



TESIS - TM 142501

**STUDI PENGARUH PENAMBAHAN *TUNED MASS DAMPER* (TMD) TERHADAP RESPON DINAMIS MODEL TURBIN ANGIN DENGAN VARIASI STRUKTUR TURBIN**

**AULIANA DIAH WILUJENG**  
021116 5005 0006

**DOSEN PEMBIMBING**  
Dr.Eng. Harus Laksana Guntur, S.T., M.Eng.  
NIP. 19750511 199903 1 001

**PROGRAM MAGISTER**  
**BIDANG STUDI DESAIN SISTEM MEKANIKAL**  
**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN**  
**FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI**  
**INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER**  
**SURABAYA**  
**2018**



**THESES - TM 142501**

**STUDY OF EFFECT OF TUNED MASS DAMPER (TMD)  
TOWARDS DYNAMIC RESPONSE OF WIND TURBINE  
MODEL WITH STRUCTURE VARIATION**

**AULIANA DIAH WILUJENG  
021116 5005 0006**

**SUPERVISOR  
Dr.Eng. Harus Laksana Guntur, S.T., M.Eng.  
NIP. 19750511 199903 1 001**

**MAGISTER PROGRAM  
MECHANICAL SYSTEM DESIGN  
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING  
FACULTY OF INDUSTRIAL ENGINEERING  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2018**

Tesis ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar  
Magister Teknik (M.T.)

di  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:  
Auliana Diah Wilujeng  
NRP. 021116 5005 0006

Tanggal Ujian : 25 Juli 2018  
Periode Wisuda : September 2018

Disetujui oleh:

  
1. Dr. Eng. Harus Laksana Guntur, S.T., M.Eng. (Pembimbing)  
NIP. 19750511 199903 1 001

  
2. Prof. Ir. I Nyoman Sutantra, M.Sc., Ph.D. (Penguji)  
NIP. 19510605 197803 1 002

  
3. Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA. (Penguji)  
NIP. 19650810 199102 1 001

  
4. Dr. Wiwiek Hendrowati, S.T., M.T. (Penguji)  
NIP. 19700412 199703 2 003

Dekan Fakultas Teknologi Industri,

  
Dr. Bambang Lelono Widjiantoro, S.T., M.T.  
NIP. 19690507 199512 1 001

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## **PERNYATAAN KEASLIAN TESIS**

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan tesis saya dengan judul “STUDI PENGARUH PENAMBAHAN TUNED MASS DAMPER (TMD) TERHADAP RESPON DINAMIS MODEL TURBIN ANGIN DENGAN VARIASI STRUKTUR TOWER” adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diizinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya saya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap di Daftar Pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku.

Surabaya, 25 Juli 2018

Auliana Diah Wilujeng

NRP: 02111650050006

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

# **STUDI PENGARUH PENAMBAHAN TUNED MASS DAMPER (TMD) TERHADAP RESPON DINAMIS MODEL TURBIN ANGIN DENGAN VARIASI STRUKTUR TOWER**

Nama Mahasiswa : Auliana Diah Wilujeng  
NRP : 2116205006  
Pembimbing : Dr. Eng. Harus Laksana Guntur, S.T., M.Eng.

## **ABSTRAK**

Turbin angin merupakan salah satu fasilitas untuk mengubah energi angin menjadi energi listrik. Banyak kasus kegagalan yang terjadi pada turbin angin, salah satunya adalah kelelahan akibat getaran. Salah satu upaya mengurangi adanya getaran adalah dengan meletakkan suatu massa di puncak tower (*nacelle*), atau biasa disebut dengan *Tuned Mass Damper* (TMD). Penelitian tentang pengaruh TMD telah banyak dilakukan dengan cara memvariasikan massa TMD, namun belum ada yang melakukan variasi pada struktur tower turbin. Oleh karena itu, perlu dilakukan pengujian eksperimen mengenai pengaruh pemberian TMD pada turbin angin skala lab dengan variasi struktur bentuk tower, kemudian hasil dari eksperimen dibandingkan dengan hasil simulasi menggunakan Matlab.

Penelitian ini diawali dengan menyimulasikan keadaan turbin angin sebenarnya dan mendapatkan besar gaya yang diterima di pondasi turbin angin. Dengan skala 1/60 maka dibangunlah meja getar sebagai eksitasi yang digunakan untuk alat uji turbin angin. Kemudian membangun turbin angin skala lab, dengan perbandingan massa tower:massa nacelle:massa TMD adalah 1:0,333:0,027. Variasi yang dilakukan diantaranya variasi frekuensi, variasi  $k_a$  dan  $m_a$ , serta variasi bentuk tower. Variasi frekuensi yang dilakukan adalah 3 Hz (kecepatan angin rata-rata), 9 Hz (salah satu frekuensi natural sistem), 12 Hz dan 15 Hz (mewakili kecepatan angin yang sangat kencang seperti puting beliung serta bencana alam seperti gempa angin. Variasi  $k_a$  yang dilakukan adalah 0,8%  $k_t$ , 1%  $k_t$ , 2%  $k_t$  sedangkan variasi  $m_a$  yang dilakukan adalah 5%  $m_n$ , 7%  $m_n$ , dan 9%  $m_n$ . Variasi tower yaitu diantaranya tower lurus, tower bertingkat, dan tower taper. Setelah model eksperimen berhasil dibangun, pengambilan data baru dapat dilakukan. Hasil yang diperoleh dari eksperimen dibandingkan dengan hasil yang diperoleh dari simulasi.

Hasil yang didapatkan dari penelitian ini adalah adanya pengaruh penambahan TMD terhadap respon dinamis, yaitu 2,85% untuk massa meja getar dan 0,71% untuk massa tower & nasel. Selain itu, dari hasil simulasi, dengan memvariasikan frekuensi, didapatkan bahwa tingkat keefektifan penambahan TMD paling baik terjadi saat sistem bekerja pada frekuensi 3 Hz. Besarnya persen keefektifannya adalah 13,114% untuk massa meja getar dan 9,217% untuk massa tower & nasel. Disamping itu besar eror yang terjadi antara hasil eksperimen dan simulasi rata-rata lebih dari 5%.

***Kata kunci: Tuned Mass Damper (TMD), absorber, turbin angin, tower turbin angin***

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

# **STUDY OF EFFECT OF TUNED MASS DAMPER (TMD) TOWARDS DYNAMIC RESPONSE OF WIND TURBINE MODEL WITH STRUCTURE VARIATION**

Student Name : Auliana Diah Wilujeng  
Student Identity Number : 2116205006  
Supervisor : Dr. Eng. Harus Laksana Guntur, S.T., M.Eng.

## **ABSTRACT**

Wind turbine is one of the facilities to convert wind energy into electrical energy. Many cases of failure that occur in wind turbines, one of which is the fatigue caused by vibration. One effort to reduce the vibration is to put a mass at the top of the tower (nacelle), or commonly called the Tuned Mass Damper (TMD). Research on the effects of TMD has been largely done by varying the mass of TMD, but no one has done variations on the tower structure of the turbine. Therefore, experimental testing on the effect of giving TMD on wind turbine of lab scale with variation of tower form structure, then result of experiment compared with result of simulation using Matlab.

This research begins by simulating the true state of the wind turbine and obtaining the great force received in the wind turbine foundation. With a scale of 1/60 then built a shaking table as an excitation used for wind turbine test equipment. Then build the lab scale wind turbine, with the tower mass ratio: nacelle mass: TMD mass is 1: 0.333: 0.027. Variations made include variations in frequency, variation of  $k_a$  and  $m_a$ , and variations of tower form. Variations in frequency are 3 Hz (average wind speed), 9 Hz (one of the system's natural frequencies), 12 Hz and 15 Hz (represents very strong wind speeds such as tornadoes and natural disasters such as wind quakes). The variations of  $k_a$  is done are 0.8%  $k_t$ , 1%  $k_t$ , 2%  $k_t$  whereas the variations of  $m_a$  is done are 5%  $m_n$ , 7%  $m_n$  and 9%  $m_n$ . The variation of tower ie straight tower, tiered tower and taper tower. After model experiments successfully built, new data retrieval can be done. The results obtained from the experiments compared with the results from the simulation.

The result of this research is the effect of TMD addition to dynamic response, ie 2.85% for vibratory table mass and 0.71% for tower & nacelle mass. In addition, from the simulation results, by varying the frequency, it was found that the level of effectiveness of TMD addition works best when the system works at 3 Hz. The percentage of effectiveness is 13.114% for shaking table mass and 9.217% for mass tower & nacelle. Beside that, there is big error between experiment result and simulation average more than 5%.

***Keywords: Tuned Mass Damper (TMD), absorber, wind turbine, wind turbine tower***

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur dihaturkan kehadirat Allah Subhanallahu Wa Ta'ala, hanya karena tuntunan-Nya penulis dapat menyelesaikan Tesis ini. Tesis ini disusun untuk memenuhi persyaratan kelulusan pendidikan Sarjana S-2 di Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penyusunan Tesis ini dapat terlaksana dengan baik atas bantuan dan kerjasama dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Keluarga, khususnya suami tercinta dan kedua orangtua, yang telah menjadi orang-orang terbaik dalam hidup penulis dan selalu memberikan doa dan dorongan dalam segala kondisi.
2. Dr.Eng. Harus Laksana Guntur, ST.M.Eng yang selalu memberikan bimbingan dan arahan dalam penulisan Tugas Akhir ini.
3. Prof. Ir. I Nyoman Sutantra, M.Sc., Ph.D, Dr. Wiwiek Hendrowati ST, MT dan Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA. selaku dosen penguji yang telah memberikan saran dan kritik kepada penulis tentang Tesis ini.
4. Segenap dosen dan karyawan Departemen Teknik Mesin FTI ITS, terima kasih atas ilmu yang disampaikan, semoga bermanfaat kedepannya bagi diri penulis dan bagi bangsa dan negara.
5. Para punggawa Lab Desain, Pak Yulianto, Mas Edwin, Ferly, dan Mbak Lisa yang senantiasa memberi motivasi dan menemani penulis selama kebersamaan dua tahun ini.
6. Teman-teman Riset H.L.G, Cika, Aik, Dila, Imelda, Rozi, Syaldilas, Yoga, Cahyo, dan Boni yang senantiasa menemani dan menghibur penulis saat sedang penat.

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

Surabaya, Juli 2018

Penulis

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN .....	i
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS .....	iii
ABSTRAK .....	v
ABSTRACT .....	vii
KATA PENGANTAR .....	ix
DAFTAR ISI .....	xi
DAFTAR GAMBAR .....	xv
DAFTAR TABEL .....	xix
BAB 1 PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	3
1.3 Tujuan Penelitian .....	3
1.4 Batasan Masalah .....	4
1.5 Manfaat Penelitian .....	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA .....	5
2.1 Penggunaan TMD pada Bangunan .....	5
2.2 Penggunaan TMD pada Turbin Angin .....	8
2.3 Penggunaan Parameter TMD yang Optimal .....	15
2.4 Getaran .....	16
2.5 <i>Dynamic Vibration Absorber</i> .....	17
2.6 <i>Stiffness of beam</i> .....	22
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN .....	25
3.1 Metode Penelitian .....	25
3.2 Studi Literatur .....	26

3.3	Pemodelan Sistem Dinamis .....	26
3.3.1	Model turbin angin variasi 1 .....	28
3.3.2	Model turbin angin variasi 2 .....	30
3.3.3	Model turbin angin variasi 3 .....	32
3.4	Pembuatan Blok Simulink .....	33
3.5	Penentuan Parameter.....	33
3.6	Pembuatan Model Eksperimen .....	35
3.7	Pengambilan Data Ekperimen.....	36
3.8	Analisa Grafik Respon Dinamis .....	40
BAB 4 ANALISA HASIL DAN PEMBAHASAN .....		41
4.1	Mekanisme Model Turbin Angin dengan Variasi Struktur Tower dan TMD 41	
4.1.1	Meja getar ( <i>table shaker</i> ) .....	42
4.1.2	Tower turbin angin dan nasek.....	45
4.1.3	TMD (Tuned Mass Damper).....	46
4.2	Pemodelan Matematis Sistem Turbin Angin .....	47
4.2.1	Turbin angin struktur tower taper tanpa TMD.....	48
4.2.2	Turbin angin struktur tower taper dengan TMD .....	49
4.3	Blok Diagram.....	51
4.4	Analisis Hasil Simulasi .....	51
4.5	Analisis Hasil Eksperimen.....	54
4.6	Perbandingan Hasil Simulasi dan Eksperimen .....	56
4.6.1	Perbandingan hasil simulasi dan eksperimen sistem turbin angin tanpa TMD .....	56
4.6.2	Perbandingan hasil simulasi dan eksperimen sistem turbin angin dengan TMD .....	58

4.7	Pembahasan.....	60
4.7.1	Hasil simulasi dengan variasi frekuensi kerja.....	60
4.7.2	Hasil simulasi dengan variasi $k_a$ dan $m_a$ .....	62
4.7.3	Hasil simulasi dengan variasi $k_t$ .....	65
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN .....		69
5.1	Kesimpulan .....	69
5.2	Saran .....	70
DAFTAR PUSTAKA .....		71
LAMPIRAN.....		73
Lampiran 1 Blok diagram sistem tanpa tmd variasi 1-3.....		73
Lampiran 2 Blok diagram sistem dengan TMD variasi 1-3.....		75
Lampiran 3 Hasil Simulasi Variasi 1 dan Variasi 2 .....		78
Lampiran 4 Hasil Simulasi Perpindahan dan Kecepatan Variasi 3.....		82
Lampiran 5 Hasil Eksperimen Variasi 1 dan Variasi 2 .....		85
BIODATA PENULIS .....		89

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Perkembangan cadangan minyak bumi di Indonesia [1].....	1
Gambar 2.1(a)	Pemodelan gedung dengan metode massa mengumpul dan peletakan TMDI, (b) Respon dinamis percepatan gedung lantai teratas (sebelum dan sesudah diberi massa peredam) [5] .....	5
Gambar 2.2	Konfigurasi struktur bangunan yang saling berdekatan (a) TMD terpisah (b) <i>shared TMD</i> (c) <i>Hybrid shared MR-TMD</i> [6].....	6
Gambar 2.3	Respon dinamis jembatan tanpa dan dengan variasi TMD [7] .....	7
Gambar 2.4	Model eksperimen turbin angin [8].....	8
Gambar 2.5	Massa TMD [8].....	9
Gambar 2.6	Perbandingan respon dinamis model turbin angin dengan eksitasi DX1 [8] .....	10
Gambar 2.7	Pengujian eksperimen turbin angin (a) skema alat (b) model fisik (c) model dinamis [4].....	11
Gambar 2.8	Bola TMD (a) 1 layer kontainer (b) 2 layer kontainer [4] .....	12
Gambar 2.9	Respon dinamis dari momen pondasi eksitasi “ <i>Overspeed</i> ” (a) TMD1-2 (b) TMD3-4 [4].....	13
Gambar 2.10	Respon dinamis dari momen pondasi eksitasi “ <i>EOG</i> ” (a) TMD1-2 (b) TMD3-4 [4] .....	14
Gambar 2.11	Respon dinamis dari momen pondasi eksitasi “ <i>Parking</i> ” (a) TMD1 (b) TMD2-3 [4].....	15
Gambar 2.12	Respon perpindahan untuk massa pegas sederhana dengan peredam [12] .....	17
Gambar 2.13	<i>Dynamic vibration absorber</i> tanpa peredam [12] .....	18
Gambar 2.14	Pengaruh DVA tanpa peredam terhadap respon dinamis massa utama [12] .....	20
Gambar 2.15	Variasi dari $\Omega_1$ dan $\Omega_2$ berdasarkan persamaan 2.9 [12] .....	20
Gambar 2.16	<i>Dynamic Vibration Absorber</i> dengan peredam [12] .....	21
Gambar 2.17	Pengaruh DVA dengan peredam terhadap respon dinamis massa utama [12].....	21

Gambar 2.18 Ilustrasi <i>rod</i> dengan beban tarik di ujung.....	22
Gambar 2.19 Ilustrasi batang kantilever dengan beban di ujung.....	23
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian secara umum.....	25
Gambar 3.2 Diagram alir pemodelan dinamis sistem.....	27
Gambar 3.3 Model fisik eksperimen turbin angin.....	28
Gambar 3.4 Turbin angin tanpa TMD variasi 1 (a) model fisik (b) model dinamis .....	29
Gambar 3.5 Model dinamis turbin angin dengan TMD variasi 1.....	30
Gambar 3.6 Turbin angin tanpa TMD variasi 2 (a) model fisik (b) model dinamis .....	31
Gambar 3. 7 Model dinamis turbin angin dengan TMD variasi 2.....	32
Gambar 3. 8 Model fisik turbin angin tanpa TMD variasi 3.....	33
Gambar 3.9 Diagram alir pembuatan model eksperimen.....	36
Gambar 3.10 Diagram alir pengambilan data eksperimen.....	37
Gambar 3. 11 Akselerometer.....	38
Gambar 3. 12 Osiloskop.....	38
Gambar 3. 13 <i>Power supply</i> .....	39
Gambar 3.14 <i>Voltage Regulator</i> .....	40
Gambar 4. 1 Alat uji turbin angin dengan variasi struktur tower.....	41
Gambar 4. 2 Meja getar.....	42
Gambar 4. 3 Grafik hasil pengukuran getaran bebas meja getar dengan <i>filtering</i> dan <i>smoothing</i> .....	43
Gambar 4. 4 Grafik hasil pengukuran getaran bebas tower dan naseel dengan <i>filtering</i> dan <i>smoothing</i> .....	45
Gambar 4. 5 TMD dan pegas TMD.....	47
Gambar 4. 6 Hasil simulasi respon percepatan massa meja getar.....	52
Gambar 4. 7 Hasil simulasi respon percepatan massa tower dan naseel.....	52
Gambar 4. 8 Domain frekuensi (a) massa meja getar (b) massa tower dan naseel.	53
Gambar 4. 9 Hasil simulasi respon percepatan massa TMD.....	53
Gambar 4. 10 Hasil eksperimen respon percepatan massa meja getar.....	54
Gambar 4. 11 Hasil eksperimen respon percepatan massa tower dan naseel.....	55
Gambar 4. 12 Hasil eksperimen respon percepatan massa TMD.....	55

Gambar 4. 13 Perbandingan hasil simulasi dan hasil eksperimen respon percepatan massa meja getar sebelum diberi TMD .....	56
Gambar 4. 14 Perbandingan hasil simulasi dan hasil eksperimen respon percepatan massa tower & nasei sebelum diberi TMD .....	57
Gambar 4. 15 Perbandingan hasil simulasi dan hasil eksperimen respon percepatan massa meja getar setelah diberi TMD .....	58
Gambar 4. 16 Perbandingan hasil simulasi dan hasil eksperimen respon percepatan massa tower & nasei setelah diberi TMD.....	59
Gambar 4. 17 Perbandingan hasil simulasi dan hasil eksperimen respon percepatan massa TMD .....	60
Gambar 4. 18 Grafik tingkat keefektifan penambahan TMD variasi frekuensi....	61
Gambar 4. 19 Grafik variasi $k_a$ dan $m_a$ terhadap keefektifan penambahan TMD pada massa meja getar.....	63
Gambar 4. 20 Grafik variasi $k_a$ dan $m_a$ terhadap keefektifan penambahan TMD pada massa tower & nasei.....	64
Gambar 4. 21 Frekuensi banding percepatan variasi $k_a$ dan $m_a$ .....	65
Gambar 4. 22 Pembesaran pada daerah sekitar frekuensi 57 rad/s .....	65
Gambar 4. 23 Grafik persentase keefektifan penambahan TMD variasi bentuk tower (a) massa meja getar (b) massa tower & nasei .....	66

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Perpindahan lantai gedung teratas [cm] (prosentase reduksi) [6] .....	7
Tabel 2.2 Tegangan geser maksimum pada pondasi [N] (prosentase reduksi) [6] .	7
Tabel 2.3 Variasi eksitasi yang digunakan dalam eksperimen [8].....	9
Tabel 2.4 Parameter variasi bola TMD [4] .....	12
Tabel 2.5 Efektivitas tiap TMD dengan eksitasi “ <i>Overspeed</i> ” [4].....	13
Tabel 2.6 Efektivitas tiap TMD dengan eksitasi “ <i>EOG</i> ” [4] .....	14
Tabel 2.7 Efektivitas tiap TMD dengan eksitasi “ <i>Parking</i> ” [4].....	15
Tabel 3.1 Parameter model eksperimen turbin angin.....	34
Tabel 4. 1 Data hasil pengujian konstanta pegas meja getar.....	43
Tabel 4. 2 Data hasil pengujian konstanta redaman meja getar .....	44
Tabel 4. 3 Data hasil pengujian konstanta redaman tower dan nasek .....	46
Tabel 4. 4 Data frekuensi natural dari setiap variasi .....	48
Tabel 4. 5 Rangkuman nilai RMS dari respon perpindahan dan kecepatan .....	54
Tabel 4. 6 Nilai RMS dari tinjauan massa dengan variasi frekuensi .....	61
Tabel 4. 7 Persentase keefektifan penambahan TMD pada massa meja getar dengan variasi $k_a$ dan $m_a$ .....	62
Tabel 4. 8 Persentase keefektifan penambahan TMD pada massa tower & nasek dengan variasi $k_a$ dan $m_a$ .....	63
Tabel 4. 9 Persentase keefektifan dengan variasi struktur tower .....	66

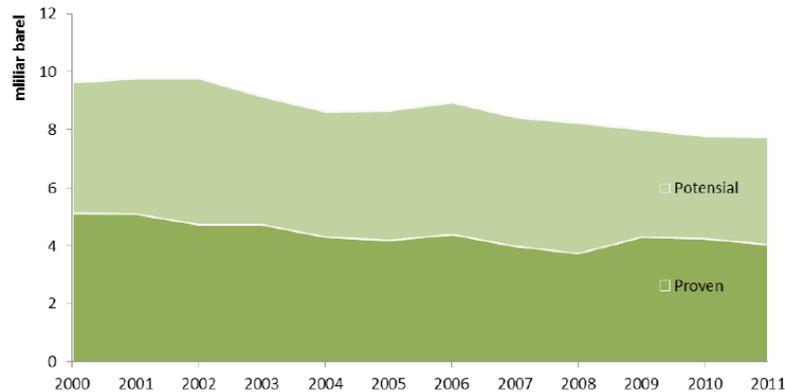
*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Dunia mulai mengalami masalah krisis energi sejak abad ke-20. Krisis energi ini terjadi akibat eksploitasi minyak bumi dan batu bara yang terus-menerus. Minyak bumi dan batu bara termasuk sumber daya alam yang tidak dapat diperbarui. Indonesia merupakan salah satu negara yang merasakan dampak adanya krisis energi dunia. Berdasarkan data dari *Handbook of Energy & Economic Statistic of Indonesia 2012*, cadangan minyak bumi di Indonesia menurun setiap tahunnya [1]. Gambar 1.1 menunjukkan grafik penurunan cadangan minyak bumi di Indonesia.



Gambar 1.1 Perkembangan cadangan minyak bumi di Indonesia [1]

Dengan rata-rata produksi 0,329 miliar barel, ketersediaan cadangan minyak bumi di Indonesia saat ini hanya cukup untuk memenuhi kebutuhan minyak bumi di Indonesia hingga 23 tahun ke depan (terhitung sejak tahun 2012). Dengan adanya fokus pemerintah untuk terus meningkatkan produksi minyak bumi untuk mencapai target minyak bumi hingga 1 juta barel pada tahun 2014 menyebabkan ketersediaan minyak bumi di Indonesia berkurang lebih cepat dari 23 tahun, jika tidak disertai usaha penemuan cadangan minyak bumi baru, baik dalam negeri maupun luar negeri [2].

Cadangan minyak bumi dan batu bara di Indonesia yang kian menipis ini memaksa pemerintah Indonesia untuk menggali potensi sumber daya terbarukan sebagai alternatif sumber energi. Salah satu sumber daya terbarukan yang berpotensi di Indonesia adalah angin. Indonesia terletak di sekitar daerah equator, dimana terjadi pertemuan sirkulasi Hadley, Walker, dan lokal, memungkinkan Indonesia memiliki potensi angin yang dapat dimanfaatkan menjadi sumber energi terbarukan. Berdasarkan data kecepatan angin di berbagai wilayah, sumberdaya energi angin di Indonesia berkisar antara 2,5-5,5 m/detik pada ketinggian 24 meter di atas permukaan tanah. Wilayah yang memiliki potensi angin cukup besar yaitu di Nusa Tenggara, Sumatera Selatan, Jambi, dan Riau [3].

Turbin angin merupakan suatu fasilitas untuk mengolah energi angin menjadi energi listrik. Semakin tinggi dan ramping suatu tower turbin, maka energi yang dihasilkan juga semakin tinggi, mengingat kecepatan angin akan semakin besar seiring bertambahnya ketinggian. Hal ini menyebabkan banyak tower turbin yang mengalami kerusakan. Biaya pembuatan sebuah tower adalah berkisar 20% dari total biaya keseluruhan [4]. Oleh karena itu, desain tower harus seoptimal mungkin. Desain tower turbin angin memiliki struktur yang kompleks yaitu berbentuk tinggi dan semakin ke atas akan semakin ramping. Semakin tinggi tower suatu turbin, maka tower akan menerima momen yang semakin besar. Hal ini disebabkan oleh gelombang angin yang besar pada puncak tower. Momen yang diterima oleh tower turbin angin akan menghasilkan getaran yang rentan kerusakan akibat kelelahan. Oleh karena itu, kontrol getaran pada tower turbin angin menjadi isu penting bagi perkembangan energi angin.

Penelitian mengenai kontrol getaran pun telah banyak dilakukan, salah satunya pasif kontrol. Kelebihan pasif kontrol yaitu merupakan perangkat kontrol yang paling sederhana, biaya murah, dan mudah perakitannya. Salah satu bentuk pasif kontrol pada getaran adalah dengan menambahkan massa peredam. Massa peredam (*Tuned Mass Damper/TMD*) diletakkan di puncak tower (*nacelle*), tujuannya agar menurunkan respon dinamisnya, baik perpindahan maupun percepatannya. Penelitian yang banyak dilakukan mengenai TMD pada turbin angin kebanyakan terfokus pada variasi massa TMD, namun tidak banyak yang melakukan variasi pada struktur tower. Padahal dalam kenyataannya banyak sekali

kerusakan akibat getaran yang mengakibatkan tower turbin patah. Oleh karena itu, penelitian ini akan dilakukan pengujian eksperimen mengenai pengaruh pemberian TMD pada (model) turbin angin skala lab dengan variasi struktur bentuk tower, diantaranya poros lurus, poros bertingkat, dan poros taper, yang kemudian hasil dari eksperimen tersebut akan divalidasi menggunakan *software* numerik.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Adapun rumusan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh penambahan massa peredam terhadap respon dinamis yang terjadi pada struktur pendukung turbin angin?
2. Bagaimana pengaruh variasi frekuensi terhadap respon dinamis struktur pendukung turbin angin saat sebelum dan setelah penambahan massa peredam?
3. Bagaimana pengaruh variasi konstanta pegas TMD dan massa TMD terhadap respon dinamis struktur pendukung turbin angin saat sebelum dan setelah penambahan massa peredam?
4. Bagaimana pengaruh variasi bentuk tower terhadap respon dinamis struktur pendukung turbin angin saat sebelum dan setelah penambahan massa peredam?
5. Bagaimana selisih error yang terjadi antara hasil simulasi dengan hasil eksperimen?

