



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PERILAKU RESPON STRUKTUR  
AKIBAT BEBAN MULTI-EKSITASI**

**SKRIPSI**

**GEORGE ANGGRAIMOND  
04 05 01 027 2**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL  
DEPOK  
JULI 2010**



960/FT.01/SKRIP/07/2010

UNIVERSITAS INDONESIA

**PERILAKU RESPON STRUKTUR  
AKIBAT BEBAN MULTI-EKSITASI**

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik**

**GEORGE ANGGRAIMOND**

**04 05 01 027 2**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL  
KEKHUSUSAN STRUKTUR  
DEPOK  
JULI 2010**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,  
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk  
telah saya nyatakan benar.**

**Nama : George Anggraimond**

**NPM : 04 05 01 027 2**

**Tanda Tangan :** 

**Tanggal : 13 Juli 2010**

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : George Anggraimond  
NPM : 04 05 01 027 2  
Program Studi : Teknik Sipil  
Judul Skripsi : Perilaku Respon Struktur Akibat Beban Multi-Eksitasi

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Ir. Yuskar Lase, DEA (.....*M83RM5*.....)  
Penguji : Dr.-Ing. Josia Irwan Rustandi, ST, MT (.....*Josia Irwan Rustandi*.....)  
Penguji : Mulia Orientilize, ST, M.Eng (.....*Mulia*.....)

Ditetapkan di : Depok.....

Tanggal : 13 Juli 2010.....

## KATA PENGANTAR/UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Sipil pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

- (1) Dr. Ir. Yuskar Lase, DEA, selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
- (2) Orang tua dan keluarga saya yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral; dan
- (3) Sahabat yang telah banyak membantu saya dalam menyelesaikan skripsi ini.

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, 13 Juli 2010

Penulis

## LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH

---

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : George Anggraimond  
NPM : 04 05 01 027 2  
Program Studi : Teknik Sipil  
Departemen : Teknik Sipil  
Fakultas : Teknik  
Jenis Karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

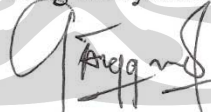
### **PERILAKU RESPON STRUKTUR AKIBAT BEBAN MULTI-EKSITASI**

Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok  
Pada tanggal : 13 Juli 2010

Yang menyatakan



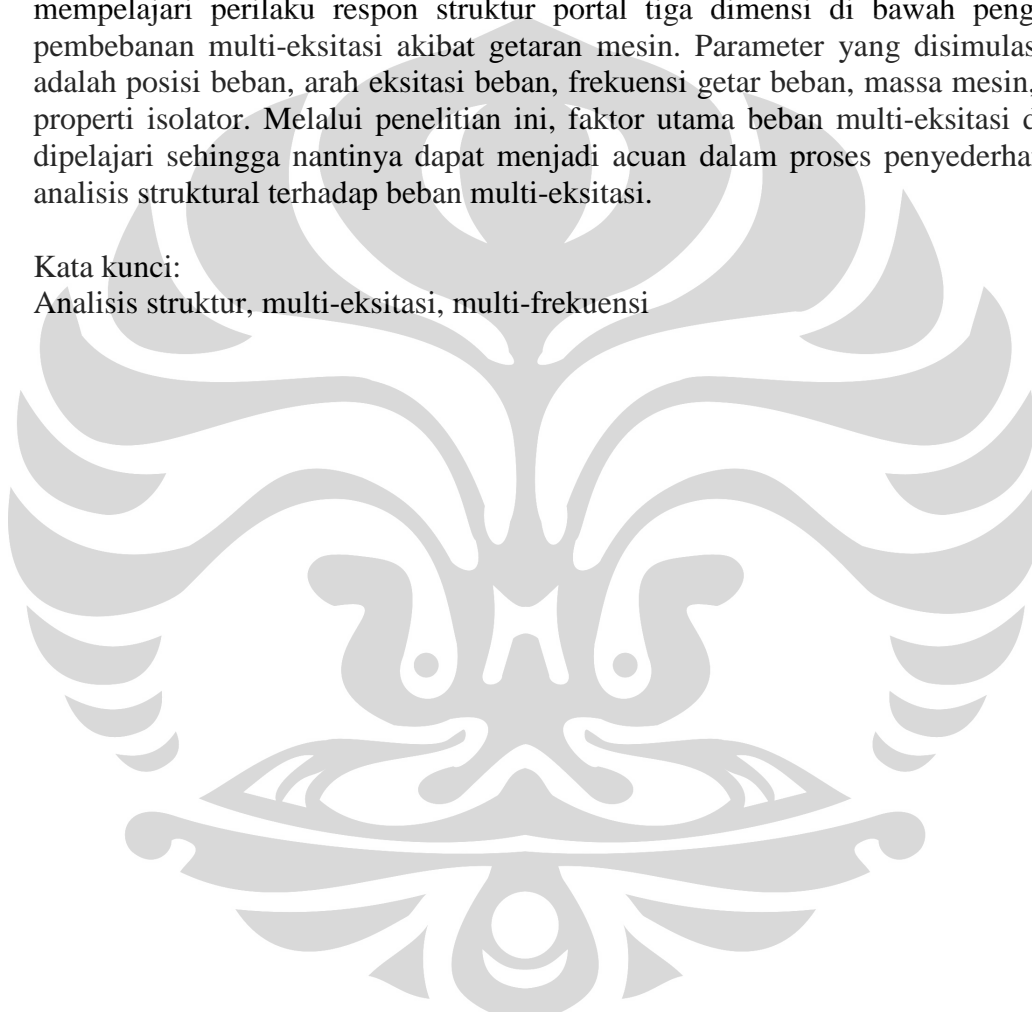
(George Anggraimond)

## ABSTRAK

Nama : George Anggraimond  
Program Studi : Teknik Sipil  
Judul : Perilaku Respon Struktur Akibat Beban Multi-Eksitasi

Skripsi ini membahas perilaku respon struktur terhadap pembebanan dinamik multi-eksitasi. Penelitian ini dilakukan melalui permodelan struktur dengan menggunakan program analisis struktur SAP2000. Analisis yang dilakukan adalah mempelajari perilaku respon struktur portal tiga dimensi di bawah pengaruh pembebanan multi-eksitasi akibat getaran mesin. Parameter yang disimulasikan adalah posisi beban, arah eksitasi beban, frekuensi getar beban, massa mesin, dan properti isolator. Melalui penelitian ini, faktor utama beban multi-eksitasi dapat dipelajari sehingga nantinya dapat menjadi acuan dalam proses penyederhanaan analisis struktural terhadap beban multi-eksitasi.

Kata kunci:  
Analisis struktur, multi-eksitasi, multi-frekuensi



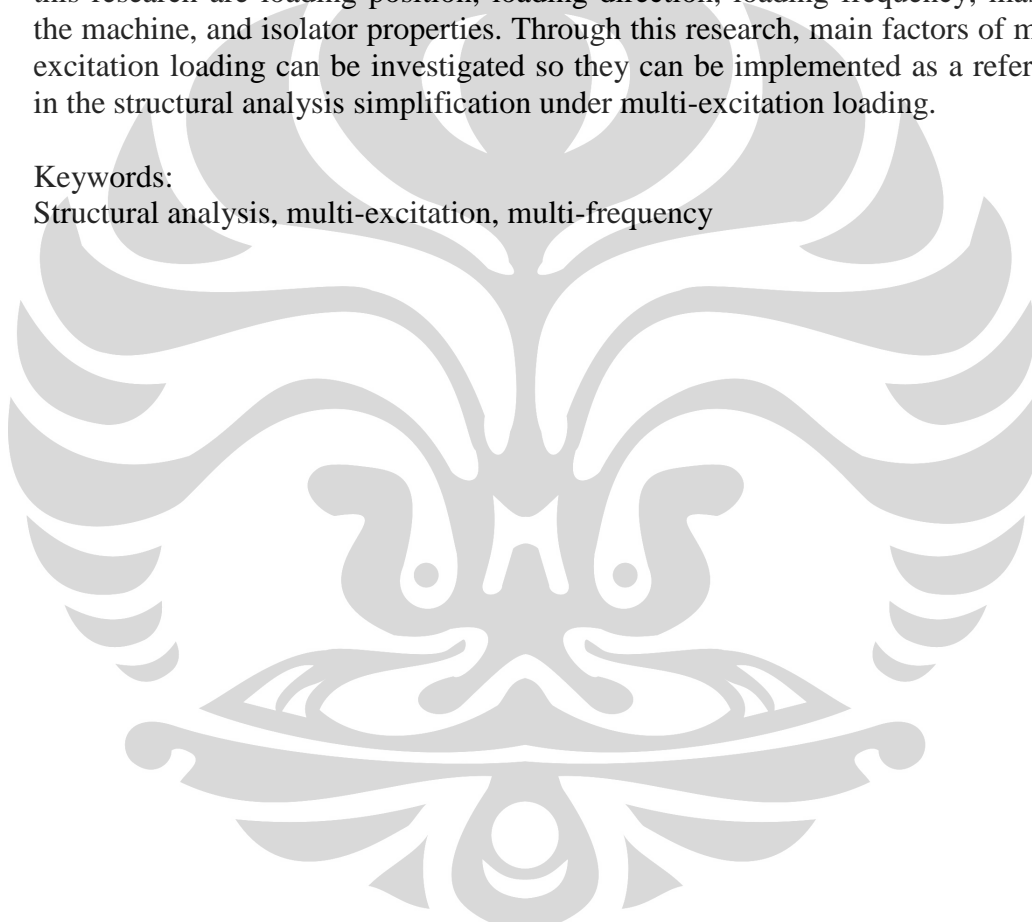
## ABSTRACT

Name : George Anggraimond  
Study Program : Civil Engineering  
Title : Structure Responses Behaviour under Multi-Excitation Loading

The focus of this study is the structure responses behaviour under multi-excitation loading. This research was conducted through structural modelling using SAP2000 structural analysis program. The analysis conducted was to learn about the behaviour of three-dimensional frame structure responses under multi-excitation loading due to vibrations from machineries. Parameters simulated in this research are loading position, loading direction, loading frequency, mass of the machine, and isolator properties. Through this research, main factors of multi-excitation loading can be investigated so they can be implemented as a reference in the structural analysis simplification under multi-excitation loading.

Keywords:

Structural analysis, multi-excitation, multi-frequency





## DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR/UCAPAN TERIMA KASIH .....	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH .....	v
ABSTRAK .....	vi
ABSTRACT .....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR .....	xi
DAFTAR TABEL.....	xiv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xvii
<b>1. PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1 LATAR BELAKANG.....	1
1.2 TUJUAN PENELITIAN .....	2
1.3 MANFAAT PENELITIAN.....	2
1.4 BATASAN MASALAH .....	2
1.5 METODE PENELITIAN.....	3
1.6 SISTEMATIKA PENULISAN .....	3
<b>2. LANDASAN TEORI.....</b>	<b>4</b>
2.1 PENDAHULUAN.....	4
2.2 SISTEM BERDERAJAT KEBEBASAN BANYAK .....	4
2.2.1 Metode Elemen Hingga .....	4
2.2.1.1 Pendekatan Metode Elemen Hingga .....	4
2.2.1.2 Derajat Kebebasan Elemen dan Fungsi Interpolasi .....	5
2.2.1.3 Matriks Kekakuan Elemen.....	7
2.2.1.4 Matriks Massa Elemen.....	8
2.2.1.5 Matriks Gaya Elemen Yang Bekerja .....	9
2.2.2 Frekuensi Dan Mode Getar Alami.....	10
2.2.3 Ortogonalitas Mode Getar Alami .....	12
2.2.4 Persamaan Modal Untuk Sistem Dengan Redaman .....	13
2.2.5 Penyelesaian Persamaan MDOF.....	14
2.3 RESPON TERHADAP EKSITASI HARMONIK DENGAN REDAMAN VISKOS .....	14
2.3.1 Respon <i>Steady-State</i> dan Transien.....	14
2.3.2 Respon Untuk $\omega = \omega_h$ .....	15
2.3.3 Deformasi Maksimum dan Beda Fase .....	17
2.3.4 Faktor Respon Dinamik .....	20
2.3.5 Frekuensi Resonansi dan Respon Resonansi .....	22
2.4 VIBRASI MESIN .....	23
2.4.1 Tipe-Tipe Mesin .....	23
2.4.2 Penyebab Vibrasi .....	24
2.4.3 Gaya Dinamik Yang Dihasilkan.....	24
2.4.4 Batasan Vibrasi .....	25

2.5	BEBAN MULTI-EKSITASI PADA BALOK (STUDI SAP2000) .....	27
2.5.1	Properti Balok .....	27
2.5.2	Balok Dengan Beban Dinamik di Tengah Bentang.....	29
2.5.3	Balok Dengan Beban Multi-Eksitasi di Tengah Bentang .....	33
2.5.4	Balok Dengan Beban <i>Couple</i> .....	39
<b>3.</b>	<b>METODOLOGI PENELITIAN .....</b>	<b>40</b>
3.1	TAHAPAN ANALISIS.....	40
3.2	MODELISASI UMUM STRUKTUR.....	40
3.2.1	Model Struktur Dengan Konfigurasi Satu Mesin .....	46
3.2.1.1	Model Struktur Dengan Variasi Frekuensi Getar Pada Kondisi Resonansi.....	48
3.2.1.2	Model Struktur Dengan Variasi Variabel Isolator .....	49
3.2.1.3	Model Struktur Dengan Variasi Massa Mesin.....	50
3.2.2	Model Struktur Dengan Konfigurasi Kombinasi Dua Mesin .....	50
3.2.2.1	Model Struktur Dengan Variasi Kombinasi Posisi Mesin.....	53
3.2.2.2	Model Struktur Dengan Variasi Kombinasi Massa Mesin.....	53
3.2.2.3	Model Struktur Dengan Variasi Kombinasi Frekuensi Getar Mesin.....	54
3.2.2.4	Model Struktur Dengan Variasi Kombinasi Kekakuan Pegas Mesin .....	54
3.2.2.5	Model Struktur Dengan Variasi Kombinasi Arah Getar Mesin.....	55
3.2.2.6	Model Struktur Dengan Variasi Kombinasi Rasio Redaman Pegas Mesin .....	55
<b>4.</b>	<b>ANALISIS STRUKTUR.....</b>	<b>56</b>
4.1	ANALISIS RESPON STRUKTUR DENGAN SATU MESIN .....	56
4.1.1	Analisis Perilaku Respon Struktur Dalam Kondisi Resonansi ....	56
4.1.1.1	Konfigurasi Mesin Arah Sumbu X .....	57
4.1.1.2	Konfigurasi Mesin Arah Sumbu Y .....	60
4.1.2	Analisis Perilaku Respon Struktur Terhadap Variasi Isolator ....	64
4.1.2.1	Variasi Rasio Redaman Pegas .....	64
4.1.2.2	Variasi Kekakuan Pegas .....	66
4.1.3	Analisis Perilaku Respon Struktur Terhadap Variasi Massa Mesin .....	70
4.2	ANALISIS RESPON STRUKTUR DENGAN DUA MESIN .....	74
4.2.1	Analisis Respon Struktur Terhadap Variasi Posisi Mesin .....	74
4.2.2	Analisis Respon Struktur Terhadap Variasi Massa Mesin .....	78
4.2.3	Analisis Respon Struktur Terhadap Variasi Frekuensi Getar Mesin .....	82
4.2.4	Analisis Respon Struktur Terhadap Variasi Kekakuan Pegas ....	84
4.2.5	Analisis Respon Struktur Terhadap Variasi Arah Getar Mesin...89	
4.2.6	Analisis Respon Struktur Terhadap Variasi Rasio Redaman Pegas .....	93

<b>5. KESIMPULAN.....</b>	<b>96</b>
5.1 KESIMPULAN .....	96
5.2 SARAN .....	97
<b>DAFTAR REFERENSI.....</b>	<b>98</b>



## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
<b>Gambar 2.1.</b> (a) Derajat kebebasan elemen balok; (b) fungsi interpolasi .....	5
<b>Gambar 2.2.</b> Respon sistem teredam terhadap gaya harmonik; $\omega/\omega_n = 0,2$ , $\zeta = 0,05$ , $u(0) = 0$ , dan $\dot{u}(0) = \omega_n p_o/k$ .....	15
<b>Gambar 2.3.</b> Respon sistem teredam dengan $\zeta = 0,05$ terhadap gaya sinusoidal pada frekuensi $\omega = \omega_n$ ; $u(0) = \dot{u}(0) = 0$ .....	16
<b>Gambar 2.4.</b> Respon dari tiga sistem, $\zeta = 0,01, 0,05$ , dan $0,1$ , terhadap gaya sinusoidal pada frekuensi $\omega = \omega_n$ ; $u(0) = \dot{u}(0) = 0$ .....	17
<b>Gambar 2.5.</b> Respon <i>steady-state</i> sistem teredam ( $\zeta = 0,2$ ) terhadap gaya sinusoidal untuk tiga nilai rasio frekuensi: (a) $\omega/\omega_n = 0,5$ , (b) $\omega/\omega_n = 1$ , (c) $\omega/\omega_n = 2$ .....	18
<b>Gambar 2.6.</b> Faktor respon deformasi dan sudut fase untuk sistem teredam digetarkan oleh gaya harmonik .....	19
<b>Gambar 2.7.</b> Faktor respon deformasi, velositas, dan akselerasi untuk sistem teredam yang digetarkan oleh gaya harmonik .....	22
<b>Gambar 2.8.</b> (a) <i>Unbalance</i> pada <i>rotating disk</i> akibat eksentrisitas pusat massa; (b) vektor dari gaya sentripugal akibat <i>unbalance</i> .....	25
<b>Gambar 2.9.</b> Batasan yang diijinkan untuk amplitudo vibrasi vertikal .....	26
<b>Gambar 2.10.</b> Modelisasi balok dan pola getar alaminya .....	28
<b>Gambar 2.11.</b> Atas: pembebanan balok di tengah bentang; bawah: eksitasi sinusoidal beban .....	29
<b>Gambar 2.12.</b> Grafik pengaruh frekuensi terhadap: atas: lendutan maksimum; bawah: putaran sudut maksimum di tengah bentang .....	30
<b>Gambar 2.13.</b> Lendutan di tengah bentang untuk $F(t) = F_o \sin(\omega_{n1} t)$ .....	31
<b>Gambar 2.14.</b> Lendutan di tengah bentang untuk $F(t) = F_o \sin(\omega_{n2} t)$ .....	31
<b>Gambar 2.15.</b> Lendutan di tengah bentang untuk $F(t) = F_o \sin(\omega_{n3} t)$ .....	31
<b>Gambar 2.16.</b> Lendutan di tengah bentang untuk $F(t) = F_o \sin(\omega_{n4} t)$ .....	32
<b>Gambar 2.17.</b> Lendutan di tengah bentang untuk $F(t) = F_o \sin \omega t$ ; ( $\omega_{n5} t$ ) .....	32
<b>Gambar 2.18.</b> Lendutan di tengah bentang untuk $F(t) = F_o \sin(\omega_{n6} t)$ .....	32
<b>Gambar 2.19.</b> Pembebanan multi-frekuensi di tengah bentang .....	33
<b>Gambar 2.20.</b> Plot gaya dan lendutan untuk fungsi eksitasi $F(t) = F_o \sum \sin(\omega_{ni} t)$ ; $i \in 1, 3, 5$ . Atas: eksitasi beban; bawah: lendutan di tengah bentang .....	33
<b>Gambar 2.21.</b> Plot gaya dan lendutan untuk fungsi eksitasi $F(t) = F_o \sum \sin(\omega_{ni} t)$ ; $i \in 2, 4, 6$ . Atas: eksitasi beban; bawah: lendutan di tengah bentang .....	34
<b>Gambar 2.22.</b> Plot gaya dan lendutan untuk fungsi eksitasi $F(t) = F_o \sum \sin(\omega_{ni} t)$ ; $i \in 1, \dots, 6$ . Atas: eksitasi beban; bawah: lendutan di tengah bentang .....	35

<b>Gambar 2.23.</b>	Lendutan tiap nodal akibat pembebanan multi-eksitasi pada waktu yang menghasilkan lendutan maksimum di tengah bentang .....	37
<b>Gambar 2.24.</b>	Lendutan tiap nodal akibat pembebanan multi-eksitasi pada waktu yang memberikan putaran sudut maksimum di tengah bentang .....	38
<b>Gambar 2.25.</b>	Beban <i>couple</i> pada balok.....	39
<b>Gambar 2.26.</b>	Lendutan tiap nodal akibat pembebanan <i>couple</i> dengan frekuensi getar $\omega_{h1}$ pada waktu yang memberikan putaran sudut maksimum di tengah bentang .....	39
<b>Gambar 2.27.</b>	Lendutan tiap nodal akibat pembebanan <i>couple</i> dengan frekuensi getar $\omega_{h2}$ pada waktu yang memberikan putaran sudut maksimum di tengah bentang .....	39
<b>Gambar 3.1.</b>	Modelisasi struktur: a) denah; b) potongan melintang; c) potongan memanjang.....	41
<b>Gambar 3.2.</b>	Pelabelan elemen portal dan nodal di tiap lantai (tipikal untuk lantai 1-4) .....	42
<b>Gambar 3.3.</b>	(a) penempatan mesin pada arah X; (b) penempatan mesin pada arah Y .....	43
<b>Gambar 3.4.</b>	(a) mesin arah X; (b) mesin arah Y; (c) potongan melintang mesin; (d) potongan memanjang mesin.....	43
<b>Gambar 3.5.</b>	(a) lantai 1, 2, dan atap tipikal; (b) lantai 3 .....	46
<b>Gambar 3.6.</b>	Hierarki penelitian model struktur dengan konfigurasi satu mesin.....	47
<b>Gambar 3.7.</b>	(a) lantai 1, 2, 3 tipikal; (b) lantai atap .....	51
<b>Gambar 3.8.</b>	Hierarki penelitian model struktur dengan kombinasi dua mesin.....	52
<b>Gambar 4.1.</b>	Grafik perbandingan $\omega_n$ struktur terhadap arah getar.....	56
<b>Gambar 4.2.</b>	Grafik perbandingan <i>base reaction</i> struktur terhadap frekuensi getar dalam kondisi resonansi pada mesin arah X .....	57
<b>Gambar 4.3.</b>	Grafik perbandingan <i>base reaction</i> struktur terhadap frekuensi getar dalam kondisi resonansi pada mesin arah Y .....	61
<b>Gambar 4.4.</b>	Grafik perbandingan <i>base reaction</i> struktur terhadap variasi rasio redaman pegas .....	64
<b>Gambar 4.5.</b>	Grafik perbandingan simpangan mesin terhadap variasi rasio redaman pegas .....	65
<b>Gambar 4.6.</b>	Grafik perbandingan $\omega_n$ struktur terhadap variasi kekakuan pegas .....	67
<b>Gambar 4.7.</b>	Grafik perbandingan <i>base reaction</i> struktur terhadap variasi kekakuan pegas.....	68
<b>Gambar 4.8.</b>	Grafik perbandingan simpangan mesin terhadap variasi kekakuan pegas.....	69
<b>Gambar 4.9.</b>	Grafik perbandingan $\omega_n$ struktur terhadap variasi massa mesin.....	71
<b>Gambar 4.10.</b>	Grafik perbandingan <i>base reaction</i> struktur terhadap variasi massa mesin.....	72
<b>Gambar 4.11.</b>	Grafik perbandingan simpangan mesin terhadap variasi massa mesin.....	73

<b>Gambar 4.12.</b> Grafik perbandingan $\omega_n$ terhadap variasi kombinasi posisi mesin.....	75
<b>Gambar 4.13.</b> Grafik perbandingan <i>base reaction</i> terhadap variasi kombinasi posisi mesin.....	76
<b>Gambar 4.14.</b> Grafik perbandingan $\omega_n$ terhadap variasi kombinasi massa mesin.....	79
<b>Gambar 4.15.</b> Grafik perbandingan <i>base reaction</i> terhadap variasi kombinasi massa mesin.....	80
<b>Gambar 4.16.</b> Grafik perbandingan <i>base reaction</i> terhadap variasi kombinasi frekuensi getar mesin.....	83
<b>Gambar 4.17.</b> Grafik perbandingan $\omega_n$ terhadap variasi kombinasi kekakuan pegas.....	85
<b>Gambar 4.18.</b> Grafik perbandingan <i>base reaction</i> terhadap variasi kombinasi kekakuan pegas.....	87
<b>Gambar 4.19.</b> Grafik perbandingan $\omega_n$ terhadap variasi kombinasi arah getar mesin.....	90
<b>Gambar 4.20.</b> Grafik perbandingan <i>base reaction</i> terhadap variasi kombinasi arah getar mesin.....	91
<b>Gambar 4.21.</b> Grafik perbandingan <i>base reaction</i> terhadap variasi kombinasi rasio redaman pegas.....	93



