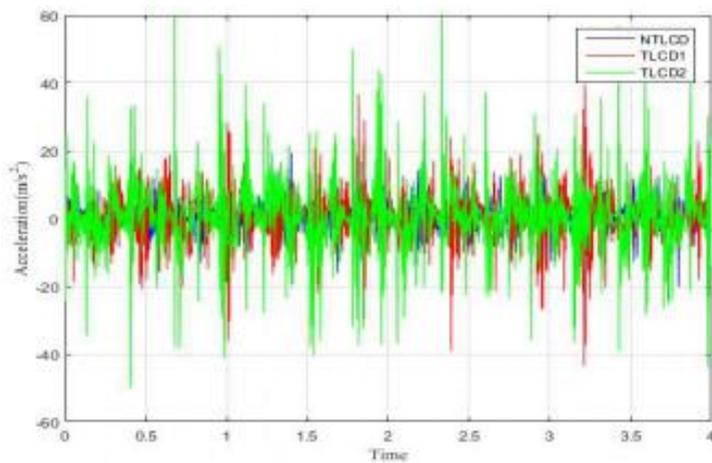
Kecepatan Struktur 2, 9 Hz (Variasi Orifice TLCD2)



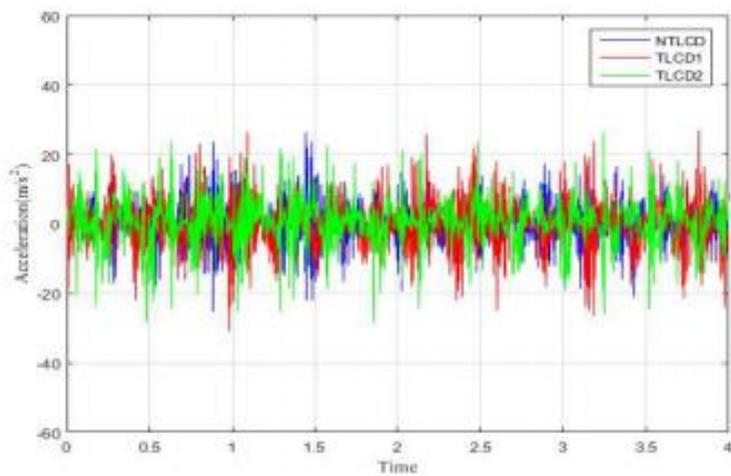
Percepatan Struktur 2, 9 Hz (Variasi Orifice TLCD2)



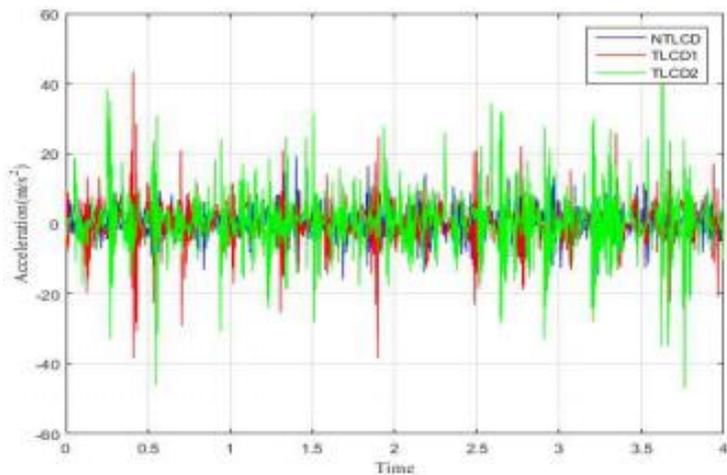
Percepatan Eksperimen Struktur 1, TLCD 5% 7 Hz