## **1.3 Tujuan Penelitian**

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh penambahan massa peredam terhadap respon dinamis yang terjadi pada struktur pendukung turbin angin
2. Mengetahui pengaruh variasi frekuensi terhadap respon dinamis struktur pendukung turbin angin saat sebelum dan setelah penambahan massa peredam
3. Mengetahui pengaruh variasi konstanta pegas TMD dan massa TMD terhadap respon dinamis struktur pendukung turbin angin saat sebelum dan setelah penambahan massa peredam
4. Mengetahui pengaruh variasi bentuk tower terhadap respon dinamis struktur pendukung turbin angin saat sebelum dan setelah penambahan massa peredam

5. Mengetahui selisih error yang terjadi antara hasil simulasi dengan hasil eksperimen.

#### **1.4 Batasan Masalah**

Adapun batasan masalah yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Kasus dipandang secara 2 dimensi sehingga tidak ada defleksi ke arah vertikal (tegak lurus dari arah datangnya angin), dengan kata lain tidak ada defleksi ke arah vertikal searah dengan tower turbin angin
2. Gesekan antara roda dengan alas massa *nacelle* diabaikan karena mengalami *rolling*
3. Parameter yang digunakan adalah parameter model laboratorium
4. Variasi dilakukan pada bentuk tower turbin, yaitu poros lurus, poros bertingkat, dan poros taper
5. Material yang digunakan adalah baja untuk tower serta aluminium untuk nasel dan TMD.

#### **1.5 Manfaat Penelitian**

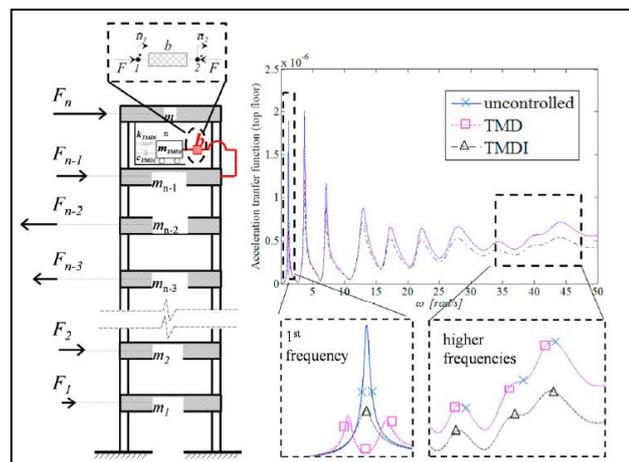
Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai syarat kelulusan program Pascasarjana dan agar dapat dijadikan dasar dalam merancang turbin angin skala prototipe maupun sebenarnya.

## BAB 2

### TINJAUAN PUSTAKA

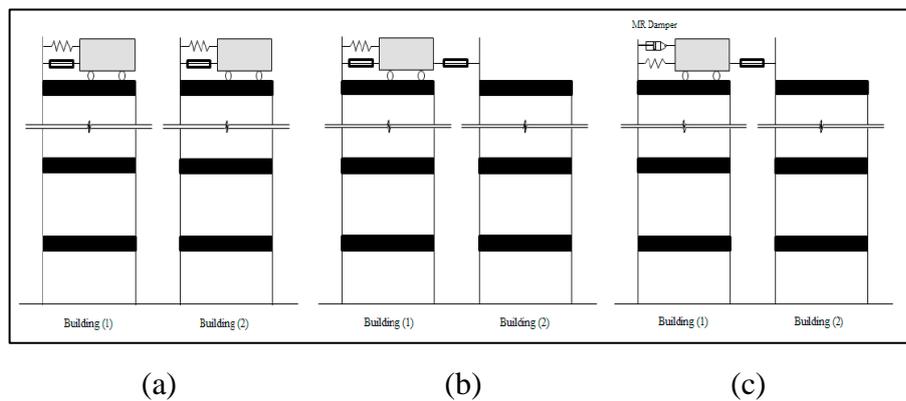
#### 2.1 Penggunaan TMD pada Bangunan

*Tuned Mass Damper (TMD)* merupakan salah satu alat pasif kontrol yang paling sederhana. Penggunaan TMD pada gedung bertingkat untuk menyerap energi angin maupun getaran dari gempa bumi pun telah banyak dilakukan penelitian. Giaralis dan Petrini [5] pada tahun 2017 melakukan riset tentang penggunaan TMD pada gedung bertingkat. TMD, meliputi massa, pegas, dan peredam, diletakkan di lantai gedung teratas. Dia membandingkan TMD pada umumnya dengan TMD yang telah dimodifikasi yang disebut TMDI. Gambar 2.1 (a) merupakan pemodelan gedung dan peletakan TMDInya. Dari Gambar 2.1(b) terlihat bahwa pada frekuensi pertama, percepatan lantai teratas sangat tinggi. Namun, setelah ditambahkan TMDI, sistem mengalami penurunan respon dinamis. Begitu pula dengan desain TMD (pada umumnya), sistem akan terbagi menjadi 2 frekuensi, dimana frekuensi tertingginya jauh di bawah frekuensi sistem sebelum diberi TMD.



Gambar 2.1(a) Pemodelan gedung dengan metode massa mengumpul dan peletakan TMDI, (b) Respon dinamis percepatan gedung lantai teratas (sebelum dan sesudah diberi massa peredam) [5]

Guenidi, dkk [6] pada tahun 2017 juga melakukan penelitian mengenai TMD yang diaplikasikan pada gedung bertingkat yang saling berdekatan. Terdapat tiga model peletakan TMD, yang pertama tiap gedung memiliki TMD masing-masing. Model kedua adalah dengan meletakkan TMD di salah satu gedung, sehingga gedung lainnya dihubungkan dengan peredam (*shared TMD*). Model ketiga memperkenalkan *magneto-rheological (MR) damper*, yaitu perangkat kontrol semi-aktif. Gambar 2.2 menunjukkan perbedaan dari ketiga model tersebut.



Gambar 2.2 Konfigurasi struktur bangunan yang saling berdekatan (a) TMD terpisah (b) *shared TMD* (c) *Hybrid shared MR-TMD* [6]

Hasil dari tiap model dibandingkan satu dengan lainnya dalam hal perpindahan lantai teratas dan tegangan geser pondasi maksimum. Hasilnya menunjukkan bahwa model ketiga memiliki performa yang lebih baik dari lainnya. Selain itu juga diketahui bahwa model ketiga sangat efektif mereduksi getaran pada *range* frekuensi yang lebar. Tabel 2.1 dan Tabel 2.2 menunjukkan perbedaan hasil dari ketiga model tersebut ditinjau dari perpindahan lantai gedung teratas maupun tegangan geser maksimum dari pondasi.

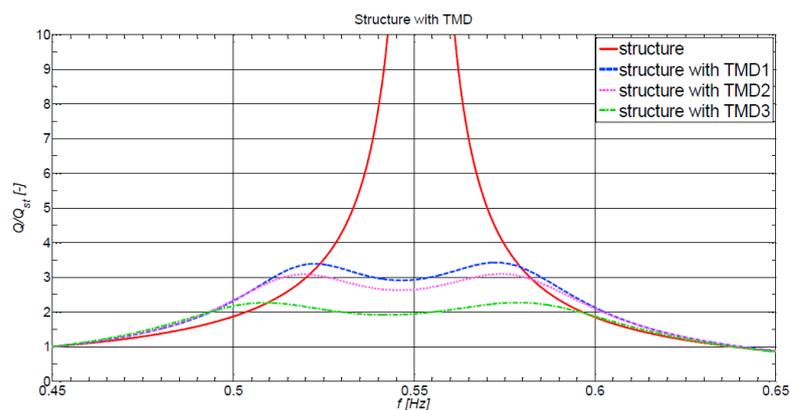
Tabel 2.1 Perpindahan lantai gedung teratas [cm] (prosentase reduksi) [6]

Earthquake	Building	Uncontrolled	Separated TMDs	Shared TMD		Hybrid shared MR-TMD
				Tuned globally	Tuned separately	
El Centro 1940	(1)	15.44	11.22 (27.33)	09.95 (35.62)	10.11 (34.53)	08.60 (44.33)
	(2)	10.41	06.05 (41.87)	07.01 (32.67)	07.34 (29.50)	07.28 (30.13)
Percentage reduction average			34.60%	34.14%	32.01%	37.23%

Tabel 2.2 Tegangan geser maksimum pada pondasi [N] (prosentase reduksi) [6]

Earthquake	Building	Uncontrolled	Separated TMDs	Shared TMD		Hybrid shared MR-TMD
				Tuned globally	Tuned separately	
El Centro 1940	(1)	$2.59 \times 10^8$	$2.11 \times 10^8$ (18.53)	$2.27 \times 10^8$ (12.35)	$2.37 \times 10^8$ (08.49)	$2.34 \times 10^8$ (09.65)
	(2)	$1.32 \times 10^8$	$0.98 \times 10^8$ (25.75)	$0.99 \times 10^8$ (25.00)	$1.00 \times 10^8$ (24.24)	$0.99 \times 10^8$ (25.00)
Percentage reduction average			22.14%	18.67%	16.36%	17.32%

Disamping pemakaian pada gedung-gedung bertingkat, TMD juga biasa digunakan pada jembatan. Saige dkk [7] telah melakukan riset pada tahun 2017 mengenai pengaruh TMD terhadap respon dinamis jembatan. TMD dipasang pada dek jembatan dan terdiri dari massa, pegas, dan peredam. Mereka memvariasikan massa TMD yaitu 10.194 kg, 12.000 kg, dan 19.500 kg. Gambar 2.3 menunjukkan respon dinamis dari jembatan.



Gambar 2.3 Respon dinamis jembatan tanpa dan dengan variasi TMD [7]

Dari grafik tersebut terlihat bahwa terdapat penurunan respon dinamis yang cukup signifikan antara sebelum dan sesudah diberi massa TMD. Semakin besar massa TMDnya maka semakin rendah responnya. Namun variasi yang dipilih

adalah TMD kedua ( $m=12.000$  kg) karena jembatan masih bisa menoleransi adanya penambahan massa tersebut. Percepatan maksimum dari jembatan setelah ditambah TMD adalah  $0,027$   $m/s^2$ , dimana dikatakan aman karena tidak melewati batas yaitu  $0,1-0,15$   $m/s^2$ .

## 2.2 Penggunaan TMD pada Turbin Angin

Selain diterapkan pada bangunan, TMD juga digunakan pada turbin angin. Massa peredam TMD diletakkan di atas (*nacelle*) guna menghindari resonansi yang dapat menyebabkan kerusakan pada struktur turbin angin, khususnya tower. Penelitian secara ekperimental telah dilakukan oleh beberapa peneliti, Li dkk [8] misalnya. Pada tahun 2012, Li dkk melakukan studi eksperimen mengenai kontrol getaran pada turbin angin *offshore* menggunakan massa peredam. Pada penelitian tersebut digunakan massa peredam berupa bola. Model turbin yang dirancang memiliki skala 1/13 dari turbin sebenarnya dan digerakkan oleh suatu *table shaker*. *Table shaker* tersebut memiliki ukuran  $4.0$  m x  $4.0$  m dan mampu menahan beban  $2.5 \times 10^4$  kg. Tower turbin memiliki tinggi  $7,425$  m berbentuk tubular dengan material steel. Pondasi turbin memiliki ukuran  $1,34$  m x  $1,34$  m x  $0,024$  m dan terbuat dari steel plate. *Nacelle* turbin memiliki ukuran  $0,92$  m x  $0,76$  m x  $0,46$  m dan memiliki 3 baling-baling/*blades*. Gambar 2.4 adalah model eksperimen dari turbin angin.



Gambar 2.4 Model eksperimen turbin angin [8]

Massa TMD yang digunakan adalah berupa bola pejal yang terbuat dari material steel. Gerakan dari bola TMD ini berbentuk setengah lingkaran karena diletakkan dalam wadah berbentuk setengah lingkaran, seperti pada Gambar 2.5. Wadah bagian dalam dilapisi material komposit. Material ini yang akan bergesekan dengan bola TMD sebagai peredam (*coloumb damping*). Eksitasi yang digunakan ada empat macam, terlampir di Tabel 2.3.

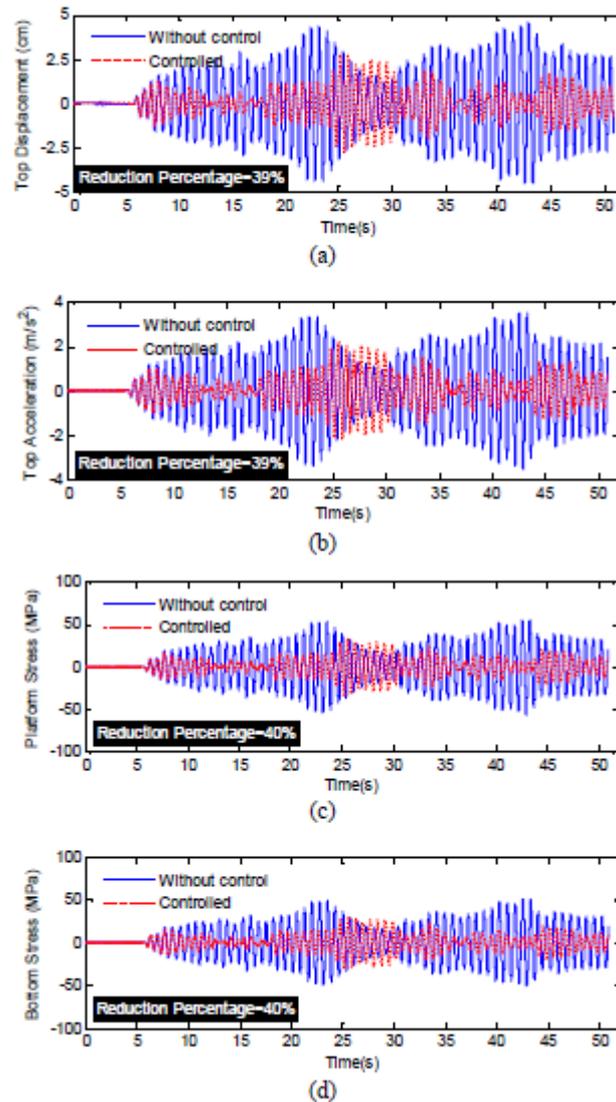


Gambar 2.5 Massa TMD [8]

Tabel 2.3 Variasi eksitasi yang digunakan dalam eksperimen [8]

<b>Excitation</b>	<b>Name for short</b>	<b>PGA</b>
Wind-wave equivalent ground motion 1	DX1	0.05 g
Wind-wave equivalent ground motion 2	DX2	0.05 g
Physical stochastic ground motion	Wang	0.3 g
1999 Chi-chi (Taiwan) earthquake	CC	0.3 g

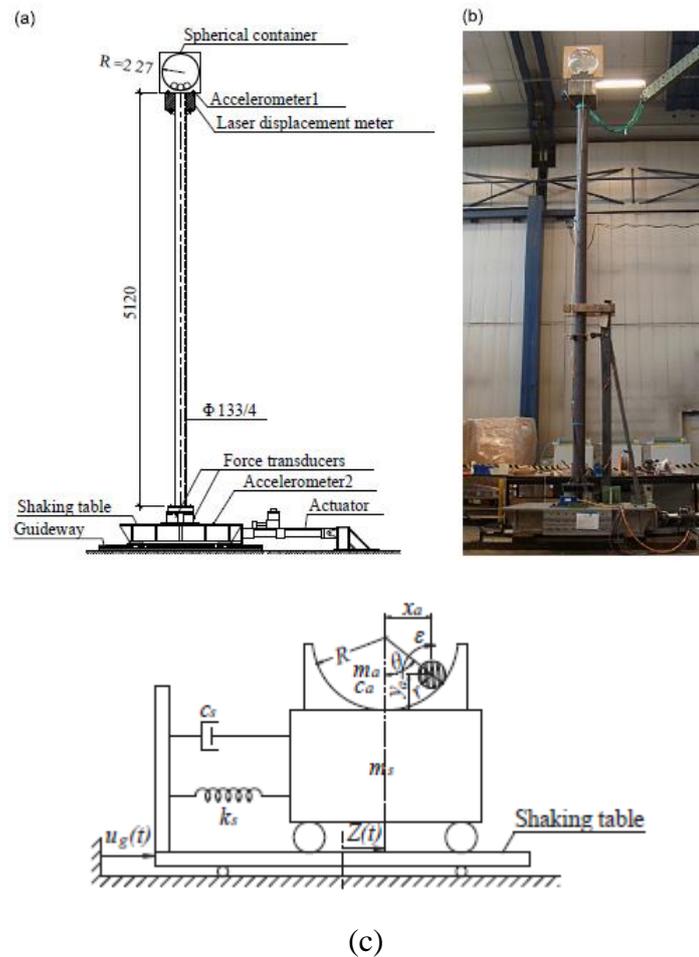
Hasil yang didapat menunjukkan adanya perubahan respon dinamis yang mengecil setelah diberi massa TMD. Prosentase penurunannya berkisar 15% - 53%, bergantung pada eksitasinya. Namun, penggunaan massa peredam ini menunjukkan performa yang lebih baik ketika dibebani eksitasi gelombang angin (DX1 dan DX2). Gambar 2.6 menunjukkan respon dinamis (meliputi perpindahan dan percepatan bagian teratas maupun tegangan pondasi) dengan eksitasi DX1.



Gambar 2.6 Perbandingan respon dinamis model turbin angin dengan eksitasi DX1 [8]

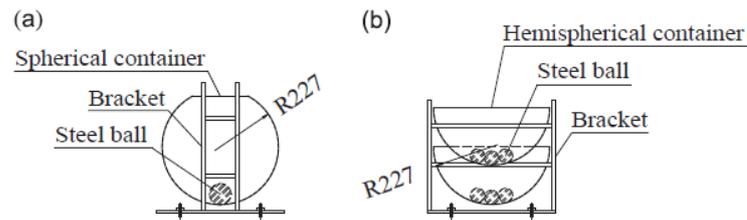
Penelitian serupa juga dilakukan oleh Chen dan Georgakis [4]. Chen dan Georgakis meneliti pengaruh sebelum dan sesudah penambahan massa TMD terhadap respon dinamisnya. Penelitiannya dilakukan secara eksperimen. Mereka membuat model turbin dengan tinggi 5120 mm dan diameter luar sebesar 133 mm dengan tebal 4 mm. Mereka memvariasikan massa TMD yang berbentuk bola. Tidak seperti penelitian sebelumnya, Chen dan Georgakis membuat wadah TMD seperti bola (satu lingkaran penuh). Hal ini memungkinkan massa TMD bergerak bebas. Gambar 2.7 merupakan pemodelan turbin angin yang dibuat. Gambar

tersebut menunjukkan bahwa input gelombang angin dapat diwakili oleh *table shaker* yang memiliki dimensi  $1,5 \text{ m}^2 \times 1,5 \text{ m}^2$  yang bergerak horizontal dengan servo hidrolis. Selain itu, untuk mewakili *nacelle* dan *baling/blades* maka ditambahkan massa 330 kg yang diletakkan di atas tower.



Gambar 2.7 Pengujian eksperimen turbin angin (a) skema alat (b) model fisik (c) model dinamis [4]

Massa TMD divariasikan menjadi dua tipe (5 peredam), yaitu satu kontainer *spherical* dengan sebuah bola TMD 4,1 kg di dalamnya dan dua kontainer *hemispherical* dengan tiga hingga enam buah bola TMD 0,716 kg di dalamnya. Kontainer terbuat dari *organic glass* yang memiliki permukaan bagian dalam yang halus. Radius kedua kontainer adalah 227 mm. Gambar 2.8 dan Tabel 2.4 merupakan model variasi massa TMD dan parameter tiap variasi TMD.

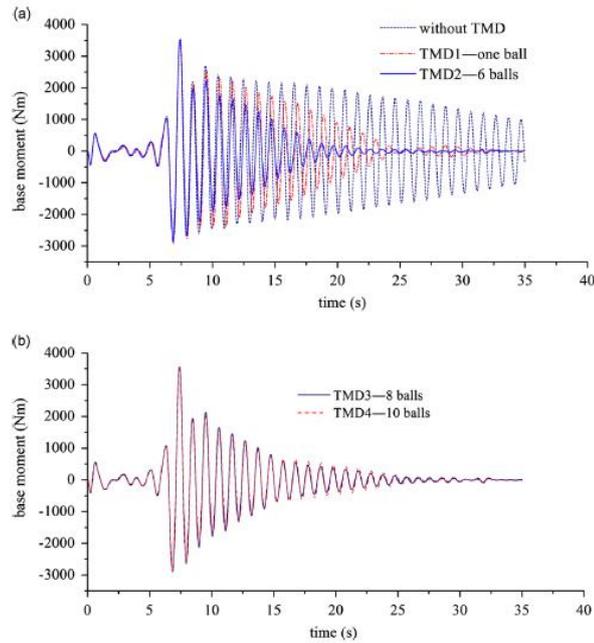


Gambar 2.8 Bola TMD (a) 1 layer kontainer (b) 2 layer kontainer [4]

Tabel 2.4 Parameter variasi bola TMD [4]

No.	Layers of container	Radius of balls (mm)	Number of balls	Total mass of balls (kg)	Frequency of damper (Hz)
TMD1	1	49.6	1	4.1	1.000
TMD2	2	27.8	6	4.3	0.943
TMD3	2	27.8	8	5.7	0.943
TMD4	2	27.8	10	7.2	0.943
TMD5	2	27.8	12	8.6	0.943

Eksitasi yang mereka gunakan ada tiga macam, yaitu “*Overspeed*”, “*Extreme operating gust (EOG)*”, dan “*Parking*”. *Overspeed* adalah keadaan dimana pondasi menerima momen paling besar. Pada kasus ini kecepatan angin sangat kencang, hingga mencapai 25 m/s dalam interval waktu yang rendah. Percobaan yang dilakukan menghasilkan respon dinamis seperti yang terlihat pada Gambar 2.9. Gambar tersebut menunjukkan ada penurunan nilai *base moment* saat diberi TMD walaupun hampir mirip dengan respon tanpa TMD. TMD2 (6 bola dengan 2 layer kontainer) memiliki efektifitas yang lebih baik daripada TMD1, walaupun keduanya memiliki frekuensi damping yang tidak jauh berbeda (Gambar 2.9a). Hal ini dikarenakan adanya effect impact dan gesekan dari keenam bola yang meningkatkan efek redaman pada TMD2. Oleh karena itu, ketika menggunakan damper lebih dari enam bola, maka bola akan semakin susah untuk mengatasi gesekan dan gaya gravitasinya. Oleh sebab itu, semakin banyak massa bola yang ditambahkan, maka damper menjadi tidak lagi efektif (Gambar 2.9b). Tabel 2.5 menunjukkan ringkasan respon dari eksitasi *overspeed*.

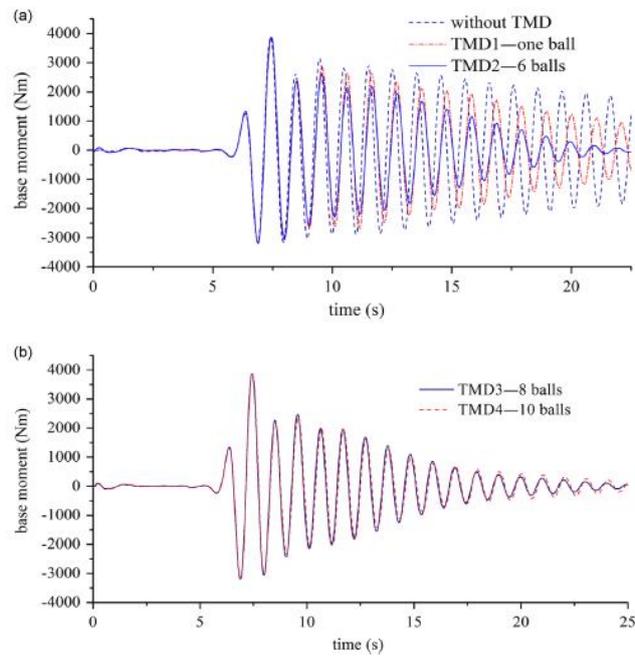


Gambar 2.9 Respon dinamis dari momen pondasi eksitasi “*Overspeed*” (a) TMD1-2 (b) TMD3-4 [4]

Tabel 2.5 Efektivitas tiap TMD dengan eksitasi “*Overspeed*” [4]

No.	Damping ratio (percent)	Top displacement				Base moment			
		Peak (mm)	RMS (mm)	$R_m$	$R_e$	Peak (N m)	RMS (N m)	$R_m$	$R_e$
Without TMD	0.88	9.44	2.66	–	–	3445.6	1264.6	–	–
TMD1	2.1	9.76	1.91	1.03	0.72	3585.2	933.8	1.04	0.74
TMD2	3.1	9.57	1.50	1.01	0.56	3527.6	730.7	1.02	0.58
TMD3	3.4	9.66	1.45	1.02	0.55	3554.7	706.9	1.03	0.56
TMD4	3.7	9.72	1.45	1.03	0.55	3576.6	709.3	1.04	0.56
TMD5	3.5	9.73	1.40	1.03	0.53	3584.5	681.7	1.04	0.54

Eksitasi kedua adalah “*Extreme operating gust (EOG)*”. *EOG* adalah keadaan dimana kecepatan angin meningkat tajam kemudian turun dalam waktu singkat saat turbin sedang beroperasi. Pada kasus ini, respon dinamis yang dihasilkan mirip dengan kasus *Overspeed*, kecuali saat 6 detik pertama. Tidak ada penurunan yang berarti saat menggunakan TMD pada getaran siklus pertama. Hal ini dikarenakan massa TMD membutuhkan waktu yang cukup dengan fase yang tepat sebelum menyerap energi secara efektif. Gambar 2.10 dan Tabel 2.6 menunjukkan ringkasan respon dinamis dari variasi TMD dengan eksitasi *EOG*.

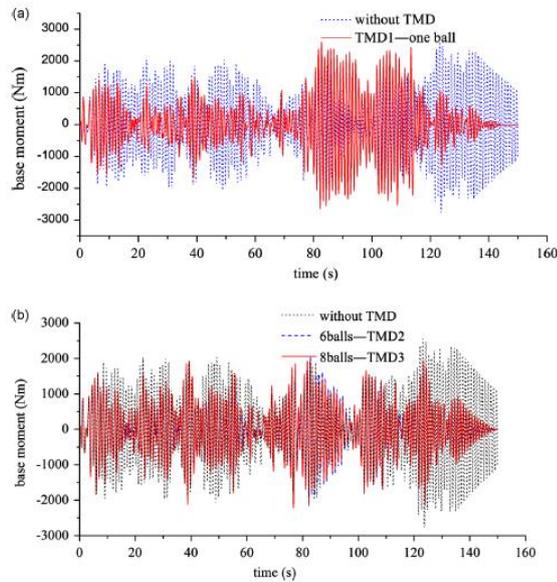


Gambar 2.10 Respon dinamis dari momen pondasi eksitasi “EOG” (a) TMD1-2  
(b) TMD3-4 [4]

Tabel 2.6 Efektivitas tiap TMD dengan eksitasi “EOG” [4]

No.	Damping ratio (percent)	Top displacement				Base moment			
		Peak (mm)	RMS (mm)	$R_m$	$R_r$	Peak (N m)	RMS (N m)	$R_m$	$R_r$
Without TMD	0.88	10.69	2.88	-	-	3882.5	1061.5	-	-
TMD1	2.1	10.59	2.20	0.99	0.76	3834.5	814.3	0.99	0.77
TMD2	3.1	10.75	1.81	1.01	0.63	3862.0	671.6	0.99	0.63
TMD3	3.4	10.72	1.70	1.00	0.59	3866.3	631.4	1.00	0.60
TMD4	3.7	10.81	1.69	1.01	0.59	3875.1	628.1	1.00	0.60
TMD5	3.5	10.79	1.61	1.01	0.59	3875.9	596.5	1.00	0.56

Eksitasi ketiga adalah “*Parking*”. *Parking* adalah kondisi dimana turbin angin dikenakan beban angin berkecepatan tinggi. Respon yang dihasilkan tampak cukup berbeda dibandingkan 2 eksitasi sebelumnya. Penambahan TMD terlihat sangat efektif menurunkan respon dinamis momen base, kecuali pada detik 80 hingga 120. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh penyimpangan frekuensi natural dari massa TMD dari nilai desain yang optimal. Gambar 2.11 Respon dinamis dari momen pondasi eksitasi “*Parking*” (a) TMD1 (b) TMD2-3 dan Tabel 2.7 menunjukkan ringkasan respon dinamis dari variasi TMD dengan eksitasi *Parking*.