## DAFTAR TABEL

	Halaman
<b>Tabel 2.1.</b> Amplitudo Yang Diiijinkan.....	26
<b>Tabel 2.2.</b> Frekuensi Getar Struktur dan Partisipasi Massa Tiap Mode.....	28
<b>Tabel 2.3.</b> Partisipasi Tiap Eksitasi Terhadap Lendutan Maksimum di Tengah Bentang.....	36
<b>Tabel 2.4.</b> Partisipasi Tiap Eksitasi Terhadap Putaran Sudut Maksimum di Tengah Bentang .....	36
<b>Tabel 3.1.</b> Tabel variasi total untuk model struktur dengan konfigurasi satu mesin.....	45
<b>Tabel 3.2.</b> Tabel variasi total untuk model struktur dengan kombinasi dua mesin .....	45
<b>Tabel 3.3.</b> Properti mesin dengan variasi frekuensi getar pada kondisi resonansi dalam arah X.....	48
<b>Tabel 3.4.</b> Properti mesin dengan variasi frekuensi getar pada kondisi resonansi dalam arah Y.....	48
<b>Tabel 3.5.</b> Besaran kekakuan pegas untuk tiap variasi.....	49
<b>Tabel 3.6.</b> Properti mesin dengan variasi rasio redaman pegas.....	49
<b>Tabel 3.7.</b> Properti mesin dengan variasi kekakuan isolator.....	49
<b>Tabel 3.8.</b> Properti mesin dengan variasi massa blok mesin.....	50
<b>Tabel 3.9.</b> Properti mesin dengan variasi posisi mesin .....	53
<b>Tabel 3.10.</b> Properti mesin dengan variasi massa blok mesin.....	53
<b>Tabel 3.11.</b> Properti mesin dengan variasi frekuensi getar mesin.....	54
<b>Tabel 3.12.</b> Properti mesin dengan variasi kekakuan pegas.....	54
<b>Tabel 3.13.</b> Properti mesin dengan variasi arah getar mesin.....	55
<b>Tabel 3.14.</b> Properti mesin dengan variasi rasio redaman pegas.....	55
<b>Tabel 4.1.</b> Perbandingan pola getar alami struktur dengan konfigurasi satu mesin .....	56
<b>Tabel 4.2.</b> Perbandingan <i>base reaction</i> struktur pada kondisi resonansi dalam arah X.....	57
<b>Tabel 4.3.</b> Perbandingan gaya dalam elemen kolom pada kondisi resonansi dalam arah X.....	58
<b>Tabel 4.4.</b> Perbandingan gaya dalam elemen balok pada kondisi resonansi dalam arah X.....	59
<b>Tabel 4.5.</b> Perbandingan simpangan mesin pada kondisi resonansi dalam arah X.....	60
<b>Tabel 4.6.</b> Perbandingan <i>base reaction</i> struktur pada kondisi resonansi dalam arah Y.....	60
<b>Tabel 4.7.</b> Perbandingan gaya dalam elemen kolom pada kondisi resonansi dalam arah Y.....	62
<b>Tabel 4.8.</b> Perbandingan gaya dalam elemen balok pada kondisi resonansi dalam arah Y.....	63
<b>Tabel 4.9.</b> Perbandingan simpangan mesin pada kondisi resonansi dalam arah Y.....	63

<b>Tabel 4.10.</b> Perbandingan <i>base reaction</i> struktur terhadap variasi rasio redaman .....	64
<b>Tabel 4.11.</b> Perbandingan simpangan mesin terhadap variasi rasio redaman ...	65
<b>Tabel 4.12.</b> Perbandingan gaya dalam elemen kolom terhadap variasi rasio redaman .....	66
<b>Tabel 4.13.</b> Perbandingan gaya dalam elemen balok terhadap variasi rasio redaman .....	66
<b>Tabel 4.14.</b> Perbandingan pola getar alami mesin terhadap variasi kekakuan pegas .....	67
<b>Tabel 4.15.</b> Perbandingan pola getar alami struktur terhadap variasi kekakuan pegas .....	67
<b>Tabel 4.16.</b> Perbandingan <i>base reaction</i> terhadap variasi kekakuan pegas .....	68
<b>Tabel 4.17.</b> Perbandingan simpangan mesin terhadap variasi kekakuan pegas.....	69
<b>Tabel 4.18.</b> Perbandingan gaya dalam elemen kolom terhadap variasi kekakuan pegas .....	69
<b>Tabel 4.19.</b> Perbandingan gaya dalam elemen balok terhadap variasi kekakuan pegas .....	70
<b>Tabel 4.20.</b> Perbandingan pola getar alami mesin terhadap variasi massa mesin .....	70
<b>Tabel 4.21.</b> Perbandingan pola getar alami struktur terhadap variasi massa mesin .....	70
<b>Tabel 4.22.</b> Perbandingan <i>base reaction</i> terhadap variasi massa mesin .....	71
<b>Tabel 4.23.</b> Perbandingan simpangan mesin terhadap variasi massa mesin ....	72
<b>Tabel 4.24.</b> Perbandingan gaya dalam elemen kolom terhadap variasi massa mesin.....	73
<b>Tabel 4.25.</b> Perbandingan gaya dalam elemen balok terhadap variasi massa mesin .....	74
<b>Tabel 4.26.</b> Perbandingan pola getar alami mesin terhadap kombinasi posisi mesin.....	75
<b>Tabel 4.27.</b> Perbandingan pola getar alami struktur terhadap kombinasi posisi mesin.....	75
<b>Tabel 4.28.</b> Perbandingan <i>base reaction</i> terhadap kombinasi posisi mesin.....	76
<b>Tabel 4.29.</b> Perbandingan simpangan mesin terhadap kombinasi posisi mesin .....	77
<b>Tabel 4.30.</b> Perbandingan gaya dalam elemen kolom terhadap kombinasi posisi mesin.....	77
<b>Tabel 4.31.</b> Perbandingan gaya dalam elemen balok terhadap kombinasi posisi mesin.....	77
<b>Tabel 4.32.</b> Perbandingan pola getar alami mesin terhadap kombinasi massa mesin.....	78
<b>Tabel 4.33.</b> Perbandingan pola getar alami struktur terhadap kombinasi massa mesin.....	78
<b>Tabel 4.34.</b> Perbandingan <i>base reaction</i> terhadap kombinasi massa mesin ....	80
<b>Tabel 4.35.</b> Perbandingan simpangan mesin terhadap kombinasi massa mesin .....	81
<b>Tabel 4.36.</b> Perbandingan gaya dalam elemen kolom terhadap kombinasi massa mesin.....	81



<b>Tabel 4.37.</b> Perbandingan gaya dalam elemen kolom terhadap kombinasi massa mesin.....	81
<b>Tabel 4.38.</b> Perbandingan <i>base reaction</i> terhadap kombinasi frekuensi getar mesin .....	82
<b>Tabel 4.39.</b> Perbandingan simpangan mesin terhadap kombinasi frekuensi getar mesin .....	83
<b>Tabel 4.40.</b> Perbandingan gaya dalam elemen kolom terhadap kombinasi frekuensi getar mesin .....	84
<b>Tabel 4.41.</b> Perbandingan gaya dalam elemen balok terhadap kombinasi frekuensi getar mesin .....	84
<b>Tabel 4.42.</b> Perbandingan pola getar alami mesin terhadap kombinasi kekakuan pegas .....	85
<b>Tabel 4.43.</b> Perbandingan pola getar alami struktur terhadap kombinasi kekakuan pegas .....	85
<b>Tabel 4.44.</b> Perbandingan <i>base reaction</i> terhadap kombinasi kekakuan pegas.....	86
<b>Tabel 4.45.</b> Perbandingan simpangan mesin terhadap kombinasi kekakuan pegas.....	87
<b>Tabel 4.46.</b> Perbandingan gaya dalam elemen kolom terhadap kombinasi kekakuan pegas .....	88
<b>Tabel 4.47.</b> Perbandingan gaya dalam elemen balok terhadap kombinasi kekakuan pegas .....	88
<b>Tabel 4.48.</b> Perbandingan pola getar alami mesin terhadap kombinasi arah getar mesin .....	89
<b>Tabel 4.49.</b> Perbandingan pola getar alami struktur terhadap kombinasi arah getar mesin .....	89
<b>Tabel 4.50.</b> Perbandingan <i>base reaction</i> terhadap kombinasi arah getar mesin .....	90
<b>Tabel 4.51.</b> Perbandingan simpangan mesin terhadap kombinasi arah getar mesin .....	91
<b>Tabel 4.52.</b> Perbandingan gaya dalam elemen kolom terhadap kombinasi arah getar mesin .....	92
<b>Tabel 4.53.</b> Perbandingan gaya dalam elemen balok terhadap kombinasi arah getar mesin .....	92
<b>Tabel 4.54.</b> Perbandingan <i>base reaction</i> terhadap kombinasi rasio redaman pegas.....	93
<b>Tabel 4.55.</b> Perbandingan simpangan mesin terhadap kombinasi rasio redaman pegas .....	94
<b>Tabel 4.56.</b> Perbandingan gaya dalam elemen kolom terhadap kombinasi rasio redaman pegas .....	95
<b>Tabel 4.57.</b> Perbandingan gaya dalam elemen balok terhadap kombinasi rasio redaman pegas .....	95

## DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 1. Output Model Dalam Kondisi Resonansi.....	99
Lampiran 2. Output Model Dengan Variasi Rasio Redaman Pegas .....	101
Lampiran 3. Output Model Dengan Variasi Kekakuan Pegas .....	102
Lampiran 4. Output Model Dengan Variasi Massa Mesin .....	105
Lampiran 5. Output Model Dengan Kombinasi Posisi Mesin.....	108
Lampiran 6. Output Model Dengan Kombinasi Massa Mesin .....	111
Lampiran 7. Output Model Dengan Kombinasi Frekuensi Getar Mesin.....	113
Lampiran 8. Output Model Dengan Kombinasi Kekakuan Pegas .....	114
Lampiran 9. Output Model Dengan Kombinasi Arah Getar Mesin.....	116
Lampiran 10. Output Model Dengan Kombinasi Rasio Redaman Pegas .....	118
Lampiran 11. Plot $u_o$ terhadap $\omega_M/\omega_n$ untuk struktur dengan satu mesin .....	119
Lampiran 12. Plot $u_o$ terhadap $\omega_M/\omega_n$ untuk struktur dengan dua mesin.....	121



# BAB 1 PENDAHULUAN

## 1.1 LATAR BELAKANG

Proses industrialisasi yang cepat pada suatu negara melibatkan instalasi mesin dengan berbagai tipe dan kapasitas. Pada struktur yang memiliki fungsi sebagai bangunan industri dimana terdapat mesin-mesin produksi skala besar, dampak dari getaran mesin-mesin yang memiliki bobot besar tersebut perlu diperhatikan karena ikut menyumbangkan beban dinamik yang cukup besar. Hal ini dapat menyebabkan terancamnya keamanan struktur maupun keamanan peralatan yang ada di dalamnya.

Beban multi-eksitasi adalah gabungan dari beban-beban dinamik yang memiliki lebih dari satu eksitasi gaya. Jika terdapat lebih dari satu eksitasi gaya pada struktur, maka respon struktur yang terjadi adalah kombinasi dari respon struktur terhadap tiap-tiap eksitasi (Esat, Dabestani, & de Silva, 2005). Analisis beban multi-eksitasi biasanya mengacu kepada analisis beban harmonik. Hal ini dikarenakan tiap-tiap eksitasi yang membentuk suatu beban multi-eksitasi umumnya merupakan eksitasi sinusoidal murni. Beban multi-eksitasi dapat dikatakan juga sebagai beban dinamik multi-frekuensi, yang tampak tidak beraturan dan memiliki lebih dari satu frekuensi utama pada waktu tertentu. Contoh-contoh beban multi-eksitasi adalah rekaman aktual gempa bumi, gangguan aerodinamika, maupun getaran akibat mesin-mesin pada pabrik. Beban multi-eksitasi yang dibahas pada penelitian ini adalah beban dinamik akibat getaran mesin, yang kemudian dimodelkan sebagai eksitasi sinusoidal dengan berbagai frekuensi getar.

Berdasarkan kriteria desain pondasinya, mesin dapat diklasifikasikan menjadi mesin yang menghasilkan gaya impuls, mesin yang menghasilkan gaya periodik, mesin berkecepatan tinggi, dan mesin-mesin yang lain. Berdasarkan frekuensi kerjanya, mesin dapat diklasifikasikan ke dalam tiga kategori, yaitu mesin dengan frekuensi menengah ke bawah ( $0 - 500 \text{ rpm}$ ), mesin dengan frekuensi menengah ke atas ( $300 - 1000 \text{ rpm}$ ), dan mesin dengan frekuensi sangat tinggi (lebih dari  $1000 \text{ rpm}$ ). Gaya dinamik yang bekerja pada pondasi mesin

dapat diklasifikasikan secara umum menjadi gaya impuls yang bekerja pada interval tertentu dan gaya *steady-state* yang bervariasi terhadap waktu menurut aturan sinus atau kosinus (Srinivasulu, Vaidyanathan, 1982). Salah satu penyebab vibrasi pada mesin adalah *unbalanced force*.

Untuk merencanakan struktur terhadap beban multi-eksitasi, perancang struktur harus memastikan amplitudo terbesar dari getaran tiap-tiap eksitasi harmonik tidak melebihi batas aman sistem struktur. Jika eksitasi gaya yang bekerja pada struktur cukup banyak, hal ini tentu sangat sulit. Oleh karena itu dibutuhkan suatu studi untuk menyimpulkan perilaku respon struktur akibat pembebanan multi-eksitasi dan kemudian mempelajari faktor dominansi beban multi-eksitasi tersebut untuk kemudian dapat menjadi acuan dalam proses penyederhanaan analisis struktur terhadap beban multi-eksitasi.

## **1.2 TUJUAN PENELITIAN**

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui faktor dominansi beban multi-eksitasi pada suatu struktur portal dengan membandingkan perilaku respon struktur akibat beban multi-eksitasi terhadap perilaku respon struktur akibat tiap-tiap eksitasi dengan variasi posisi beban, arah eksitasi beban, frekuensi getar beban, massa mesin, dan properti isolator pada pondasi mesin.

## **1.3 MANFAAT PENELITIAN**

Penelitian ini bermanfaat untuk mengetahui perilaku respon struktur akibat beban multi-eksitasi dan faktor-faktor dominansi beban dinamik tersebut, sehingga nantinya dapat menjadi acuan dalam proses penyederhanaan analisis struktur terhadap beban multi-eksitasi.

## **1.4 BATASAN MASALAH**

Sistem portal pada masalah ini dibatasi untuk portal 3 dimensi dengan  $n$ -bentang arah  $X$ ,  $n$ -bentang arah  $Y$ , dan  $n$ -lantai, dimana massa dan kekakuan antartingkat tidak jauh berbeda. Eksitasi beban pada masalah ini dibatasi untuk eksitasi harmonik akibat *rotating machine* dengan frekuensi menengah ke bawah. Parameter studi pada penelitian ini adalah variasi posisi beban, arah eksitasi

beban, frekuensi getar beban, massa mesin, dan properti isolator pada pondasi mesin.

### **1.5 METODE PENELITIAN**

Penelitian dilakukan melalui simulasi numerik dengan bantuan program analisis struktur SAP2000 yang memiliki kemampuan untuk menganalisis struktur baik secara linier maupun nonlinier. Pada tahap awal dilakukan modelisasi struktur. Model struktur yang telah dibuat diberikan berbagai beban dinamik rencana kemudian ditinjau untuk mempelajari partisipasi tiap beban dan faktor dominansi beban multi-eksitasi.

### **1.6 SISTEMATIKA PENULISAN**

Laporan seminar skripsi ini disusun dalam 3 bab, yaitu:

#### **BAB 1 PENDAHULUAN**

Bagian ini menguraikan tentang latar belakang masalah, tujuan penulisan, manfaat penelitian, batasan masalah, metode penelitian, serta sistematika penulisan.

#### **BAB 2 LANDASAN TEORI**

Bagian ini menjelaskan tentang dasar teori struktur MDOF dengan pengenalan terhadap metode elemen hingga dan analisis respon balok sederhana terhadap beban multi-eksitasi dengan variasi frekuensi getar melalui studi program analisis struktur SAP2000.

#### **BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN**

Bagian ini menjelaskan tentang informasi umum perencanaan, parameter studi, dan modelisasi struktur.

#### **BAB 4 ANALISIS STRUKTUR**

Bagian ini menjelaskan tentang proses analisis perilaku respon model struktur untuk tiap variasi dan hasil kesimpulan yang didapat untuk tiap proses analisis.

#### **BAB 5 KESIMPULAN**

Bagian ini memuat kesimpulan akhir dan saran terhadap hasil penelitian ini.

## BAB 2 LANDASAN TEORI

### 2.1 PENDAHULUAN

Secara garis besar bab ini dibagi ke dalam tiga bagian, yaitu studi literatur sistem berderajat kebebasan banyak dengan pendekatan metode elemen hingga, vibrasi mesin, dan studi perilaku respon balok sederhana terhadap beban multi-eksitasi dengan menggunakan program analisis struktur SAP2000.

### 2.2 SISTEM BERDERAJAT KEBEBASAN BANYAK

Chopra (1997) menjelaskan mengenai sistem dengan banyak derajat kebebasan. Berikut adalah penjelasan tersebut dengan menggunakan pendekatan metode elemen hingga.

#### 2.2.1 Metode Elemen Hingga

##### 2.2.1.1 Pendekatan Metode Elemen Hingga

Pada metode elemen hingga lendutan nodal digunakan sebagai koordinat tergeneralisasi, dan persamaan gerakan diformulasikan dari lendutan fisik yang berarti pada setiap nodal. Melalui metode elemen hingga, suatu struktur digambarkan sebagai kesatuan dari segmen-segmen yang lebih kecil atau disebut elemen terhingga. Ukuran setiap segmen tidak ditentukan; tiap segmen dapat memiliki ukuran yang sama ataupun berbeda-beda. Keakuratan perilaku respon struktur dengan analisis metode elemen hingga dipengaruhi oleh jumlah elemen. Jumlah elemen struktur yang banyak akan menghasilkan analisis respon yang lebih ideal, sedangkan jumlah elemen struktur yang sedikit akan mempermudah dan mempercepat analisis. Untuk tiap elemen hubungan gaya lateral dan lendutan serta hubungan gaya inersia dan percepatan dirumuskan sebagai

$$(\mathbf{f}_S)_e = \mathbf{k}_e \mathbf{u}_e \quad (\mathbf{f}_I)_e = \mathbf{m}_e \ddot{\mathbf{u}}_e \quad (2.1)$$

Matriks tiap elemen kemudian digabungkan secara langsung menjadi matriks massa, kekakuan, dan vektor gaya yang bekerja sebagai berikut.

$$\mathbf{k} = \mathcal{A}_{e=1}^{N_e} \mathbf{k}_e \quad \mathbf{m} = \mathcal{A}_{e=1}^{N_e} \mathbf{m}_e \quad \mathbf{p}(t) = \mathcal{A}_{e=1}^{N_e} \mathbf{p}_e(t) \quad (2.2)$$

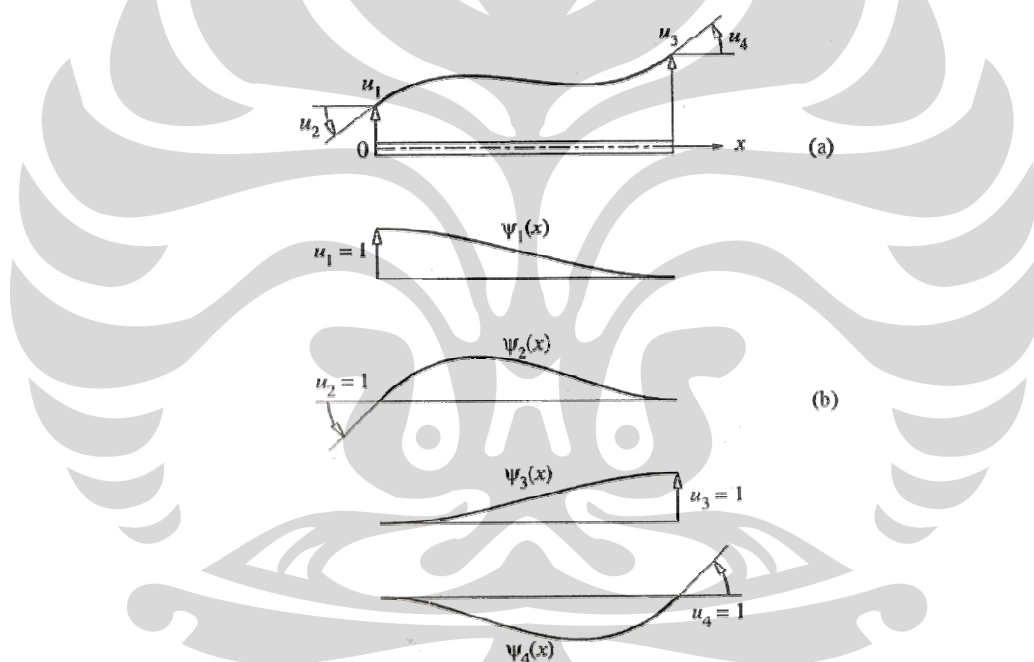
Operator  $\mathcal{A}$  menandakan prosedur penyusunan langsung tiap matriks untuk tiap elemen menjadi matriks gabungan struktur. Persamaan gerakan gabungan elemen terhingga diformulasikan sebagai berikut.

$$\mathbf{m}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{c}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{k}\mathbf{u} = \mathbf{p}(t) \quad (2.3)$$

Matriks  $\mathbf{m}$ ,  $\mathbf{c}$ , dan  $\mathbf{k}$  simetris, dimana matriks  $\mathbf{m}$  dan  $\mathbf{c}$  bersifat semi-definit positif sedangkan matriks  $\mathbf{k}$  bersifat definit positif.

### 2.2.1.2 Derajat Kebebasan Elemen dan Fungsi Interpolasi

Pada gambar 2.1 diilustrasikan sebuah elemen balok datar dengan panjang  $L$ , massa per satuan panjang  $m(x)$ , dan kepadatan lentur  $EI(x)$ .



Gambar 2.1. (a) Derajat kebebasan elemen balok; (b) fungsi interpolasi

Sumber: Chopra, A. K., *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering* (International ed.), Prentice Hall International, Inc, Singapore, 1997, hal 623.

Jika deformasi aksial diabaikan, tiap nodal memiliki dua DOF yaitu translasi arah sumbu lokal  $y$  dan putaran sudut. Lendutan elemen balok memiliki korelasi terhadap keempat DOF tersebut.

$$u(x, t) = \sum_{i=1}^4 u_i(t) \psi_i(x) \quad (2.4)$$

dimana fungsi  $\psi_i(x)$  menyatakan lendutan elemen terhadap lendutan unit  $u_i$  sementara DOF yang lain dianggap tidak berdeformasi. Fungsi  $\psi_i(x)$  tersebut memenuhi kondisi batas berikut:

$$i = 1: \quad \psi_1(0) = 1, \quad \psi_1'(0) = \psi_1(L) = \psi_1'(L) = 0 \quad (2.5a)$$

$$i = 2: \quad \psi_2'(0) = 1, \quad \psi_2(0) = \psi_2(L) = \psi_2'(L) = 0 \quad (2.5b)$$

$$i = 3: \quad \psi_3(L) = 1, \quad \psi_3(0) = \psi_3'(0) = \psi_3'(L) = 0 \quad (2.5c)$$

$$i = 4: \quad \psi_4'(L) = 1, \quad \psi_4(0) = \psi_4'(0) = \psi_4(L) = 0 \quad (2.5d)$$

Fungsi interpolasi tersebut dapat berupa berbagai bentuk sembarang yang memenuhi kondisi batas. Satu kemungkinannya adalah bentuk lendutan tepat dari elemen balok terhadap kondisi batas yang berlaku, tetapi hal ini sulit untuk ditentukan jika kepadatan lentur bervariasi sepanjang bentang. Untuk balok seragam, dengan mengabaikan deformasi geser, persamaan kesetimbangan untuk balok tanpa beban adalah sebagai berikut.

$$EI \frac{d^4 u}{dx^4} = 0 \quad (2.6)$$

Solusi umum persamaan di atas untuk balok seragam adalah fungsi polinomial pangkat tiga.

$$u(x) = a_1 + a_2 \left(\frac{x}{L}\right) + a_3 \left(\frac{x}{L}\right)^2 + a_4 \left(\frac{x}{L}\right)^3 \quad (2.7)$$

Konstanta  $a_i$  dapat ditentukan untuk keempat kondisi batas sehingga menghasilkan

$$\psi_1(x) = 1 - 3\left(\frac{x}{L}\right)^2 + 2\left(\frac{x}{L}\right)^3 \quad (2.8a)$$

$$\psi_2(x) = L\left(\frac{x}{L}\right) - 2L\left(\frac{x}{L}\right)^2 + L\left(\frac{x}{L}\right)^3 \quad (2.8b)$$

$$\psi_3(x) = 3\left(\frac{x}{L}\right)^2 - 2\left(\frac{x}{L}\right)^3 \quad (2.8c)$$

$$\psi_4(x) = -L\left(\frac{x}{L}\right)^2 + L\left(\frac{x}{L}\right)^3 \quad (2.8d)$$



Fungsi interpolasi tersebut dapat digunakan untuk memformulasikan matriks elemen untuk elemen non-seragam.

### 2.2.1.3 Matriks Kekakuan Elemen

Matriks kekakuan elemen struktur dibentuk dengan prinsip deformasi virtual menjadi persamaan umum

$$k_{ij} = \int_0^L EI(x) \psi''_i(x) \psi''_j(x) dx \quad (2.9)$$

atau secara verbal dapat dijabarkan bahwa koefisien pengaruh kekakuan elemen balok  $k_{ij}$  adalah gaya yang terjadi pada DOF  $i$  akibat lendutan satuan pada DOF  $j$ . Untuk elemen hingga seragam dimana  $EI(x) = EI$ , integral persamaan tersebut dapat dievaluasi secara analitis, menghasilkan matriks kekakuan elemen balok seperti berikut.

$$\bar{\mathbf{k}}_e = \frac{EI}{L^3} \begin{bmatrix} 12 & 6L & -12 & 6L \\ 6L & 4L^2 & -6L & 2L^2 \\ -12 & -6L & 12 & -6L \\ 6L & 2L^2 & -6L & 4L^2 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Pada kasus portal bidang, elemen dapat dibebani secara aksial, sehingga pada tiap nodal terdapat tiga DOF aktif yaitu sumbu lokal  $x$ , sumbu lokal  $y$ , dan putaran sudut. Oleh karena itu matriks kekakuan diubah menjadi matriks  $6 \times 6$  dengan menggabungkan matriks kekakuan untuk rangka sehingga didapatkan matriks kekakuan elemen untuk portal bidang sebagai berikut.

$$\bar{\mathbf{k}}_e = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Matriks ini masih mengacu pada sumbu koordinat lokal tiap elemen. Untuk menyesuaikannya dengan sumbu global, matriks tersebut dikalikan dengan matriks transformasi sebagai berikut (Katili, 2008).