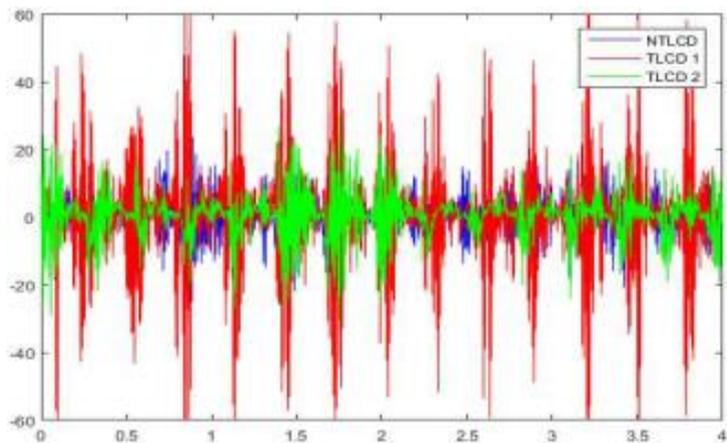
Percepatan Eksperimen Struktur 2, TLCD 5% 7 Hz



Percepatan Eksperimen Struktur 1, TLCD 7% 7 Hz



Percepatan Eksperimen Struktur 2, TLCD 7% 7 Hz



Tabel Hasil Simulasi dengan Penambahan TLCD pada ratio massa 5%

Perpindahan	7Hz, 7%	NTLCD	TLCD1	TLCD2
	Struktur 1	0.004	0.0061	0.0068
	Struktur 2	0.0039	0.0058	0.0041
Kecepatan	7Hz, 7%	NTLCD	TLCD1	TLCD2
	Struktur 1	0.169	0.254	0.294
	Struktur 2	0.161	0.240	0.168
Perpindahan	8Hz, 7%	NTLCD	TLCD1	TLCD2
	Struktur 1	0.0058	0.0026	0.0049
	Struktur 2	0.0038	0.0021	0.0024
Kecepatan	8Hz, 7%	NTLCD	TLCD1	TLCD2
	Struktur 1	0.2782	0.1122	0.2322
	Struktur 2	0.1671	0.0708	0.0918
Perpindahan	9 Hz, 7%	NTLCD	TLCD1	TLCD2
	Struktur 1	0.0026	0.0017	0.0024
	Struktur 2	0.0019	0.0017	0.0017
Kecepatan	9 Hz, 7%	NTLCD	TLCD1	TLCD2
	Struktur 1	0.131	0.0711	0.1209
	Struktur 2	0.0599	0.0378	0.0403

Tabel Hasil Simulasi dengan Penambahan TLCD pada ratio massa 7%

Perpindahan	7Hz, 5%	NTLCD	TLCD1	TLCD2
	Struktur 1	0.004	0.0062	0.0065
	Struktur 2	0.0039	0.0059	0.0041
Kecepatan	7Hz, 5%	NTLCD	TLCD1	TLCD2
	Struktur 1	0.169	0.253	0.280
	Struktur 2	0.161	0.240	0.168
Perpindahan	8 Hz, 5%	NTLCD	TLCD1	TLCD2
	Struktur 1	0.0059	0.0027	0.005
	Struktur 2	0.0038	0.0022	0.0025

Kecepatan	8 Hz, 5%	NTLCD	TLCD1	TLCD2
	Struktur 1	14.62	6.02	12.12
	Struktur 2	0.16	0.08	0.10
Perpindahan	9 Hz, 5%	NTLCD	TLCD1	TLCD2
	Struktur 1	0.0026	0.0018	0.0024
	Struktur 2	0.0019	0.0017	0.0017
Kecepatan	9 Hz, 5%	NTLCD	TLCD1	TLCD2
	Struktur 1	0.132	0.076	0.123
	Struktur 2	0.060	0.039	0.042