Gambar 2.11 Respon dinamis dari momen pondasi eksitasi “Parking” (a) TMD1  
(b) TMD2-3 [4]

Tabel 2.7 Efektivitas tiap TMD dengan eksitasi “Parking” [4]

No.	Damping ratio (percent)	Top displacement				Base moment			
		Peak (mm)	RMS (mm)	$R_m$	$R_e$	Peak (N m)	RMS (N m)	$R_m$	$R_e$
Without TMD	0.88	6.89	2.73	–	–	2549.0	1017.2	–	–
TMD1	2.1	6.98	2.16	1.01	0.79	2596.7	809.9	1.02	0.80
TMD2	3.1	5.45	1.74	0.79	0.64	2045.4	656.4	0.80	0.64
TMD3	3.4	5.15	1.91	0.75	0.70	1944.7	719.6	0.76	0.71
TMD4	3.7	5.58	2.11	0.81	0.77	2098.7	795.2	0.82	0.78
TMD5	3.5	5.71	2.12	0.83	0.78	2142.6	799.7	0.84	0.78

### 2.3 Penggunaan Parameter TMD yang Optimal

Untuk mendapatkan hasil yang maksimal, penggunaan TMD harus memiliki parameter-parameter yang optimal. Frahm [9] dalam patennya mengatakan bahwa kontrol getaran dengan menggunakan DVA akan efektif jika natural frekuensi dari massa absorber sangat dekat dengan frekuensi eksitasi. Namun jika frekuensi eksitasinya mendekati salah satu dari dua natural frekuensi yang ada, maka akan terjadi resonansi. Oleh karena itu, kontrol getaran ini hanya efektif pada frekuensi eksitasi tertentu yang telah diketahui. Den Hartog [10] dan Rahul Rana & T.T.Song [11] menuliskan perumusan untuk mendapatkan nilai parameter yang optimal.

$$f_{opt} = \frac{1}{1+\mu} \quad (2.1)$$

$$\zeta_D = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)}} \quad (2.2)$$

Dimana:  $f$  adalah perbandingan frekuensi massa absorber dengan massa utama

$\mu$  adalah perbandingan massa peredam dengan massa utama

$\zeta_D$  adalah damping ratio massa absorber

Dengan mengetahui nilai  $f_D$  dan  $\zeta_D$ , nilai  $c$  dan  $k$  absorber yang optimal diketahui dengan rumus sebagai berikut:

$$f_{opt} = \frac{\omega_{a_{opt}}}{\Omega} = \frac{\sqrt{k_{opt}/m}}{\Omega} \quad (2.3)$$

$$k_{opt} = f_{opt}^2 \Omega^2 m \quad (2.4)$$

Dengan cara serupa didapatkan:

$$\zeta_{D_{opt}} = \frac{c_{opt}}{c_c} = \frac{c_{opt}}{2\omega_a m} \quad (2.5)$$

$$c_{opt} = 2\zeta_D f_{opt} \Omega m \quad (2.6)$$

Dimana:  $k$  adalah konstanta pegas absorber

$m$  adalah massa absorber

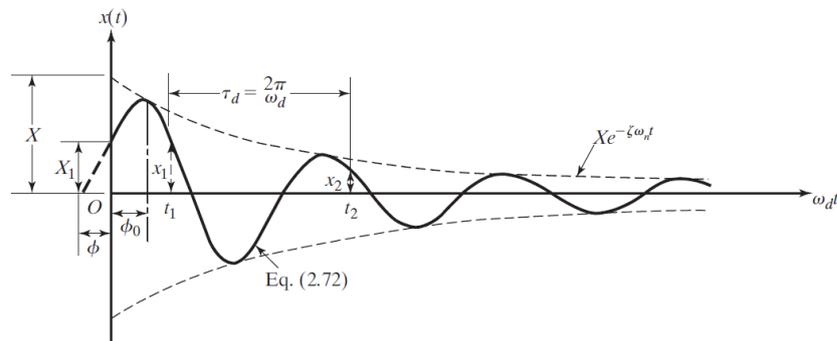
$c$  adalah konstanta redaman absorber

$\omega_a$  adalah frekuensi natural massa absorber

$\Omega$  adalah frekuensi natural massa utama

## 2.4 Getaran

Getaran merupakan perpindahan bolak balik dari suatu benda relatif terhadap titik kesetimbangannya. Apabila dalam suatu sistem yang bergetar tidak memiliki peredam, maka amplitudo getaran yang dicapai akan selalu sama. Namun dalam kenyataannya, sebuah sistem pegas yang paling sederhana sekalipun pasti akan mengalami redaman karena adanya disipasi energi. Disipasi energi ini diakibatkan oleh adanya gesekan atau peredam jenis lainnya. Oleh karena itu, amplitudo getaran akan mengecil dengan bertambahnya waktu. Hal ini dapat ditunjukkan pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12 Respon perpindahan untuk massa pegas sederhana dengan peredam [12]

Berdasarkan Gambar 2.12 terlihat bahwa nilai konstanta redaman ( $C$ ) yang terjadi pada benda yang sedang bergetar dapat dihitung dengan menggunakan hubungan berikut:

$$X(t) = X e^{-\delta \omega_n t} \quad (2.7)$$

$$\delta = \frac{c}{2m\omega_n} \quad (2.8)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan 2.8 ke 2.7 maka diperoleh nilai  $c$  dari sistem yang bergetar tersebut.

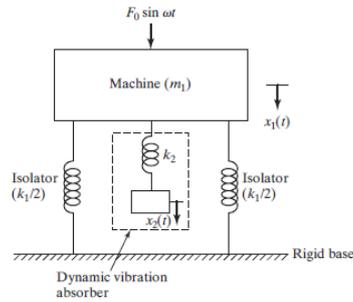
### 2.5 Dynamic Vibration Absorber

Suatu sistem dapat bergetar sangat besar jika frekuensi eksitasi yang bekerja pada sistem tersebut mendekati frekuensi natural dari sistem tersebut atau yang biasa disebut resonansi. Resonansi dapat dikurangi dengan meletakkan massa-pegas dimana massa-pegas ini memiliki frekuensi yang sama/mendekati dengan frekuensi natural dari sistem. Massa-pegas inilah yang kemudian dikenal dengan *dynamic vibration absorber* (DVA). Pada prinsipnya, tujuan penambahan DVA adalah untuk menciptakan interferensi destruktif antara getaran sistem dengan getaran yang tersalur pada massa DVA. Hal ini menyebabkan anti-resonansi pada frekuensi operasi sistem sehingga respon dinamis sistem akan mengecil atau bahkan hilang.

#### a. DVA tanpa peredam

Tujuan utama dari penambahan massa DVA pada sistem utama adalah untuk menurunkan atau bahkan menghilangkan amplitudo dari massa

utama. Hal ini didapat dengan cara menambahkan massa dan pegas pada sistem utama, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.13. Gambar tersebut menunjukkan sebuah massa utama sebesar  $m_1$  dan mendapatkan gaya eksitasi sebesar  $F_0 \sin(\omega t)$ .



Gambar 2.13 *Dynamic vibration absorber* tanpa peredam [12]

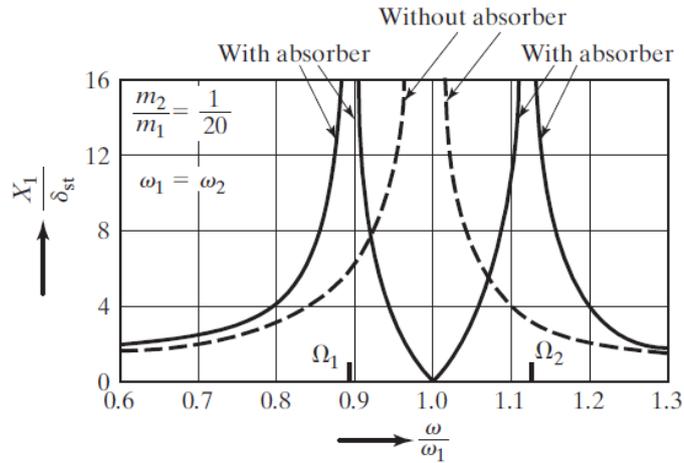
Untuk mengurangi getaran pada frekuensi natural sistem utama, maka ditambahkan pegas ( $k_2$ ) dan massa absorber ( $m_2$ ) baru yang memiliki frekuensi natural sama dengan frekuensi natural sistem utama. Walaupun memiliki frekuensi natural yang sama, bukan berarti massa dan pegas yang digunakan sebagai absorber harus sama dengan massa dan pegas utama. Apabila massa  $m_2$  yang digunakan lebih besar dari massa  $m_1$  maka akan mengganggu performa dari massa utama. Oleh karena itu, besar massa dan pegas absorber harus lebih kecil daripada massa dan pegas utama.

Gambar 2.14 menunjukkan variasi amplitudo dari massa  $m_1$  dengan kecepatan putar massa  $m_1$ . Garis putus menunjukkan respon dinamis massa utama sebelum penambahan DVA, sedangkan garis utuh menunjukkan respon dinamis massa pertama dan kedua setelah penambahan DVA. Dari gambar tersebut terlihat saat  $\omega$  eksitasi sama dengan  $\omega_1$  maka akan terjadi resonansi (sebelum penambahan DVA). Dengan penambahan DVA yang memiliki frekuensi natural yang sama dengan frekuensi natural massa utama, maka akan terjadi dua frekuensi berbeda, yaitu pada rasio frekuensi pertama,  $\Omega_1$  dan rasio frekuensi kedua,  $\Omega_2$ . Selain itu juga terjadi antiresonansi saat rasio frekuensinya sama dengan satu. Dalam praktiknya, frekuensi mesin  $\omega$  harus dijauhkan dari  $\Omega_1$  dan  $\Omega_2$ . Rao [12] menuliskan rumus untuk mendapatkan  $\Omega_1$  dan  $\Omega_2$ , sebagai berikut:

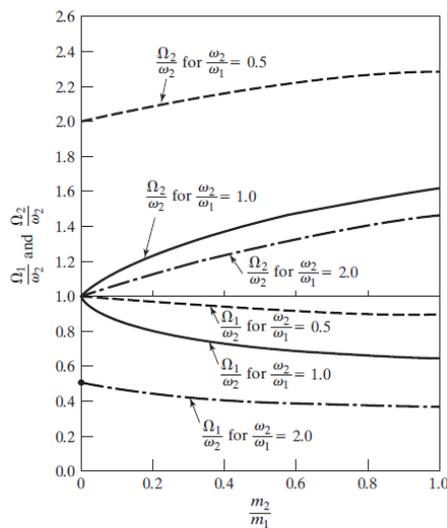
$$\left. \begin{matrix} \left(\frac{\Omega_1}{\omega_2}\right)^2 \\ \left(\frac{\Omega_2}{\omega_2}\right)^2 \end{matrix} \right\} = \frac{\left\{ \left[ 1 + \left( 1 + \frac{m_2}{m_1} \right) \left( \frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2 \right] \mp \left\{ \left[ 1 + \left( 1 + \frac{m_2}{m_1} \right) \left( \frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2 \right]^2 - 4 \left( \frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2 \right\}^{1/2} \right\}}{2 \left( \frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2} \quad (2.9)$$

Persamaan 2.9 menunjukkan bahwa  $\Omega_1$  dan  $\Omega_2$  merupakan fungsi dari  $(m_2/m_1)$  dan  $(\omega_2/\omega_1)$ . Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam kasus DVA tanpa peredam ini, diantaranya adalah:

- Dari persamaan 2.9 dapat dilihat bahwa  $\Omega_1$  lebih kecil dari dan  $\Omega_2$  lebih besar dari kecepatan operasi mesin (dimana frekuensi eksitasi sama dengan frekuensi natural  $\omega_1$ . Maka mesin pasti akan melewati  $\Omega_1$  saat menghidupkan ataupun mematikan mesin, dimana saat melewati  $\Omega_1$  akan memiliki amplitudo yang besar (resonansi).
- Oleh karena absorber di-*tune* pada frekuensi eksitasi  $\omega$ , maka amplitudo dari mesin bernilai nol hanya pada saat frekuensi tersebut. Jika mesin beroperasi pada frekuensi lainnya atau terdapat gaya eksitasi lainnya pada frekuensi berbeda, maka mesin akan mempunyai amplitudo yang mungkin besar.
- Variasi dari  $\frac{\Omega_1}{\omega_2}$  dan  $\frac{\Omega_2}{\omega_2}$  sebagai fungsi dari rasio massa  $m_2/m_1$  ditunjukkan pada Gambar 2.15 pada rasio frekuensi,  $\omega_2/\omega_1$ , tertentu (0,5; 1; 2). Gambar tersebut menunjukkan bahwa perbedaan antara  $\frac{\Omega_1}{\omega_2}$  dan  $\frac{\Omega_2}{\omega_2}$  meningkat seiring bertambahnya nilai  $m_2/m_1$ .



Gambar 2.14 Pengaruh DVA tanpa peredam terhadap respon dinamis massa utama [12]

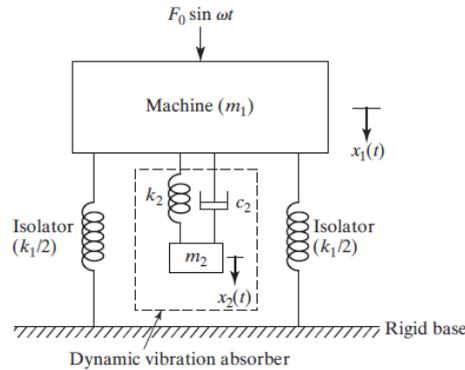


Gambar 2.15 Variasi dari  $\Omega_1$  dan  $\Omega_2$  berdasarkan persamaan 2.9 [12]

b. DVA dengan peredam

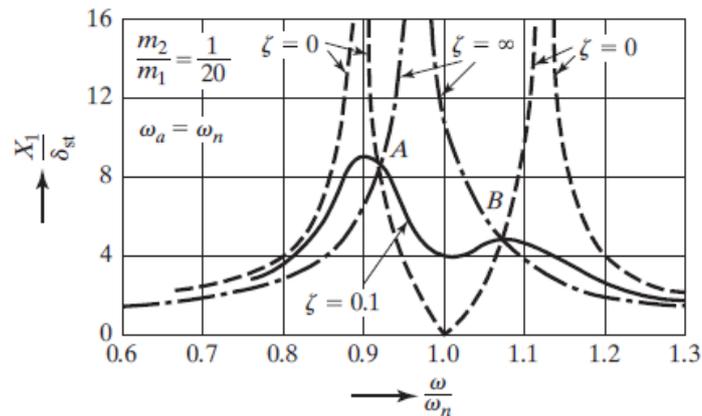
Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa penambahan DVA akan mengurangi bahkan meniadakan resonansi yang terjadi pada mesin utama namun menghasilkan dua puncak resonansi yang baru. Oleh karena itu, mesin utama akan beresonansi saat melewati puncak pertama selama proses menyalakan atau mematikan mesin. Amplitudo dari mesin dapat

dikurangi dengan menambahkan peredam dalam DVA tersebut yang ditunjukkan pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16 *Dynamic Vibration Absorber* dengan peredam [12]

Perbedaan dari keduanya hanya terletak pada peredamnya. Dengan adanya peredam maka selain menurunkan amplitudo mesin saat beroperasi, juga akan menurunkan amplitudo resonansi pertama yang pasti akan dilewati saat menyalakan maupun menghidupkan mesin. Namun amplitudo saat mesin beroperasi lebih besar daripada DVA yang tidak menggunakan peredam (sama sekali nol). Respon transmisi dapat dilihat pada Gambar 2.17 berikut.



Gambar 2.17 Pengaruh DVA dengan peredam terhadap respon dinamis massa utama [12]

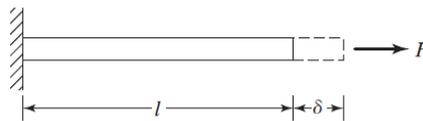
## 2.6 Stiffness of beam

Pegas pada umumnya berbentuk spiral seperti yang biasa diketahui. Namun pada nyatanya, setiap benda yang memiliki elastisitas berarti memiliki nilai kekakuan. Untuk mendapatkan konstanta kekakuan pegas dari batang berelastis sederhana seperti *rod*, *beam*, *hollow shaft*, terlebih dahulu mencari defleksi. Nantinya besar defleksi tersebut akan disubstitusikan pada persamaan berikut.

$$F = k \delta \quad (2.10)$$

$$k = \frac{F}{\delta} \quad (2.11)$$

Contoh kasus berikut akan memperjelas cara menentukan konstanta kekakuan.



Gambar 2.18 Ilustrasi *rod* dengan beban tarik di ujung

Gambar 2.18 menunjukkan ilustrasi suatu batang/rod yang di-*fixed* di ujung lainnya. Seperti yang diketahui, persamaan hubungan tegangan dan regangan sebagai berikut.

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (2.12)$$

$$\frac{F}{A} = E \cdot \frac{\delta}{L} \quad (2.13)$$

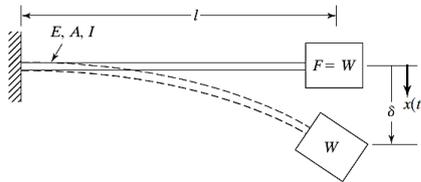
$$\delta = \frac{F \cdot L}{A \cdot E} \quad (2.14)$$

Persamaan (2.14) disubstitusikan ke persamaan (2.10) sehingga didapatkan nilai konstanta kekakuan berikut.

$$k = \frac{A \cdot E}{L} \quad (2.15)$$

Untuk jenis batang yang mendapatkan beban tegak lurus terhadap batang itu sendiri, maka untuk mendapatkan defleksinya harus menggunakan metode (salah satunya) potongan untuk mendapatkan persamaan *internal force*. Dalam hal ini

tidak akan dibahas secara detail bagaimana cara untuk mendapatkan persamaan momen dari metode potongan. Gambar berikut menunjukkan batang kantilever yang mendapatkan beban vertikal.



Gambar 2.19 Ilustrasi batang kantilever dengan beban di ujung

Dari Gambar 2.19 didapatkan persamaan momen sebagai berikut:

$$M = P \cdot x \quad (2.16)$$

Berdasarkan metode “*Double-Integration*” didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M}{EI} \quad (2.17)$$

Dimana  $y$  ( $\delta$ ) adalah panjang defleksi yang terjadi. Sedangkan  $EI$  adalah kekakuan lentur yang dimiliki oleh batang, biasanya besarnya konstan sepanjang batang. Namun ada kalanya batang memiliki luas penampang yang berubah-ubah sepanjang batang tersebut. Hal ini berdampak langsung pada besar inersianya yang juga berubah-ubah.

Untuk mendapatkan besar defleksi,  $y$ , maka persamaan (2.13) harus diintegrasikan sebanyak dua kali. Agar hasil integrasi menjadi tertentu, maka diperlukan dua konstrain. Untuk kasus pada Gambar 2.20 konstrain yang digunakan adalah ketika  $x=L$  maka  $y$  dan  $y'$  bernilai nol. Berikut ini adalah contoh penyelesaian dari kasus Gambar 2.19. Dengan substitusi persamaan (2.16) ke persamaan (2.17) didapatkan persamaan berikut.

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{Px}{EI} \quad (2.18)$$

$$\int \int d^2y = \int \int \frac{Px}{EI} dx^2 \quad (2.19)$$

$$\int EI \cdot dy = \int \left( \frac{P \cdot x^2}{2} + C_1 \right) dx \quad (2.20)$$

$$EI \cdot y = \frac{P \cdot x^3}{6} + C_1 \cdot x + C_2 \quad (2.21)$$

Dengan konstrain sebagai berikut:

$$y'|_{x=L} = 0 \quad (2.22)$$

$$y|_{x=L} = 0 \quad (2.23)$$

Dengan memasukkan konstrain pada persamaan (2.22) ke persamaan (2.20) dan konstrain pada persamaan (2.23) ke persamaan (2.21), maka didapatkan persamaan akhir sebagai berikut.

$$y = \frac{P.L^3}{3.EI} \quad (2.24)$$

Persamaan (2.24) disubstitusikan ke persamaan (2.11) sehingga menghasilkan persamaan akhir sebagai berikut.

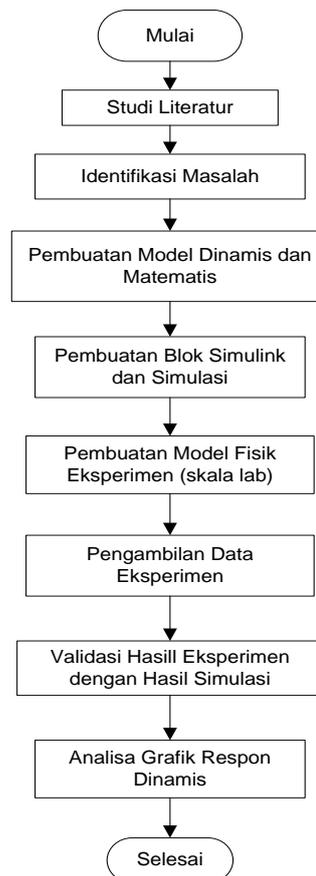
$$k = \frac{F}{P.L^3/3.EI} = \frac{3.EI}{L^3} \quad (2.25)$$

## BAB 3

### METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh penambahan TMD pada turbin angin, yang dilakukan secara eksperimen dan kemudian divalidasi menggunakan *software* numerik. Gambar 3.1 menunjukkan proses penelitian tesis ini secara garis umum. Hal yang pertama kali dilakukan adalah studi literatur kemudian dilanjutkan dengan identifikasi masalah. Setelah itu, dibuatlah model dinamis dan matematis untuk mempermudah penyelesaian masalah.



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian secara umum

Model matematis yang telah dibuat akan dimasukkan ke dalam *software* numerik untuk menyimulasikan respon dinamis dari turbin angin sehingga

didapatkan parameter-parameter yang sesuai untuk dibuatkan model eksperimennya. Setelah pembuatan model eksperimen, dilakukan pengambilan data lalu dibandingkan dengan hasil simulasi.

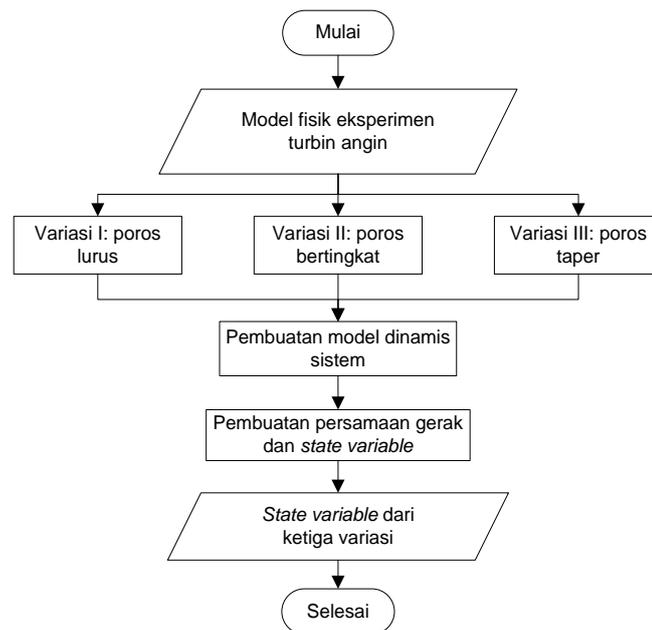
### **3.2 Studi Literatur**

Dalam menyelesaikan penelitian ini diperlukan referensi-referensi, baik dari jurnal, seminar, maupun buku-buku teks, yang dapat menunjang penelitian ini. Oleh karena itu, dilakukan studi literatur untuk menambah wawasan, pengetahuan, dasar teori, ataupun landasan mengenai masalah yang akan dibahas. Adapun literatur yang mendukung dalam penulisan penelitian ini diantaranya mekanika getaran dasar, *tuned mass damper*, pemodelan sistem dinamis maupun matematis, dan pembuatan blok diagram simulasi.

### **3.3 Pemodelan Sistem Dinamis**

Pemodelan yang digunakan dalam penelitian ini adalah mengacu pada model eksperimen yang akan dibangun. Secara umum, langkah-langkah yang digunakan untuk membangun persamaan gerak sistem ditunjukkan oleh Gambar 3.2.

Sedangkan model fisik dari model turbin angin ditunjukkan pada Gambar 3.3.



Gambar 3.2 Diagram alir pemodelan dinamis sistem

Variasi yang digunakan ada tiga, yaitu poros lurus, poros bertingkat, dan poros taper. TMD nantinya akan diletakkan di puncak tower. TMD yang akan digunakan berbentuk massa balok yang diberi roda agar dapat bergerak bebas. Eksitasi yang berasal dari *table shaker* merupakan eksitasi angin yang dirasakan oleh massa pondasi, sedangkan gaya angin bersifat dinamis. Gaya dinamis angin dapat diperoleh dari persamaan sebagai berikut:

$$F_d(t) = F_d \cos (\omega t) \quad (3. 1)$$

$$F_d(t) = \frac{1}{2} \rho C_D A V^2 \cos (\omega t) \quad (3. 2)$$

$$F_d(t) = 0,5 \times 1,225 \times 1,2 \times 254 \times 5^2 \cos 3t \quad (3. 3)$$

$$F_d(t) = 4667,25 \cos 3t \quad (3. 4)$$

Dari persamaan (3.4) didapatkan amplitudo gaya sebesar 4667,25 N. Gaya ini yang selanjutnya digunakan untuk mencari gaya di pondasi menggunakan persamaan momen sederhana (analisa statis). Berdasarkan Gambar 3.3, didapatkan persamaan momen sederhana sebagai berikut [13]:

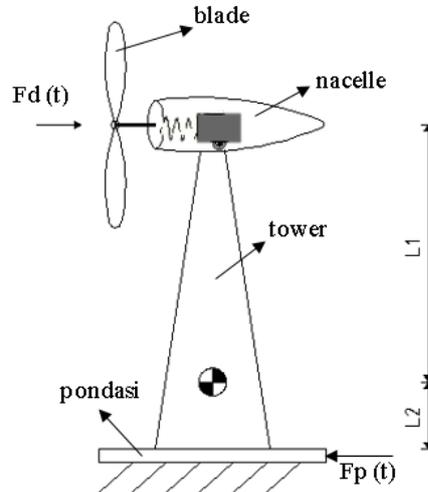
$$\sum M = 0$$

$$F_D L_1 - F_P L_2 = 0 \quad (3. 5)$$

$$\left( \frac{1}{2} \rho C_D A V^2 \right) L_1 - F_P L_2 = 0 \quad (3. 6)$$

$$(0,5 \times 1,225 \times 1,2 \times 254 \times 5^2) \times 22,5 = F_p \times 7,5 \quad (3.7)$$

$$F_p = \frac{105013,125}{7,5} = 14001,75 \text{ N} \quad (3.8)$$



Gambar 3.3 Model fisik eksperimen turbin angin

Nilai  $F$  pondasi pada persamaan (3.8) merupakan gaya yang terjadi pada pondasi. Gaya ini yang kemudian dijadikan patokan untuk mendesain meja getar. Dengan skala  $1/60$ , didapatkan gaya di meja getar sebesar:

$$F_s = \frac{1}{60} F_d \quad (3.9)$$

$$F_s = \frac{1}{60} 14.001,75 \quad (3.10)$$

$$F_s = 237,438 \quad (3.11)$$

Nilai  $F$  shaker ini selanjutnya digunakan sebagai dasar mendesain parameter-parameter pada *table shaker*.

$$F_s(t) = F_s \cos(\omega t) \quad (3.12)$$

$$F_s(t) = m\omega^2 R \cos(\omega t) \quad (3.13)$$

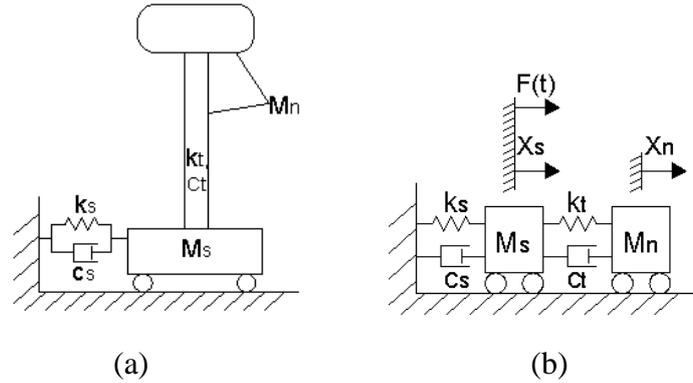
$$F_s(t) = 1,2 \times 57,4^2 \times 0,06 \cos(57,4t) \quad (3.14)$$

$$F_s(t) = 237,438 \cos(57,4t) \quad (3.15)$$

### 3.3.1 Model turbin angin variasi 1

Variasi 1 memiliki bentuk tower panjang langsing yang diameternya tetap sepanjang tingginya, disebut poros lurus. Gambar 3.4 (a) menunjukkan model fisik dan Gambar 3.4 (b) menunjukkan model dinamisnya.  $M_s$  merupakan massa *table shaker*,  $M_n$  merupakan massa dari tower dan

*nacelle*,  $k_s$  dan  $c_s$  merupakan konstanta kekakuan dan damping dari *table shaker*,  $k_t$  merupakan konstanta kekakuan dari tower, dan  $c_t$  merupakan koefisien damping tower.  $F(t)$  merupakan inputan gaya yang berasal dari massa *unbalance* pada *table shaker*.