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Matriks kekakuan elemen mengacu pada sumbu koordinat global struktur adalah hasil dari operasi matriks berikut.

$$\mathbf{k}_e = \mathbf{T}^T \bar{\mathbf{k}}_e \mathbf{T} \quad (2.13)$$

#### 2.2.1.4 Matriks Massa Elemen

Dengan prinsip yang sama, matriks massa struktur dapat dibentuk melalui persamaan umum

$$m_{ij} = \int_0^L m(x) \psi_i(x) \psi_j(x) dx \quad (2.14)$$

atau secara verbal dapat dijabarkan bahwa koefisien pengaruh massa elemen balok  $m_{ij}$  adalah gaya yang terjadi pada DOF  $i$  akibat percepatan satuan pada DOF  $j$ . Untuk elemen hingga dengan massa terdistribusi seragam ( $m(x) = m$ ), integral persamaan tersebut dapat dievaluasi secara analitis, menghasilkan matriks massa konsisten elemen balok seperti berikut.

$$\bar{\mathbf{m}}_e = \frac{mL}{420} \begin{bmatrix} 156 & 22L & 54 & -13L \\ 22L & 4L^2 & 13L & -3L^2 \\ 54 & 13L & 156 & -22L \\ -13L & -3L^2 & -22L & 4L^2 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Matriks massa konsisten dari elemen hingga dapat disederhanakan dengan mengasumsikan bahwa massa terdistribusi sepanjang elemen dapat digumpalkan sebagai massa terpusat sepanjang DOF translasional  $u_1$  dan  $u_3$  pada ujung-ujung

elemen. Kedua massa tersebut dapat ditentukan dengan analisis statis balok terhadap massa sendirinya. Jika massa elemen seragam adalah  $m$  per satuan panjang, maka besar massa terpusat pada tiap ujung adalah  $mL/2$  sehingga matriks massanya menjadi seperti berikut.

$$\bar{\mathbf{m}}_e = mL \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Formulasi massa konsisten akan menghasilkan analisis respon yang lebih ideal, sedangkan formulasi massa tergrup akan mempermudah dan mempercepat analisis.

Untuk kasus portal bidang, matriks massa konsisten elemen struktur terhadap sumbu lokal adalah sebagai berikut.

$$\bar{\mathbf{m}}_e = \frac{mL}{420} \begin{bmatrix} 140 & 0 & 0 & 70 & 0 & 0 \\ 0 & 156 & 22L & 0 & 54 & -13L \\ 0 & 22L & 4L^2 & 0 & 13L & -3L^2 \\ 70 & 0 & 0 & 140 & 0 & 0 \\ 0 & 54 & 13L & 0 & 156 & -22L \\ 0 & -13L & -3L^2 & 0 & -22L & 4L^2 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Matriks massa elemen mengacu pada sumbu koordinat global struktur adalah hasil dari operasi matriks berikut.

$$\mathbf{m}_e = \mathbf{T}^T \bar{\mathbf{m}}_e \mathbf{T} \quad (2.18)$$

#### 2.2.1.5 Matriks Gaya Elemen Yang Bekerja

Jika gaya luar  $p_i(t)$ ,  $i = 1, 2, 3$ , dan  $4$ , bekerja pada nodal elemen, vektor gaya elemen dapat ditulis secara langsung. Namun, jika gaya luar yang bekerja adalah gaya terdistribusi  $p(x, t)$  dan gaya terpusat  $p'_j(t)$  pada lokasi  $x_j$ , gaya nodal pada DOF  $i$  adalah sebagai berikut.

$$p_i(t) = \int_0^L p(x, t) \psi_i(x) dx + \sum_j p'_j \psi_i(x_j) \quad (2.19)$$

Persamaan ini dapat ditemukan dengan prinsip deformasi virtual. Jika kita menggunakan fungsi interpolasi yang sama seperti pada persamaan (2.8), matriks yang dihasilkan disebut matriks gaya nodal konsisten.

Yang lebih sederhana, yaitu pendekatan yang kurang akurat adalah dengan menggunakan fungsi interpolasi linier:

$$\psi_1(x) = 1 - \frac{x}{L} \quad \psi_3(x) = \frac{x}{L} \quad (2.20)$$

Penyelesaian persamaan (2.19) akan menghasilkan matriks vektor gaya elemen  $\bar{\mathbf{p}}_e$  yang mengacu pada sumbu koordinat lokal elemen. Untuk menyesuaikannya dengan sumbu koordinat global, matriks tersebut harus dikalikan dengan transpose dari matriks transformasi.

$$\mathbf{p}_e = \mathbf{T}^T \bar{\mathbf{p}}_e \mathbf{T} \quad (2.21)$$

### 2.2.2 Frekuensi Dan Mode Getar Alami

Persamaan gerakan yang tercantum dalam persamaan (2.3) adalah persamaan gerak pada koordinat Cartesian. Untuk itu persamaan tersebut perlu ditransformasi ke dalam persamaan pola getar. Jika respon struktur merupakan linier elastis, maka lendutan adalah merupakan fungsi berikut.

$$\mathbf{u}(t) = \sum_{n=1}^N \phi_n q_n(t) \quad (2.22)$$

dimana matriks pola getar alami  $\phi_n$  merupakan matriks bentuk deformasi struktur untuk tiap mode dan tidak berubah terhadap waktu. Variasi waktu lendutan dituliskan sebagai fungsi harmonik sederhana

$$q_n(t) = A_n \cos \omega_n t + B_n \sin \omega_n t \quad (2.23)$$

dimana  $A_n$  dan  $B_n$  adalah konstanta integrasi yang dapat ditentukan melalui kondisi inisial gerakan. Turunan kedua untuk fungsi tersebut adalah

$$\ddot{q}_n(t) = -\omega_n^2 A_n \cos \omega_n t - \omega_n^2 B_n \sin \omega_n t \quad (2.24)$$

Substitusi persamaan (2.23) ke dalam persamaan (2.24) akan menghasilkan

$$\ddot{q}_n(t) = -\omega_n^2 q_n(t) \quad (2.25)$$

Dengan mengabaikan redaman pada struktur, maka persamaan gerak struktur dalam kondisi getar bebas dapat ditulis sebagai

$$\sum (\mathbf{m}\phi_n \ddot{q}_n(t) + \mathbf{k}\phi_n q_n(t)) = \{0\} \quad (2.26)$$

Substitusi persamaan (2.25) ke dalam persamaan (2.26) akan menghasilkan

$$\sum (-\omega_n^2 \mathbf{m} + \mathbf{k})\phi_n q_n(t) = \{0\} \quad (2.27)$$

Persamaan di atas akan bernilai nol untuk dua kondisi, yaitu untuk  $q_n(t) = 0$  yang berarti kondisi awal sistem ( $t = 0$ ) serta kondisi dimana frekuensi natural  $\omega_n$  dan mode  $\phi_n$  harus memenuhi persamaan aljabar berikut.

$$\mathbf{k}\phi_n = \omega_n^2 \mathbf{m}\phi_n \quad (2.28)$$

Persamaan aljabar ini kemudian dinamakan *matrix eigenvalue problem*. Untuk mendapatkan solusi formal, persamaan tersebut ditulis ulang dalam bentuk

$$(-\omega_n^2 \mathbf{m} + \mathbf{k})\phi_n = 0 \quad (2.29)$$

Persamaan tersebut memiliki solusi nontrivial sebagai berikut.

$$\det(-\omega_n^2 \mathbf{m} + \mathbf{k}) = 0 \quad (2.30)$$

Determinan matriks tersebut memberikan nilai frekuensi getar alami  $\omega_n$  untuk tiap mode. Jika nilai frekuensi getar alami  $\omega_n$  tersebut disubstitusikan ke dalam persamaan (2.29) maka nilai dari  $\phi_n$  untuk tiap mode dapat ditentukan.

Untuk sistem dengan derajat kebebasan yang sangat banyak, penyelesaian persamaan (2.28) ke dalam persamaan (2.30) menjadi tidak praktis. Oleh karena itu sejak dikembangkannya komputer digital, metode yang efisien untuk menyelesaikan masalah nilai eigen ini diteliti. Metode-metode ini antara lain: metode *inverse vector iteration*, *vector iteration with shifts*, maupun transformasi  $\mathbf{k}\phi_n = \omega_n^2 \mathbf{m}\phi_n$  ke dalam bentuk standar.

### 2.2.3 Ortogonalitas Mode Getar Alami

Mode alami bersesuaian dengan frekuensi getar alami yang berbeda memenuhi kondisi ortogonalitas. Ketika  $\omega_n \neq \omega_r$ , maka

$$\phi_n^T \mathbf{k} \phi_r = 0 \quad \phi_n^T \mathbf{m} \phi_r = 0 \quad (2.31)$$

Hal ini dapat dibuktikan untuk mode getar memenuhi  $\mathbf{k} \phi_n = \omega_n^2 \mathbf{m} \phi_n$  dan frekuensi getar alami ke- $n$ , persamaan tersebut dikalikan oleh matriks  $\phi_r^T$  yang merupakan transpose dari matriks getar alami ke- $r$ ,  $\phi_r$ , sehingga

$$\phi_r^T \mathbf{k} \phi_n = \omega_n^2 \phi_r^T \mathbf{m} \phi_n \quad (2.32)$$

Sama seperti sebelumnya, untuk mode dan frekuensi getar alami ke- $r$ , persamaan tersebut dikalikan oleh matriks  $\phi_n^T$ , sehingga

$$\phi_n^T \mathbf{k} \phi_r = \omega_r^2 \phi_n^T \mathbf{m} \phi_r \quad (2.33)$$

Transpose matriks pada sisi kiri persamaan (2.32) hasilnya sama dengan matriks pada sisi kanan persamaan (2.33), sehingga

$$\phi_n^T \mathbf{k} \phi_r = \omega_r^2 \phi_n^T \mathbf{m} \phi_r \quad (2.34)$$

dimana hubungan matriks massa dan matriks kekakuan sudah diketahui sehingga persamaan tersebut dapat disubstitusikan menjadi

$$(\omega_n^2 - \omega_r^2) \phi_n^T \mathbf{m} \phi_r = 0 \quad (2.35)$$

Maka dari persamaan di atas terbukti bahwa persamaan (2.31) benar jika  $\omega_n^2 \neq \omega_r^2$ . Untuk sistem dengan frekuensi getar alami positif maka dapat dikatakan persamaan tersebut benar jika  $\omega_n \neq \omega_r$ . Dengan mensubstitusikan persamaan (2.31b) ke dalam persamaan (2.33) akan menghasilkan persamaan (2.31a) benar jika  $\omega_n \neq \omega_r$ . Hal ini membuktikan hubungan ortogonalitas antara tiap mode.

Ortogonalitas mode getar alami menunjukkan bahwa matriks persegi berikut adalah diagonal:

$$\mathbf{K} \equiv \Phi^T \mathbf{k} \Phi \quad \mathbf{M} \equiv \Phi^T \mathbf{m} \Phi \quad (2.36)$$

dimana elemen diagonalnya adalah

$$K_n = \phi_n^T \mathbf{k} \phi_n \quad M_n = \phi_n^T \mathbf{m} \phi_n \quad (2.37)$$

maka  $K_n$  memenuhi kondisi  $K_n = \omega_n^2 M_n$  melalui pembuktian berikut.

$$K_n = \phi_n^T (\omega_n^2 \mathbf{m} \phi_n) = \omega_n^2 (\phi_n^T \mathbf{m} \phi_n) = \omega_n^2 M_n \quad (2.38)$$

#### 2.2.4 Persamaan Modal Untuk Sistem Dengan Redaman

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.22) ke dalam persamaan (2.3) dihasilkan persamaan

$$\mathbf{m} \phi_n \ddot{q}_n(t) + \mathbf{c} \phi_n \dot{q}_n(t) + \mathbf{k} \phi_n q_n(t) = \mathbf{p}(t) \quad (2.39)$$

Dengan mengalikan persamaan di atas dengan transpose matriks mode getar alami  $\phi_n^T$ , didapatkan persamaan gerak SDOF untuk  $n$  mode getar alami sebagai berikut

$$M_n \ddot{q}_n(t) + C_n \dot{q}_n(t) + K_n q_n(t) = \phi_n^T \mathbf{p}(t) \quad (2.40)$$

Dengan membagi persamaan di atas dengan  $M_n$ , didapatkan persamaan yang lebih sederhana, yaitu

$$\ddot{q}_n(t) + 2\zeta \omega_n \dot{q}_n(t) + \omega_n^2 q_n(t) = p_n(t) \quad (2.41)$$

Persamaan ini dapat diselesaikan seperti untuk sistem SDOF dengan evaluasi analitik, seperti faktor integral, deret Fourier, dan integral Duhamel; maupun dengan evaluasi numerik, seperti metode *time-stepping*, metode *central difference*, atau metode Newmark. Peyelesaian ini merupakan analisis riwayat waktu. Analisis riwayat waktu menyediakan respon struktur sebagai fungsi dari waktu. Selain penyelesaian dalam riwayat waktu yang telah disebutkan di atas, solusi persamaan tersebut dapat dicari dalam frekuensi yaitu dengan metode respon spektrum. Pada metode respon spektrum, respon puncak dapat diketahui secara langsung dari spektrum respon terhadap eksitasi tanpa perlu mencari fungsi respon struktur terhadap waktu.

### 2.2.5 Penyelesaian Persamaan MDOF

Penyelesaian persamaan (2.41) akan menghasilkan nilai lendutan modal  $q_n(t)$ . Setelah nilai  $q_n(t)$  didapatkan, maka langkah selanjutnya adalah menghitung kembali matriks lendutan sistem struktur melalui persamaan (2.22). Setelah matriks lendutan  $\mathbf{u}(t)$  didapatkan, maka gaya-gaya dalam yang timbul pada tiap elemen dapat dihitung sebagai berikut.

$$\mathbf{f}_e(t) = \mathbf{k}_e \mathbf{u}(t) \quad (2.42)$$

## 2.3 RESPON TERHADAP EKSITASI HARMONIK DENGAN REDAMAN VISKOS

Selain itu, Chopra (1997) juga menjelaskan mengenai respon struktur berderajat kebebasan tunggal terhadap eksitasi harmonik dengan redaman viskos. Berikut adalah penjelasan tersebut.

### 2.3.1 Respon *Steady-State* dan Transien

Dengan mengikutsertakan redaman viskos, persamaan diferensial yang menyatakan respon sistem SDOF terhadap gaya harmonik adalah

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p_o \sin \omega t \quad (2.43)$$

Persamaan ini diselesaikan untuk kondisi inisial

$$u = u(0) \quad \dot{u} = \dot{u}(0) \quad (2.44)$$

Solusi khusus untuk persamaan diferensial ini adalah

$$u_p(t) = C \sin \omega t + D \cos \omega t \quad (2.45)$$

dimana

$$C = \frac{p_o}{k} \frac{1 - (\omega/\omega_n)^2}{[1 - (\omega/\omega_n)^2]^2 + [2\zeta(\omega/\omega_n)]^2} \quad (2.46)$$

$$D = \frac{p_o}{k} \frac{-2\zeta \omega/\omega_n}{[1 - (\omega/\omega_n)^2]^2 + [2\zeta(\omega/\omega_n)]^2}$$

Solusi komplementer dari persamaan (2.43) adalah respon getaran bebas:

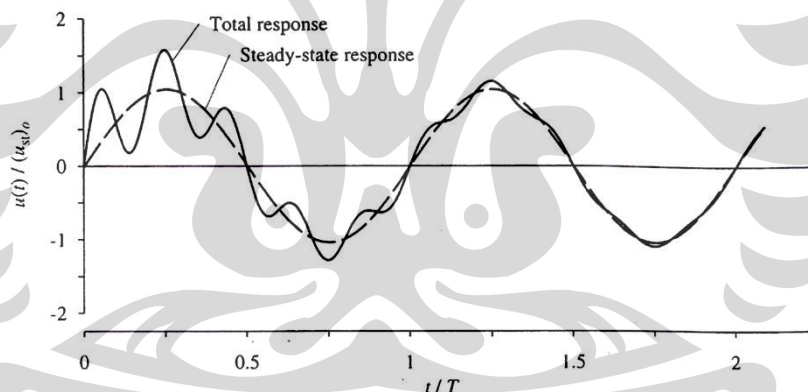


$$u_c(t) = e^{-\zeta\omega_n t} (A \cos \omega_D t + B \sin \omega_D t)$$

dimana  $\omega_D = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$ . Solusi lengkap dari persamaan (2.43) adalah

$$u_c(t) = \underbrace{e^{-\zeta\omega_n t} (A \cos \omega_D t + B \sin \omega_D t)}_{\text{transient}} + \underbrace{C \sin \omega t + D \cos \omega t}_{\text{steady state}} \quad (2.47)$$

dimana konstanta  $A$  dan  $B$  dapat ditentukan melalui prosedur standar pada kondisi inisial  $u(0)$  dan velositas inisial  $\dot{u}(0)$ . Persamaan (2.47) diplot pada gambar 2.2 untuk  $\omega/\omega_n = 0,2$ ,  $\zeta = 0,05$ ,  $u(0) = 0$ , dan  $\dot{u}(0) = \omega_n p_o/k$ ; respon total ditampilkan sebagai garis sambung dan respon *steady-state* ditunjukkan dengan garis putus-putus. Perbedaan keduanya adalah respon transien, yang berkurang secara eksponensial terhadap waktu tergantung  $\omega/\omega_n$  dan  $\zeta$ . Setelah beberapa waktu, hanya respon terhadap getar paksa yang masih berlanjut, dan disebut sebagai respon *steady-state*. Perlu diketahui, bahwa bagaimanapun juga puncak deformasi terbesar dapat terjadi sebelum sistem mencapai kondisi *steady-state*.



**Gambar 2.2.** Respon sistem teredam terhadap gaya harmonik;  $\omega/\omega_n = 0,2$ ,  $\zeta = 0,05$ ,  $u(0) = 0$ , dan  $\dot{u}(0) = \omega_n p_o/k$

Sumber: Chopra, A. K., *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering* (International ed.), Prentice Hall International, Inc, Singapore, 1997, hal 69.

### 2.3.2 Respon Untuk $\omega = \omega_n$

Untuk  $\omega = \omega_n$ , persamaan (2.46) memberikan  $C = 0$  dan  $D = -(u_{st})_o/2\zeta$ ; untuk  $\omega = \omega_n$  dan kondisi inisial nol, konstanta  $A$  dan  $B$  pada persamaan (2.47) dapat ditentukan:  $A = (u_{st})_o/2\zeta$  dan  $B = (u_{st})_o/2\sqrt{1 - \zeta^2}$ . Dengan solusi-solusi tersebut untuk nilai  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , dan  $D$ , persamaan (2.47) menjadi

$$u(t) = (u_{st})_o \frac{1}{2\zeta} \left[ e^{-\zeta\omega_n t} \left( \cos \omega_D t + \frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin \omega_D t \right) - \cos \omega_n t \right] \quad (2.48)$$

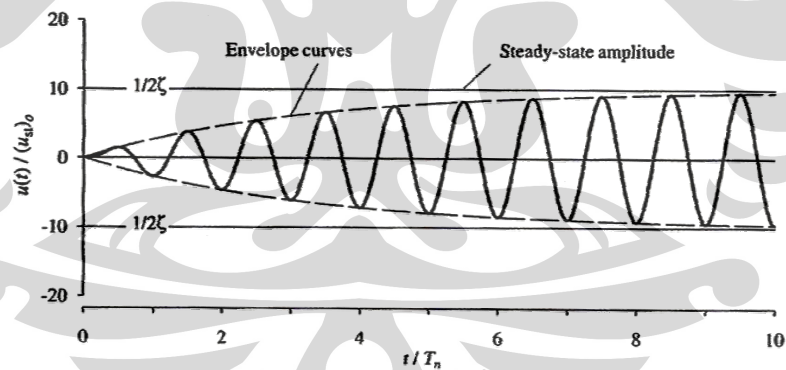
Hasil ini diplot pada gambar 2.3 untuk sistem dengan  $\zeta = 0,05$ . Perbandingan sistem teredam dan sistem tak teredam menunjukkan bahwa redaman menurunkan tiap puncak dan membatasi respon menjadi nilai terbatas:

$$u_o = \frac{(u_{st})_o}{2\zeta} \quad (2.49)$$

Untuk sistem dengan redaman kecil, bagian sinusoidal pada persamaan (2.48) sangat kecil dan  $\omega_D \approx \omega_n$ , sehingga persamaan menjadi

$$u(t) \approx \underbrace{(u_{st})_o \frac{1}{2\zeta}}_{\text{envelope function}} (e^{-\zeta\omega_n t} - 1) \cos \omega_n t \quad (2.50)$$

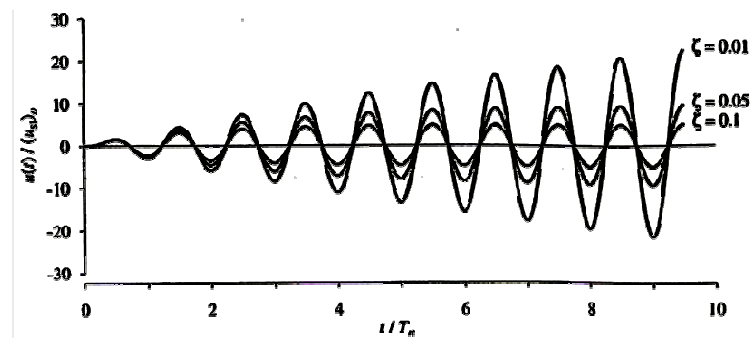
Deformasi bervariasi menurut waktu sebagai fungsi kosinus, dengan amplitudo meningkat menurut waktu sesuai dengan fungsi amplop yang digambarkan dengan garis putus-putus pada gambar 2.2.



**Gambar 2.3.** Respon sistem teredam dengan  $\zeta = 0,05$  terhadap gaya sinusoidal pada frekuensi  $\omega = \omega_n$ ;  $u(0) = \dot{u}(0) = 0$

Sumber: Chopra, A. K., *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering* (International ed.), Prentice Hall International, Inc, Singapore, 1997, hal 70.

Amplitudo dari deformasi *steady-state* sistem terhadap gaya harmonik dengan  $\omega = \omega_n$  dan tingkatnya pada kondisi *steady-state* dipengaruhi dengan kuat oleh redaman. Pengaruh yang penting dari rasio redaman terlihat pada gambar 2.4, dimana persamaan (2.48) diplot untuk tiga rasio redaman:  $\zeta = 0,01$ ,  $0,05$ , dan  $0,1$ .



**Gambar 2.4.** Respon dari tiga sistem,  $\zeta = 0,01, 0,05, \text{ dan } 0,1$ , terhadap gaya sinusoidal pada frekuensi  $\omega = \omega_n$ ;  $u(0) = \dot{u}(0) = 0$

Sumber: Chopra, A. K., *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering* (International ed.), Prentice Hall International, Inc, Singapore, 1997, hal 71.

### 2.3.3 Deformasi Maksimum dan Beda Fase

Lendutan *steady-state* sistem akibat gaya harmonik, dideskripsikan oleh persamaan (2.45) dan (2.46), dapat ditulis kembali sebagai berikut

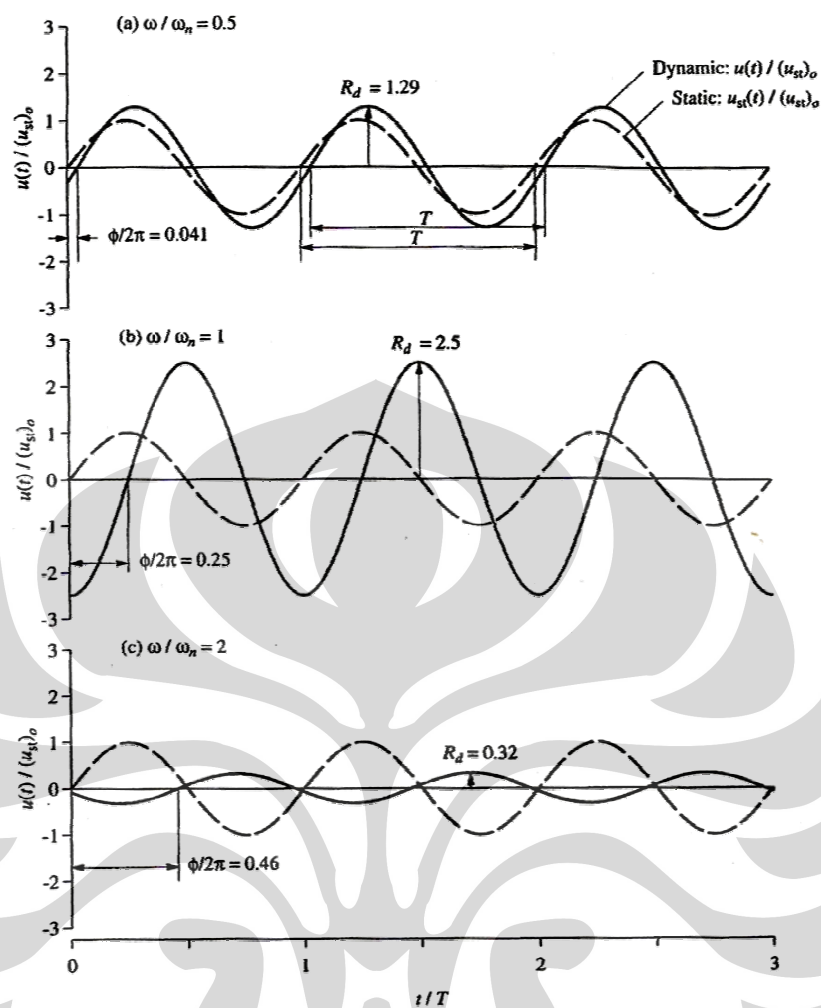
$$u(t) = u_o \sin(\omega t - \phi) = \frac{P_o}{k} R_d \sin(\omega t - \phi) \quad (2.51)$$

dimana  $u_o = \sqrt{C^2 + D^2}$  dan  $\phi = \tan^{-1}(-D/C)$ . Substitusi untuk  $C$  dan  $D$  memberikan

$$R_d = \frac{u_o}{(u_{st})_o} = \frac{1}{\sqrt{[1 - (\omega/\omega_n)^2]^2 + [2\zeta(\omega/\omega_n)]^2}} \quad (2.52)$$

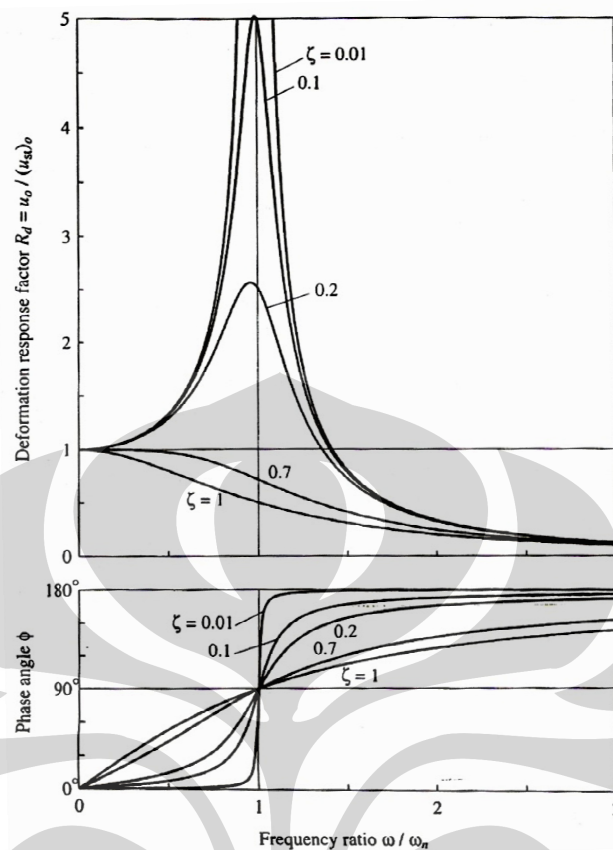
$$\phi = \tan^{-1} \frac{2\zeta(\omega/\omega_n)}{1 - (\omega/\omega_n)^2} \quad (2.53)$$

Persamaan (2.51) diplot pada gambar 2.5 untuk tiga nilai  $\omega/\omega_n$  dan nilai tetap  $\zeta = 0,2$ . Nilai  $R_d$  dan  $\Phi$  dapat dihitung dari persamaan (2.52) dan (2.53). Deformasi statik akibat  $p(t)$  terlihat sebagai garis putus-putus, yang bervariasi menurut waktu seperti halnya kerja gaya, kecuali untuk konstanta  $k$ . Gerakan *steady-state* ini terlihat terjadi pada periode kerja  $T = 2\pi/\omega$ , tetapi dengan beda waktu  $= \Phi/2\pi$ ;  $\Phi$  disebut sudut fase atau beda fase.