Tabel Hasil Simulasi variasi *orifice* TLCD1

TLCD1	7Hz	NTLCD	25%	50%	75%
Perpindahan	Struktur 1	0.004	0.0058	0.0061	0.0063
	Struktur 2	0.0039	0.0056	0.0058	0.006
Kecepatan	Struktur 1	0.1686	0.2513	0.2613	0.272
	Struktur 2	0.1593	0.2372	0.2467	0.2567
TLCD1	8 Hz	NTLCD	25%	50%	75%
Perpindahan	Struktur 1	0.0058	0.0027	0.0027	0.0027
	Struktur 2	0.0037	0.0022	0.0022	0.0022
Kecepatan	Struktur 1	0.2841	0.1228	0.1212	0.1212
	Struktur 2	0.1705	0.0769	0.0761	0.0762
TLCD1	9 Hz	NTLCD	25%	50%	75%
Perpindahan	Struktur 1	0.0026	0.0018	0.0018	0.0018
	Struktur 2	0.0019	0.0017	0.0017	0.0017
Kecepatan	Struktur 1	0.1301	0.0746	0.0737	0.0736
	Struktur 2	0.0599	0.0391	0.039	0.0389

Tabel Hasil Simulasi variasi *orifice* TLCD2

TLCD2	7Hz	NTLCD	25%	50%	75%
Perpindahan	Struktur 1	0.004	0.0064	0.0065	0.0066
	Struktur 2	0.0038	0.004	0.004	0.004
Kecepatan	Struktur 1	0.1685	0.2773	0.2833	0.2869

	Struktur 2	0.1589	0.1659	0.1675	0.169
TLCD2	8 Hz	NTLCD	25%	50%	75%
Perpindahan	Struktur 1	0.0058	0.0049	0.0049	0.0049
	Struktur 2	0.0036	0.0023	0.0023	0.0023
Kecepatan	Struktur 1	0.2854	0.239	0.2392	0.2401
	Struktur 2	0.1705	0.0979	0.0971	0.0972
TLCD2	9 Hz	NTLCD	25%	50%	75%
Perpindahan	Struktur 1	0.0025	0.0023	0.0023	0.0023
	Struktur 2	0.0016	0.0014	0.0014	0.0014
Kecepatan	Struktur 1	0.1295	0.1199	0.1199	0.1199
	Struktur 2	0.0579	0.0396	0.0394	0.0394

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BIOGRAFI PENULIS



Imelda Christi lahir di kota Balikpapan, Kalimantan Timur pada 08 Agustus 1996. Penulis merupakan anak ke 2 dari 4 bersaudara dari Bapak Binsar Hutauruk dan Ibu Rolan Tiur Riwayat Pendidikan penulis diawali di TK Kenari Balikpapan pada tahun 2000.. Lalu pendidikan dilanjutkan di SDN 004 Balikpapan Tengah pada tahun 2002-2008. Lalu penulis melanjutkan pendidikannya di SMP Negeri 1 Balikpapan pada tahun 2008, Kemudian selanjutnya penulis melanjutkan pendidikan di SMA Negeri 1 Balikpapan pada tahun 2011 – 2014. Lalu penulis melanjutkan pendidikan jenjang S-1 di Departemen Teknik Mesin di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya dari tahun 2014 hingga 2018.

Penulis aktif menjadi Staff Ahli Finansial di Departemen Kesejahteraan Mahasiswa di Himpunan Mahasiswa Mesin (HMM) pada tahun 2016 -2017. Selain itu juga penulis aktif dalam pelatihan Penulis juga pernah mengikuti LKMM Pra-TD yang diselenggarakan oleh BEM FTI-ITS pada tahun 2014. Penulis juga pernah menjadi grader mata kuliah Mekanika Getaran dan juga aktif sebagai asisten praktikum Mekanika Getaran pada Laboratorium Vibrasi dan Sistem Dinamis.

Semasa kuliah penulis masuk ke Laboratorium Vibrasi dan Sistem Dinamis dan mendalami masalah mengenai getaran pada struktur bangunan. Untuk semua informasi dan masukan terkait tugas akhir ini dapat menghubungi penulis melalui email imeldachristii@gmail.com