Gambar 3.4 Turbin angin tanpa TMD variasi 1 (a) model fisik (b) model dinamis

Pada Gambar 3.4(b) terlihat model dinamis turbin angin tanpa TMD memiliki 2 derajat kebebasan. Persamaan gerak dari Gambar 3.4(b) sebagai berikut:

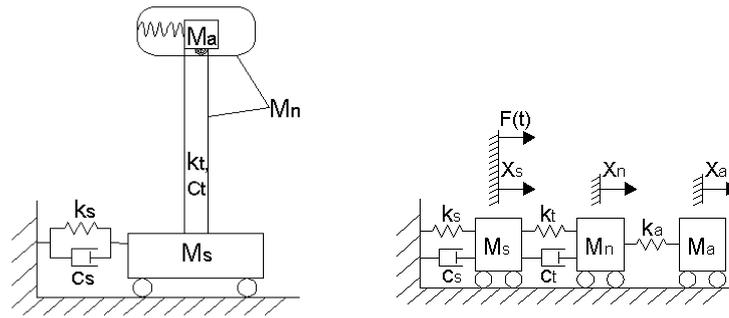
$$m_s \ddot{x}_s + c_s \dot{x}_s + k_s x_s + c_t (\dot{x}_s - \dot{x}_n) + k_t (x_s - x_n) = F(t) \quad (3.16)$$

$$\ddot{x}_s = \frac{F(t) - c_s \dot{x}_s - k_s x_s - c_t (\dot{x}_s - \dot{x}_n) - k_t (x_s - x_n)}{m_s} \quad (3.17)$$

$$m_n \ddot{x}_n + c_t (\dot{x}_n - \dot{x}_s) + k_t (x_n - x_s) = 0 \quad (3.18)$$

$$\ddot{x}_n = \frac{-c_t (\dot{x}_n - \dot{x}_s) - k_t (x_n - x_s)}{m_n} \quad (3.19)$$

Penambahan TMD menyebabkan bertambahnya derajat kebebasan. Massa TMD memiliki 1 derajat kebebasan sehingga totalnya menjadi 3 derajat kebebasan. Penambahan massa TMD ini akan menghasilkan model dinamis seperti pada Gambar 3.5 berikut.



Gambar 3.5 Model dinamis turbin angin dengan TMD variasi 1

Massa  $M_s$  pada Gambar 3.5 memiliki persamaan gerak yang sama dengan persamaan (3.9), namun massa  $M_n$  dan  $M_a$  memiliki persamaan gerak yang berbeda. Persamaan gerak dari model dinamis pada Gambar 3.5 adalah sebagai berikut:

$$m_n \ddot{x}_n + c_t(\dot{x}_n - \dot{x}_s) + k_t(x_n - x_s) + c_a(\dot{x}_n - \dot{x}_a) + k_a(x_n - x_a) = 0 \quad (3.20)$$

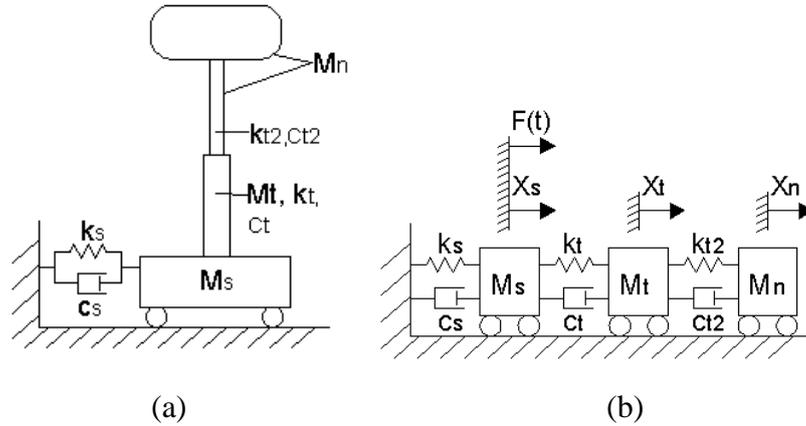
$$\ddot{x}_n = \frac{-c_t(\dot{x}_n - \dot{x}_s) - k_t(x_n - x_s) - c_a(\dot{x}_n - \dot{x}_a) - k_a(x_n - x_a)}{m_n} \quad (3.21)$$

$$m_a \ddot{x}_a + c_a(\dot{x}_a - \dot{x}_n) + k_a(x_a - x_n) = 0 \quad (3.22)$$

$$\ddot{x}_a = \frac{-c_a(\dot{x}_a - \dot{x}_n) - k_a(x_a - x_n)}{m_a} \quad (3.23)$$

### 3.3.2 Model turbin angin variasi 2

Variasi 2 memiliki bentuk tower dengan dua macam diameter konstan sepanjang tinggi tower, disebut poros bertingkat. Gambar 3.6 (a) menunjukkan model fisik dan Gambar 3.6 (b) menunjukkan model dinamisnya.  $M_s$  merupakan massa *table shaker*,  $M_n$  merupakan massa dari tower atas dan *nacelle*,  $M_t$  merupakan massa tower bagian bawah,  $k_t$  merupakan konstanta kekakuan dari tower bawah,  $k_{t2}$  merupakan konstanta kekakuan dari tower atas,  $c_t$  merupakan koefisien damping dari tower bawah,  $c_{t2}$  merupakan koefisien damping dari tower atas.



Gambar 3.6 Turbin angin tanpa TMD variasi 2 (a) model fisik (b) model dinamis

Pada Gambar 3.6(b) terlihat model dinamis turbin angin tanpa TMD memiliki 3 derajat kebebasan. Persamaan gerak dari Gambar 3.6(b) sebagai berikut:

$$m_s \ddot{x}_s + c_s \dot{x}_s + k_s x_s + c_t (\dot{x}_s - \dot{x}_t) + k_t (x_s - x_t) = F(t) \quad (3.24)$$

$$\ddot{x}_s = \frac{F(t) - c_s \dot{x}_s - k_s x_s - c_t (\dot{x}_s - \dot{x}_t) - k_t (x_s - x_t)}{m_s} \quad (3.25)$$

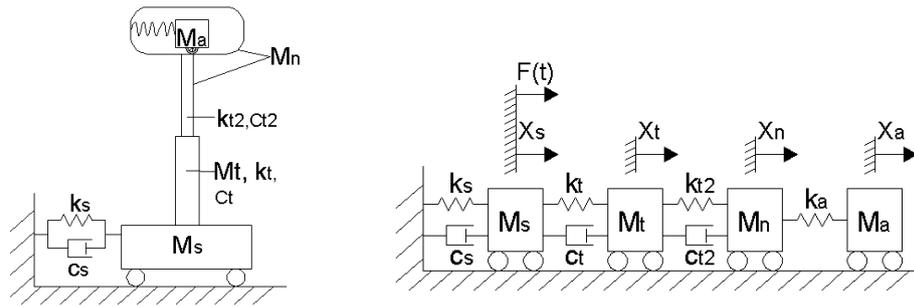
$$m_t \ddot{x}_t + c_t (\dot{x}_t - \dot{x}_s) + k_t (x_t - x_s) + c_{t2} (\dot{x}_n - \dot{x}_t) + k_{t2} (x_n - x_t) = 0 \quad (3.26)$$

$$\ddot{x}_t = \frac{-c_t (\dot{x}_t - \dot{x}_s) - k_t (x_t - x_s) - c_{t2} (\dot{x}_n - \dot{x}_t) - k_{t2} (x_n - x_t)}{m_t} \quad (3.27)$$

$$m_n \ddot{x}_n + c_{t2} (\dot{x}_n - \dot{x}_t) + k_{t2} (x_n - x_t) = 0 \quad (3.28)$$

$$\ddot{x}_n = \frac{-c_{t2} (\dot{x}_n - \dot{x}_t) - k_{t2} (x_n - x_t)}{m_n} \quad (3.29)$$

Penambahan TMD menyebabkan bertambahnya derajat kebebasan. Massa TMD memiliki 1 derajat kebebasan sehingga totalnya menjadi 4 derajat kebebasan. Penambahan massa TMD ini akan menghasilkan model dinamis seperti pada Gambar 3.7 berikut.



Gambar 3. 7 Model dinamis turbin angin dengan TMD variasi 2

Massa  $M_s$  dan  $M_t$  pada Gambar 3.7 memiliki persamaan gerak yang sama dengan persamaan (3.17), dan (3.19), namun massa  $M_n$  dan  $M_a$  memiliki persamaan gerak yang berbeda. Persamaan gerak dari model dinamis pada Gambar 3.7 adalah sebagai berikut:

$$m_n \ddot{x}_n + c_{t2}(\dot{x}_n - \dot{x}_t) + k_{t2}(x_n - x_t) + c_a(\dot{x}_n - \dot{x}_a) + k_a(x_n - x_a) = 0 \quad (3.30)$$

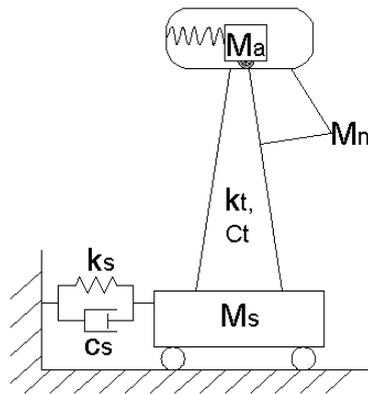
$$\ddot{x}_n = \frac{-c_{t2}(\dot{x}_n - \dot{x}_t) - k_{t2}(x_n - x_t) - c_a(\dot{x}_n - \dot{x}_a) - k_a(x_n - x_a)}{m_n} \quad (3.31)$$

$$m_a \ddot{x}_a + c_a(\dot{x}_a - \dot{x}_n) + k_a(x_a - x_n) = 0 \quad (3.32)$$

$$\ddot{x}_a = \frac{-c_a(\dot{x}_a - \dot{x}_n) - k_a(x_a - x_n)}{m_a} \quad (3.33)$$

### 3.3.3 Model turbin angin variasi 3

Variasi 3 memiliki bentuk tower berbentuk kerucut yang terpancung, disebut poros bertingkat. Variasi ketiga ini memiliki diameter yang berbeda-beda ditiap titik tinjauannya. Gambar 3.8 menunjukkan model fisik turbin angin dan model dinamisnya sama seperti model dinamis pada variasi 1 (Gambar 3.4(b)). Penambahan TMD juga akan menghasilkan model dinamis serta persamaan gerak yang sama persis dengan variasi 1, bedanya hanya pada parameter  $k_t$ . Model dinamis penambahan TMD dapat dilihat pada Gambar 3.5, sedangkan persamaan gerak sistem baik tanpa TMD maupun dengan TMD dapat dilihat pada persamaan (3.9), (3.11), (3.13), dan (3.15).



Gambar 3. 8 Model fisik turbin angin tanpa TMD variasi 3

### 3.4 Pembuatan Blok Simulink

Pada tahap ini akan dibuat blok diagram simulasi pada *software* numerik simulink Matlab. Dasar yang digunakan dalam pembuatan blok diagram simulasi adalah persamaan *state variable* yang telah didapatkan sebelumnya (pada subbab 3.3). Tujuan dari dilakukannya simulasi adalah untuk mengetahui respon dinamis dari berbagai tinjauan massa dan untuk memvalidasi hasil eksperimen yang telah dilakukan. Respon dinamis yang didapat dari simulasi adalah berupa data defleksi/perpindahan, kecepatan dan percepatan dari berbagai tinjauan massa, baik sebelum diberi TMD maupun sesudah diberi TMD, pada setiap variasi. Dalam penelitian ini akan dilakukan variasi terhadap bentuk dari tower yang berdampak langsung pada nilai kekakuan tower,  $k_t$ . Untuk lebih jelasnya, akan dibahas pada subbab 3.5.

### 3.5 Penentuan Parameter

Sebelum membuat model eksperimen, terlebih dahulu menentukan parameter-parameter yang digunakan. Beberapa batasan dalam membuat model eksperimen turbin angin diantaranya adalah massa TMD berkisar 8%-9% dari massa *nacelle* dan massa *nacelle* sepertiga dari massa tower [14]. Oleh karena itu dibuatlah perbandingan massa dari ketiganya dengan konfigurasi Massa tower:Massa *nacelle*:Massa *absorber* adalah 1:0,333:0,027. Tinggi tower alat uji menggunakan rasio 1/30 dari tinggi tower sebenarnya, yaitu 1 m. Sedangkan ukuran diameternya mengikuti perbandingan massa yang telah ditentukan sebelumnya.

Tabel 3.1 merangkum nilai dari parameter-parameter yang digunakan dalam simulasi maupun eksperimen.

Tabel 3.1 Parameter model eksperimen turbin angin

Parameter	Variasi			Keterangan
	I:Poros lurus	II:Poros bertingkat	III:Poros taper	
$M_s$	8,226 kg			Massa <i>table shaker</i>
$M_n$	4807 gram	2563,6 gram	4769 gram	Massa <i>nacelle</i> dan tower
$M_t$	-	2205 gram	-	Massa tower bawah (khusus variasi 2)
$M_a$	232 gram			Massa <i>absorber</i>
$k_s$	199,8575 N/m			Konst. Kekakuan <i>table shaker</i>
$k_t$	11714 N/m	121535,2 N/m	12174 N/m	Konst. Kekakuan tower
$k_{t2}$	-	53572 N/m	-	Konst. Kekakuan tower (variasi 2)
$k_a$	95,30864 N/m			Konst. Kekakuan <i>absorber</i>
$c_s$	4,863767 N.s/m			Konst. Damping <i>table shaker</i>
$c_t$	43,509 N.s/m	90,4889 N.s/m	42,19 N.s/m	Konst. Damping tower
$c_{t2}$	-	38,2106 N.s/m	-	Konst. Damping tower (variasi 2)
$d_1$	25 mm	27 mm	27 mm	Diameter tower bawah
$d_2$	25 mm	22 mm	21 mm	Diameter tower atas
$L$	100 cm	-	100 cm	Tinggi tower
$L_1$	-	50 cm	-	Tinggi tower bawah
$L_2$	-	50 cm	-	Tinggi tower atas

Dari Tabel 3.1 terdapat beberapa parameter yang belum dijelaskan secara rinci. Salah satunya adalah cara untuk mendapatkan nilai kekakuan tower, yang akan dijelaskan berikut ini. sedangkan cara untuk mendapatkan beberapa parameter konstanta kekakuan dan konstanta peredam lainnya dijelaskan pada Bab 4.

a. Tower lurus

Dengan menggunakan persamaan 2.25, didapatkan k sebagai berikut:

$$k_t = \frac{3 \times 200 \times 10^9 \times 1,9175^{-8}}{1^3} \quad (3.34)$$

$$k_t = 11714 \text{ N/m} \quad (3.35)$$

b. Tower bertingkat

Untuk bentuk tower bertingkat akan memiliki 2 derajat kebebasan seperti yang telah disebutkan pada subbab 3.3.2. Tower yang berdiameter 2,2 cm memiliki 1 dof ( $k_t$ ), dan tower yang berdiameter 2,7 cm juga memiliki dof tersendiri ( $k_{t2}$ ). Persamannya sebagai berikut:

$$k_t = \frac{3 \times 200 \times 10^9 \times 2,6087 \times 10^{-8}}{0,5^3} = 121540 \text{ N/m} \quad (3.36)$$

$$k_{t2} = \frac{3 \times 200 \times 10^9 \times 1,1499 \times 10^{-8}}{0,5^3} = 53572 \text{ N/m} \quad (3.37)$$

c. Tower taper

Variasi bentuk tower taper memiliki sedikit perbedaan dari variasi bentuk tower lainnya. Perbedaannya terletak pada penampang yang berubah setiap perubahan  $x$  (dalam hal ini  $x$  adalah panjang tower). Hal ini berdampak pada inersia batang yang merupakan fungsi dari  $x$ . Untuk itu, diperlukan metode integrasi untuk mendapatkan sebuah konstanta kekakuan dari tower taper ini. Berdasarkan persamaan (2.19) serta konstrain pada persamaan (2.22) dan (2.23), maka didapatkan persamaan berikut:

$$\delta = \frac{32L^4 P(3d_1L - 3d_1x - d_2L + 3d_2x)}{3\pi E(d_1 - d_2)^3 [d_1(L-x) + d_2x]^2} + \frac{32LxP(2d_2L - 3d_1L)}{3\pi E d_1^3 (d_1 - d_2)^2} + \frac{32L^4 P(d_2L - 3d_1L)}{3\pi E(d_1 - d_2)^3 (d_1L)^2} \quad (3.38)$$

$$\delta = \frac{64d_2L^5 P}{3\pi E(d_1 - d_2)^3 (d_2L)^2} + \frac{32L^2 P(2d_2L - 3d_1L)}{3\pi E d_1^3 (d_1 - d_2)^2} + \frac{32L^4 P(d_2L - 3d_1L)}{3\pi E(d_1 - d_2)^3 (d_1L)^2} \quad (3.39)$$

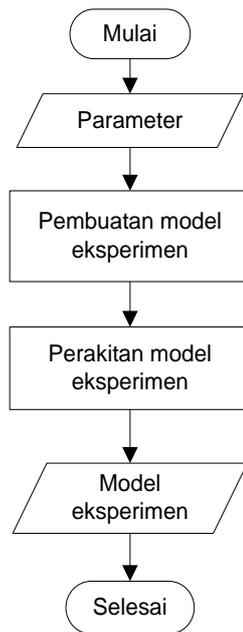
$$\delta = 3,6352 \times 10^{-4} \text{ m} \quad (3.40)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (3.27) ke persamaan (2.11) didapatkan persamaan berikut ini:

$$k_t = 12174 \text{ N/m} \quad (3.41)$$

### 3.6 Pembuatan Model Eksperimen

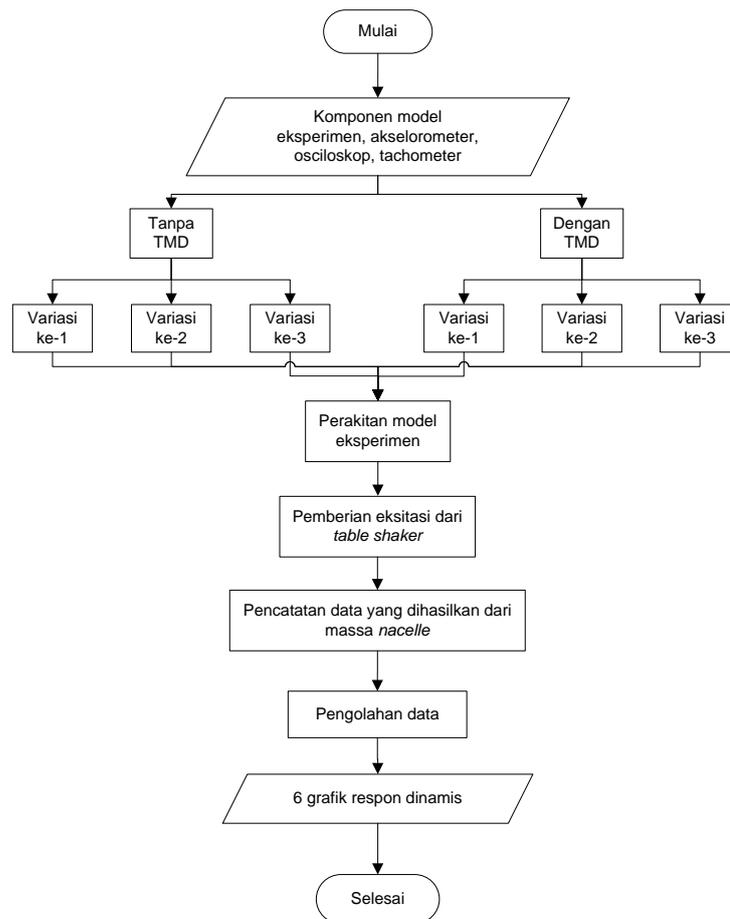
Setelah menentukan parameter, selanjutnya dibuat model eksperimennya sesuai dengan diagram alir pada Gambar 3.9 berikut. Material yang digunakan adalah steel, yang telah sesuai dengan kenyataannya.



Gambar 3.9 Diagram alir pembuatan model eksperimen

### 3.7 Pengambilan Data Ekperimen

Pada tahap ini akan dilakukan pengujian model dengan input dari *table shaker*. Gambar 3.10 menunjukkan langkah-langkah secara umum yang dilakukan saat memasuki tahap ini. Seperti yang disebutkan sebelumnya bahwa dalam penelitian ini terdapat variasi pada bentuk towernya. Parameter dari tiap variasi telah dirangkum pada Tabel 3.1. Dari semua variasi ini maka akan didapatkan 6 grafik hasil pengujian.



Gambar 3.10 Diagram alir pengambilan data eksperimen

Alat yang digunakan dalam eksperimen ini diantaranya:

a. Akselerometer

Akselerometer adalah alat yang digunakan untuk mengukur percepatan, mendeteksi dan mengukur getaran (vibrasi), dan mengukur percepatan akibat gravitasi. Akselerometer mengukur percepatan benda yang disebabkan oleh gerakan benda yang melekat padanya [15]. Gambar 3.12 merupakan akselerometer yang digunakan pada eksperimen. Akselerometer yang digunakan adalah merek Omega tipe ACC103 dengan spesifikasi sebagai berikut:

- *Frequency range* : 3 Hz – 10 kHz
- *Reference sensitivity* : 10 mV/g@100 Hz
- *Temperature range* : -40°C - 121°C
- *Mounted resonant frequency* : 50 kHz
- *Mounting* : 10-32 removable stud



Gambar 3. 11 Akselerometer

b. Osiloskop

Osiloskop adalah alat ukur elektronik yang menginterpretasikan sinyal listrik serta frekuensi listrik menjadi visual gambar grafik, sehingga dapat dinyatakan dalam satuan tertentu sebagai indikator kinerja. Gambar 3.15 merupakan osiloskop yang digunakan pada eksperimen. Osiloskop yang digunakan adalah merek Tektronix tipe TDS1000B dengan spesifikasi sebagai berikut:

- *Bandwith* : 40 Mhz
- *Sample rate* : 500 MS/s
- *Record length* : 2.5K points
- *Vertical sensitivity* : 2mV – 5V/div
- *Time-base range* : 5 ns – 50 s/div

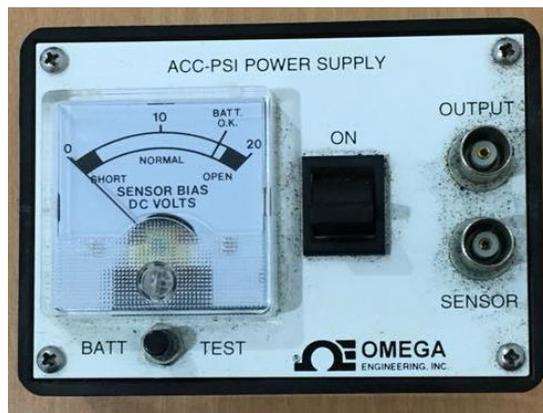


Gambar 3. 12 Osiloskop

c. *Power supply*

*Power supply* adalah perangkat keras yang bertugas menyalurkan tegangan listrik ke akselerometer. *Power supply* yang digunakan dalam eksperimen ini adalah merek Omega tipe ACC-PS1 dengan spesifikasi sebagai berikut:

- *Excitation voltage* : 18 Vdc
- *Excitation current* : 2 mA



Gambar 3. 13 *Power supply*

Data yang diperoleh dari hasil pengukuran merupakan data voltase yang ditampilkan di osiloskop. Untuk mengubahnya ke dalam respon getaran, maka perlu dilakukan konversi terlebih dahulu dengan menggunakan persamaan 3.11 berikut:

$$Response = \frac{G_1}{V} \cdot g \cdot \frac{f}{100} \quad (3.42)$$

Keterangan:

$G_1$  : Data yang akan diolah

$V$  : Sensitifitas akselerometer

$g$  : Percepatan gravitasi ( $9,81 \text{ m/s}^2$ )

$f$  : Frekuensi eksitasi yang diberikan [Hz]

100 : Frekuensi kerja akselerometer pada saat 100 MHz

d. *Voltage regulator*

Voltage regulator merupakan alat yang berfungsi untuk mengeluarkan suatu tegangan DC tetap yang tidak dipengaruhi oleh tegangan masukan, arus beban

keluaran, dan suhu. Voltage regulator yang digunakan dalam pengujian ini adalah merek Even TDGC<sub>2</sub>-1 kVA dengan spesifikasi sebagai berikut:

Input Voltage : 220 V, 380 V

Output Voltage : 0-430 V

Max. Output Capacity: 0,2 kVA – 30 kVA.



Gambar 3.14 *Voltage Regulator*

### **3.8 Analisa Grafik Respon Dinamis**

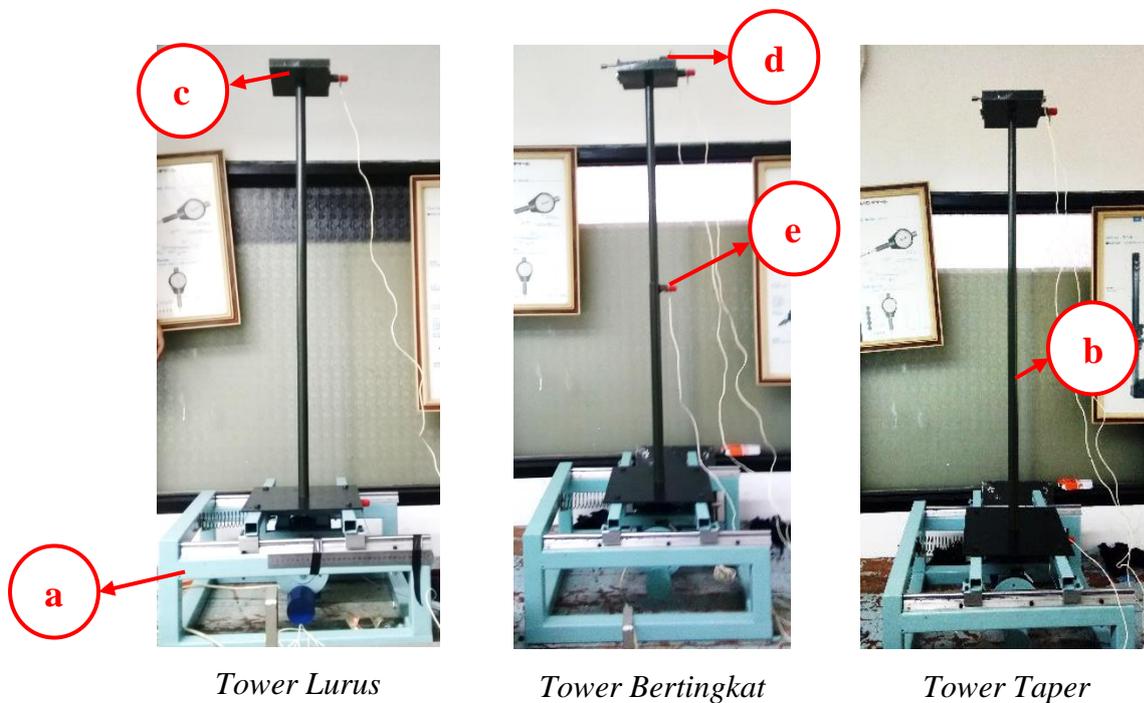
Pada tahap ini akan dibahas grafik respon dinamis yang telah dihasilkan, baik yang diperoleh dari eksperimen maupun simulasi. Selain itu, tahap ini juga akan membahas pengaruh penambahan massa TMD dan pengaruh variasi bentuk tower.