**Gambar 2.5.** Respon *steady-state* sistem teredam ( $\zeta = 0,2$ ) terhadap gaya sinusoidal untuk tiga nilai rasio frekuensi: (a)  $\omega / \omega_n = 0,5$ , (b)  $\omega / \omega_n = 1$ , (c)  $\omega / \omega_n = 2$

Sumber: Chopra, A. K., *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering* (International ed.), Prentice Hall International, Inc, Singapore, 1997, hal 73.



**Gambar 2.6.** Faktor respon deformasi dan sudut fase untuk sistem teredam digetarkan oleh gaya harmonik

Sumber: Chopra, A. K., *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering* (International ed.), Prentice Hall International, Inc, Singapore, 1997, hal 74.

Plot amplitudo kuantitas respon terhadap frekuensi eksitasi disebut kurva frekuensi-respon. Plot semacam ini untuk deformasi  $u$  diberikan pada gambar 2.6, dimana  $R_d$  diplot sebagai fungsi  $\omega/\omega_n$  untuk beberapa nilai  $\zeta$ . Redaman mengurangi  $R_d$  dan begitu juga amplitudo deformasi pada seluruh frekuensi eksitasi. Besaran reduksi tergantung dengan sangat kuat kepada frekuensi eksitasi dan diperiksa untuk tiga area skala frekuensi-eksitasi:

1. Jika rasio frekuensi  $\omega/\omega_n \ll 1$  (gaya bervariasi perlahan),  $R_d$  hanya sedikit lebih besar dari 1 dan utamanya tidak tergantung redaman, oleh karena itu

$$u(t) \simeq (u_{st})_o = \frac{P_o}{k} \quad (2.54)$$

Hasil ini menyiratkan bahwa respon dinamik hampir sama dengan deformasi statik dan dikontrol oleh kekakuan sistem.

2. Jika  $\omega/\omega_n \gg 1$  (gaya bervariasi dengan cepat),  $R_d$  menuju nol seiring kenaikan  $\omega/\omega_n$  dan utamanya tidak dipengaruhi redaman. Untuk nilai  $\omega/\omega_n$  yang sangat besar,  $(\omega/\omega_n)^4$  dominan pada persamaan (2.52), yang dapat didekati oleh

$$u_o \approx (u_{st})_o \frac{\omega_n^2}{\omega^2} = \frac{P_o}{m\omega^2} \quad (2.55)$$

Hasil ini menyiratkan bahwa respon dikontrol oleh massa sistem.

3. Jika  $\omega/\omega_n \approx 1$  (frekuensi kerja dekat dengan frekuensi alami sistem),  $R_d$  sangat sensitif terhadap redaman dan, untuk nilai redaman yang lebih kecil,  $R_d$  beberapa kali lebih besar dari 1, menyiratkan bahwa deformasi dinamik dapat lebih besar dari deformasi statik. Jika  $\omega = \omega_n$ , persamaan (2.52) memberikan

$$u_o = \frac{(u_{st})_o}{2\zeta} = \frac{P_o}{c\omega_n} \quad (2.56)$$

Hasil ini menyiratkan bahwa respon dikontrol oleh redaman sistem.

Sudut fase  $\Phi$ , yang mendefinisikan waktu dimana respon terlambat di belakang gaya, bervariasi dengan  $\omega/\omega_n$  seperti terlihat pada gambar 2.6. Kemudian diperiksa untuk tiga area skala frekuensi-eksitasi:

- a. Jika  $\omega/\omega_n \ll 1$ ,  $\Phi$  mendekati  $0^\circ$  dan lendutan sefase dengan gaya yang bekerja, seperti pada gambar 2.10a.
- b. Jika  $\omega/\omega_n \gg 1$ ,  $\Phi$  mendekati  $180^\circ$  dan lendutan berbeda fase dengan gaya yang bekerja, seperti pada gambar 2.10b.
- c. Jika  $\omega/\omega_n = 1$ ,  $\Phi = 90^\circ$  untuk semua nilai  $\zeta$ , dan lendutan mencapai puncaknya ketika gaya melewati nol, seperti pada gambar 2.5c.

### 2.3.4 Faktor Respon Dinamik

Faktor respon deformasi, velositas, dan akselerasi tidak memiliki dimensi dan menentukan amplitudo dari ketiga kuantitas respon. Lendutan *steady-state* pada persamaan (2.51) diulang untuk kenyamanan:

$$\frac{u(t)}{p_o/k} = R_d \sin(\omega t - \phi) \quad (2.57)$$

dimana, seperti telah dijelaskan sebelumnya,  $R_d$  adalah rasio amplitudo lendutan getar  $u_o$  terhadap lendutan statik  $(u_{st})_o$ . Dengan mendiferensiasi persamaan (2.57) didapatkan persamaan untuk respon velositas:

$$\frac{\dot{u}(t)}{p_o/\sqrt{km}} = R_v \cos(\omega t - \phi) \quad (2.58)$$

dimana faktor respon velositas  $R_v$  berhubungan dengan  $R_d$  oleh

$$R_v = \frac{\omega}{\omega_n} R_d \quad (2.59)$$

Dengan mendiferensiasi persamaan (2.58) didapatkan persamaan untuk respon akselerasi:

$$\frac{\ddot{u}(t)}{p_o/m} = -R_a \sin(\omega t - \phi) \quad (2.60)$$

dimana faktor respon akselerasi  $R_a$  berhubungan dengan  $R_d$  oleh

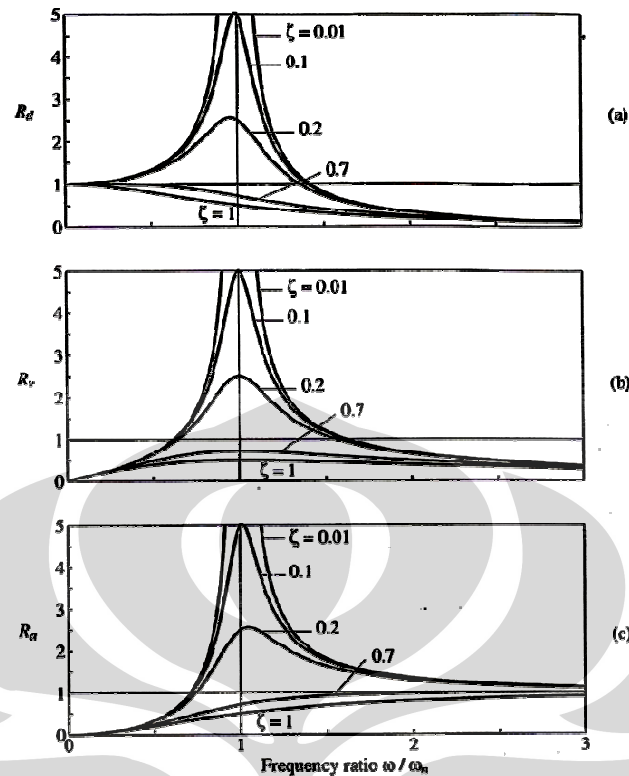
$$R_a = \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 R_d \quad (2.61)$$

Ditinjau dari persamaan (2.60) bahwa  $R_a$  adalah rasio amplitudo akselerasi getar terhadap akselerasi akibat gaya  $p_o$  bekerja pada massa.

Faktor respon dinamik  $R_d$ ,  $R_v$ , dan  $R_a$  diplot sebagai fungsi  $\omega/\omega_n$  pada gambar 2.7. Faktor respon deformasi  $R_d$  adalah satu satuan pada  $\omega/\omega_n = 0$ , mencapai puncak pada  $\omega/\omega_n < 1$ , dan mendekati nol pada  $\omega/\omega_n \rightarrow \infty$ . Faktor respon velositas  $R_v$  adalah nol pada  $\omega/\omega_n = 0$ , mencapai puncak pada  $\omega/\omega_n = 1$ , dan mendekati nol pada  $\omega/\omega_n \rightarrow \infty$ . Faktor respon akselerasi  $R_a$  adalah nol pada  $\omega/\omega_n = 0$ , mencapai puncak pada  $\omega/\omega_n > 1$ , dan mendekati satu satuan pada  $\omega/\omega_n \rightarrow \infty$ . Untuk  $\zeta > 1/\sqrt{2}$  tidak terjadi puncak untuk  $R_d$  dan  $R_a$ .

Hubungan sederhana di antara tiap faktor respon dinamik adalah

$$\frac{R_a}{\omega/\omega_n} = R_v = \frac{\omega}{\omega_n} R_d \quad (2.62)$$



**Gambar 2.7.** Faktor respon deformasi, velositas, dan akselerasi untuk sistem teredam yang digetarkan oleh gaya harmonik

Sumber: Chopra, A. K., *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering* (International ed.), Prentice Hall International, Inc, Singapore, 1997, hal 77.

### 2.3.5 Frekuensi Resonansi dan Respon Resonansi

Frekuensi resonansi didefinisikan sebagai frekuensi kerja pada saat amplitudo respon terbesar terjadi. Gambar 2.7 menunjukkan bahwa puncak pada kurva frekuensi-respon untuk lendutan, velositas, dan akselerasi terjadi pada frekuensi yang sedikit berbeda. Frekuensi resonansi tersebut dapat ditentukan dengan menghitung turunan pertama dari  $R_d$ ,  $R_v$ , dan  $R_a$  yang menghasilkan nilai nol dengan memperhatikan  $\omega/\omega_n$ ; untuk  $\zeta < 1/\sqrt{2}$  frekuensi resonansinya adalah:

- Frekuensi resonansi lendutan:  $\omega_n \sqrt{1 - 2\zeta^2}$
- Frekuensi resonansi velositas:  $\omega_n$
- Frekuensi resonansi akselerasi:  $\omega_n \div \sqrt{1 - 2\zeta^2}$

Untuk sistem tak teredam ketika frekuensi resonansi adalah identik dan sama dengan frekuensi alami  $\omega_n$  sistem. Intuisi mungkin menyarankan bahwa



frekuensi resonansi untuk sistem teredam seharusnya pada frekuensi alami  $\omega_D = \omega_n \sqrt{1 - 2\zeta^2}$ , tetapi hal ini tidak terjadi. Bagaimanapun juga, perbedaannya sangat kecil; untuk derajat redaman yang umum pada struktur, biasanya di bawah 20%, perbedaan di antara ketiga frekuensi resonansi dan frekuensi alami diabaikan.

Ketiga faktor respon dinamik pada frekuensi resonansi masing-masing adalah

$$R_d = \frac{1}{2\zeta\sqrt{1-\zeta^2}} \quad R_v = \frac{1}{2\zeta} \quad R_a = \frac{1}{2\zeta\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (2.63)$$

## 2.4 VIBRASI MESIN

### 2.4.1 Tipe-Tipe Mesin

Mesin dapat diklasifikasikan ke dalam tiga kategori utama, berdasarkan gerakan yang terjadi pada mesin, yaitu:

- *Shock machines*, yaitu alat yang memungkinkan terjadinya perubahan kecepatan benda uji pada periode yang pendek. *Shock machines* dibagi ke dalam dua kategori (Lalane & de Silva, 2005):
  - *Impulse machines*, yang menaikkan kecepatan benda uji selama *shock*. Benda uji umumnya berada pada kondisi awal diam.
  - *Impact machines*, yang menurunkan kecepatan benda uji melalui *shock* dan/atau mengubah arahnya.
- *Rotating machines*, yaitu mesin dengan bagian yang berotasi pada porosnya. Contohnya motor, kipas, turbin.
- *Reciprocating machines*, yaitu mesin yang memiliki *slider* yang bergerak secara rektilinear maju mundur pada jalurnya. Seringkali pada mesin ini terdapat juga bagian yang berotasi (de Silva, 2005). Contoh umumnya adalah piston.

Berdasarkan kriteria desain pondasinya, mesin diklasifikasikan menjadi (Srinivasulu & Vaidyanathan, 1982):

- Mesin yang menghasilkan *impact forces*, contohnya *forge hammers*, *presses*.

- Mesin yang menghasilkan gaya periodik, contohnya *reciprocating engines* seperti *compressors*.
- Mesin berkecepatan tinggi seperti turbin dan *rotary compressors*.
- Mesin lainnya.

Sedangkan berdasarkan frekuensi operasionalnya, mesin dapat dibagi ke dalam tiga kategori (Srinivasulu & Vaidyanathan, 1982):

- Frekuensi menengah ke bawah (0 – 500 *rpm*), contohnya sebagian besar *reciprocating engines*, *compressors*, dan *blowers*.
- Frekuensi menengah ke atas (300 – 1000 *rpm*), contohnya mesin diesel dan *gas engines*.
- Frekuensi sangat tinggi (lebih dari 1000 *rpm*), contohnya *high-speed internal combustion engines*, motor elektrik, dan *turbogenerator*.

#### 2.4.2 Penyebab Vibrasi

Secara umum, vibrasi pada mesin disebabkan oleh *unbalanced mass* yang terjadi pada mesin. Ketidakseimbangan ini terjadi pada bagian yang berotasi ketika pusat massanya tidak berhimpit dengan sumbu rotasinya. Eksentrisitas antara pusat massa dan sumbu rotasi ini terjadi karena (de Silva, 2005):

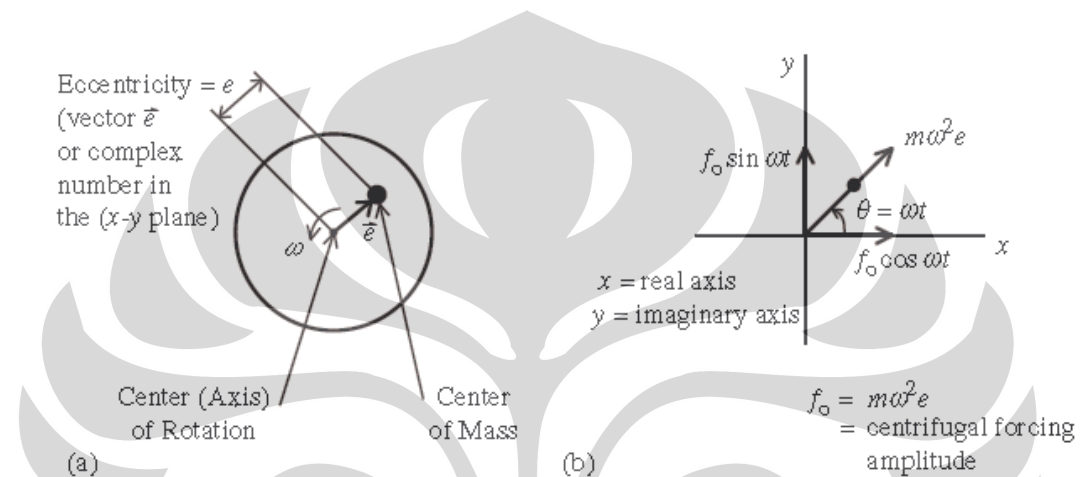
- a) Prosedur produksi yang tidak akurat (*machining*, *casting*, *forging*, *assemblying*, dan lainnya)
- b) *Wear and tear*
- c) Kondisi pembebanan (mekanikal)
- d) Kondisi lingkungan (beban termal dan lendutan)
- e) Penggunaan material nonhomogen dan anisotropik (yang distribusi kerapatannya tidak seragam)
- f) Kegagalan komponen
- g) Penambahan komponen pada bagian yang berotasi

#### 2.4.3 Gaya Dinamik Yang Dihasilkan

Gaya dinamik yang bekerja pada pondasi mesin dapat diklasifikasikan secara umum menjadi dua kategori (Srinivasulu & Vaidyanathan, 1982):

- *Shock* atau gaya impuls yang terjadi pada interval tertentu (contohnya *hammers* dan *presses*).
- Gaya steady-state yang bervariasi terhadap waktu menurut aturan sinus atau kosinus (contohnya *reciprocating machines* dan *rotating machines*).

Pada *rotating machines*, gaya dinamik yang terjadi akibat *unbalanced mass* dapat digambarkan sebagai berikut.

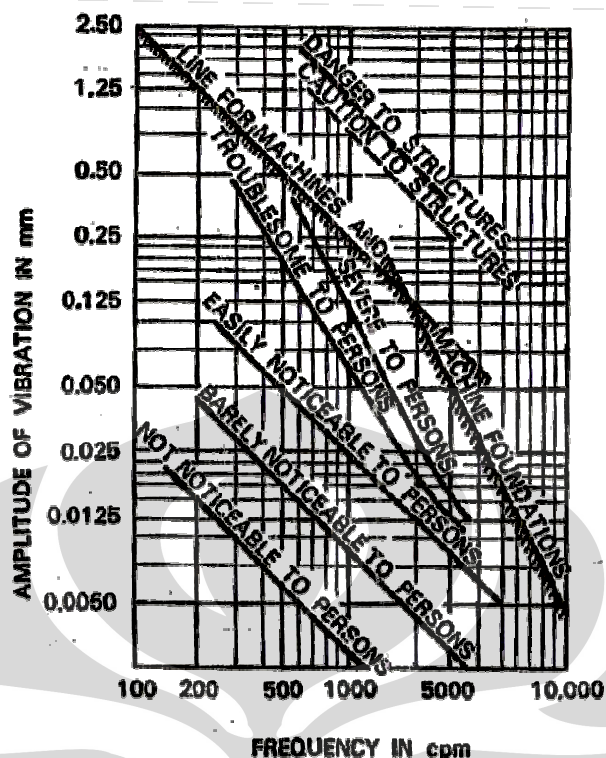


**Gambar 2.8.** (a) *Unbalance* pada *rotating disk* akibat eksentrisitas pusat massa; (b) vektor dari gaya sentripugal akibat *unbalance*

Sumber: De Silva, C. W., "Vibration Design and Control", dalam *Vibration and Shock Handbook* (ed. C. W. De Silva), Taylor & Francis, Boca Raton, 2005, hal 32-16.

#### 2.4.4 Batasan Vibrasi

Vibrasi pada mesin harus dibatasi untuk memenuhi batas keamanan mesin. Salah satu cara untuk membatasi vibrasi mesin adalah dengan batasan amplitudo yang diijinkan. Nilai batasan amplitudo yang diijinkan pada umumnya diberikan oleh pabrikan mesin. Jika nilai batasan amplitudo yang diijinkan tersebut tidak diberikan, nilai yang disarankan dapat dilihat pada grafik dan tabel berikut (Srinivasulu & Vaidyanathan, 1982).



Gambar 2.9. Batasan yang diijinkan untuk amplitudo vibrasi vertikal

Sumber: Srinivasulu, P., & Vaidyanathan, C. V., *Handbook of Machine Foundations*, Tata McGraw-Hill Publishing Company Ltd, New Delhi, 1982, hal 6.

Tabel 2.1. Amplitudo Yang Diijinkan

Tipe	Amplitudo yang diijinkan (mm)
1. Mesin berkecepatan rendah (500 rpm)	0,2 – 0,25
2. Hammer foundations	1 – 1,2
3. Mesin berkecepatan tinggi:	
a. 3000 rpm	
i. Vibrasi vertikal	0,02 – 0,03
ii. Vibrasi horisontal	0,04 – 0,05
b. 1500 rpm	
iii. Vibrasi vertikal	0,04 – 0,06
iv. Vibrasi horisontal	0,07 – 0,09

Sumber: Srinivasulu, P., & Vaidyanathan, C. V., *Handbook of Machine Foundations*, Tata McGraw-Hill Publishing Company Ltd, New Delhi, 1982, hal 7.

Selain itu, batasan vibrasi mesin juga dapat ditentukan berdasarkan nilai *Root-Mean-Square* (RMS) dari kecepatannya. Secara keseluruhan, getaran peralatan mesin dengan putaran mesin hingga 5000 rpm dapat diterima hingga nilai RMS kecepatannya 0,1 mm/s sedangkan pada getaran peralatan mesin

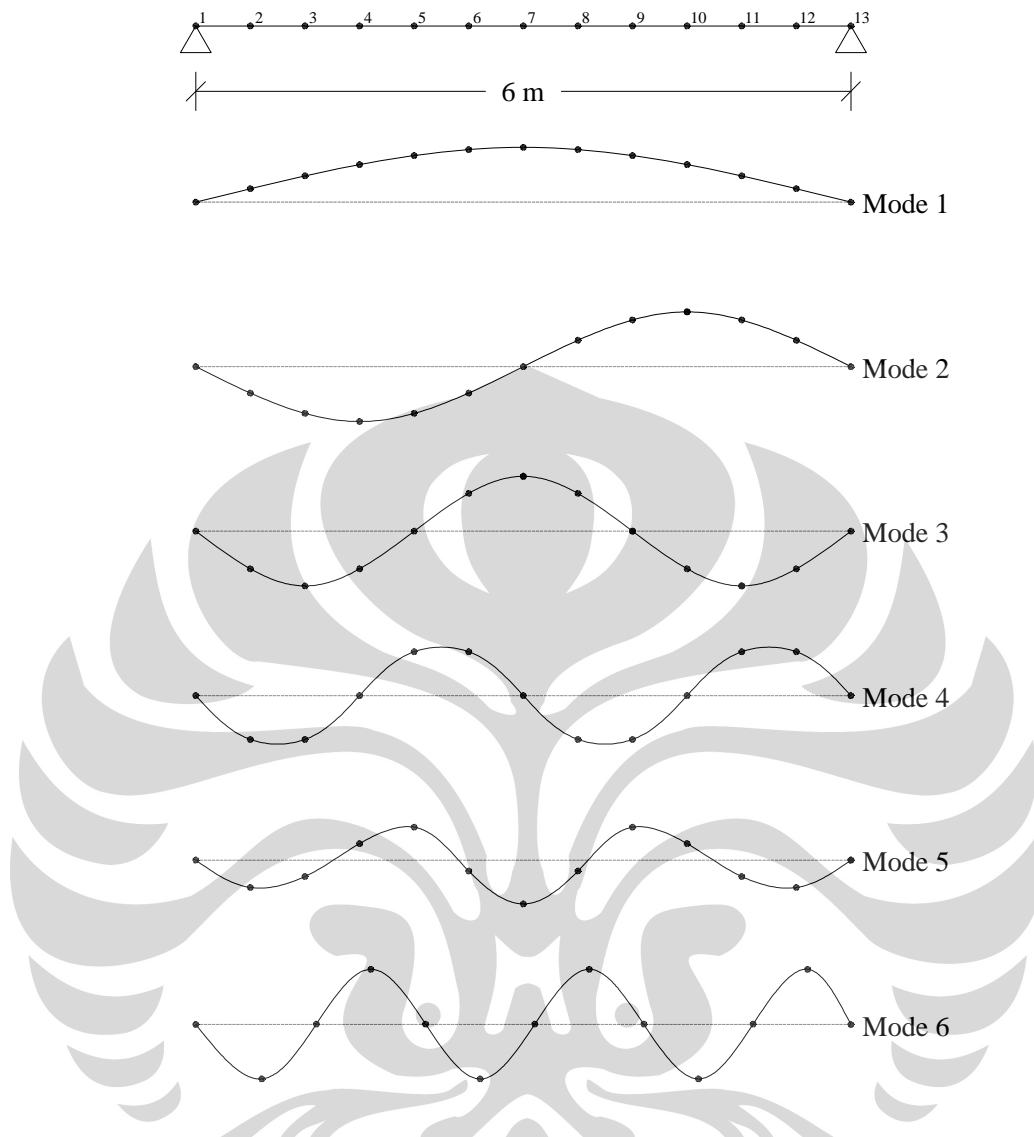
dengan putaran mesin lebih dari 5000 *rpm* dapat diterima hingga nilai RMS kecepataannya 1 *mm/s* (Kumaraswamy, Rakesh, & Nalavade, 2002).

## **2.5 BEBAN MULTI-EKSITASI PADA BALOK (STUDI SAP2000)**

Untuk memulai penelitian mengenai efek beban multi-eksitasi pada portal, efek beban multi-eksitasi pada balok sederhana dengan variasi frekuensi dan arah eksitasi terlebih dahulu dipelajari. Tujuannya adalah untuk mempelajari efek dari tiap pola-pola pembebanan, meninjau partisipasi tiap-tiap eksitasi terhadap lendutan struktur, dan membandingkannya dengan respon lendutan yang terjadi akibat tiap beban yang bekerja sendiri.

### **2.5.1 Properti Balok**

Balok sederhana yang ditinjau adalah balok sederhana dengan panjang bentang 6 *m* dan ditopang oleh sistem perletakan sendi-sendi. Balok tersebut dibentuk dari 12 elemen batang (13 nodal) dengan bentang 0,5 *m*. Berikut adalah penggambaran dari sistem struktur, beserta mode getar alami struktur.