## BAB 4

### ANALISA HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Mekanisme Model Turbin Angin dengan Variasi Struktur Tower dan TMD

Turbin angin dimodelkan seperti pada Gambar 4.1 berikut. Alat ini sebagai model turbin angin yang dikenai beban angin untuk diketahui respon dinamis dari tiap-tiap tinjauan massa. Adapun tinjauan massa secara umum terletak pada beberapa bagian, diantaranya meja getar, tower, nasel, dan TMD.



Gambar 4. 1 Alat uji turbin angin dengan variasi struktur tower

Keterangan:

a : meja getar

d : TMD

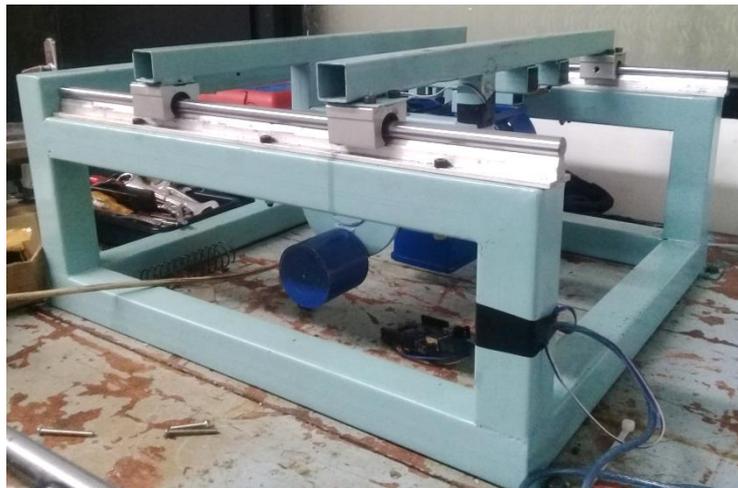
b : tower

e : probe accelerometer

c : nasel

#### 4.1.1 Meja getar (*table shaker*)

Meja getar yang telah dibuat berfungsi sebagai pengganti eksitasi angin untuk turbin angin. Meja getar ini dapat bergerak karena menggunakan sistem massa *unbalance* yang dipasangkan pada *disk* motor. Agar meja tidak berputar rotasional, meja ditahan oleh *linear rail bearing* sehingga meja bergerak secara translasi ke arah horizontal. Agar meja dapat bergerak bolak-balik, digunakanlah pegas yang dikaitkan antar rangka (sebagai bodi diam) dan meja getar itu sendiri. Massa *unbalance* yang digunakan sebesar 1,2 kg dengan jarak eksentris sebesar 6 cm. Motor yang digunakan dihubungkan dengan *voltage regulator* sehingga frekuensi kerja meja getar dapat dengan mudah ditentukan. Gambar 4.2 menunjukkan meja getar yang digunakan selama pengambilan data.



Gambar 4. 2 Meja getar

Parameter yang digunakan dalam simulasi maupun eksperimen dari meja getar ini, diantaranya adalah massa meja getar, konstanta pegas, dan konstanta peredam dari meja getar. Pengujian dilakukan untuk mendapatkan nilai konstanta pegas dan redaman. Pengujian konstanta pegas dilakukan dengan menghitung selisih pertambahan panjang pegas setelah diberi beberapa variasi beban. Tabel 4.1 merupakan hasil pengambilan data pengujian. Berikut ini merupakan contoh perhitungan untuk mendapatkan konstanta pegas.

$$k = \frac{F}{\Delta x} \quad 4. 1$$

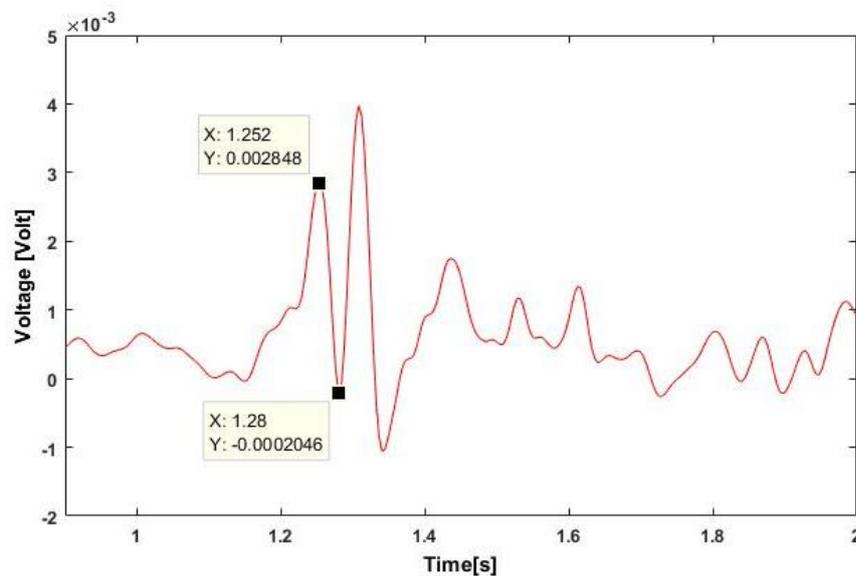
$$k = \frac{10}{(0,105-0,155)} \quad 4.2$$

$$k = 200 \text{ N/m} \quad 4.3$$

Tabel 4. 1Data hasil pengujian konstanta pegas meja getar

Gaya Tarik (N)	Panjang Awal (m)	Panjang Akhir (m)	Selisih Panjang (m)	Nilai k (N/m)
10	0,105	0,155	0,05	200
8	0,105	0,144	0,039	205,1281
7	0,105	0,141	0,036	194,444
<b>Nilai k rata-rata</b>				199,8575

Sedangkan untuk menentukan konstanta redaman dari meja getar, dilakukan pengambilan dengan cara memberi simpangan awal pada meja getar tersebut kemudian dilepas agar dapat bergetar bebas. Respon getaran yang terjadi kemudian ditangkap dan dibaca oleh akselerometer dan osiloskop, untuk selanjutnya diolah menggunakan persamaan *incremental degreement*. Gambar 4.3 merupakan respon getaran yang diperoleh dan telah mengalami *filtering* maupun *smoothing*.



Gambar 4. 3 Grafik hasil pengukuran getaran bebas meja getar dengan *filtering* dan *smoothing*

Pengolahan data pada Gambar 4.3 dilakukan dengan mencari nilai amplitudo rata-rata dari sebuah puncak dan sebuah lembah yang berdekatan ( $a_n$ ). Kemudian mencari amplitudo rata-rata dari sebuah puncak dan lembah berikutnya ( $a_{n+1}$ ). Dari kedua nilai tersebut ( $a_n$  dan  $a_{n+1}$ ) kemudian dimasukkan ke dalam persamaan *incremental decreement*. Tabel 4.2 merupakan data hasil pengujian konstanta redaman dari meja getar. Berikut ini adalah contoh langkah-langkah yang dilakukan untuk melakukan perhitungan mencari nilai redaman meja getar.

- Menghitung rata-rata dari amplitudo pertama ( $a_n$ ):

$$a_n = \frac{\text{puncak}_n + \text{lembah}_n}{2}$$

$$a_n = \frac{0,00285 + (-0,0002)}{2}$$

$$a_n = 0,001325 \text{ volt}$$

- Menghitung rata-rata amplitudo kedua ( $a_{n+1}$ ):

$$a_{n+1} = \frac{\text{puncak}_{n+1} + \text{lembah}_{n+1}}{2}$$

$$a_{n+1} = \frac{0,00397 + (-0,001041)}{2}$$

$$a_{n+1} = 0,001465 \text{ volt}$$

- Mencari konstanta redaman ( $c$ )

$$c = 2m \sqrt{\frac{k}{m}} \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{2\pi}{\ln\left(\frac{a_n}{a_{n+1}}\right)}\right)^2 + 1}} \quad 4.4$$

$$c = 2,8,226 \sqrt{\frac{200}{8,226}} \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{2\pi}{\ln\left(\frac{0,001325}{0,001465}\right)}\right)^2 + 1}} \quad 4.5$$

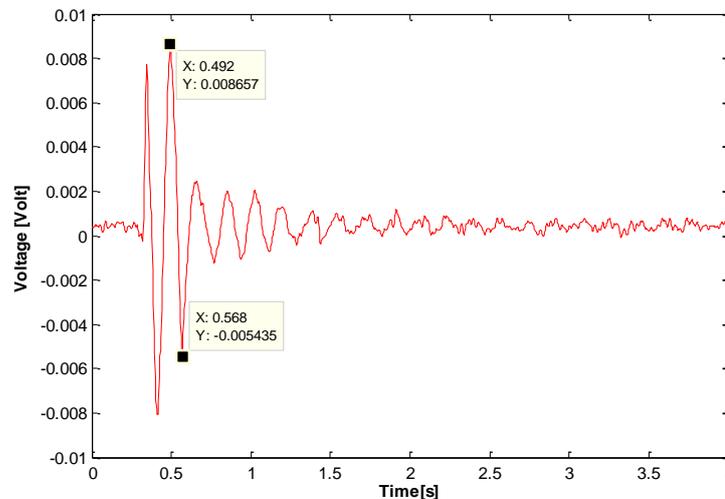
$$c = 1,29224 \text{ N. s/m} \quad 4.6$$

Tabel 4. 2 Data hasil pengujian konstanta redaman meja getar

Data ke-	$a_n$ (volt)	$a_{n+1}$ (volt)	Nilai c (Ns/m)
1	0.001325	0.001465	1.292244
2	0.001485	0.001125	3.586729
3	0.001125	0.000805	4.315139
4	0.000805	0.00552	4.862483
5	0.00057	0.000324	7.264026
<b>Nilai c rata-rata</b>			4.264

#### 4.1.2 Tower turbin angin dan nasel

Tower yang digunakan dalam penelitian ini sebanyak tiga tipe, yaitu tower lurus, tower bertingkat, dan tower taper. Ketiga tower ini terbuat dari material baja. Sama halnya dengan meja getar, parameter yang digunakan dalam penelitian ini adalah massa tower, konstanta kekakuan maupun redaman dari masing-masing tower. Konstanta kekakuan pada tower sebelumnya telah dijelaskan pada Bab 3. Sedangkan untuk menentukan konstanta redaman tower digunakan persamaan *incremental degreement* dengan cara memberikan simpangan awal pada tower kemudian tower dibiarkan bergetar bebas. Respon getaran yang dihasilkan kemudian ditangkap dan ditampilkan oleh akselerometer dan osiloskop. Gambar 4.4 menunjukkan grafik respon getaran dari tower taper setelah mengalami *filtering* dan *smoothing*.



Gambar 4. 4 Grafik hasil pengukuran getaran bebas tower dan nasel dengan *filtering* dan *smoothing*

Pengolahan data pada Gambar 4.4 dilakukan dengan mencari nilai amplitudo rata-rata dari sebuah puncak dan sebuah lembah yang berdekatan ( $a_n$ ). Kemudian mencari amplitudo rata-rata dari sebuah puncak dan lembar berikutnya ( $a_{n+1}$ ). Dari kedua nilai tersebut ( $a_n$  dan  $a_{n+1}$ ) kemudian dimasukkan ke dalam persamaan *incemental degreement*. Tabel 4.3 merupakan data hasil pengujian

konstanta redaman dari tower dan nasel. Berikut ini adalah contoh langkah-langkah yang dilakukan untuk melakukan perhitungan mencari nilai redaman tower.

- Menghitung rata-rata dari amplitudo pertama ( $a_n$ ):

$$a_n = \frac{puncak_n + lembah_n}{2}$$

$$a_n = \frac{0,008657 + (-0,005435)}{2}$$

$$a_n = 0,001611 \text{ volt}$$

- Menghitung rata-rata amplitudo kedua ( $a_{n+1}$ ):

$$a_{n+1} = \frac{puncak_{n+1} + lembah_{n+1}}{2}$$

$$a_n = \frac{0,002464 + (-0,001246)}{2}$$

$$a_n = 0,000609 \text{ volt}$$

Tabel 4. 3 Data hasil pengujian konstanta redaman tower dan nasel

Data ke-	$a_n$ (volt)	$a_{n+1}$ (volt)	Nilai c (Ns/m)
1	0.001611	0.000609	73.73212
2	0.000609	0.000467	20.34415
3	0.000467	0.000714	32.5094
<b>Nilai c rata-rata</b>			42.195

Dengan cara yang sama, nilai redaman tower tipe lurus dan bertingkat juga didapatkan. Nilainya telah sesuai dengan yang ada di Tabel 3.1

#### 4.1.3 TMD (Tuned Mass Damper)

TMD merupakan suatu massa yang ditambahkan dan diletakkan pada suatu sistem untuk meredam respon getaran dari sistem utama tersebut. Pada turbin angin, TMD diletakkan di atas massa nasel. Gambar 4.5 merupakan massa TMD dan pegas yang diletakkan di atas massa nasel. Parameter yang digunakan dalam TMD ini adalah massa TMD dan konstanta pegas TMD. Adapun cara mendapatkan massa TMD adalah dengan menimbanginya. Sedangkan untuk mendapatkan konstanta pegasnya digunakan rumus sebagai berikut.

$$k = \frac{G.d^4}{8.n.D^3} \quad 4.7$$

dimana  $G$  = Modulus shear ( $N/m^2$ )

$d$  = diameter kawat (m)

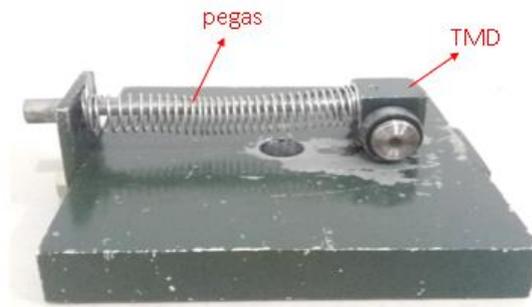
$n$  = jumlah lilitan kawat

$D$  = Diameter pegas (m)

Berdasarkan material yang digunakan untuk pegas yaitu kawat baja maka nilai modulus shear yang digunakan adalah  $G=7,72 \times 10^{10} N/m^2$ , diameter kawat adalah  $d = 0,001$  m, diameter pegas adalah  $D= 0.015$  m, dan jumlah lilitan kawat adalah 30 lilitan. Maka nilai konstanta kekakuan pegas yang didapatkan adalah:

$$k = \frac{7,72 \cdot 10^{10} \cdot 0,001^4}{8 \cdot 30 \cdot 0,015^3} \quad 4.8$$

$$k = 95,3086 N/m \quad 4.9$$



Gambar 4. 5 TMD dan pegas TMD

## 4.2 Pemodelan Matematis Sistem Turbin Angin

Pada Sub-Bab ini akan dibahas mengenai cara mendapatkan frekuensi natural dari ketiga variasi, yaitu tower lurus, tower bertingkat, dan tower taper. Untuk mendapatkan frekuensi natural digunakan persamaan gerak yang telah dijabarkan di subbab 3.3. Dalam subbab ini hanya akan dibahas cara mencari frekuensi natural pada variasi ketiga, yaitu tower taper, sedangkan variasi lainnya dilakukan dengan cara yang sama dan hasilnya ditabelkan pada Tabel 4.4.

Tabel 4. 4 Data frekuensi natural dari setiap variasi

	Tower lurus		Tower bertingkat		Tower taper	
	Tanpa TMD	Dengan TMD	Tanpa TMD	Dengan TMD	Tanpa TMD	Dengan TMD
$\omega_1$	3,9128 <i>rad/s</i>	3,8353 <i>rad/s</i>	3,9224 <i>rad/s</i>	2,8074 <i>rad/s</i>	3,91733 <i>rad/s</i>	3.88125 <i>rad/s</i>
$\omega_2$	62,3639 <i>rad/s</i>	20,7899 <i>rad/s</i>	137,5687 <i>rad/s</i>	20,4378 <i>rad/s</i>	63,5738 <i>rad/s</i>	20.4215 <i>rad/s</i>
$\omega_3$	-	62,9571 <i>rad/s</i>	310,1063 <i>rad/s</i>	137,5709 <i>rad/s</i>	-	63.6842 <i>rad/s</i>
$\omega_4$	-	-	-	310,1063 <i>rad/s</i>	-	-

#### 4.2.1 Turbin angin struktur tower taper tanpa TMD

Persamaan 3.9 dan 3.10 dapat dikemas men menjadi persamaan matriks sebagai berikut.

$$[M] = \begin{bmatrix} m_s & 0 \\ 0 & m_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_s \\ \ddot{x}_n \end{Bmatrix} \quad 4. 10$$

$$[C] = \begin{bmatrix} (c_s + c_t) & -c_t \\ -c_t & c_t \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_s \\ \dot{x}_n \end{Bmatrix} \quad 4. 11$$

$$[K] = \begin{bmatrix} (k_s + k_t) & -k_t \\ -k_t & k_t \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_s \\ x_n \end{Bmatrix} \quad 4. 12$$

Persamaan fundamental yang digunakan yaitu:

$$[M]\ddot{x} + [C]\dot{x} + [K]x = F(t) \quad 4. 13$$

Nilai frekuensi natural dari suatu sistem hanya didapatkan dari nilai  $k_{eq}$  dan  $m_{eq}$  sehingga matriks  $[C]\dot{x}$  dan  $F(t)$  dapat diabaikan. Selanjutnya persamaan diatas dapat menjadi persamaan sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} m_s & 0 \\ 0 & m_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_s \\ \ddot{x}_n \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} (k_s + k_t) & -k_t \\ -k_t & k_t \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_s \\ x_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad 4. 14$$

dimana:

$$x(t) = X \cos \omega t$$

$$\dot{x}(t) = -X\omega \sin \omega t$$

$$\ddot{x}(t) = -X\omega^2 \cos \omega t$$

Persamaan 4.14 dapat berubah menjadi,

$$\begin{bmatrix} (k_s + k_t) - \omega^2 m_s & -k_t \\ -k_t & k_t - m_n \omega^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_s \cos(\omega t + \phi) \\ x_n \cos(\omega t + \phi) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad 4.15$$

Menggunakan analisa fundamental, kemudian menentukan determinan dari matriks dari persamaan 4.15.

$$\det \begin{vmatrix} (k_s + k_t) - \omega^2 m_s & -k_t \\ -k_t & k_t - m_n \omega^2 \end{vmatrix} = 0 \quad 4.16$$

$$((k_s + k_t) - \omega^2 m_s)(k_t - m_n \omega^2) - (-k_t)(-k_t) = 0 \quad 4.17$$

$$((k_s + k_t)k_t - k_t \omega^2 m_s - (k_s + k_t)m_n \omega^2 + m_s m_n \omega^4) - k_t^2 = 0 \quad 4.18$$

$$m_s m_n \omega^4 - ((k_s + k_t)m_n + k_t m_s)\omega^2 - (k_t^2 - (k_s + k_t)k_t) = 0 \quad 4.19$$

Dengan memasukkan nilai parameter berikut,

$$k_t = 12174 \text{ N/m} \quad m_n = 4,769$$

$$k_s = 199,857 \text{ N/m} \quad m_s = 8,226 \text{ kg}$$

didapatkan persamaan kuadrat sebagai berikut, dimana  $\lambda = \omega^2$ ,

$$39,229794 \lambda^2 - 159.154,248 \lambda + 2.433.059,118 = 0 \quad 4.20$$

Dengan menggunakan rumus kuadratis, dapat diperoleh nilai frekuensi natural dari sistem model turbin angin tanpa *tuned mass damper*.

$$\lambda_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad 4.21$$

$$\lambda_1 = 15,3454722 \quad 4.22$$

$$\lambda_2 = 4041,628368 \quad 4.23$$

$$\omega_1 = \sqrt{\lambda_1} = 3,91733 \text{ rad/s} \quad 4.24$$

$$\omega_2 = \sqrt{\lambda_2} = 63,5738 \text{ rad/s} \quad 4.25$$

#### 4.2.2 Turbin angin struktur tower taper dengan TMD

Persamaan 3.9, 3.13, dan 3.15 dapat dikemas men menjadi persamaan matriks sebagai berikut.

$$[M] = \begin{bmatrix} m_s & 0 & 0 \\ 0 & m_n & 0 \\ 0 & 0 & m_a \end{bmatrix} \quad 4.26$$

$$[C] = \begin{bmatrix} (c_s + c_t) & -c_t & 0 \\ -c_t & (c_t + c_a) & -c_a \\ 0 & -c_a & c_a \end{bmatrix} \quad 4.27$$

$$[K] = \begin{bmatrix} (k_s + k_t) & -k_t & 0 \\ -k_t & (k_t + k_a) & -k_a \\ 0 & -k_a & k_a \end{bmatrix} \quad 4.28$$

Dengan menggunakan persamaan fundamental seperti pada persamaan 4.13 didapatkan persamaan gerak dalam bentuk matriks sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} m_s & 0 & 0 \\ 0 & m_n & 0 \\ 0 & 0 & m_a \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_s \\ \ddot{x}_n \\ \ddot{x}_a \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} (k_s + k_t) & -k_t & 0 \\ -k_t & (k_t + k_a) & -k_a \\ 0 & -k_a & k_a \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_s \\ x_n \\ x_a \end{Bmatrix} = 0 \quad 4.29$$

dimana:

$$x(t) = X \cos \omega t$$

$$\dot{x}(t) = -X\omega \sin \omega t$$

$$\ddot{x}(t) = -X\omega^2 \cos \omega t$$

Persamaan 4.29 dapat berubah menjadi,

$$\begin{bmatrix} (k_s + k_t) - m_s \omega^2 & -k_t & 0 \\ -k_t & (k_t + k_a) - m_n \omega^2 & -k_a \\ 0 & -k_a & k_a - m_a \omega^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_s \cos(\omega t + \phi) \\ x_n \cos(\omega t + \phi) \\ x_a \cos(\omega t + \phi) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad 4.30$$

Menggunakan analisa fundamental, kemudian menentukan determinan dari matriks dari persamaan 4.30.

$$\det \begin{vmatrix} (k_s + k_t) - m_s \omega^2 & -k_t & 0 \\ -k_t & (k_t + k_a) - m_n \omega^2 & -k_a \\ 0 & -k_a & k_a - m_a \omega^2 \end{vmatrix} = 0 \quad 4.31$$

Dengan cara yang sama seperti pada subbab 4.2.1 dan dengan memasukkan nilai parameter berikut,

$$k_t = 12174 \text{ N/m} \quad m_n = 4,769 \text{ kg}$$

$$k_s = 199,857 \text{ N/m} \quad m_s = 8,226 \text{ kg}$$

$$k_a = 95,30864 \text{ N/m} \quad m_a = 0,232 \text{ kg}$$

didapatkan persamaan kuadrat sebagai berikut, dimana  $\lambda = \omega^2$ ,

$$-9,10131 \lambda^3 + 40.844,6139 \lambda^2 - 16.006.850,48 \lambda + 231.891555,6 = 0$$

Maka didapatkan nilai frekuensi natural dari sistem model turbin angin dengan *tuned mass damper*.

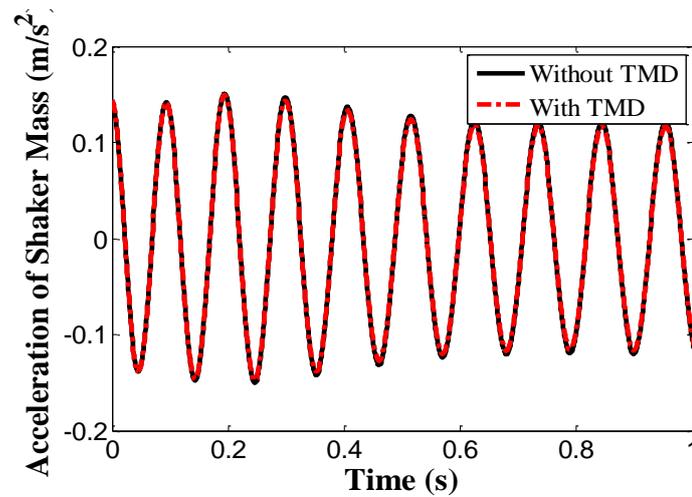
$$\begin{aligned}\lambda_1 = 15,0641268 & \quad \rightarrow \quad \omega_1 = \sqrt{\lambda_1} = 3,88125 \text{ rad/s} \\ \lambda_2 = 417,0366325 & \quad \rightarrow \quad \omega_2 = \sqrt{\lambda_2} = 20,4215 \text{ rad/s} \\ \lambda_3 = 4055,672309 & \quad \rightarrow \quad \omega_3 = \sqrt{\lambda_3} = 63,6842 \text{ rad/s}\end{aligned}$$

### 4.3 Blok Diagram

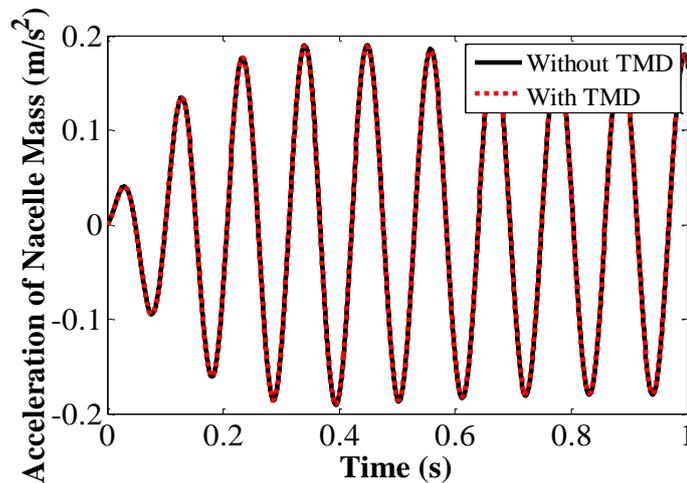
Untuk menyelesaikan simulasi dalam penelitian ini maka persamaan matematis yang telah diperoleh sebelumnya disajikan dalam bentuk blok-blok diagram menggunakan software Matlab dan Simulink. Terdapat dua jenis blok diagram, yang pertama adalah blok diagram dari sistem tanpa TMD dan yang kedua adalah sistem dengan TMD. Pada variasi 1 dan 3 memiliki jumlah dof yang sama sehingga blok diagramnya sama saja. Sedangkan variasi 2 memiliki jumlah dof berbeda, yaitu 3 dof. Blok diagram sistem tanpa TMD pada variasi 1-3 terdapat di Lampiran 1, sedangkan blok diagram sistem dengan TMD pada variasi 1-3 terdapat di Lampiran 2.

### 4.4 Analisis Hasil Simulasi

Dalam subbab ini akan dibahas hasil yang didapatkan dari simulasi. Parameter TMD yang digunakan dalam variasi 1 hingga variasi 3 sesuai dengan yang ada pada Tabel 3.1. Variasi 1 dan variasi 2 telah dibahas pada penelitian sebelumnya. Sehingga pada laporan penelitian ini hanya akan membahas variasi 3. Hasil simulasi variasi 1 [16] dan 2 [17] dengan parameter yang sama dapat dilihat pada Lampiran 3. Frekuensi eksitasi yang digunakan dalam simulasi ini juga telah disesuaikan dengan frekuensi eksitasi pada eksperimen yaitu 9,136 Hz atau setara dengan 57,403 rad/s.



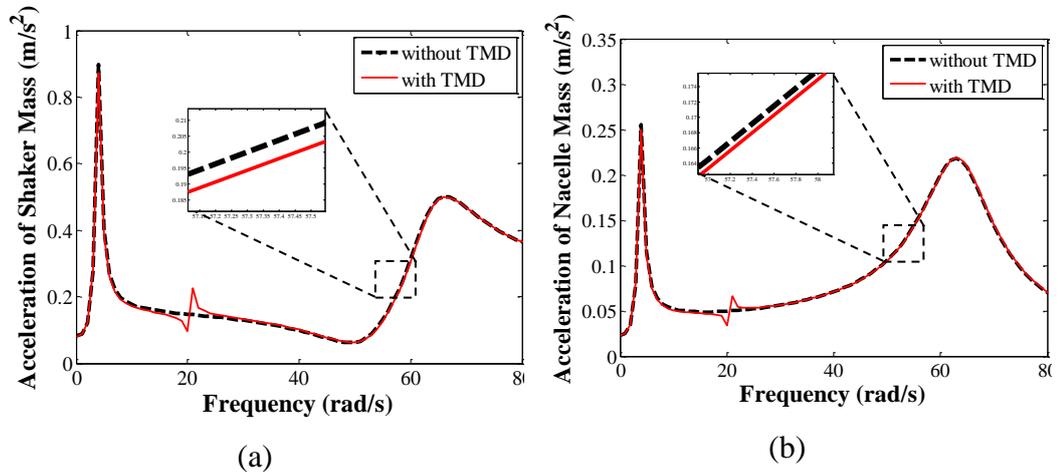
Gambar 4. 6 Hasil simulasi respon percepatan massa meja getar



Gambar 4. 7 Hasil simulasi respon percepatan massa tower dan nasek

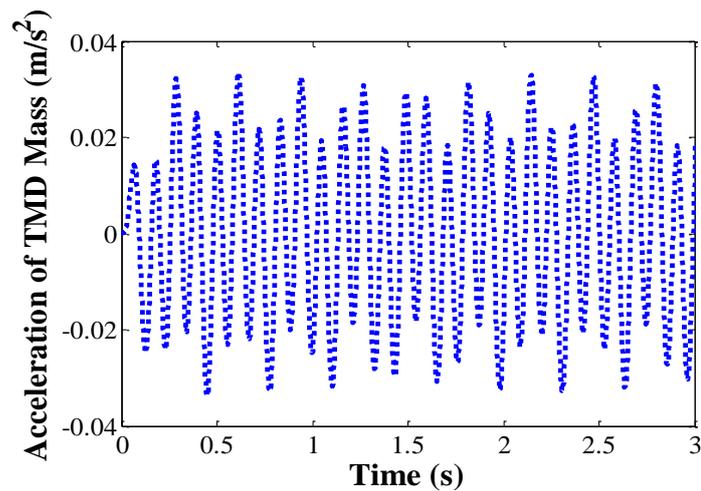
Gambar 4.6 dan Gambar 4.7 berturut-turut menunjukkan hasil simulasi respon percepatan untuk massa meja getar dan massa tower & nasek. Waktu yang dilakukan dalam simulasi adalah 10 detik, namun yang ditampilkan hanya 1 detik agar grafiknya lebih mudah dilihat. Nilai RMS pada meja getar sebelum diberi TMD adalah  $0,2034 \text{ m/s}^2$ , sedangkan setelah diberi TMD turun menjadi  $0,1976 \text{ m/s}^2$ . Sedangkan nilai RMS pada tower dan nasek sebelum diberi TMD adalah  $0,1691 \text{ m/s}^2$ , sedangkan setelah diberi TMD turun sedikit menjadi  $0,1679 \text{ m/s}^2$ . Hal ini dapat dijelaskan menggunakan *frequency response*. Dalam respon frekuensi terlihat bahwa baik massa nasek maupun massa meja getar memiliki respon yang

turun setelah diberi TMD, walaupun penurunannya tidak signifikan. Gambar 4.8 merupakan respon frekuensi dari massa meja getar dan massa tower & nasek.



Gambar 4. 8 Domain frekuensi (a) massa meja getar (b) massa tower dan nasek

Gambar 4.9 menunjukkan hasil respon percepatan dari massa TMD. Nilai RMS yang didapat adalah sebesar 1,4919  $m/s^2$ . Nilai RMS yang dimiliki TMD cukup besar, hal ini dikarenakan TMD dapat dikatakan menggantikan getaran dari sistem lainnya, sehingga sistem lainnya memiliki respon yang menurun.



Gambar 4. 9 Hasil simulasi respon percepatan massa TMD

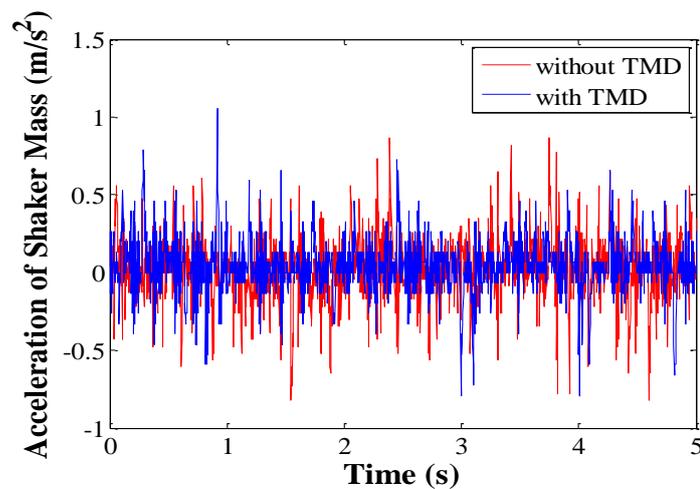
Selain respon percepatan, respon perpindahan maupun kecepatan juga didapatkan dari simulasi ini. Gambar grafik respon perpindahan dan kecepatan berada di Lampiran 4. Tabel 4.5 menunjukkan rangkuman nilai RMS dari perpindahan dan kecepatan di setiap tinjauan massa. Dari tabel tersebut menunjukkan bahwa, baik massa meja getar maupun massa tower & nasek, semua respon dinamis dapat tereduksi dengan baik setelah penambahan TMD.

Tabel 4. 5 Rangkuman nilai RMS dari respon perpindahan dan kecepatan

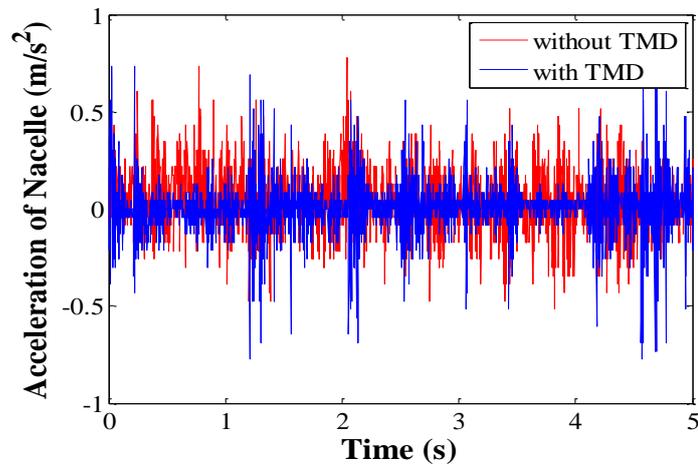
Simulasi	<i>Shaker</i>			<i>Nacelle</i>			TMD
	Tanpa TMD	Dengan TMD	reduksi (%)	Tanpa TMD	Dengan TMD	reduksi (%)	
Kecepatan (m/s)	0.2999	0.2913	2.8655	0.8826	0.8763	0.7086	0.1607
Perpindahan (m)	0.0056	0.0055	2.6193	0.0155	0.0154	0.7133	0.0291

#### 4.5 Analisis Hasil Eksperimen

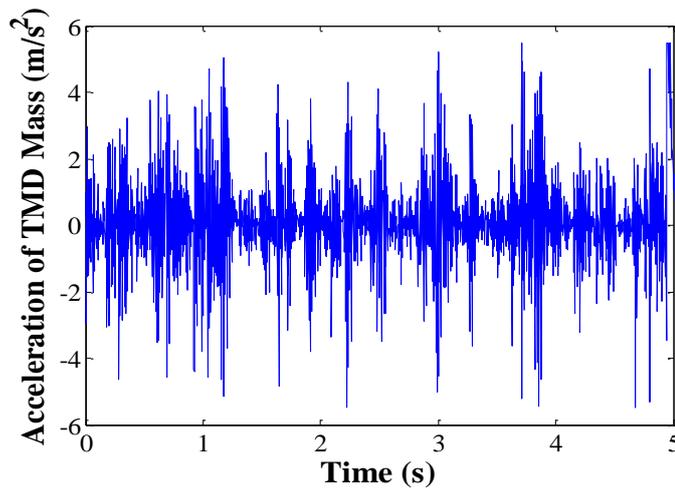
Dalam subbab ini akan dibahas hasil yang didapatkan dari eksperimen. Variasi 1 dan variasi 2 telah dibahas pada penelitian sebelumnya. Sehingga pada laporan penelitian ini hanya akan membahas variasi 3. Hasil eksperimen variasi 1 dan 2 dapat dilihat pada Lampiran 5. Frekuensi eksitasi saat pengujian adalah 9,136 Hz atau setara dengan 57,403 rad/s.



Gambar 4. 10 Hasil eksperimen respon percepatan massa meja getar



Gambar 4. 11 Hasil eksperimen respon percepatan massa tower dan nasek



Gambar 4. 12 Hasil eksperimen respon percepatan massa TMD

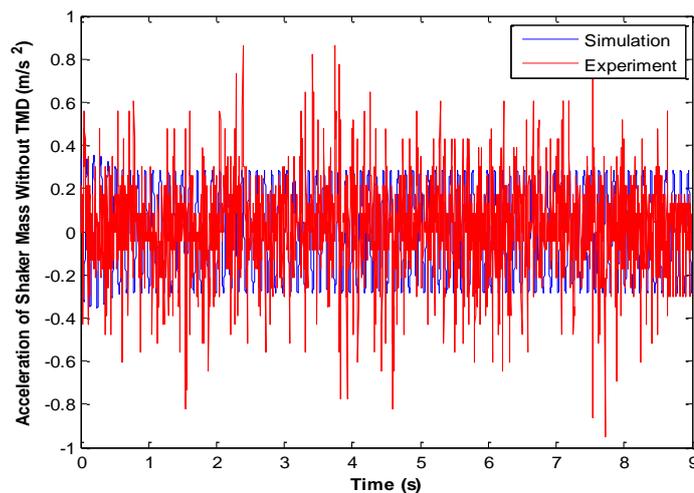
Gambar 4.10 dan Gambar 4.11 berturut-turut menunjukkan hasil eksperimen respon percepatan pada massa meja getar dan tower & nasek. Nilai RMS dari percepatan massa meja getar sebelum diberi TMD sebesar  $0,2161 \text{ m/s}^2$ . Setelah diberi TMD mengalami penurunan respon menjadi  $0,1777 \text{ m/s}^2$ . Penurunan yang terjadi sebesar 17,77%. Sedangkan nilai RMS dari percepatan massa tower dan nasek sebelum diberi TMD sebesar  $0,186 \text{ m/s}^2$ . Namun setelah diberi TMD, respon percepatan mengalami kenaikan sebesar 0,484% menjadi  $0,1869 \text{ m/s}^2$ . Hal ini mungkin saja terjadi mengingat banyak faktor luar yang dapat menyumbang getaran, misalnya kabel probe yang mengganggu gerakan TMD sehingga

dimungkinkan respon percepatan pada massa tower dan nasel bertambah. Sedangkan pada Gambar 4.12 menunjukkan respon percepatan pada massa TMD. Nilai RMS yang dihasilkan selama 9 detik adalah sebesar 1,5498 m/s<sup>2</sup>.

#### 4.6 Perbandingan Hasil Simulasi dan Eksperimen

##### 4.6.1 Perbandingan hasil simulasi dan eksperimen sistem turbin angin tanpa TMD

Setelah mendapatkan hasil simulasi dan eksperimen, selanjutnya adalah membandingkan keduanya, apakah telah sesuai atau tidak. Jika tidak, maka akan dianalisis penyebabnya. Gambar 4.13 dan Gambar 4.14 menunjukkan grafik respon percepatan dari massa meja getar dan massa tower & nasel sebelum diberi TMD.

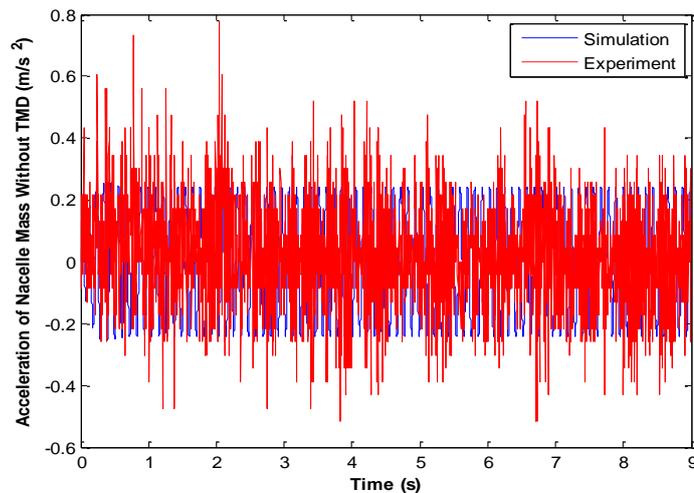


Gambar 4. 13 Perbandingan hasil simulasi dan hasil eksperimen respon percepatan massa meja getar sebelum diberi TMD

Gambar 4.13 menunjukkan perbedaan hasil simulasi dengan hasil eksperimen dari massa meja getar sebelum diberi TMD. Dari grafik tersebut didapatkan nilai RMS simulasi sebesar 0,2034 m/s<sup>2</sup>, sedangkan RMS eksperimen sebesar 0,2161 m/s<sup>2</sup>. Besarnya eror yang terjadi adalah sebagai berikut.

$$\%_{error} = \left| \frac{0,2034 - 0,2161}{0,2034} \right| \times 100\% = 6,24\%$$

Pada perhitungan di atas terlihat bahwa error yang terjadi pada RMS percepatan sebesar 6,24%. Besarnya error yang terjadi ini dapat diakibatkan oleh banyak faktor, diantaranya adalah *noise* yang diakibatkan oleh alat uji itu sendiri maupun adanya getaran dari meja yang digunakan saat melakukan pengujian. Hal ini menyebabkan respon getaran yang dihasilkan juga semakin tinggi.



Gambar 4. 14 Perbandingan hasil simulasi dan hasil eksperimen respon percepatan massa tower & naseel sebelum diberi TMD

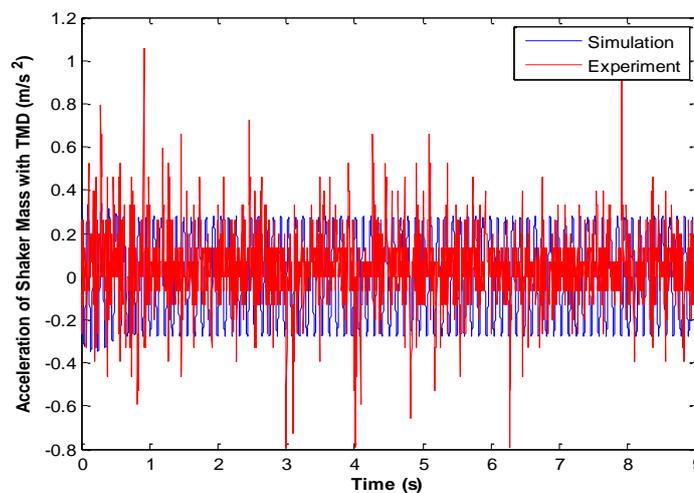
Gambar 4.14 menunjukkan perbedaan hasil simulasi dengan hasil eksperimen dari massa tower & naseel sebelum diberi TMD. Dari grafik tersebut didapatkan nilai RMS simulasi sebesar  $0,1679 \text{ m/s}^2$ , sedangkan RMS eksperimen sebesar  $0,1869 \text{ m/s}^2$ . Besarnya eror yang terjadi adalah sebagai berikut.

$$\%_{error} = \left| \frac{0,1679 - 0,1869}{0,1679} \right| \times 100\% = 9,99 \%$$

Pada perhitungan di atas terlihat bahwa error yang terjadi pada RMS percepatan sebesar 9,99%. Besarnya error yang terjadi ini dapat diakibatkan oleh banyak faktor, diantaranya adalah *noise* yang diakibatkan oleh alat uji itu sendiri maupun adanya getaran dari meja yang digunakan saat melakukan pengujian. Hal ini menyebabkan respon getaran yang dihasilkan juga semakin tinggi.

#### 4.6.2 Perbandingan hasil simulasi dan eksperimen sistem turbin angin dengan TMD

Setelah mendapatkan hasil simulasi dan eksperimen, selanjutnya adalah membandingkan keduanya, apakah telah sesuai atau tidak. Jika tidak, maka akan dianalisis penyebabnya. Gambar 4.15, Gambar 4.16 dan Gambar 4.17 menunjukkan grafik respon percepatan dari massa meja getar dan massa tower & nasek setelah diberi TMD, serta massa TMD.



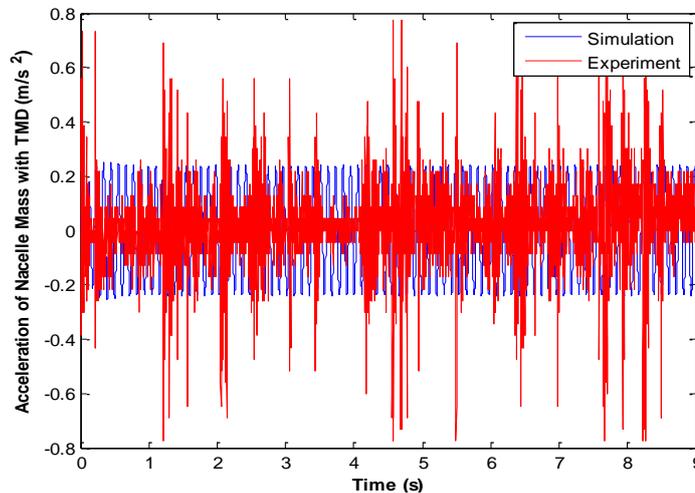
Gambar 4. 15 Perbandingan hasil simulasi dan hasil eksperimen respon percepatan massa meja getar setelah diberi TMD

Gambar 4.15 menunjukkan perbedaan hasil simulasi dengan hasil eksperimen dari massa meja getar setelah diberi TMD. Dari grafik tersebut didapatkan nilai RMS simulasi sebesar  $0,1976 \text{ m/s}^2$ , sedangkan RMS eksperimen sebesar  $0,1777 \text{ m/s}^2$ . Besarnya error yang terjadi adalah sebagai berikut.

$$\%_{error} = \left| \frac{0,1976 - 0,1777}{0,1976} \right| \times 100\% = 10,1\%$$

Pada perhitungan di atas terlihat bahwa error yang terjadi pada RMS percepatan sebesar 10,1%. Besarnya error yang terjadi ini dapat diakibatkan oleh banyak faktor, diantaranya adalah *noise* yang diakibatkan oleh alat uji itu sendiri maupun adanya getaran dari meja yang digunakan saat melakukan

pengujian. Hal ini menyebabkan respon getaran yang dihasilkan juga semakin tinggi.

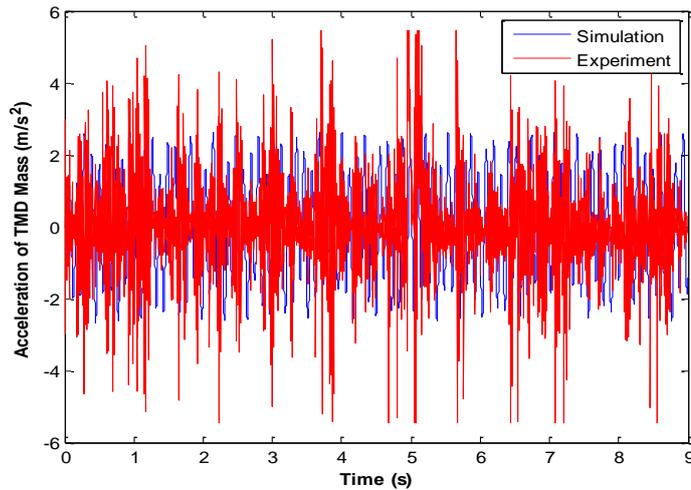


Gambar 4. 16 Perbandingan hasil simulasi dan hasil eksperimen respon percepatan massa tower & naseel setelah diberi TMD

Gambar 4.16 menunjukkan perbedaan hasil simulasi dengan hasil eksperimen dari massa tower & naseel setelah diberi TMD. Dari grafik tersebut didapatkan nilai RMS simulasi sebesar  $0,1679 \text{ m/s}^2$ , sedangkan RMS eksperimen sebesar  $0,1869 \text{ m/s}^2$ . Besarnya error yang terjadi adalah sebagai berikut.

$$\%_{\text{error}} = \left| \frac{0,1679 - 0,1869}{0,1679} \right| \times 100\% = 11,32 \%$$

Pada perhitungan di atas terlihat bahwa error yang terjadi pada RMS percepatan sebesar 11,32%. Besarnya error yang terjadi ini dapat diakibatkan oleh banyak faktor, diantaranya adalah *noise* yang diakibatkan oleh alat uji itu sendiri maupun adanya getaran dari meja yang digunakan saat melakukan pengujian. Hal ini menyebabkan respon getaran yang dihasilkan juga semakin tinggi.



Gambar 4. 17 Perbandingan hasil simulasi dan hasil eksperimen respon percepatan massa TMD

Gambar 4.17 menunjukkan perbedaan hasil simulasi dengan hasil eksperimen dari massa TMD. Dari grafik tersebut didapatkan nilai RMS simulasi sebesar  $1,4919 \text{ m/s}^2$ , sedangkan RMS eksperimen sebesar  $1,5498 \text{ m/s}^2$ . Besarnya eror yang terjadi adalah sebagai berikut.

$$\%_{error} = \left| \frac{1,4919 - 1,5498}{1,4919} \right| \times 100\% = 3,88 \%$$

Perbedaan yang terjadi antara hasil simulasi dan eksperimen pada massa TMD dapat dikatakan relatif kecil. Sehingga dapat dikatakan untuk respon percepatan TMD telah sesuai dengan hasil simulasi. Sedangkan untuk tinjauan massa lainnya tidak dapat dikatakan sesuai dengan simulasi. Hal ini dikarenakan besarnya error yang terjadi lebih dari 5%.

## 4.7 Pembahasan

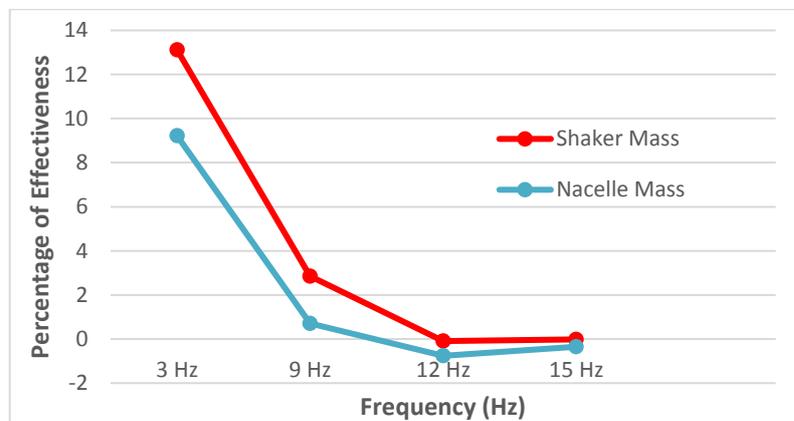
### 4.7.1 Hasil simulasi dengan variasi frekuensi kerja

Selain melakukan simulasi dan eksperimen di frekuensi  $9,136 \text{ Hz}$ , dalam penelitian ini juga dilakukan variasi frekuensi kerja. Variasi frekuensi yang dilakukan diantaranya  $3 \text{ Hz}$  merupakan frekuensi angin,  $9 \text{ Hz}$  merupakan frekuensi kerja saat melakukan eksperimen,  $12 \text{ Hz}$  dan  $15 \text{ Hz}$  yang merupakan kecepatan angin di atas rata-rata, yaitu angin topan dan angin puting beliung serta bencana alam gempa bumi. Berikut ini merupakan tabel

nilai RMS pada massa meja getar dan massa tower & nasek terhadap variasi frekuensi.

Tabel 4. 6 Nilai RMS dari tinjauan massa dengan variasi frekuensi

	Meja getar		Tower & nasek	
	sebelum	sesudah	sebelum	sesudah
<b>3 Hz</b>	0.0069	6.00E-03	0.004	3.60E-03
<b>9 Hz</b>	0.2034	0.1976	0.1691	0.1679
<b>12 Hz</b>	0.2953	0.2956	0.1217	0.1227
<b>15 Hz</b>	0.3519	0.352	0.0737	0.0739



Gambar 4. 18 Grafik tingkat keefektifan penambahan TMD variasi frekuensi

Dari Tabel 4.6 dapat kita ketahui perbedaan sebelum dan sesudah menggunakan TMD pada variasi frekuensi kerja. Besarnya penurunan respon setelah pemberian TMD dapat dilihat dari Gambar 4.18. Garis yang berwarna merah menunjukkan respon pada massa meja getar, sedangkan garis yang berwarna biru menunjukkan respon pada massa tower & nasek.

Pada gambar tersebut memperlihatkan bahwa pada massa meja getar maupun massa tower & nasek memiliki trendline yang sama, yaitu menurun seiring dengan bertambahnya frekuensi. Namun setelah 12 Hz respon menunjukkan persentase penurunan yang negatif, dalam artian sebenarnya RMS kedua massa tersebut bertambah setelah diberi TMD. Hal ini dikarenakan pada frekuensi tersebut telah melewati frekuensi natural.

Berdasarkan grafik *frequency response* pada Gambar 4.8 bahwa pada frekuensi di atas  $\pm 10,98$  Hz, penambahan TMD sudah tidak lagi efektif. Selain itu, dari Gambar 4.18 juga dapat menunjukkan bahwa persentase keefektifan paling besar jika turbin angin bekerja pada frekuensi 3 Hz, yaitu pada kecepatan angin.

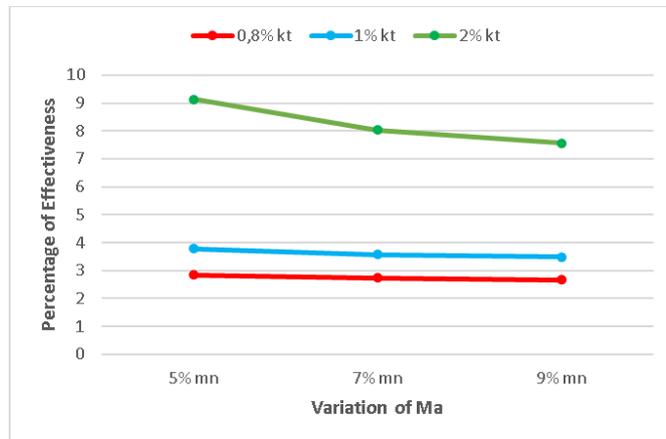
#### 4.7.2 Hasil simulasi dengan variasi $k_a$ dan $m_a$

Selain memvariasikan nilai frekuensi, pada penelitian ini juga dilakukan variasi pada beberapa parameter, yaitu konstanta pegas TMD dan massa TMD. Konstanta pegas yang digunakan dalam Table 3.1 adalah 0,8% dari konstanta kekakuan tower. Sedangkan variasi pegas yang dilakukan adalah 1% dan 2% dari konstanta kekakuan tower. Selain itu, massa TMD yang ada di Tabel 3.1 adalah 5% dari massa tower & nasek. Oleh karena itu variasi massa TMD yang dilakukan adalah 7% dan 9% dari massa tower & nasek. Tabel 4.7 merupakan rangkuman persentase keefektifan penambahan TMD pada massa meja getar saat frekuensi kerja 9 Hz.