**Gambar 2.10.** Modelisasi balok dan pola getar alaminya

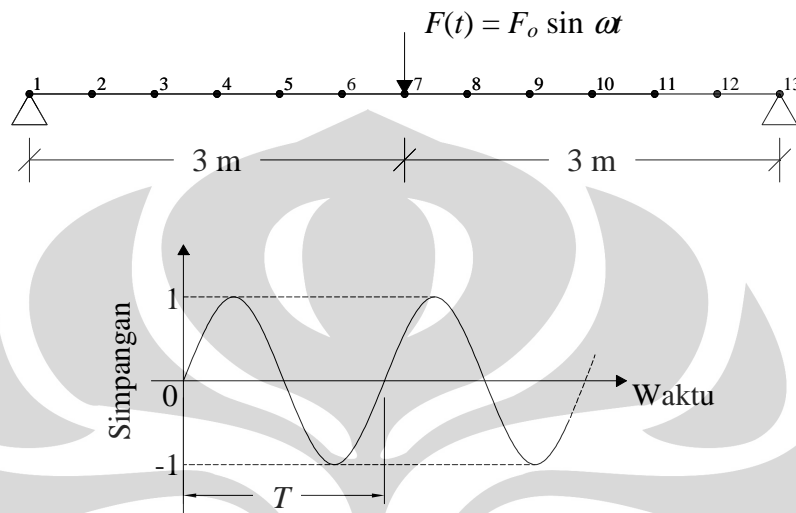
Frekuensi getar alami struktur untuk tiap mode dapat dilihat pada tabel berikut.

**Tabel 2.2.** Frekuensi Getar Struktur dan Partisipasi Massa Tiap Mode

Mode	$T_n$ (s)	$\omega_n$ (rad/s)	Rasio Partisipasi Massa	
			$U_z$	$R_y$
1	$5,063 \times 10^{-2}$	124,11	87,42%	68,41%
2	$1,297 \times 10^{-2}$	484,47	0,00%	16,52%
3	$6,000 \times 10^{-3}$	1047,2	8,83%	6,91%
4	$3,565 \times 10^{-3}$	1762,3	0,00%	3,56%
5	$2,445 \times 10^{-3}$	2570,3	2,57%	2,01%
6	$1,843 \times 10^{-3}$	3410	0,00%	1,19%

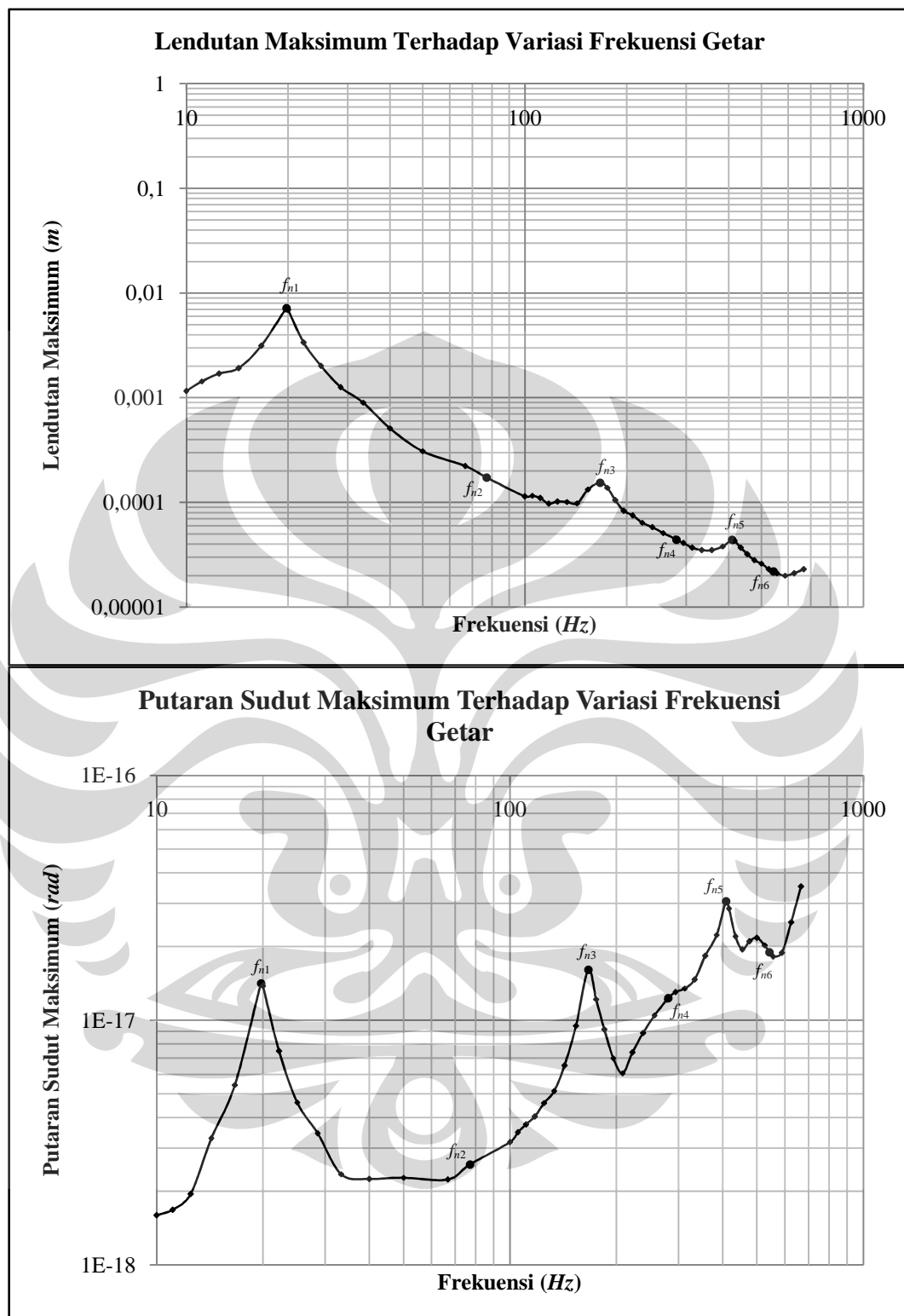
### 2.5.2 Balok Dengan Beban Dinamik di Tengah Bentang

Beban diberikan secara dinamik, terletak di tengah bentang balok (nodal 7) dengan besaran beban ( $F_o$ ) 10 kN pada arah gravitasi. Eksitasi yang diberikan adalah eksitasi sinusoidal dengan variasi frekuensi getar.



**Gambar 2.11.** Atas: pembebanan balok di tengah bentang; bawah: eksitasi sinusoidal beban

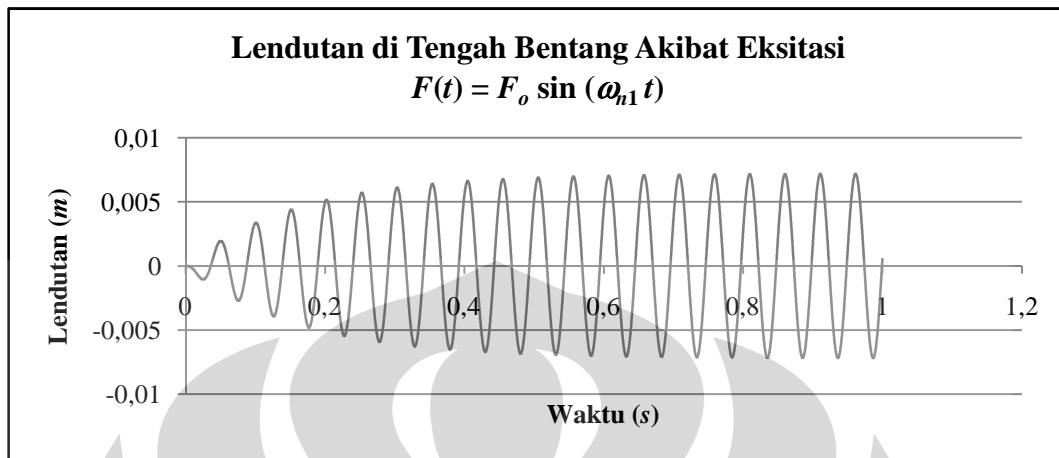
Beban dianalisis sebagai *linear modal history* dengan *modal damping* sebesar 5%. Analisis diperhitungkan selama kurun waktu 1 detik dengan interasi waktu sebesar  $1 \times 10^{-4}$  detik. Berikut adalah grafik perubahan lendutan maksimum dan putaran sudut maksimum di tengah bentang balok akibat variasi frekuensi getar.



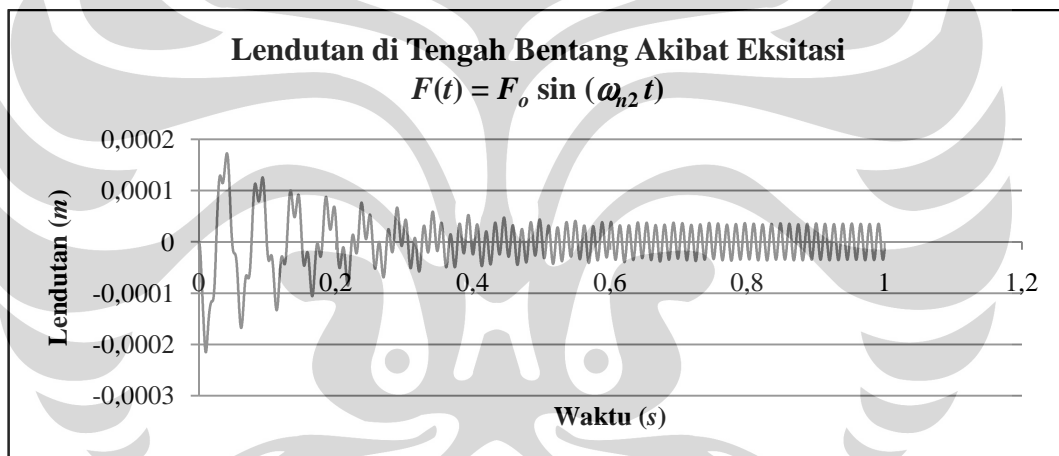
**Gambar 2.12.** Grafik pengaruh frekuensi terhadap: atas: lendutan maksimum; bawah: putaran sudut maksimum di tengah bentang



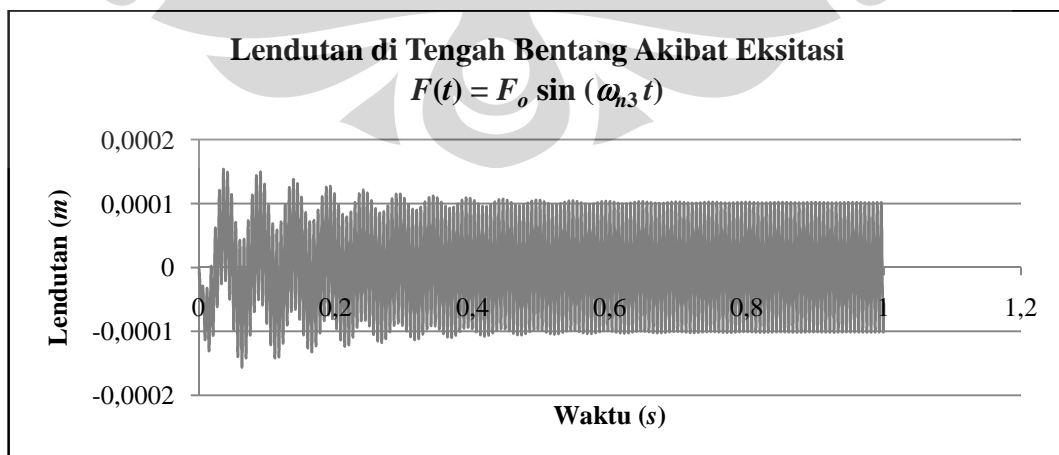
Plot fungsi lendutan di tengah bentang terhadap waktu untuk eksitasi dengan frekuensi getar  $\omega \in \omega_{n1}, \omega_{n2}, \dots, \omega_{n6}$  dapat dilihat sebagai berikut.



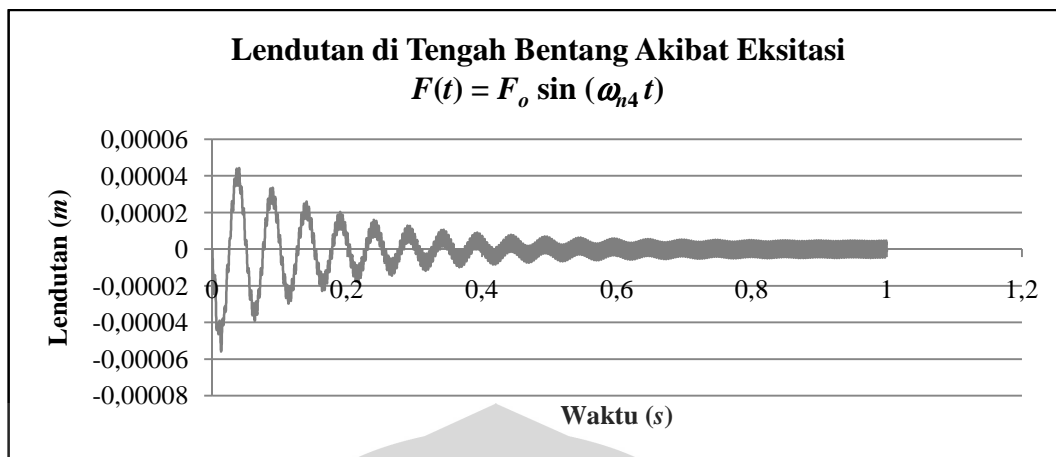
**Gambar 2.13.** Lendutan di tengah bentang untuk  $F(t) = F_o \sin(\omega_{n1} t)$



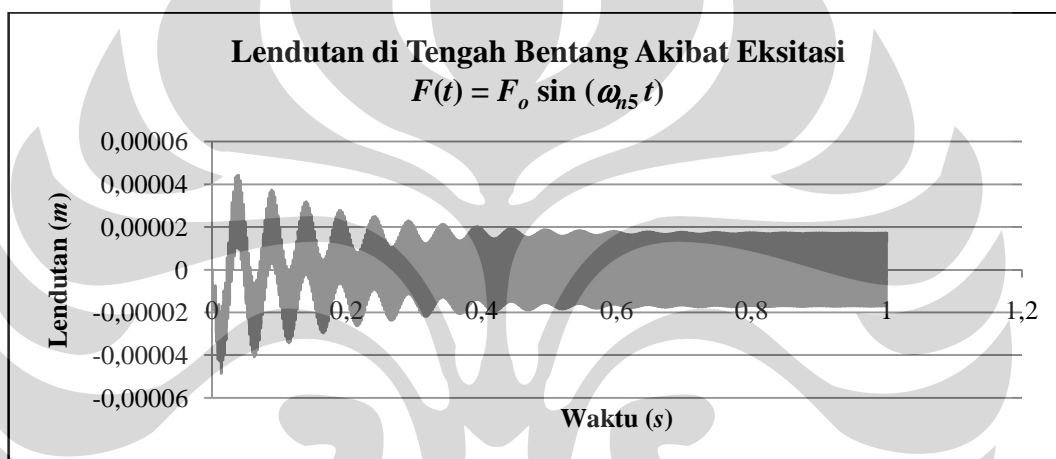
**Gambar 2.14.** Lendutan di tengah bentang untuk  $F(t) = F_o \sin(\omega_{n2} t)$



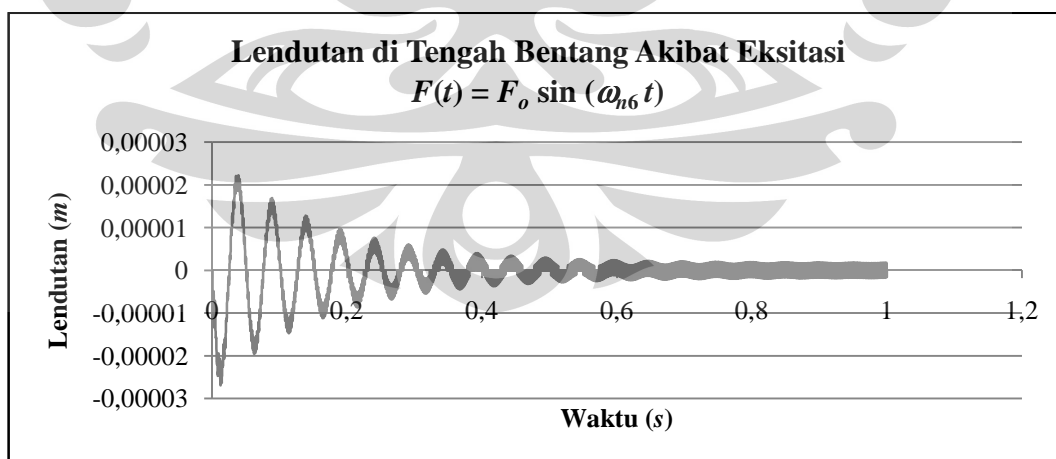
**Gambar 2.15.** Lendutan di tengah bentang untuk  $F(t) = F_o \sin(\omega_{n3} t)$



**Gambar 2.16.** Lendutan di tengah bentang untuk  $F(t) = F_o \sin(\omega_{n4} t)$



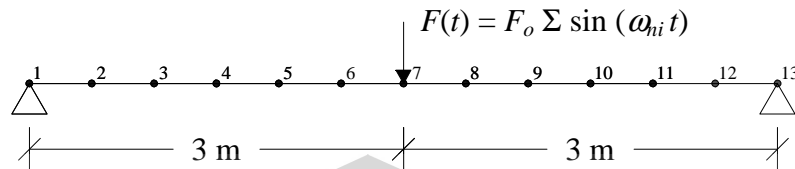
**Gambar 2.17.** Lendutan di tengah bentang untuk  $F(t) = F_o \sin \alpha t; (\omega_{n5} t)$



**Gambar 2.18.** Lendutan di tengah bentang untuk  $F(t) = F_o \sin(\omega_{n6} t)$

### 2.5.3 Balok Dengan Beban Multi-Eksitasi di Tengah Bentang

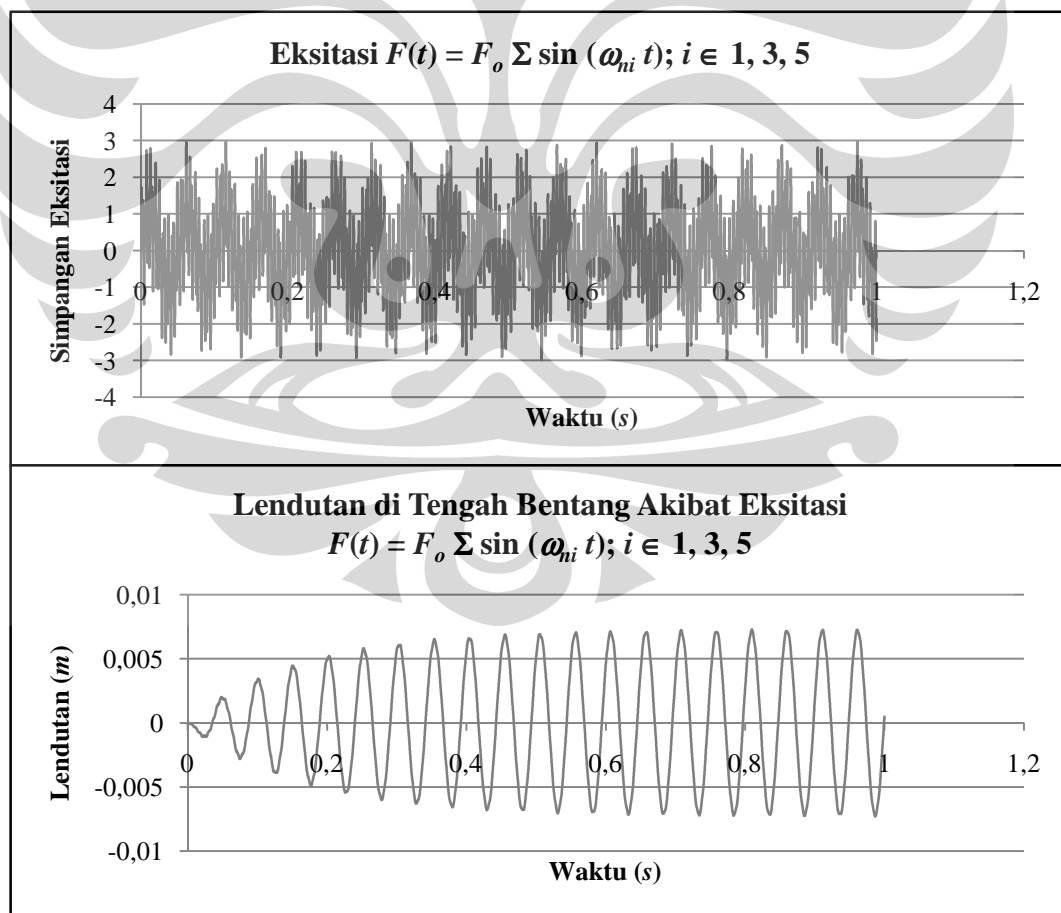
Setelah mempelajari respon struktur untuk pembebanan pada tiap-tiap frekuensi getar alami struktur, maka respon pembebanan tersebut dikombinasikan sebagai balok yang dikenai gaya multi-frekuensi di tengah bentang.



Gambar 2.19. Pembebanan multi-frekuensi di tengah bentang

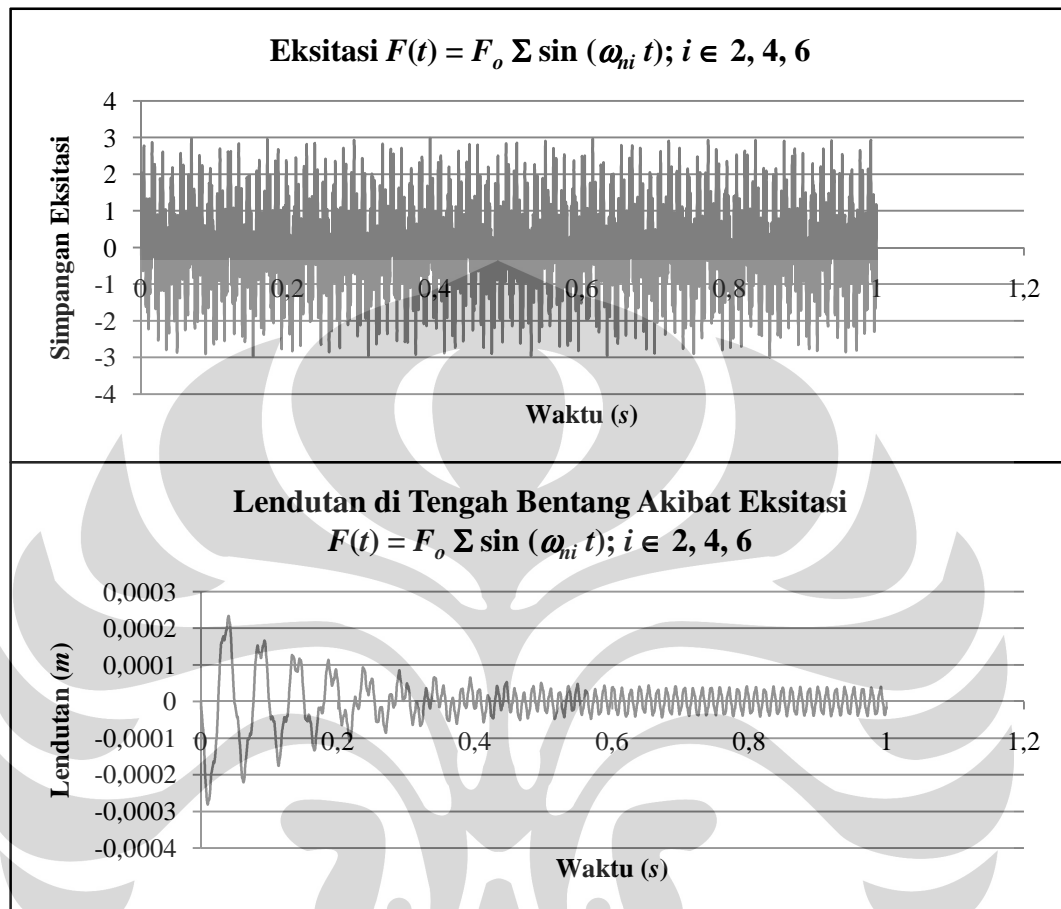
Jika lebih dari satu eksitasi bekerja, maka respon yang terjadi adalah jumlah dari respon tiap-tiap eksitasi yang terjadi, digambarkan sebagai berikut.

Untuk kasus dengan fungsi eksitasi beban  $F(t) = F_o \sum \sin(\omega_{ni} t); i \in 1, 3, 5$  lendutan di tengah bentang mencapai maksimum pada waktu 0,9868 detik.