Tabel 4. 7 Persentase keefektifan penambahan TMD pada massa meja getar dengan variasi  $k_a$  dan  $m_a$

	5% $m_n$	7% $m_n$	9% $m_n$
0,8% $k_t$	2.8483	2.7307	2.6748
1% $k_t$	3.7752	3.5716	3.4776
2% $k_t$	9.134	8.0308	7.5695

Gambar 4.19 menunjukkan grafik pengaruh variasi konstanta pegas TMD dan massa TMD terhadap persentase keefektifan penambahan TMD. Dari gambar tersebut terlihat garis berwarna merah menunjukkan konstanta pegas yang digunakan adalah 0,8%  $k_t$  atau sekitar 95,30864 N/m. Sedangkan garis berwarna biru menunjukkan konstanta pegas yang digunakan adalah 1%  $k_t$  atau sekitar 121,74 N/m. Garis berwarna hijau menunjukkan konstanta pegas yang digunakan adalah 2%  $k_t$  atau sekitar 243,48 N/m.



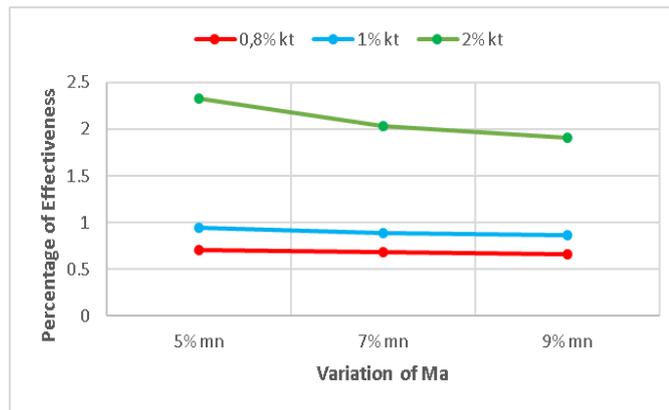
Gambar 4. 19 Grafik variasi  $k_a$  dan  $m_a$  terhadap keefektifan penambahan TMD pada massa meja getar

Ketiga garis tersebut menunjukkan trendline garis yang sama, yaitu menurun seiring bertambahnya massa TMD. Selain itu juga terlihat bahwa pada saat massa TMD yang sama, semakin besar konstanta pegas TMD maka persentase keefektifan yang dihasilkan juga semakin besar. Dari grafik tersebut dapat diambil kesimpulan bahwa pada frekuensi 9 Hz, penambahan konstanta pegas TMD memberikan pengaruh yang signifikan terhadap persentase keefektifan daripada penambahan massa TMD.

Sama halnya dengan massa tower & nasel. Tabel 4.8 menunjukkan persentase keefektifan penambahan TMD pada tinjauan massa tower & nasel dengan memvariasikan nilai  $k_a$  dan  $m_a$ . Untuk memudahkan pembacaan, tabel 4.8 disajikan dalam bentuk grafik, yang dapat dilihat pada Gambar 4.20.

Tabel 4. 8 Persentase keefektifan penambahan TMD pada massa tower & nasel dengan variasi  $k_a$  dan  $m_a$

	5% $m_n$	7% $m_n$	9% $m_n$
<b>0,8% <math>k_t</math></b>	0.7084	0.6786	0.6648
<b>1% <math>k_t</math></b>	0.9423	0.8903	0.8662
<b>2% <math>k_t</math></b>	2.3224	2.0326	1.9111

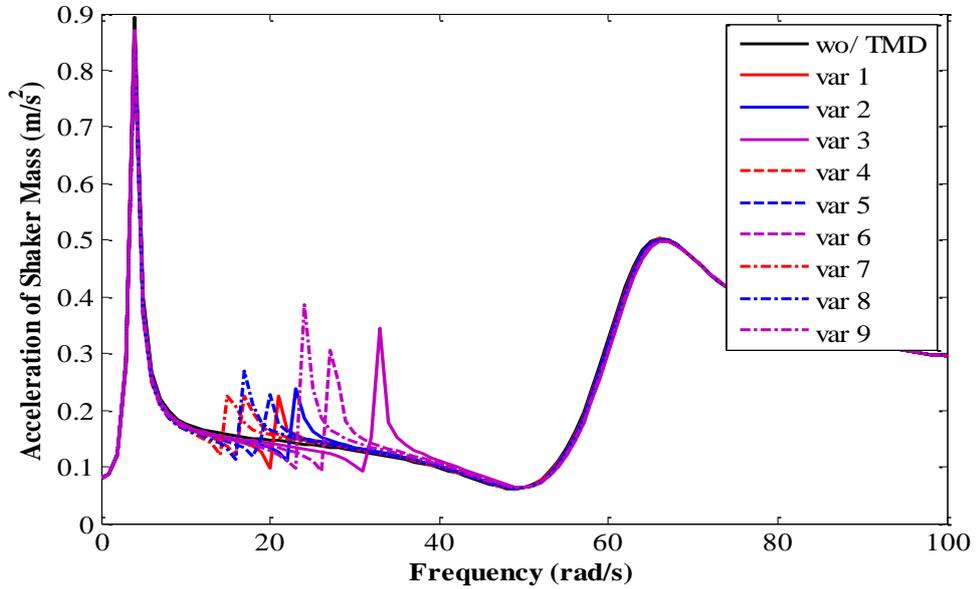


Gambar 4. 20 Grafik variasi  $k_a$  dan  $m_a$  terhadap keefektifan penambahan TMD pada massa tower & nasei

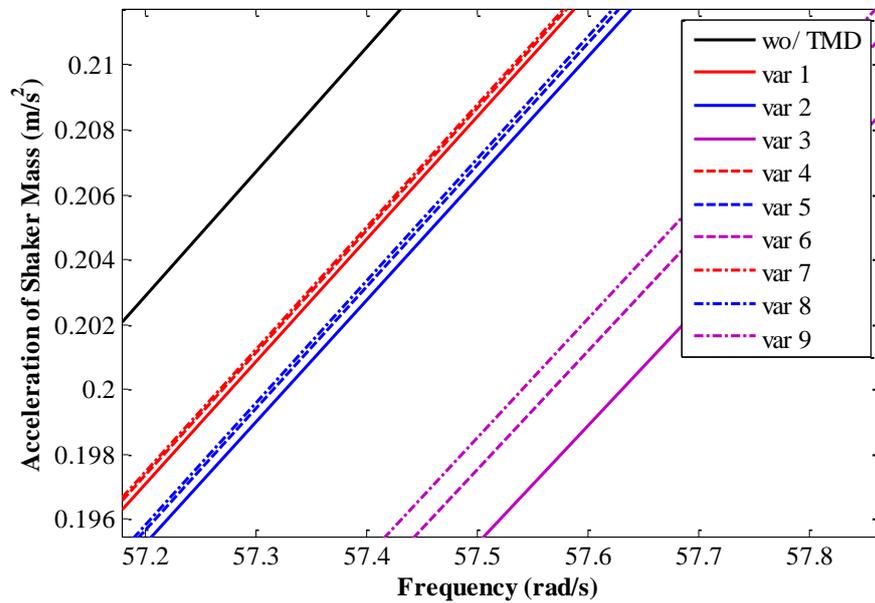
Gambar 2.20 menunjukkan terdapat 3 jenis warna garis. Garis merah menunjukkan konstanta pegas yang digunakan adalah 0,8%  $k_t$  atau sekitar 95,30864 N/m. Sedangkan garis berwarna biru menunjukkan konstanta pegas yang digunakan adalah 1%  $k_t$  atau sekitar 121,74 N/m. Garis berwarna hijau menunjukkan konstanta pegas yang digunakan adalah 2%  $k_t$  atau sekitar 243,48 N/m. Walaupun persentasenya tidak sebesar pada tinjauan massa meja getar, namun respon yang ditunjukkan massa tower & nasei memiliki trendline yang sama, yaitu menurun seiring bertambahnya nilai massa TMD. Sama halnya dengan yang diungkapkan pada pembahasan sebelumnya, bahwa variasi  $k_a$  lebih memiliki pengaruh yang signifikan terhadap persentase keefektifan penambahan TMD pada frekuensi 9 Hz daripada memvariasikan massa TMD itu sendiri.

Hasil menunjukkan bahwa pada kedua tinjauan massa, yaitu meja getar dan tower & nasei, kombinasi  $k_a$  dan  $m_a$  yang paling baik adalah  $k_a=2\%k_t$  dan  $m_a=5\%m_n$ . Hal ini dapat dijelaskan karena frekuensi natural kedua semakin besar dan bergeser ke kanan. Bergesernya frekuensi natural kedua ini menyebabkan grafiknya semakin landai ketika mendekati frekuensi natural ketiga. Hal ini menyebabkan perbedaan yang cukup signifikan antara grafik tanpa TMD dengan grafik dengan TMD dengan kombinasi  $k_a=2\%k_t$  dan  $m_a=5\%m_n$ . Gambar 4.21 menunjukkan grafik frekuensi banding percepatan.

Sedangkan Gambar 4.22 merupakan pembesaran Gambar 4.21 pada daerah sekitar frekuensi 57 rad/s (9 Hz).



Gambar 4. 21 Frekuensi banding percepatan variasi  $k_a$  dan  $m_a$



Gambar 4. 22 Pembesaran pada daerah sekitar frekuensi 57 rad/s

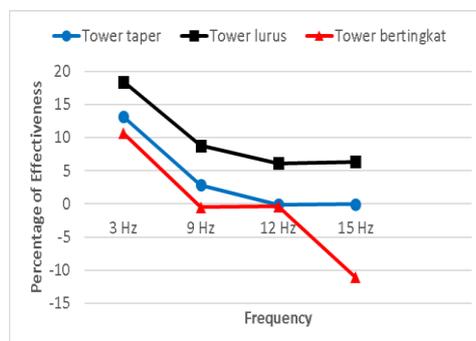
#### 4.7.3 Hasil simulasi dengan variasi $k_t$

Struktur bentuk tower turbin memiliki pengaruh yang signifikan terhadap massa dan juga konstanta kekakuannya. Oleh karena itu, untuk

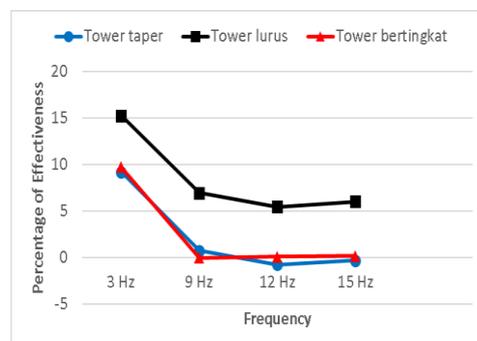
mengetahui pengaruh bentuk tower terhadap respon dinamisnya, variasi yang dilakukan adalah struktur tower lurus, tower bertingkat, dan tower taper. Seperti yang ada pada Tabel 3.1, dapat diketahui nilai parameter kekakuan tower dan massa tower dari tiap variasi. Selanjutnya Tabel 4.9 menunjukkan persentase keefektifan penambahan TMD pada massa meja getar dan massa tower & nasek dari ketiga variasi struktur tower pada variasi frekuensi 3 Hz, 9 Hz, 12 Hz, dan 15 Hz. Untuk memudahkan pembacaan, maka tabel tersebut juga akan disajikan dalam bentuk grafik.

Tabel 4. 9 Persentase keefektifan dengan variasi struktur tower

Variasi Tower	Frekuensi	% Efektif Massa Shaker	% Efektif Massa Nacelle
Tower Lurus	3 Hz	18.394	15.26
	9 Hz	8.8082	6.9412
	12 Hz	6.1031	5.4326
	15 Hz	6.3244	5.9971
Tower Bertingkat	3 Hz	10.652921	9.7315436
	9 Hz	-0.478261	-0.063898
	12 Hz	-0.356653	0.074985
	15 Hz	-11.09551	0.1535874
Tower Taper	3 Hz	13.1141	9.2165
	9 Hz	2.8483	0.7084
	12 Hz	-0.0926	-0.7603
	15 Hz	-0.0181	-0.3466



(a)



(b)

Gambar 4. 23 Grafik persentase keefektifan penambahan TMD variasi bentuk tower (a) massa meja getar (b) massa tower & nasek

Gambar 4.21 menunjukkan terdapat tiga jenis warna berbeda. Warna biru menunjukkan grafik untuk tower taper. Sedangkan untuk warna hitam menunjukkan grafik untuk tower lurus, dan warna merah untuk tower bertingkat. Gambar 4.21(a) untuk massa meja getar dan Gambar 4.21(b) untuk massa tower & nasek.

Pada Gambar 4.21(a) trendline garis dari ketiga variasi tersebut semuanya sama, yaitu menurun seiring bertambahnya frekuensi. Pada frekuensi angin yaitu 3 Hz, ketiga variasi menunjukkan respon yang bagus yaitu berkurang setelah diberi TMD. Variasi terbaik saat frekuensi eksitasi 3 Hz adalah tower lurus, kemudian disusul tower taper dan tower bertingkat. Pada frekuensi 9 Hz, tower lurus dan tower taper dapat dikatakan cukup baik untuk digunakan. Namun respon pada tower bertingkat kurang baik, karena responnya bertambah setelah diberi TMD, mencapai  $\pm 0,478\%$ . Pada frekuensi 12 Hz dan 15 Hz tidak disarankan menggunakan tower bertingkat dan tower taper karena keduanya memiliki respon yang bertambah setelah diberi TMD. Sehingga dapat diambil kesimpulan bahwa tower lurus baik digunakan pada semua variasi frekuensi (dalam hal ini adalah 3 Hz, 9 Hz, 12 Hz, dan 15 Hz).

Pada Gambar 4.21(b) trendline garis dari ketiga variasi tersebut semuanya sama, yaitu menurun seiring bertambahnya frekuensi, namun naik kembali saat frekuensi 15 Hz. Pada frekuensi angin yaitu 3 Hz, ketiga variasi menunjukkan respon yang bagus yaitu berkurang setelah diberi TMD. Variasi terbaik saat frekuensi eksitasi 3 Hz adalah tower lurus, kemudian disusul tower bertingkat dan tower taper. Tower taper memiliki respon getaran yang sama dengan tower lurus. Hal ini disebabkan karena frekuensi natural kedua variasi berdekatan. Sedangkan pada tower bertingkat, analisa pemodelan *dof* nya memiliki sedikit perbedaan daripada kedua variasi tower lainnya. Pada tower bertingkat memiliki respon yang acak dan tidak teratur sehingga tidak dapat diambil kesimpulan yang umum dan menyeluruh. Kesimpulan yang dapat diambil secara umum dan menyeluruh adalah tower lurus memiliki respon getaran yang cukup baik di semua variasi frekuensi (dalam hal ini adalah 3 Hz, 9 Hz, 12 Hz, dan 15 Hz).

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## **BAB 5**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Adapun kesimpulan yang dapat diambil dari Tesis ini adalah:

1. Ada pengaruh penambahan TMD pada struktur turbin angin, diantaranya:
  - a. RMS percepatan massa meja getar sebelum dan sesudah pemberian TMD adalah  $0,2034 \text{ m/s}^2$  dan  $0,1976 \text{ m/s}^2$ , dengan persentase keefektifan sebesar 2,8483%
  - b. RMS percepatan massa tower & nasek sebelum dan sesudah pemberian TMD adalah  $0,1691 \text{ m/s}^2$  dan  $0,1679 \text{ m/s}^2$ , dengan persentase keefektifan sebesar 0,7084%
  - c. RMS percepatan massa TMD adalah  $1,4919 \text{ m/s}^2$
2. Pada frekuensi eksitasi 3 Hz memiliki persentase keefektifan terbesar, baik di massa meja getar maupun massa tower & nasek, yaitu berturut-turut sebesar 13,114% dan 9,217%
3. Variasi  $k_a$  lebih meningkatkan persentase keefektifan penambahan TMD daripada variasi  $m_a$ , dimana  $k_a=2\% k_t$  dan  $m_a=5\% m_n$ , dengan persentase keefektifan sebesar 9.134%
4. Variasi struktur tower lurus lebih baik penggunaannya di semua frekuensi dengan persentase keefektifan yang cukup signifikan, yaitu rata-rata untuk massa meja getar sebesar 9,9% dan untuk massa tower & nasek sebesar 8,41%.
5. Error yang terjadi antara hasil simulasi dengan eksperimen adalah sebagai berikut:
  - a. Massa meja getar tanpa TMD=6,24%
  - b. Massa nasek tanpa TMD=9,99%
  - c. Massa meja getar tanpa TMD=10,1%
  - d. Massa nasek tanpa TMD=11,32%
  - e. Massa TMD=3,88%

## 5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, diperoleh saran sebagai berikut:

1. Memperbaiki desain meja getar agar mampu beroperasi dengan rentang frekuensi yang cukup luas
2. Pada penelitian selanjutnya diharapkan untuk merancang alat eksperimen dengan desain yang lebih matang sehingga hasil eksperimen yang didapatkan dapat lebih mendekati hasil simulasi.
3. Melakukan kalibrasi alat ukur sebelum melakukan pengujian, dalam hal ini akselerometer dan osiloskop
4. Memperbaiki instalasi TMD terhadap massa nasei agar *noise* yang mungkin terjadi berkurang, sehingga error antara hasil eksperimen dan hasil simulasi juga dapat berkurang.

## DAFTAR PUSTAKA

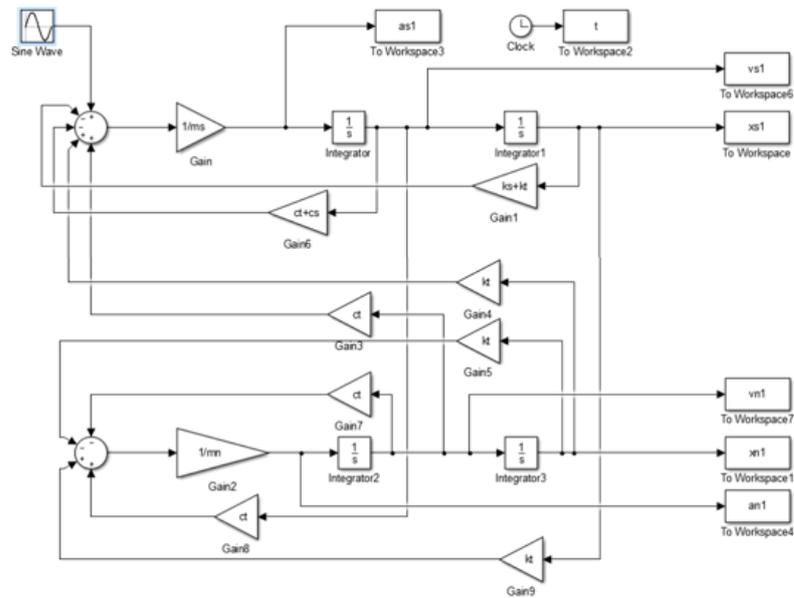
- [1] “Handbook of Energy & Economic Statistic of Indonesia 2012,” 2012.
- [2] Kajian Supply Demand Energy, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2012.
- [3] Indonesia Outlook Energy 2010, Kementerian Energy dan Sumber Daya Mineral, 2010.
- [4] J. Chen dan C. T. Georgakis, “Tuned Rolling-Ball Dampers for Vibration Control in Wind Turbines,” *Journal of Sound and Vibration*, vol. 332, pp. 5271-5282, 2013.
- [5] A. Giaralis dan F. Petrini, “Optimum Design of The Tuned Mass-Damper-Inverter for Serviceability Limit State Performance in Wind-Excited Tall Buildings,” dalam *X International Conference on Structural Dynamics*, Eurodyn, 2017.
- [6] Z. Guenidi, M. Abdeddaim, A. Ounis, M. Shrimali dan T. Datta, “Control of Adjacent Buildings Using Shared Tuned Mass Damper,” dalam *X International Conference on Structural Dynamics*, Eurodyn, 2017.
- [7] D. Saige, J. Engelhardt dan S. Katz, “Application of Eddy Current Damper Technology for Passive Tuned Mass Damper Systems within Footbridges,” dalam *X Internaatinal Conference on Structural Dynamics*, Eurodyn, 2017.
- [8] J. Li, Z. Zhang dan J. Chen, “Experimental Study on Vibration Control of Offshore Wind Turbines Using a Ball Vibration Absorber,” *Energy and Power Engineering*, vol. 4, pp. 153-157, 2012.
- [9] H. Frahm, “Device for Damping Vibrations of Bodies”. Paten 989,958, 18 April 1911.
- [10] D. Hartog JP, *Mechanical Vibrations*, New York: McGraw-Hill, 1956.
- [11] R. Rana dan T. Soong, “Parametric Study and Simplified Design of Tuned Mass Dampers,” *Engineering Structures*, vol. 20, pp. 193-204, 1998.

- [12] S. Rao, *Mechanical Vibration Fifth Edition*, Miami: Pearson Education, Inc, 2011.
- [13] W. E. Solutions, "<https://windenergysolutions.nl/turbines/wes-80/>," [Online].
- [14] M. A. Lackner dan M. A. Rotea, "Passive Structure Control of Offshore Wind Turbines," *Wind Energy*, vol. 14, pp. 373-388, 2011.
- [15] V. R. Alma'i, Wahyudi dan I. Setiawan, "Aplikasi Sensor Accelerometer pada Deteksi Posisi".
- [16] A. A. Rosyada, "Analisis Pengaruh Penambahan Tuned Mass Damper (TMD) terhadap Respon Dinamis Model Turbin Angin Struktur Homogen," 2018.
- [17] N. M. Sudarsono, "Analisis Pengaruh Penambahan Tuned Mass Damper (TMD) terhadap Respon Dinamis Model Turbin Angin Struktur Bertingkat," 2018.

# LAMPIRAN

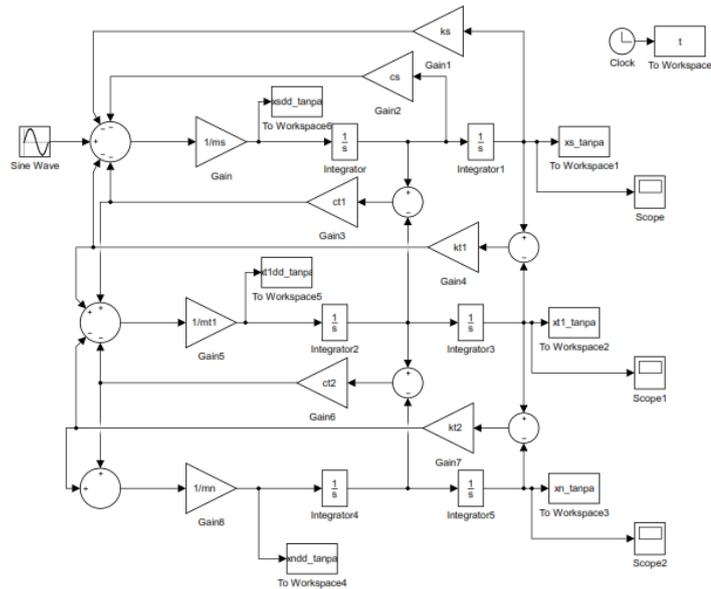
## Lampiran 1 Blok diagram sistem tanpa tmd variasi 1-3

- Variasi 1



Gambar 1. Blok diagram variasi 1 tanpa TMD

- Variasi 2



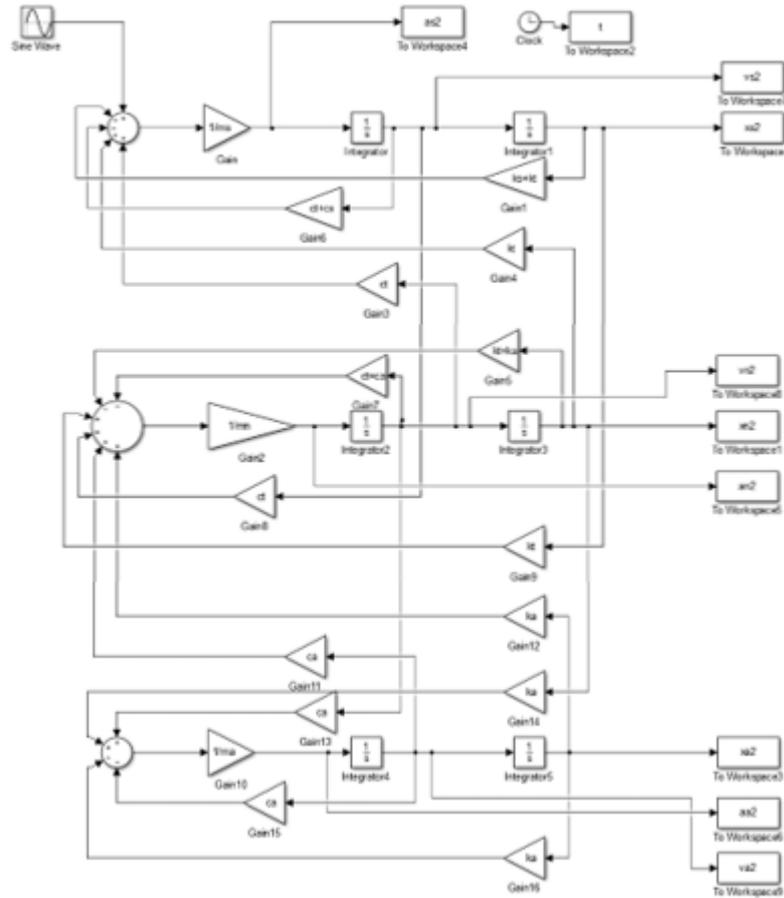
Gambar 2. Blok diagram variasi 2 tanpa TMD

- Variasi 3



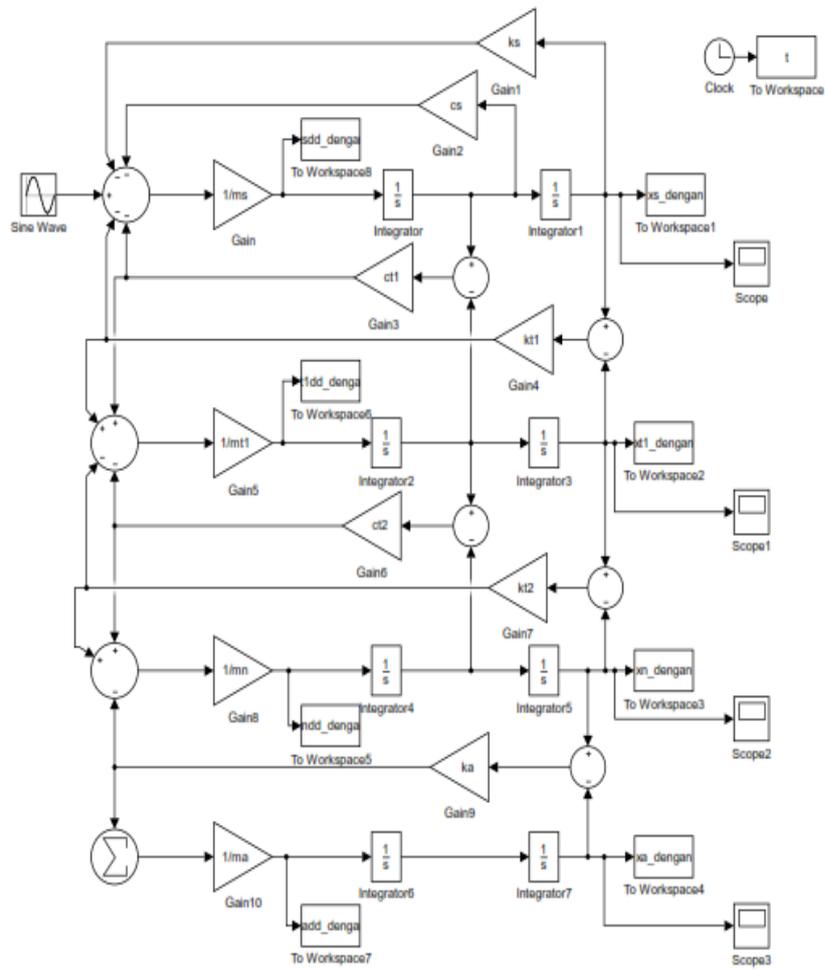
## Lampiran 2 Blok diagram sistem dengan TMD variasi 1-3

- Variasi 1



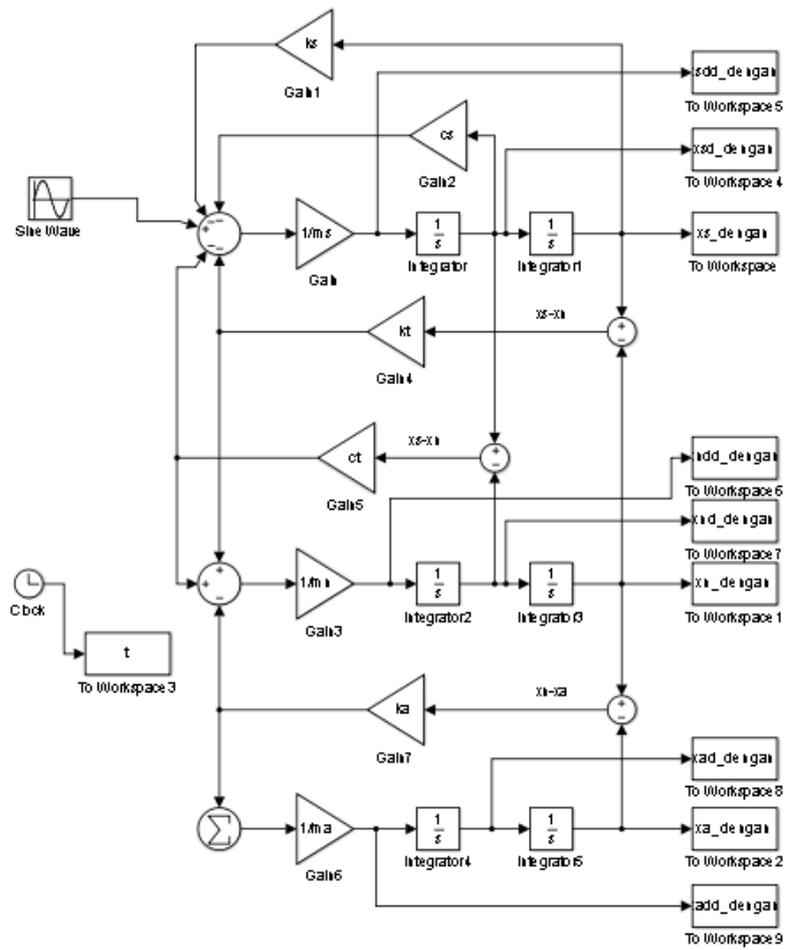
Gambar 4. Blok diagram variasi 1 dengan TMD

- Variasi 2



Gambar 5. Blok diagram variasi 2 dengan TMD

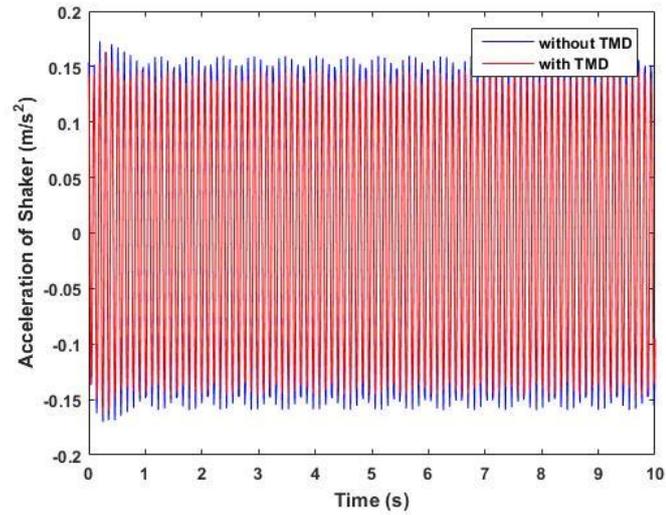
- Variasi 3



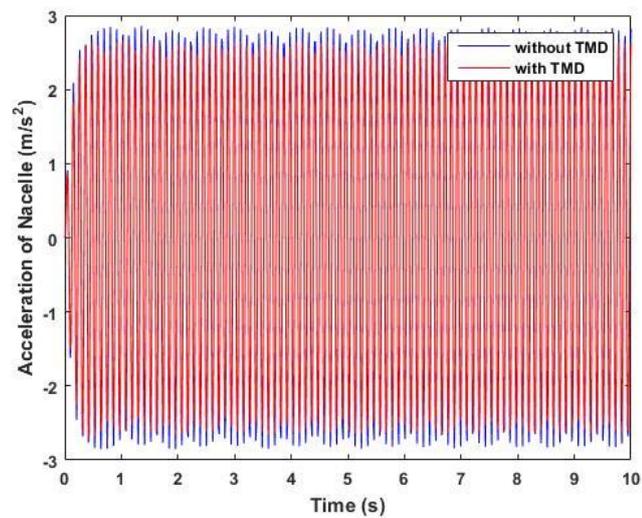
Gambar 6. Blok diagram variasi 3 dengan TMD

### Lampiran 3 Hasil Simulasi Variasi 1 dan Variasi 2

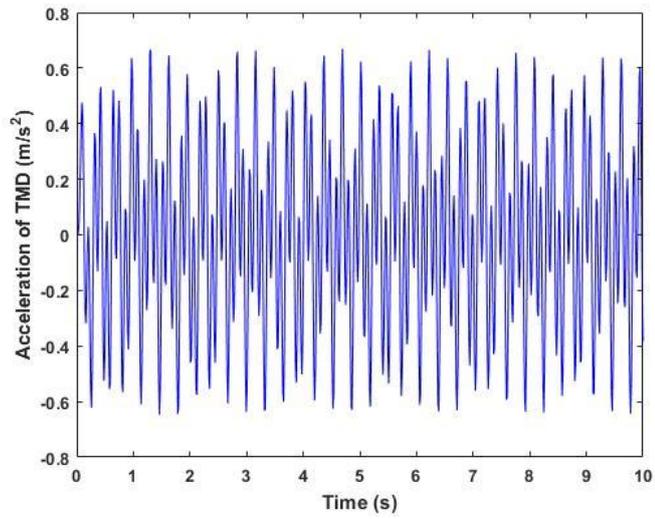
- Variasi 1



Gambar 7 Respon percepatan massa meja getar variasi 1

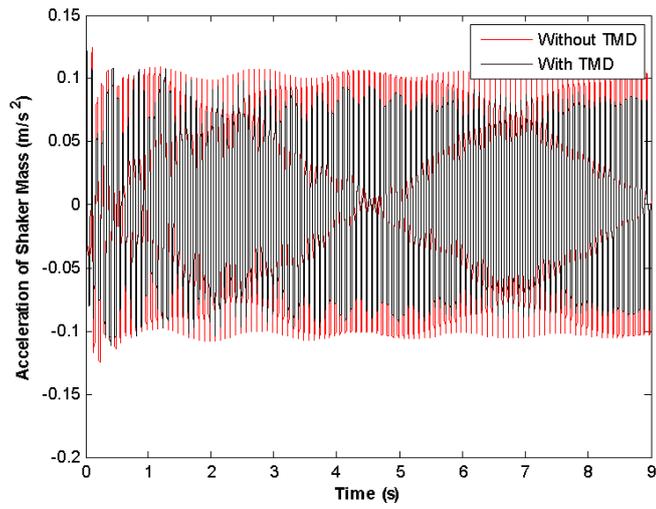


Gambar 8 Respon percepatan massa tower & naseel variasi 1

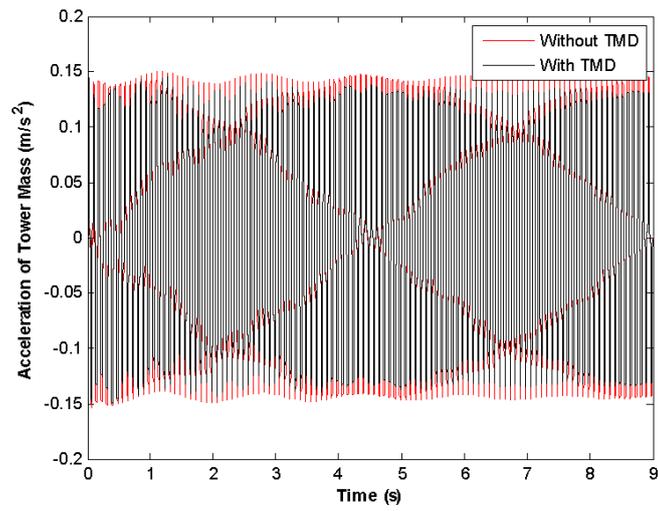


Gambar 9 Respon percepatan massa absorber variasi 1

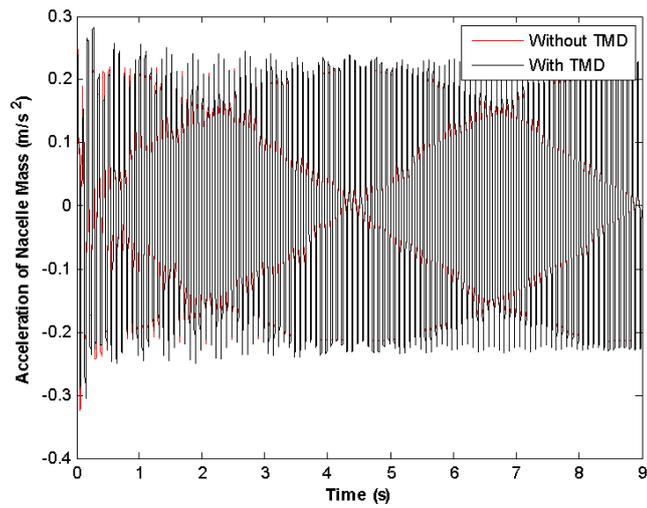
- Variasi 2



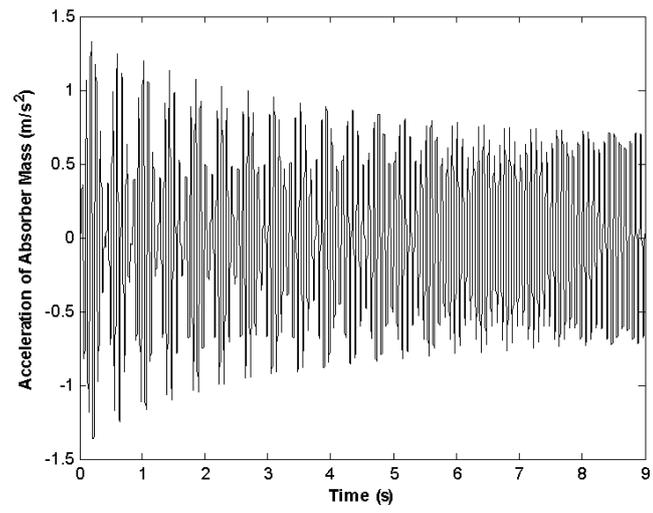
Gambar 10 Respon percepatan massa meja getar variasi 2



Gambar 11 Respon percepatan massa tower bawah variasi 2



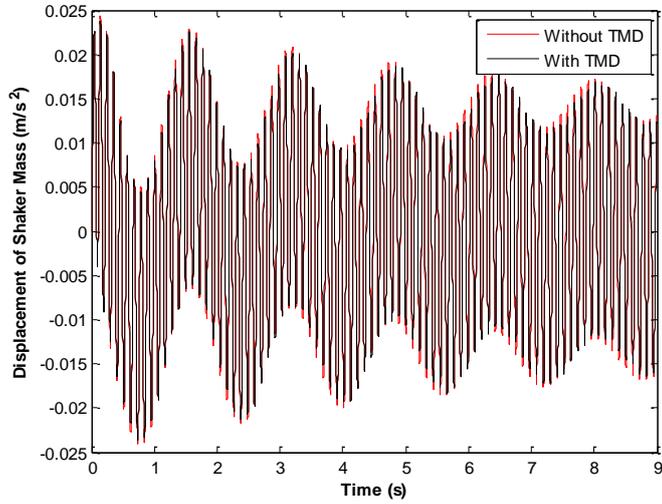
Gambar 12 Respon percepatan massa tower atas & naseel variasi 2



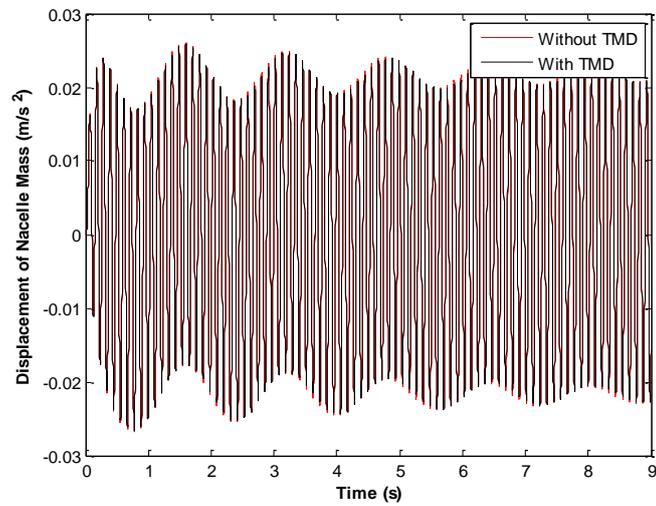
Gambar 13 Respon percepatan massa absorber variasi 2

## Lampiran 4 Hasil Simulasi Perpindahan dan Kecepatan Variasi 3

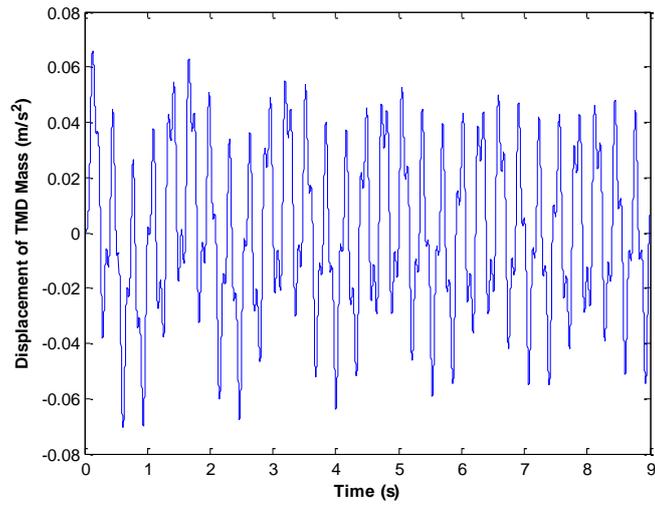
- Perpindahan



Gambar 13 Respon perpindahan massa meja getar

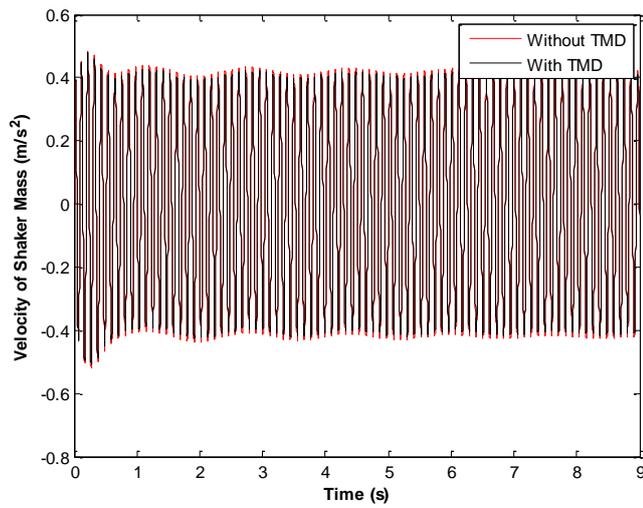


Gambar 14 Respon perpindahan massa tower & nasei

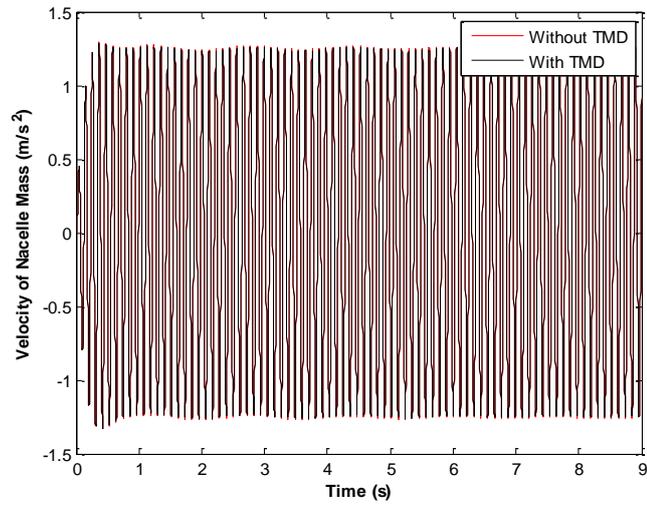


Gambar 15 Respon perpindahan massa absorber

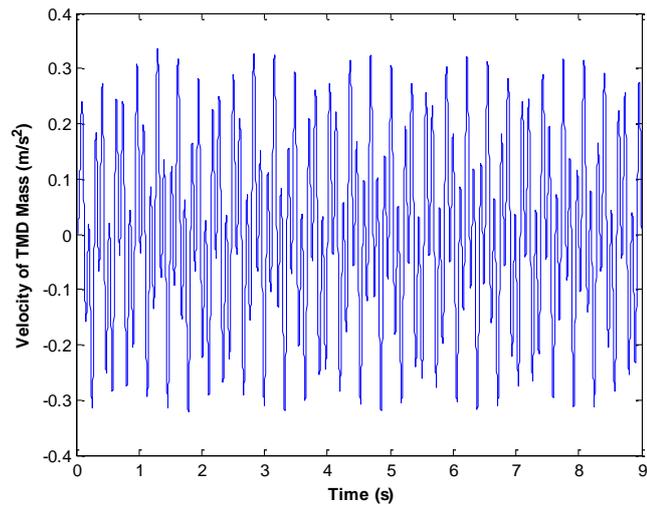
- Kecepatan



Gambar 16 Respon kecepatan massa meja getar



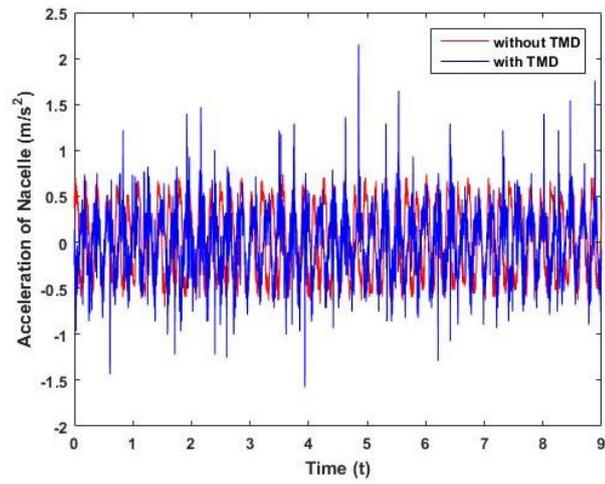
Gambar 17 Respon kecepatan massa tower & nasei



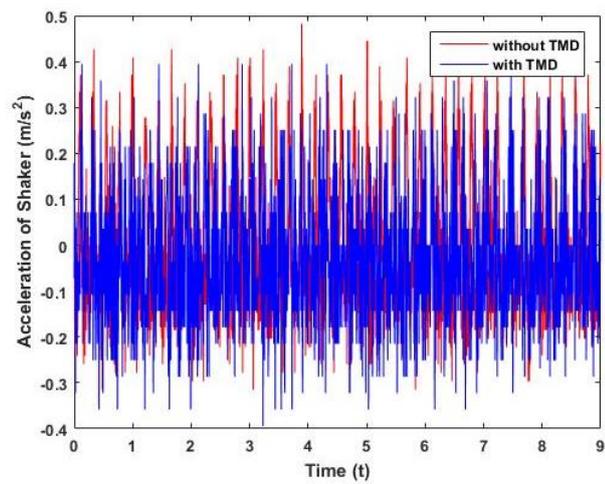
Gambar 18 Respon kecepatan massa absorber

## Lampiran 5 Hasil Eksperimen Variasi 1 dan Variasi 2

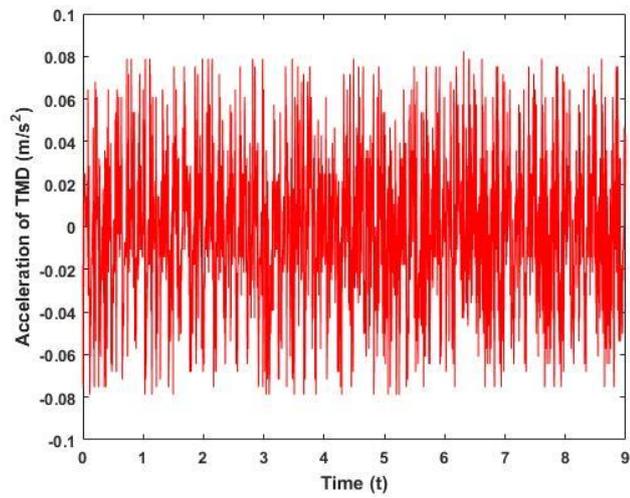
- Variasi 1



Gambar 19 Respon percepatan hasil eksperimen massa naseel pada variasi 1

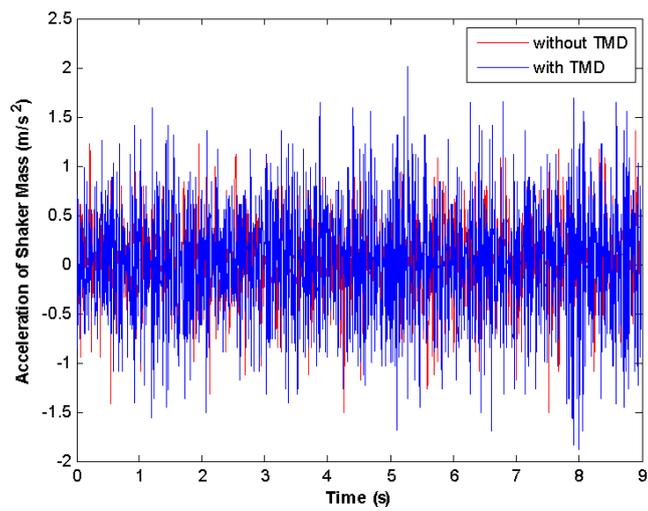


Gambar 20 Respon percepatan hasil eksperimen massa shaker pada variasi 1

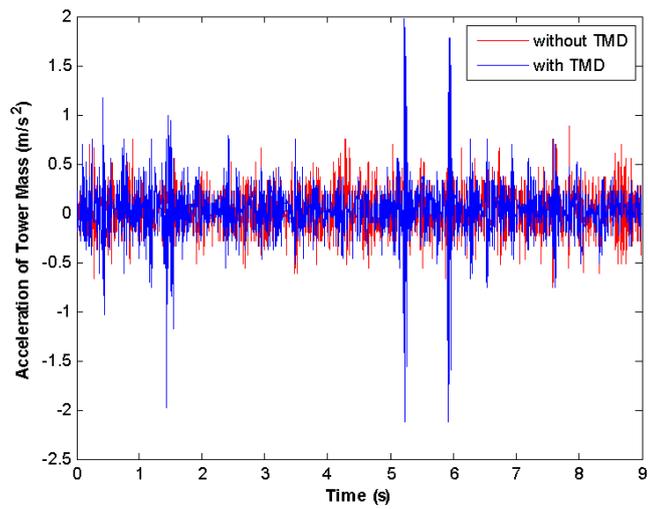


Gambar 21 Respon percepatan hasil eksperimen massa TMD pada variasi 1

- Variasi 2

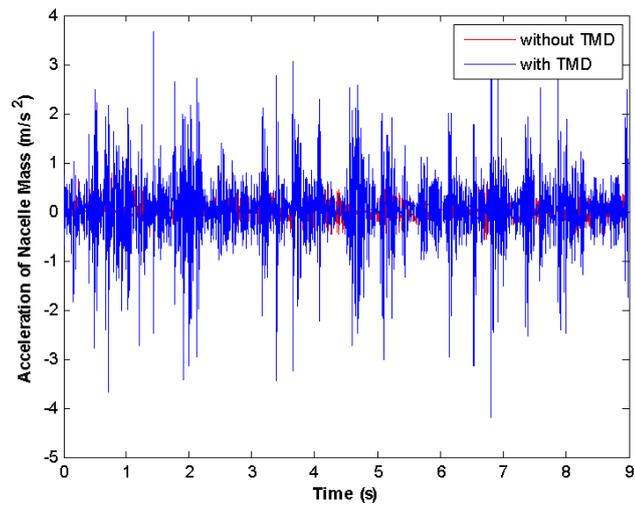


Gambar 22 Respon percepatan hasil eksperimen massa meja getar pada variasi 2

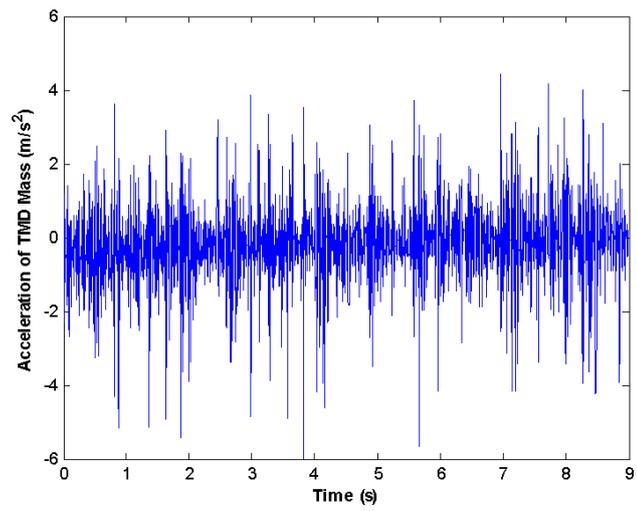


Gambar 23 Respon percepatan hasil eksperimen massa tower bawah pada variasi

2



Gambar 24 Respon percepatan hasil eksperimen massa tower atas & nasek pada variasi 2



Gambar 25 Respon percepatan hasil eksperimen massa absorber pada variasi 2

## BIODATA PENULIS



**Auliana Diah Wilujeng** dilahirkan di Sampang, 22 Desember 1992 anak yang terlahir dari orangtua terbaik bernama Ismail dan Suharti. Riwayat pendidikan penulis diawali di SDN Gunung Sekar I Sampang pada tahun 1999-2005. Penulis melanjutkan pendidikannya di SMPN I Sampang pada tahun 2005-2008 kemudian melanjutkan pendidikannya di SMAN I Sampang pada tahun 2008-2011. Selanjutnya penulis melanjutkan pendidikan jenjang S-1 Jurusan Teknik Mesin di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya melalui jalur SNMPTN Undangan. Tahun 2016 penulis melanjutkan studi magisternya di Departemen Teknik Mesin ITS dengan bidang keahlian Desain Sistem Mekanikal.

Penulis aktif dalam kegiatan akademik maupun organisasi selama perkuliahan. Penulis juga pernah menjadi asisten dosen di kelas maupun asisten Laboratorium Desain. Dalam organisasi kemahasiswaan, penulis aktif menjadi staff hubungan luar di Mesin Music Club (MMC) pada tahun 2012-2013 dan menjadi bendahara umum di Mesin Music Club (MMC) pada tahun 2013-2014. Pada tahun 2015 diwisuda dari studi sarjana dengan predikat “Dengan pujian”. Saat ini penulis bekerja sebagai Dosen tetap di Politeknik Negeri Madura.

Motto hidup penulis “Worrying solves nothing” menjadikan penulis lebih tegar dalam menghadapi masalah. Untuk semua informasi dan masukan terkait tugas akhir ini dapat menghubungi penulis melalui email [ajeng.wut@gmail.com](mailto:ajeng.wut@gmail.com).