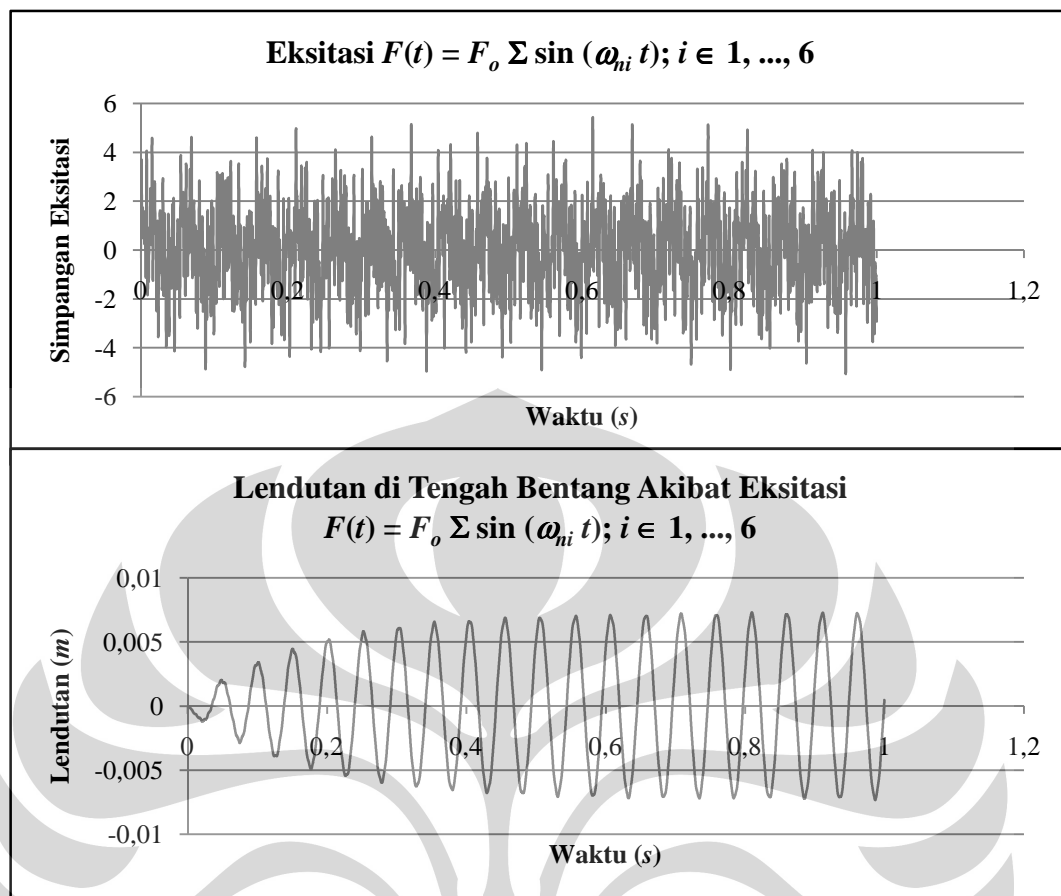
Gambar 2.20. Plot gaya dan lendutan untuk fungsi eksitasi  $F(t) = F_o \sum \sin(\omega_{ni} t); i \in 1, 3, 5$ . Atas: eksitasi beban; bawah: lendutan di tengah bentang

Untuk kasus dengan fungsi eksitasi beban  $F(t) = F_o \sum \sin(\omega_{ni} t); i \in 2, 4, 6$  lendutan di tengah bentang mencapai maksimum pada waktu 0,0102 detik.



**Gambar 2.21.** Plot gaya dan lendutan untuk fungsi eksitasi  $F(t) = F_o \sum \sin(\omega_{ni} t); i \in 2, 4, 6$ . Atas: eksitasi beban; bawah: lendutan di tengah bentang

Untuk kasus dengan fungsi eksitasi beban  $F(t) = F_o \sum \sin(\omega_{ni} t); i \in 1, \dots, 6$  lendutan di tengah bentang mencapai maksimum pada waktu 0,9868 detik.



**Gambar 2.22.** Plot gaya dan lendutan untuk fungsi eksitasi  $F(t) = F_o \sum \sin(\omega_{ni} t); i \in 1, \dots, 6$ .  
Atas: eksitasi beban; bawah: lendutan di tengah bentang

Setelah mengetahui lendutan maksimum tiap-tiap kasus multi-eksitasi dan waktu kejadiannya, maka partisipasi tiap-tiap eksitasi terhadap lendutan dan putaran sudut pada waktu yang memberikan lendutan maksimum dan putaran sudut maksimum di tengah bentang dapat dihitung ke dalam tabel berikut.

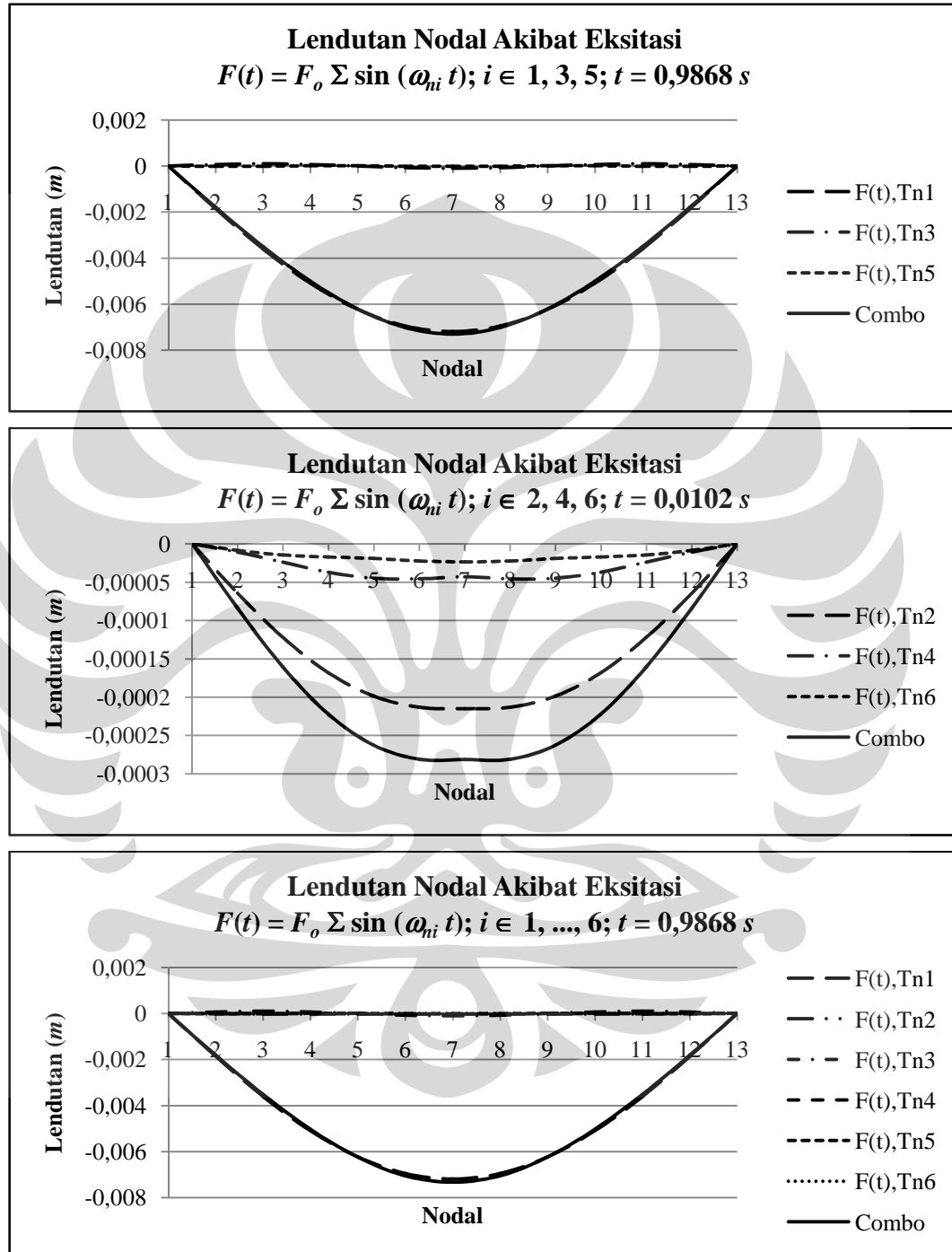
**Tabel 2.3.** Partisipasi Tiap Eksitasi Terhadap Lentutan Maksimum di Tengah Bentang

Kasus Eksitasi	Waktu (s)	$U_z$ (m)	Partisipasi (%)
$F(t) = F_o \sum \sin(\omega_{ni}t); i \in 1, 3, 5$	<b>0,9868</b>	<b><math>-7,305 \times 10^{-3}</math></b>	
$F(t) = F_o \sin(\omega_{n1}t)$		$-7,192 \times 10^{-3}$	98,45
$F(t) = F_o \sin(\omega_{n3}t)$		$-9,793 \times 10^{-5}$	1,34
$F(t) = F_o \sin(\omega_{n5}t)$		$-1,496 \times 10^{-5}$	0,20
$F(t) = F_o \sum \sin(\omega_i t); i \in 2, 4, 6$	<b>0,0102</b>	<b><math>-2,813 \times 10^{-4}</math></b>	
$F(t) = F_o \sin(\omega_{n2}t)$		$-2,148 \times 10^{-4}$	76,36
$F(t) = F_o \sin(\omega_{n4}t)$		$-4,289 \times 10^{-5}$	15,25
$F(t) = F_o \sin(\omega_{n6}t)$		$-2,370 \times 10^{-5}$	8,43
$F(t) = F_o \sum \sin(\omega_i t); i \in 1, 2, \dots, 6$	<b>0,9868</b>	<b><math>-7,326 \times 10^{-3}</math></b>	
$F(t) = F_o \sin(\omega_{n1}t)$		$-7,192 \times 10^{-3}$	98,17
$F(t) = F_o \sin(\omega_{n2}t)$		$-1,744 \times 10^{-5}$	0,24
$F(t) = F_o \sin(\omega_{n3}t)$		$-9,793 \times 10^{-5}$	1,34
$F(t) = F_o \sin(\omega_{n4}t)$		$-3,965 \times 10^{-6}$	0,05
$F(t) = F_o \sin(\omega_{n5}t)$		$-1,496 \times 10^{-5}$	0,20
$F(t) = F_o \sin(\omega_{n6}t)$	$-1,920 \times 10^{-7}$	0,00	

**Tabel 2.4.** Partisipasi Tiap Eksitasi Terhadap Putaran Sudut Maksimum di Tengah Bentang

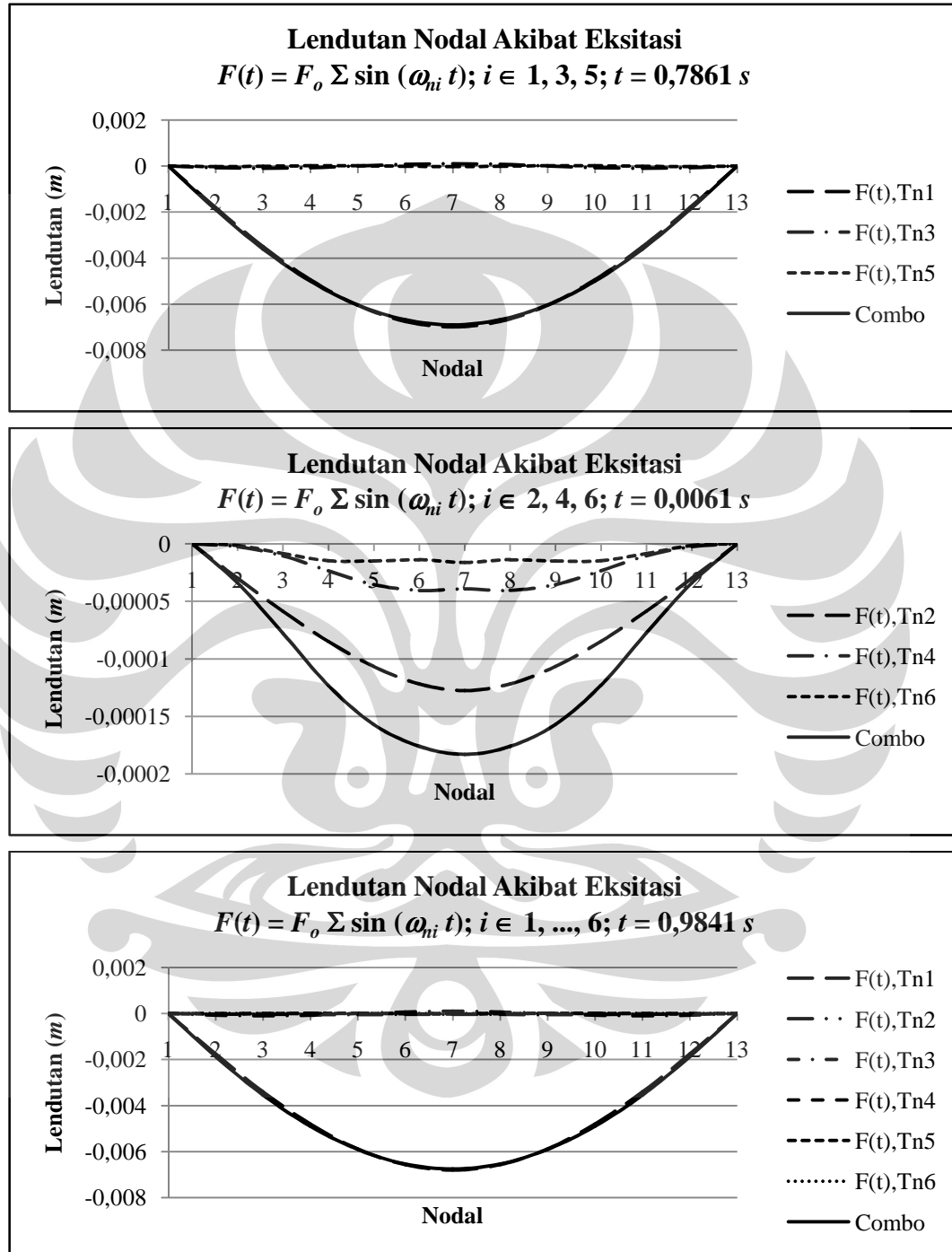
Kasus Eksitasi	Waktu (s)	$R_y$ (rad)	Partisipasi
$F(t) = F_o \sum \sin(\omega_{ni}t); i \in 1, 3, 5$	<b>0,7861</b>	<b><math>6,040 \times 10^{-17}</math></b>	
$F(t) = F_o \sin(\omega_{n1}t)$		$1,389 \times 10^{-17}$	23,00
$F(t) = F_o \sin(\omega_{n3}t)$		$1,600 \times 10^{-17}$	26,49
$F(t) = F_o \sin(\omega_{n5}t)$		$3,050 \times 10^{-17}$	50,50
$F(t) = F_o \sum \sin(\omega_i t); i \in 2, 4, 6$	<b>0,0061</b>	<b><math>-2,328 \times 10^{-17}</math></b>	
$F(t) = F_o \sin(\omega_{n2}t)$		$-1,272 \times 10^{-18}$	5,46
$F(t) = F_o \sin(\omega_{n4}t)$		$-8,659 \times 10^{-18}$	37,20
$F(t) = F_o \sin(\omega_{n6}t)$		$-1,335 \times 10^{-17}$	57,35
$F(t) = F_o \sum \sin(\omega_i t); i \in 1, 2, \dots, 6$	<b>0,9841</b>	<b><math>7,775 \times 10^{-17}</math></b>	
$F(t) = F_o \sin(\omega_{n1}t)$		$1,304 \times 10^{-17}$	16,77
$F(t) = F_o \sin(\omega_{n2}t)$		$5,033 \times 10^{-19}$	0,65
$F(t) = F_o \sin(\omega_{n3}t)$		$1,600 \times 10^{-17}$	20,58
$F(t) = F_o \sin(\omega_{n4}t)$		$8,985 \times 10^{-18}$	11,56
$F(t) = F_o \sin(\omega_{n5}t)$		$3,046 \times 10^{-17}$	39,18
$F(t) = F_o \sin(\omega_{n6}t)$	$8,758 \times 10^{-18}$	11,26	

Grafik respon lendutan kasus beban multi-eksitasi dan partisipasi tiap-tiap eksitasi pada keseluruhan bentang balok pada waktu yang memberikan lendutan maksimum di tengah bentang dapat digambarkan sebagai berikut.



**Gambar 2.23.** Lendutan tiap nodal akibat pembebanan multi-eksitasi pada waktu yang menghasilkan lendutan maksimum di tengah bentang

Grafik respon lendutan kasus beban multi-eksitasi dan partisipasi tiap-tiap eksitasi pada keseluruhan bentang balok pada waktu yang memberikan putaran sudut maksimum di tengah bentang dapat digambarkan sebagai berikut.

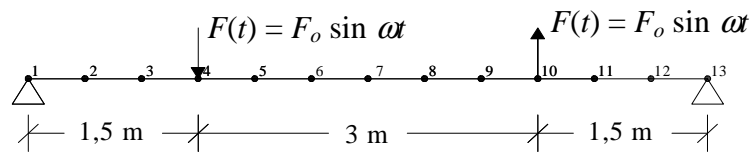


**Gambar 2.24.** Lendutan tiap nodal akibat pembebanan multi-eksitasi pada waktu yang memberikan putaran sudut maksimum di tengah bentang



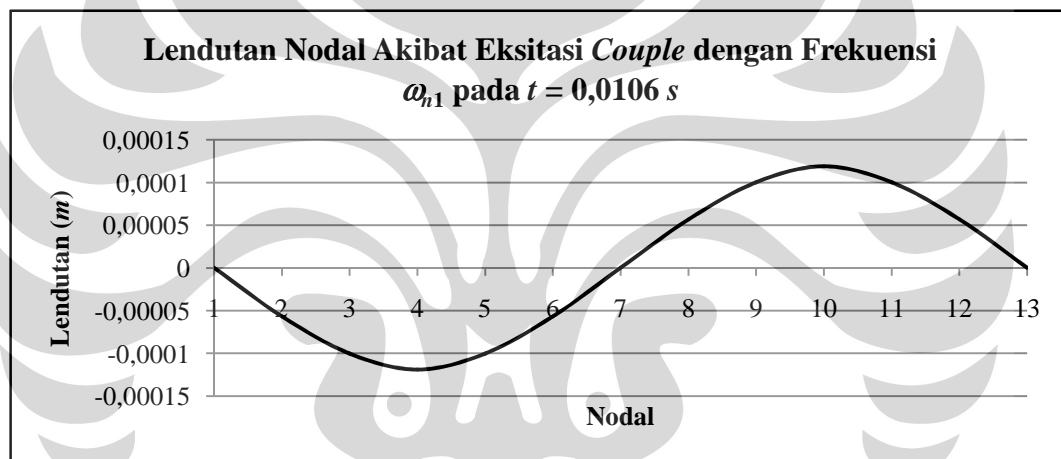
### 2.5.4 Balok Dengan Beban Couple

Dampak dari pembebanan momen pada tengah bentang dapat digambarkan sebagai beban *couple* yang jatuh ke balok seperti gambar berikut.

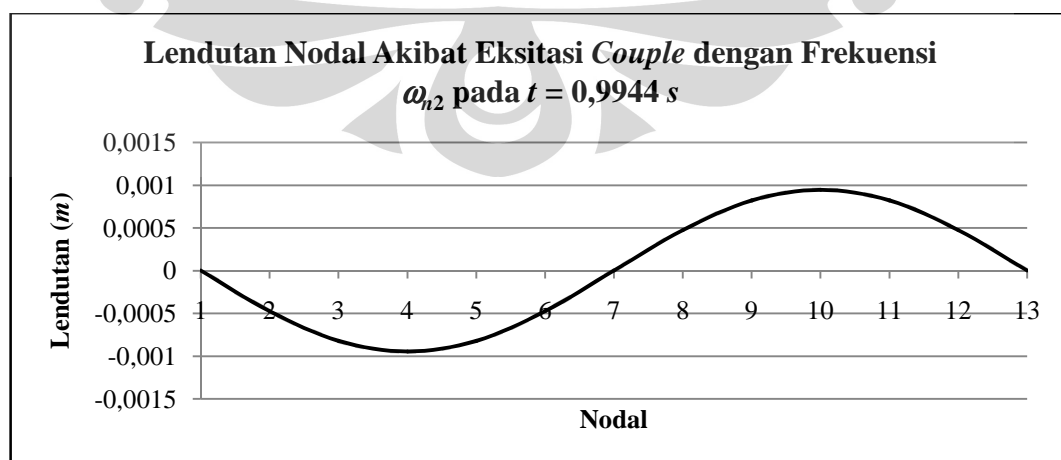


Gambar 2.25. Beban *couple* pada balok

Grafik respon lendutan pada bentang balok dengan frekuensi getar  $\omega_{h1}$  dan  $\omega_{h2}$  pada waktu yang memberikan putaran sudut maksimum di tengah bentang adalah



Gambar 2.26. Lendutan tiap nodal akibat pembebanan *couple* dengan frekuensi getar  $\omega_{h1}$  pada waktu yang memberikan putaran sudut maksimum di tengah bentang



Gambar 2.27. Lendutan tiap nodal akibat pembebanan *couple* dengan frekuensi getar  $\omega_{h2}$  pada waktu yang memberikan putaran sudut maksimum di tengah bentang

## BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 TAHAPAN ANALISIS

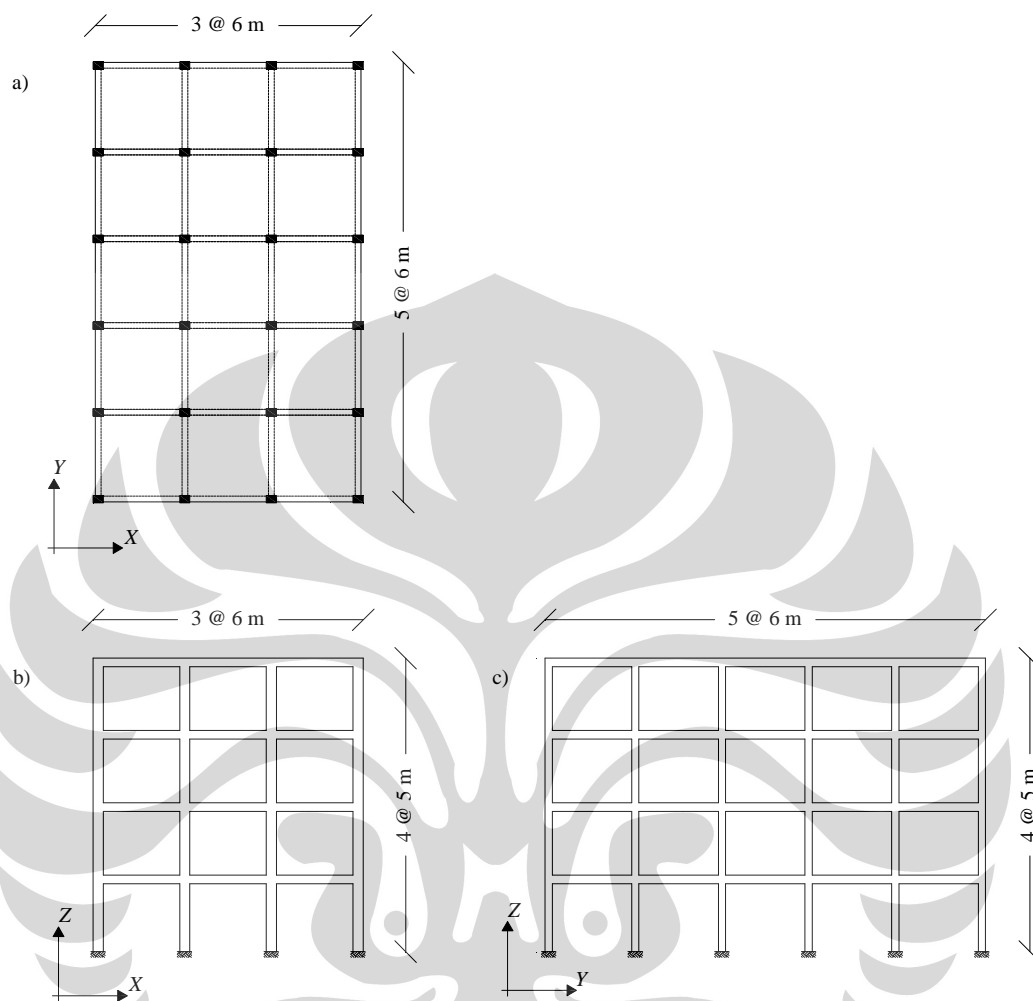
Secara umum, tahapan-tahapan yang digunakan dalam analisis penelitian ini adalah:

1. Melakukan permodelan struktur portal tiga dimensi pada SAP2000, dan mengaplikasikan beban mati tambahan dan beban hidup yang direduksi sesuai Peraturan Pembebanan Indonesia untuk Gedung tahun 1983.
2. Melakukan analisis modal untuk model struktur tersebut dan mengumpulkan data karakteristik dinamik struktur.
3. Mengaplikasikan beban multi-eksitasi dengan variasi konfigurasi mesin (posisi, massa, frekuensi getar, kekakuan, arah getar, dan redaman) pada model struktur tersebut.
4. Melakukan analisis terhadap pembebanan dengan analisis *time history* selama 30 detik melalui program SAP2000.
5. Melakukan pengolahan data respon struktur, dengan parameter yang ditinjau adalah:
  - a. pola getar alami,
  - b. *base reaction*,
  - c. simpangan pada mesin, dan
  - d. gaya-gaya dalam elemen portal.
6. Melakukan analisis terhadap data dengan membandingkan hasil tiap varian dalam satu variasi parameter.
7. Menyimpulkan hasil penelitian perilaku respon struktur akibat beban multi-eksitasi.

### 3.2 MODELISASI UMUM STRUKTUR

Dalam penelitian ini, struktur yang ditinjau adalah portal tiga dimensi, dengan tiga bentang arah sumbu  $X$ , lima bentang arah sumbu  $Y$ , dan empat lantai. Panjang bentang arah sumbu  $X$  dan arah sumbu  $Y$  adalah 6  $m$  sedangkan tinggi

antarlantai adalah 5 m. Berikut adalah penggambaran model struktur yang ditinjau.



Gambar 3.1. Modelisasi struktur: a) denah; b) potongan melintang; c) potongan memanjang

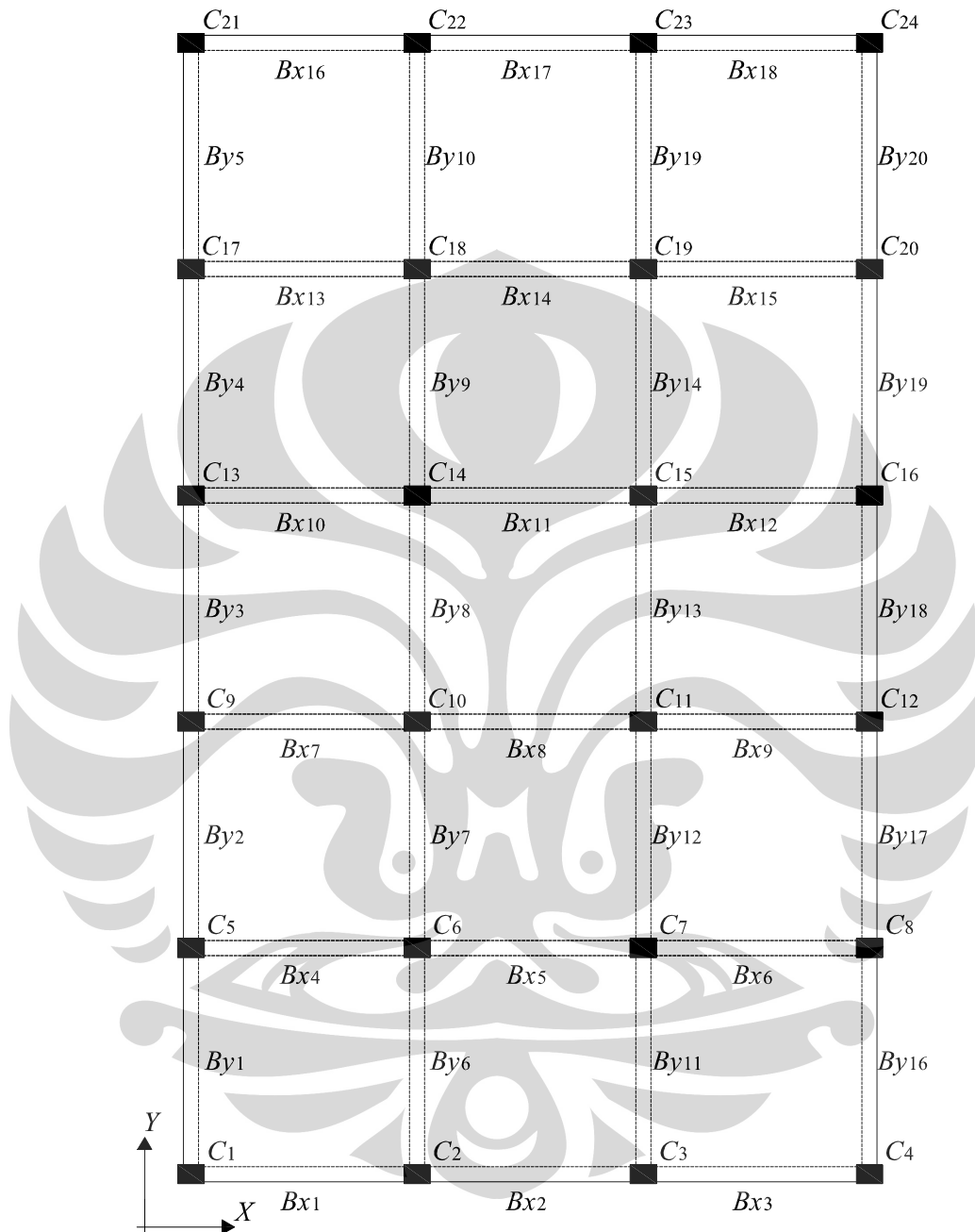
Struktur tersebut menggunakan material beton dengan mutu K-400.

Properti material beton tersebut adalah sebagai berikut:

- Massa jenis ( $\rho$ ) = 2,4 ton/m<sup>3</sup>
- Berat jenis ( $w$ ) = 24 kN/m<sup>3</sup>
- Kuat tekan ( $f_c'$ ) = 33 MPa
- Modulus elastisitas ( $E$ ) =  $4700 \times \sqrt{f_c'}$  (dalam MPa)

Secara umum elemen kolom pada struktur tersebut berdimensi 50 cm x 70 cm, sedangkan elemen balok berdimensi 40 cm x 60 cm. Pelat lantai dan atap

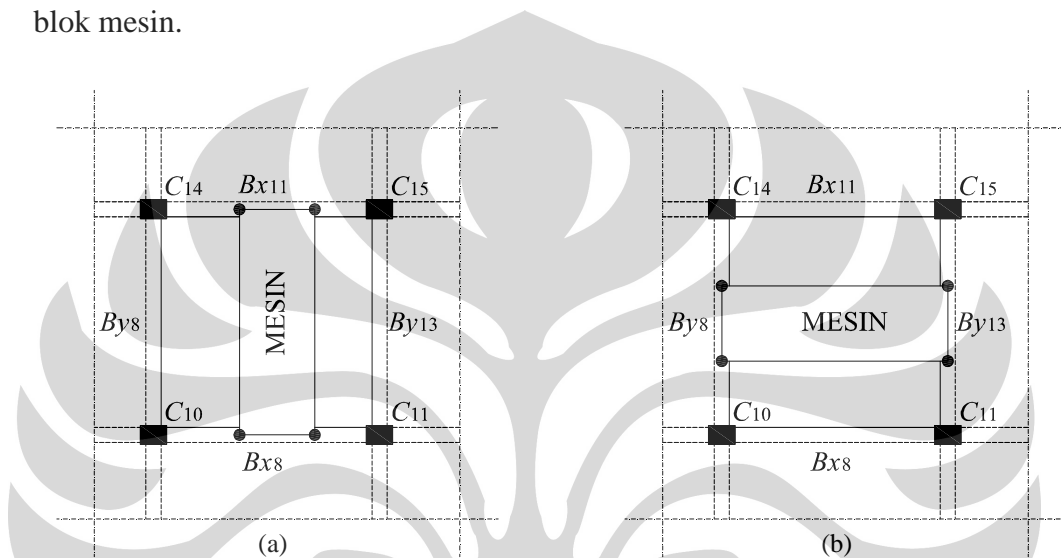
dimodelkan sebagai *shell* dengan ketebalan 15 cm. Berikut adalah pelabelan elemen portal dan nodal di tiap lantai pada struktur.



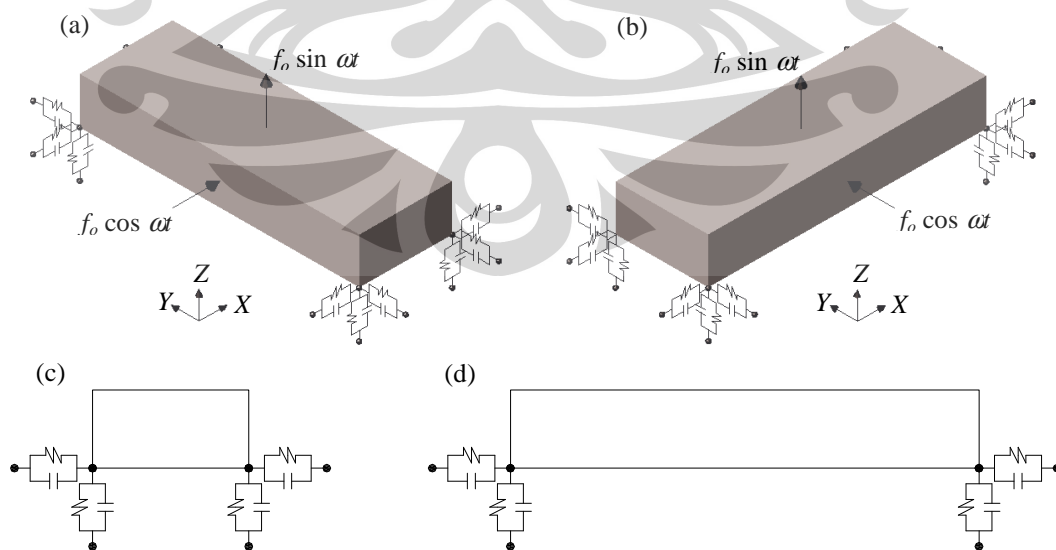
**Gambar 3.2.** Pelabelan elemen portal dan nodal di tiap lantai (tipikal untuk lantai 1-4)

Blok mesin dimodelkan sebagai diafragma dimensi 6 m x 2 m x 1 m. Blok mesin ditopang oleh empat tapak mesin yang dimodelkan sebagai *link*, masing-masing pada tiap ujung-ujungnya. Mesin selalu berada di tengah struktur untuk menghindari efek torsi. Beban dinamik yang bekerja pada tiap mesin terdiri dari

dua eksitasi gaya, yaitu gaya arah vertikal dengan eksitasi harmonik menurut aturan sinus dan gaya lateral dengan eksitasi harmonik menurut aturan kosinus, sesuai dengan yang telah dipelajari pada studi literatur. Selain itu, mesin akan divariasikan terhadap arah kerja pada sumbu  $X$  dan  $Y$ . Pada mesin dengan konfigurasi arah  $X$ , tapak mesin menumpu pada balok yang sejajar arah  $Y$ . Sedangkan pada mesin dengan konfigurasi arah  $Y$ , tapak mesin menumpu pada balok yang sejajar arah  $X$ . Untuk lebih memperjelas, berikut adalah penggambaran blok mesin.



**Gambar 3.3.** (a) penempatan mesin pada arah  $X$ ; (b) penempatan mesin pada arah  $Y$



**Gambar 3.4.** (a) mesin arah  $X$ ; (b) mesin arah  $Y$ ; (c) potongan melintang mesin; (d) potongan memanjang mesin

Massa struktur tersebut ditentukan dari kombinasi berat sendiri struktur, beban mati tambahan, dan beban hidup yang bekerja pada struktur. Faktor reduksi beban hidup pada struktur dengan fungsi sebagai pabrik adalah sebesar 0,9 (Direktorat Penyelidikan Masalah Bangunan, Peraturan Pembebanan Indonesia untuk Gedung, 1983). Dalam bentuk persamaan, berat struktur dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$W = DL + 0,9 \times LL \quad (3.1)$$

Perhitungan beban mati tambahan dan beban hidup yang bekerja pada pelat lantai dan pelat atap struktur ditentukan oleh Peraturan Pembebanan Indonesia untuk Gedung tahun 1983 sebagai berikut.

### 1. Beban mati tambahan

#### a. Beban mati tambahan pada pelat lantai

- Adukan semen tebal 3 cm: 3 x 21 kg/m <sup>2</sup>	= 63 kg/m <sup>2</sup>	
- Penutup lantai 1 cm: 1 x 24 kg/m <sup>2</sup>	= 24 kg/m <sup>2</sup>	
- Penutup plafond	= 11 kg/m <sup>2</sup>	
- Penggantung plafond	= 7 kg/m <sup>2</sup>	
- Mekanikal dan elektrikal	= 20 kg/m <sup>2</sup>	
<b>Total</b>		<b>= 125 kg/m<sup>2</sup></b>

#### b. Beban mati pada pelat atap

- Adukan semen tebal 4 cm: 4 x 21 kg/m <sup>2</sup>	= 84 kg/m <sup>2</sup>	
- Penutup plafond	= 11 kg/m <sup>2</sup>	
- Penggantung plafond	= 7 kg/m <sup>2</sup>	
- Mekanikal dan elektrikal	= 20 kg/m <sup>2</sup>	
<b>Total</b>		<b>= 122 kg/m<sup>2</sup></b>

### 2. Beban hidup

a. Beban hidup pada pelat lantai	= 400 kg/m <sup>2</sup>
b. Beban hidup pada pelat atap	= 100 kg/m <sup>2</sup>

Variabel yang menjadi subjek penelitian ini adalah konfigurasi mesin, yaitu posisi mesin, massa mesin, frekuensi getar mesin, kekakuan pondasi mesin, arah getar mesin, dan redaman pondasi mesin. Variabel yang menjadi parameter tinjauan adalah pola getar alami struktur, *base reaction*, simpangan mesin, dan gaya-gaya dalam elemen struktur. Berikut adalah tabel variasi total penelitian.

Tabel 3.1. Tabel variasi total untuk model struktur dengan konfigurasi satu mesin

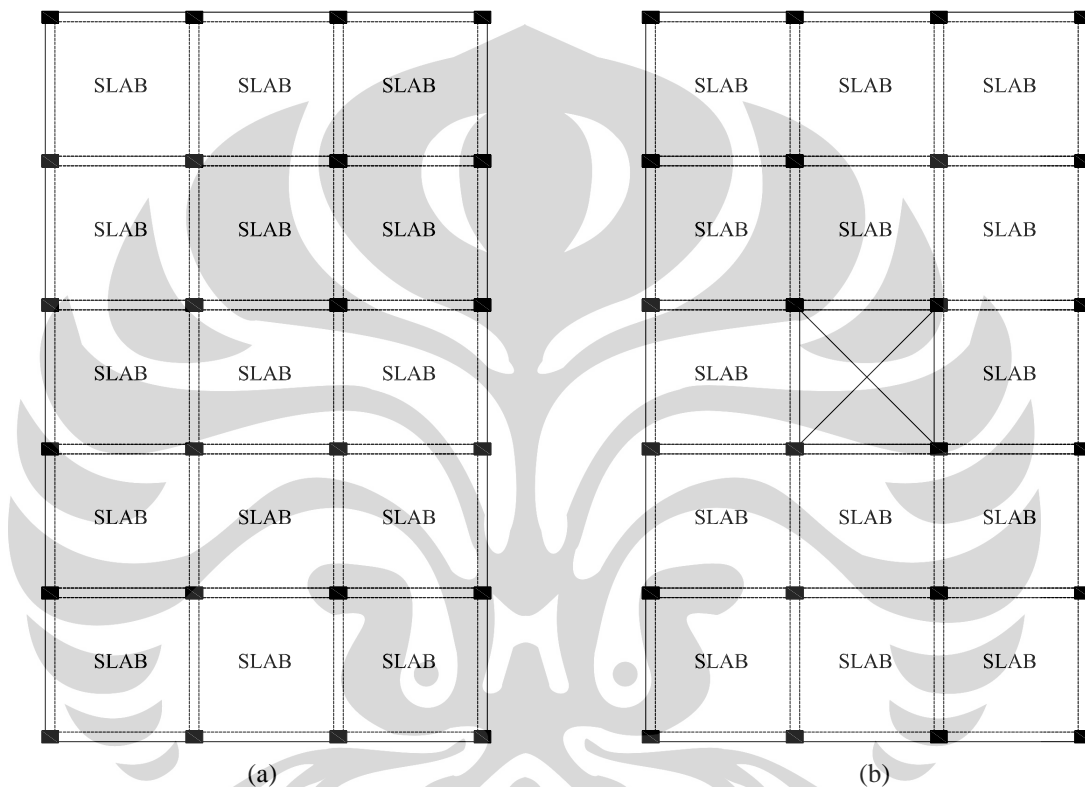
Properti	Variasi Frekuensi						Variasi Isolator										
	Arah Getar X			Arah Getar Y			Variasi Redaman			Variasi Kekakuan			Variasi Massa Mesin				
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 1	Case 2	Case 3	Case 1	Case 2	Case 3	Case 1	Case 2	Case 3
$f_M$ (rpm)	$f_{n1}$	$f_{n2}$	$f_{n3}$	$f_{n11}$	$f_{n1}$	$f_{n2}$	$f_{n3}$	$f_{n11}$	100	100	100	100	100	100	100	100	100
$k_M$ (kN/m)	Rigid	Rigid	Rigid	Rigid	Rigid	Rigid	Rigid	Rigid	484,28	484,28	484,28	484,28	484,28	484,28	484,28	484,28	484,28
	Rigid	Rigid	Rigid	Rigid	Rigid	Rigid	Rigid	Rigid	96,8	96,8	96,8	96,8	96,8	96,8	96,8	96,8	96,8
$\zeta_M$ (%)	0	0	0	0	0	0	0	0	5	15	25	15	15	15	15	15	15
$m_M$ (ton)	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Arah Getar	X	X	X	X	Y	Y	Y	Y	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Tabel 3.2. Tabel variasi total untuk model struktur dengan kombinasi dua mesin

Properti	M	Posisi Mesin						Massa Mesin						Frekuensi Kerja						Kekakuan Pegas						Arah Getar						Rasi Redaman					
		Case 1		Case 2		Case 3		Case 1		Case 2		Case 3		Case 1		Case 2		Case 3		Case 1		Case 2		Case 3		Case 1		Case 2		Case 3							
		Lt.1	Lt.2	Lt.1	Lt.2	Lt.1	Lt.2	Lt.1	Lt.2	Lt.1	Lt.2	Lt.1	Lt.2	Lt.1	Lt.2	Lt.1	Lt.2	Lt.1	Lt.2	Lt.1	Lt.2	Lt.1	Lt.2	Lt.1	Lt.2	Lt.1	Lt.2	Lt.1	Lt.2	Lt.1	Lt.2						
Posisi	1	Lt.1	Lt.2	Lt.1	Lt.2	Lt.1	Lt.2	Lt.1	Lt.2	Lt.1	Lt.2	Lt.1	Lt.2	Lt.1	Lt.2	Lt.1	Lt.2	Lt.1	Lt.2	Lt.1	Lt.2	Lt.1	Lt.2	Lt.1	Lt.2	Lt.1	Lt.2	Lt.1	Lt.2	Lt.1	Lt.2						
	2	Lt.2	Lt.1	Lt.3	Lt.2	Lt.3	Lt.1	Lt.3	Lt.2	Lt.3	Lt.1	Lt.3	Lt.2	Lt.3	Lt.1	Lt.3	Lt.2	Lt.3	Lt.1	Lt.3	Lt.2	Lt.3	Lt.1	Lt.3	Lt.2	Lt.3	Lt.1	Lt.3	Lt.2	Lt.3	Lt.1	Lt.3					
$m_M$ (ton)	1	15	15	15	15	18	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15					
	2	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15					
$f_M$ (rpm)	1	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150					
	2	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150					
$k_M$ (kN/m)	1	484,28	484,28	484,28	484,28	484,28	484,28	484,28	484,28	484,28	484,28	484,28	484,28	484,28	484,28	484,28	484,28	484,28	484,28	484,28	484,28	484,28	484,28	484,28	484,28	484,28	484,28	484,28	484,28	484,28	484,28	484,28					
	2	484,28	484,28	484,28	484,28	484,28	484,28	484,28	484,28	484,28	484,28	484,28	484,28	484,28	484,28	484,28	484,28	484,28	484,28	484,28	484,28	484,28	484,28	484,28	484,28	484,28	484,28	484,28	484,28	484,28	484,28	484,28					
$k_x$	1	96,8	96,8	96,8	96,8	96,8	96,8	96,8	96,8	96,8	96,8	96,8	96,8	96,8	96,8	96,8	96,8	96,8	96,8	96,8	96,8	96,8	96,8	96,8	96,8	96,8	96,8	96,8	96,8	96,8	96,8	96,8					
	2	96,8	96,8	96,8	96,8	96,8	96,8	96,8	96,8	96,8	96,8	96,8	96,8	96,8	96,8	96,8	96,8	96,8	96,8	96,8	96,8	96,8	96,8	96,8	96,8	96,8	96,8	96,8	96,8	96,8	96,8	96,8					
Arah Getar	1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X					
	2	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X					
$\zeta_M$ (%)	1	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15					
	2	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15					

### 3.2.1 Model Struktur Dengan Konfigurasi Satu Mesin

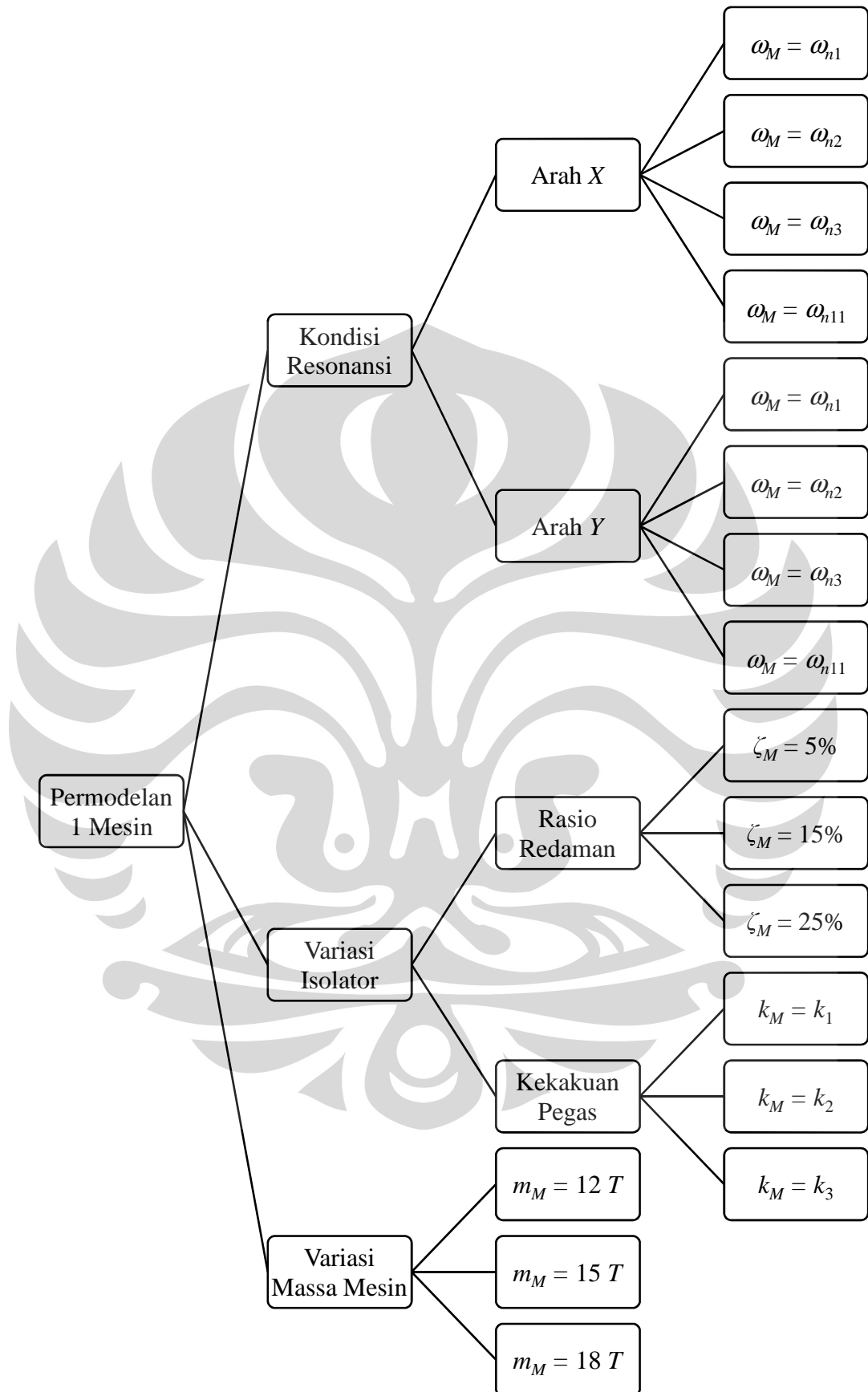
Pada model ini, mesin diletakkan pada elevasi +16 m atau berada pada 1 m di atas lantai 3. Mesin diletakkan pada bentang tengah struktur agar struktur tidak mengalami torsi. Pelat pada lantai 3 yang berada tepat di bawah mesin dihilangkan untuk memudahkan perawatan mesin dan instalasi pipa-pipa pendukung. Berikut adalah penggambaran tiap lantai struktur.



**Gambar 3.5.** (a) lantai 1, 2, dan atap tipikal; (b) lantai 3

Penelitian yang dilakukan pada model struktur dengan konfigurasi satu mesin dan parameter studi yang ditinjau dapat digambarkan dalam hierarki berikut.





**Gambar 3.6.** Hierarki penelitian model struktur dengan konfigurasi satu mesin

### 3.2.1.1 Model Struktur Dengan Variasi Frekuensi Getar Pada Kondisi Resonansi

Pada model struktur dengan variasi frekuensi getar pada kondisi resonansi, tapak mesin dimodelkan sebagai rigid. Untuk mendapatkan mode lokal struktur, balok-balok tengah pada lantai pertama sengaja dilemahkan dengan mengubah dimensi balok menjadi  $30 \times 40$  cm. Balok-balok yang dilemahkan adalah balok dengan label  $B_{x8}$ ,  $B_{x11}$ ,  $B_{y8}$ ,  $B_{y13}$  pada lantai pertama. Mesin dioperasikan dengan variasi frekuensi getar  $\omega_M = \omega_{h1}$ ,  $\omega_M = \omega_{h2}$ ,  $\omega_M = \omega_{h3}$ , dan  $\omega_M = \omega_{h11}$  pada arah X dan Y. Berikut adalah tabel parameter struktur untuk variasi frekuensi getar pada kondisi resonansi.

**Tabel 3.3.** Properti mesin dengan variasi frekuensi getar pada kondisi resonansi dalam arah X

Properti	Konfigurasi Mesin Arah X			
	Kasus 1	Kasus 2	Kasus 3	Kasus 4
Letak Mesin	Lt. 3			
Arah Getar Mesin	Arah X			
Massa Blok Mesin	15 ton			
Frekuensi Getar Mesin	$\omega_M = \omega_{h1}$	$\omega_M = \omega_{h2}$	$\omega_M = \omega_{h3}$	$\omega_M = \omega_{h11}$
Kekakuan Pegas	Rigid			
Rasio Redaman	0%			

**Tabel 3.4.** Properti mesin dengan variasi frekuensi getar pada kondisi resonansi dalam arah Y

Properti	Konfigurasi Mesin Arah Y			
	Kasus 1	Kasus 2	Kasus 3	Kasus 4
Letak Mesin	Lt. 3			
Arah Getar Mesin	Arah Y			
Massa Blok Mesin	15 ton			
Frekuensi Getar Mesin	$\omega_M = \omega_{h1}$	$\omega_M = \omega_{h2}$	$\omega_M = \omega_{h3}$	$\omega_M = \omega_{h11}$
Kekakuan Pegas	Rigid			
Rasio Redaman	0%			

Hipotesis yang dibangun pada studi dengan variasi frekuensi getar pada kondisi resonansi adalah sebagai berikut:

- Mesin dengan frekuensi getar dan arah getar yang bersesuaian dengan pola getar alami struktur memberikan respon maksimum.
- Mesin dengan frekuensi getar yang bersesuaian dengan pola getar global menghasilkan respon global struktur sedangkan mesin dengan frekuensi getar yang bersesuaian dengan pola getar lokal menghasilkan respon lokal struktur.

### 3.2.1.2 Model Struktur Dengan Variasi Variabel Isolator

Pada model struktur dengan variasi variabel *isolator*, tapak mesin dimodelkan sebagai *linear isolator* atau pegas. Pegas dikonfigurasi agar dapat bergerak hanya pada arah  $U_x$ ,  $U_y$ , dan  $U_z$  global. Variabel yang divariasikan pada pegas dibagi menjadi dua, yaitu variasi rasio redaman dan variasi kekakuan. Rasio redaman pegas diambil dengan variasi 5%, 15%, dan 25%, sedangkan kekakuan pegas diambil dengan variasi  $k_1$ ,  $k_2$ , dan  $k_3$  dimana  $k_1 < k_2 < k_3$ . Besaran kekakuan pegas pada arah aksial dan arah lateral untuk tiap variasi dapat dilihat pada tabel berikut.

**Tabel 3.5.** Besaran kekakuan pegas untuk tiap variasi

<b>Kekakuan isolator</b>	$k_1$ (kN/m)	$k_2$ (kN/m)	$k_3$ (kN/m)
Kekakuan aksial ( $k_s$ )	304,97	484,28	836,92
Kekakuan horisontal ( $k_x$ )	61,69	96,8	134,98

Mesin dioperasikan dengan frekuensi getar 100 rpm pada arah X. Berikut adalah tabel parameter struktur pada variasi rasio redaman pegas.

**Tabel 3.6.** Properti mesin dengan variasi rasio redaman pegas

<b>Properti</b>	<b>Kasus 1</b>	<b>Kasus 2</b>	<b>Kasus 3</b>
	$\zeta_M = \zeta_1$	$\zeta_M = \zeta_2$	$\zeta_M = \zeta_3$
Letak Mesin	Lt. 3		
Arah Getar Mesin	Arah X		
Massa Blok Mesin	15 ton		
Frekuensi Getar	10,47 rad/s		
Kekakuan Pegas	$k_s = 484,28$ kN/m, $k_x = 96,8$ kN/m		
Rasio Redaman	5%	15%	20%

Berikut adalah tabel parameter struktur pada variasi kekakuan pegas.

**Tabel 3.7.** Properti mesin dengan variasi kekakuan isolator

<b>Properti</b>	<b>Kasus 1</b>	<b>Kasus 2</b>	<b>Kasus 3</b>	
	$k_M = k_1$	$k_M = k_2$	$k_M = k_3$	
Letak Mesin	Lt. 3			
Arah Getar Mesin	Arah X			
Massa Blok Mesin	15 ton			
Frekuensi Getar	10,47 rad/s			
Kekakuan Pegas (kN/m)	$k_s$	304,97	484,28	836,92
	$k_x$	61,69	96,8	134,98
Rasio Redaman	15%			

Hipotesis yang dibangun pada studi dengan variasi redaman dan kekakuan pegas adalah sebagai berikut:

- Redaman pegas hanya bekerja efektif pada respon struktur yang searah dengan pola getar yang berdekatan dengan frekuensi getar mesin.
- Frekuensi getar alami struktur dan *base reaction* berbanding lurus dengan kekakuan pegas.

### 3.2.1.3 Model Struktur Dengan Variasi Massa Mesin

Pada model struktur dengan variasi massa mesin, mesin dimodelkan dengan pegas pada tapak mesin. Variasi massa mesin diambil dengan selisih 3 ton, yaitu 12 ton, 15 ton, dan 18 ton. Berikut adalah tabel parameter struktur untuk variasi massa mesin.

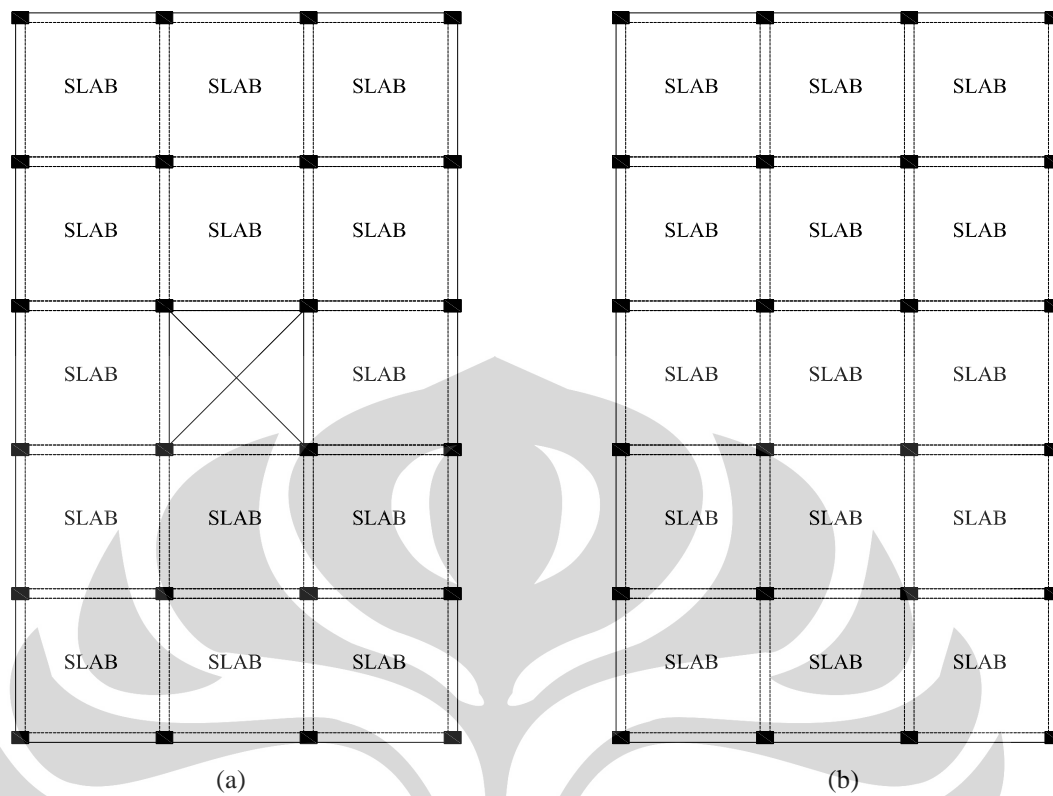
**Tabel 3.8.** Properti mesin dengan variasi massa blok mesin

Properti	Kasus 1	Kasus 2	Kasus 3
	$m_M = 12 \text{ ton}$	$m_M = 15 \text{ ton}$	$m_M = 18 \text{ ton}$
Letak Mesin	Lt. 3		
Arah Getar Mesin	Arah X		
Massa Blok Mesin	12 ton	15 ton	18 ton
Frekuensi Getar	10,47 rad/s		
Kekakuan Pegas	$k_y = 484,28 \text{ kN/m}$ , $k_x = 96,8 \text{ kN/m}$		
Rasio Redaman	15%		

Hipotesis yang dibangun pada studi dengan variasi massa mesin adalah sebagai berikut: “perubahan massa mesin berbanding terbalik dengan perubahan frekuensi getar alami struktur”.

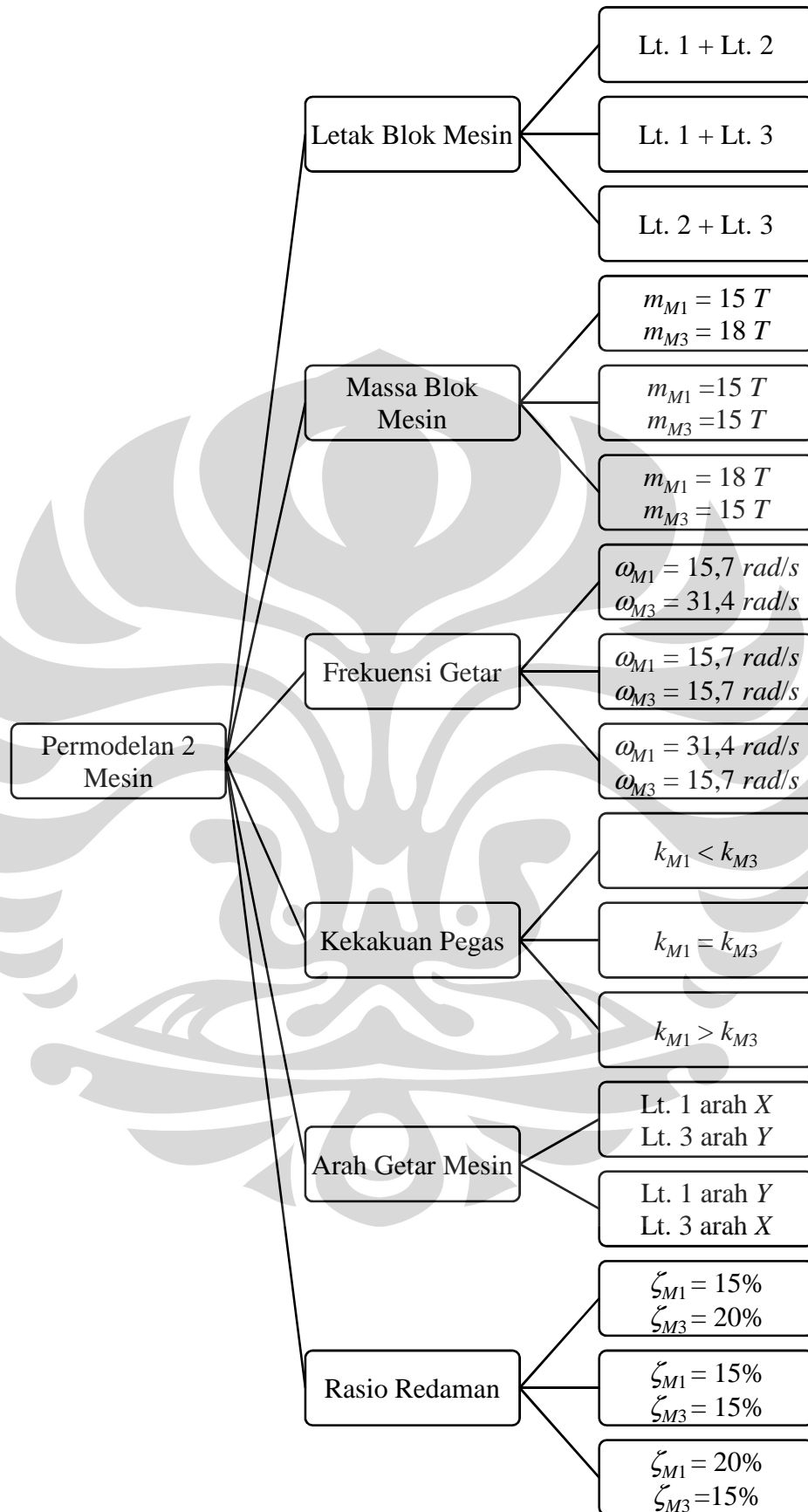
### 3.2.2 Model Struktur Dengan Konfigurasi Kombinasi Dua Mesin

Pada model dengan kombinasi dua mesin, tiap-tiap mesin diletakkan pada lantai 1-3. Mesin diletakkan pada bentang tengah struktur agar struktur tidak mengalami torsi. Pelat yang berada di bentang tengah pada lantai 1-3 dihilangkan untuk memudahkan perawatan mesin dan instalasi pipa-pipa pendukung. Berikut adalah penggambaran tiap lantai struktur.



**Gambar 3.7.** (a) lantai 1, 2, 3 tipikal; (b) lantai atap

Pada model struktur tersebut, tapak mesin dimodelkan sebagai pegas dengan variabel kekakuan  $k_2$  dan rasio redaman 15%, kecuali untuk variasi kombinasi kekakuan pegas dan variasi kekakuan redaman, dimana kedua variabel tersebut masing-masing diubah. Penelitian yang dilakukan pada model struktur dengan konfigurasi dua mesin dan tiap-tiap parameter studi yang ditinjau dapat digambarkan dalam hierarki berikut.



**Gambar 3.8.** Hierarki penelitian model struktur dengan kombinasi dua mesin

### 3.2.2.1 Model Struktur Dengan Variasi Kombinasi Posisi Mesin

Parameter yang digunakan pada mesin untuk studi model struktur dengan variasi posisi mesin dapat dilihat pada tabel berikut.

**Tabel 3.9.** Properti mesin dengan variasi posisi mesin

Properti	Variasi Posisi Blok Mesin		
	$M_1 + M_2$	$M_1 + M_3$	$M_2 + M_3$
Letak Mesin	Lt. 1 + Lt. 2	Lt. 1 + Lt. 3	Lt. 2 + Lt. 3
Arah Getar Mesin	Arah X		
Massa Blok Mesin	15 ton		
Frekuensi Getar	15,7 rad/s		
Kekakuan Pegas	$k_s = 484,28 \text{ kN/m}, k_x = 96,8 \text{ kN/m}$		
Rasio Redaman	15%		

Hipotesis yang dibangun pada studi dengan variasi posisi mesin adalah sebagai berikut:

- Kenaikan ketinggian mesin berbanding terbalik terhadap frekuensi getar alami struktur.
- Konfigurasi mesin-mesin pada level lantai yang tinggi menghasilkan respon struktur yang lebih besar.

### 3.2.2.2 Model Struktur Dengan Variasi Kombinasi Massa Mesin

Parameter yang digunakan pada mesin untuk studi model struktur dengan variasi massa blok mesin dapat dilihat pada tabel berikut.

**Tabel 3.10.** Properti mesin dengan variasi massa blok mesin

Properti	Variasi Massa Blok Mesin			
		$m_{M1} < m_{M3}$	$m_{M1} = m_{M3}$	$m_{M1} > m_{M3}$
Letak Mesin	Lt. 1 + Lt. 3			
Arah Getar Mesin	Arah X			
Massa Blok Mesin (ton)	Lt.1	15	15	18
	Lt.3	18	15	15
Frekuensi Getar	15,7 rad/s			
Kekakuan Pegas	$k_s = 484,28 \text{ kN/m}, k_x = 96,8 \text{ kN/m}$			
Rasio Redaman	15%			

Hipotesis yang dibangun pada studi dengan variasi massa blok mesin adalah sebagai berikut: “mesin dengan massa yang lebih besar lebih efektif ditempatkan pada level lantai yang lebih tinggi”.

### 3.2.2.3 Model Struktur Dengan Variasi Kombinasi Frekuensi Getar Mesin

Parameter yang digunakan pada mesin untuk studi model struktur dengan variasi frekuensi getar mesin dapat dilihat pada tabel berikut.

**Tabel 3.11.** Properti mesin dengan variasi frekuensi getar mesin

Properti		Variasi Frekuensi Getar Mesin		
		$\omega_{M1} < \omega_{M3}$	$\omega_{M1} = \omega_{M3}$	$\omega_{M1} > \omega_{M3}$
Letak Mesin		Lt. 1 + Lt. 3		
Arah Getar Mesin		Arah X		
Massa Blok Mesin		15 ton		
Frekuensi Getar ( <i>rad/s</i> )	Lt.1	15,7	15,7	31,4
	Lt.3	31,4	15,7	15,7
Kekakuan Pegas		$k_s = 484,28 \text{ kN/m}$ , $k_x = 96,8 \text{ kN/m}$		
Rasio Redaman		15%		

Hipotesis yang dibangun pada studi dengan variasi frekuensi getar mesin adalah sebagai berikut: “mesin dengan frekuensi yang lebih besar lebih efektif ditempatkan pada level lantai yang lebih tinggi”.

### 3.2.2.4 Model Struktur Dengan Variasi Kombinasi Kekakuan Pegas Mesin

Parameter yang digunakan pada mesin untuk studi model struktur dengan variasi kekakuan pegas dapat dilihat pada tabel berikut.

**Tabel 3.12.** Properti mesin dengan variasi kekakuan pegas

Properti			Kekakuan Pegas		
			$k_{M1} < k_{M3}$	$k_{M1} = k_{M3}$	$k_{M1} > k_{M3}$
Letak Mesin			Lt. 3		
Arah Getar Mesin			Arah X		
Massa Blok Mesin			15 ton		
Frekuensi Getar			15,7 <i>rad/s</i>		
Kekakuan Pegas ( <i>kN/m</i> )	Lt. 1	$k_s$	484,28	484,28	836,92
		$k_x$	96,8	96,8	134,98
	Lt. 3	$k_s$	836,92	484,28	484,28
		$k_x$	134,98	96,8	96,8
Rasio Redaman			15%		

Hipotesis yang dibangun pada studi dengan variasi kekakuan pegas adalah sebagai berikut: “mesin dengan kekakuan pegas yang lebih besar lebih efektif ditempatkan pada level lantai yang lebih rendah”.



### 3.2.2.5 Model Struktur Dengan Variasi Kombinasi Arah Getar Mesin

Parameter yang digunakan pada mesin untuk studi model struktur dengan variasi arah getar mesin dapat dilihat pada tabel berikut.

**Tabel 3.13.** Properti mesin dengan variasi arah getar mesin

Properti		Variasi Arah Getar	
		$M_{1-X} + M_{3-Y}$	$M_{1-Y} + M_{3-X}$
Letak Mesin		Lt. 1 + Lt. 3	
Arah Getar Mesin	Lt.1	Arah X	Arah Y
	Lt.3	Arah Y	Arah X
Massa Blok Mesin		15 ton	
Frekuensi Getar		15,7 rad/s	
Kekakuan Pegas		$k_s = 484,28 \text{ kN/m}$ , $k_x = 96,8 \text{ kN/m}$	
Rasio Redaman		15%	

Hipotesis yang dibangun pada studi dengan variasi arah getar mesin adalah sebagai berikut: “respon struktur ditentukan oleh mesin pada lantai atas”.

### 3.2.2.6 Model Struktur Dengan Variasi Kombinasi Rasio Redaman Pegas Mesin

Parameter yang digunakan pada mesin untuk studi model struktur dengan variasi rasio redaman pegas dapat dilihat pada tabel berikut.

**Tabel 3.14.** Properti mesin dengan variasi rasio redaman pegas

Properti		Variasi Rasio Redaman		
		$\zeta_{M1} < \zeta_{M3}$	$\zeta_{M1} = \zeta_{M3}$	$\zeta_{M1} > \zeta_{M3}$
Letak Mesin		Lt. 1 + Lt. 3		
Arah Getar Mesin		Arah X		
Massa Blok Mesin		15 ton		
Frekuensi Getar		15,7 rad/s		
Kekakuan Pegas		$k_s = 484,28 \text{ kN/m}$ , $k_x = 96,8 \text{ kN/m}$		
Rasio Redaman	Lt.1	15%	15%	20%
	Lt.3	20%	15%	15%

Hipotesis yang dibangun pada studi dengan variasi rasio redaman pegas adalah sebagai berikut: “mesin dengan rasio redaman pegas yang lebih besar lebih efektif ditempatkan pada level lantai yang lebih tinggi”.

## BAB 4 ANALISIS STRUKTUR

### 4.1 ANALISIS RESPON STRUKTUR DENGAN SATU MESIN

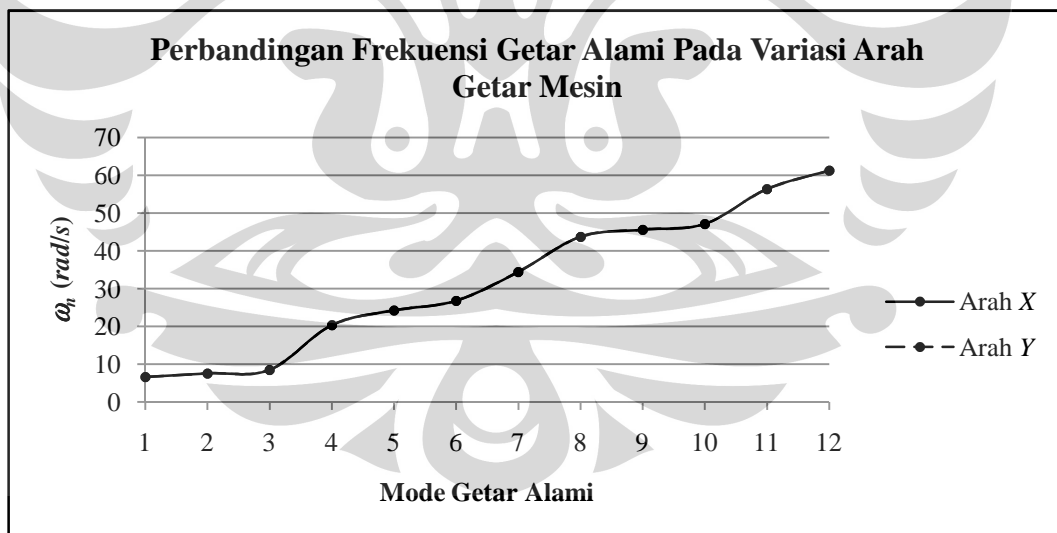
#### 4.1.1 Analisis Perilaku Respon Struktur Dalam Kondisi Resonansi

Dengan melakukan analisis modal terhadap model struktur dengan konfigurasi satu mesin di lantai 3 arah X dan arah Y, diperoleh karakteristik dinamik struktur sebagai berikut.

**Tabel 4.1.** Perbandingan pola getar alami struktur dengan konfigurasi satu mesin

Mode	Arah Mode Getar	$\omega_n$ (rad/s)	
		Arah X	Arah Y
1	$U_Y$	6,628	6,627
2	$U_X$	7,555	7,558
3	$R_Z$	8,475	8,474
11	$U_Z$ lokal balok lemah	56,338	56,338

Dalam bentuk kurva dapat digambarkan sebagai berikut.



**Gambar 4.1.** Grafik perbandingan  $\omega_n$  struktur terhadap arah getar

Dari grafik, dapat dilihat bahwa perubahan konfigurasi arah getar mesin tidak memberikan dampak yang cukup besar kepada pola getar alami struktur. Dari data-data tersebut, variasi frekuensi getar mesin ditentukan untuk kondisi

resonansi pada mode global, yaitu mode pertama, mode kedua, dan mode ketiga; serta pada mode lokal, yaitu mode ke-11.

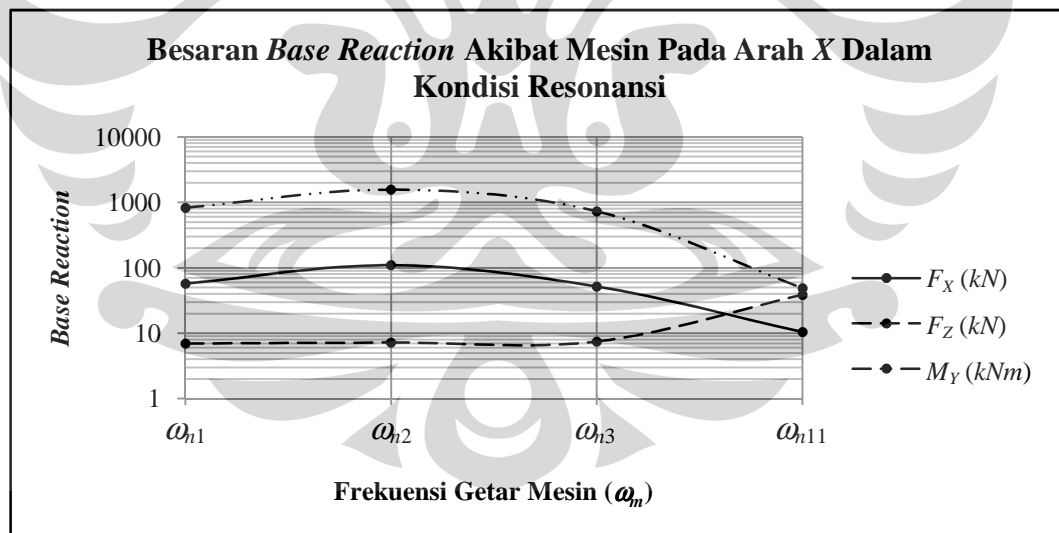
#### 4.1.1.1 Konfigurasi Mesin Arah Sumbu X

Simulasi model struktur dengan konfigurasi mesin arah sumbu X menghasilkan *base reaction* struktur sebagai berikut.

**Tabel 4.2.** Perbandingan *base reaction* struktur pada kondisi resonansi dalam arah X

Frekuensi Getar Mesin	Step	Base Reaction		
		$F_X$ (kN)	$F_Z$ (kN)	$M_Y$ (kNm)
$\omega_M = \omega_{h1}$	Maks	56,254	6,928	812,073
	Min	-57,051	-6,960	-823,529
$\omega_M = \omega_{h2}$	Maks	109,360	6,996	1561,666
	Min	-109,356	-7,189	-1561,640
$\omega_M = \omega_{h3}$	Maks	51,665	6,965	729,140
	Min	-51,205	-7,434	-723,182
$\omega_M = \omega_{h11}$	Maks	10,439	38,595	48,977
	Min	-10,271	-37,049	-45,250

Dalam bentuk kurva dapat digambarkan sebagai berikut.



**Gambar 4.2.** Grafik perbandingan *base reaction* struktur terhadap frekuensi getar dalam kondisi resonansi pada mesin arah X

Dari grafik tersebut, terlihat bahwa  $F_X$  dan  $M_Y$  mencapai maksimum pada saat frekuensi getar mesin bersesuaian dengan pola getar kedua, sedangkan  $F_Z$  mencapai maksimum pada saat frekuensi getar mesin bersesuaian dengan pola

getar ke-11. Pada saat frekuensi getar mesin mendekati pola getar kedua,  $F_x$  dan  $M_y$  mengalami kenaikan hingga dua kali lipat jika dibandingkan dengan ketika mendekati pola getar pertama dan ketiga, atau sebesar 109,35  $kN$  dan 1561,65  $kNm$ . Pada saat frekuensi getar mesin mendekati pola getar ke-11,  $F_z$  mengalami kenaikan hingga lima kali lipat jika dibandingkan dengan ketika mendekati pola getar awal struktur, atau sebesar 37,6  $kN$ .

Perbandingan gaya dalam elemen pada tiap frekuensi getar mesin dapat dilihat pada tabel berikut.

**Tabel 4.3.** Perbandingan gaya dalam elemen kolom pada kondisi resonansi dalam arah  $X$

Frekuensi Getar Mesin	Gaya Dalam	Nilai	Posisi
$\omega_M = \omega_{h1}$	$P$ ( $kN$ )	Maks	6,443
		Min	-6,397
	$V_2$ ( $kN$ )	Maks	2,863
		Min	-2,823
	$M_3$ ( $kNm$ )	Maks	8,983
		Min	-8,858
$\omega_M = \omega_{h2}$	$P$ ( $kN$ )	Maks	12,202
		Min	-12,202
	$V_2$ ( $kN$ )	Maks	5,391
		Min	-5,391
	$M_3$ ( $kNm$ )	Maks	17,157
		Min	-17,158
$\omega_M = \omega_{h3}$	$P$ ( $kN$ )	Maks	5,676
		Min	-5,696
	$V_2$ ( $kN$ )	Maks	2,494
		Min	-2,516
	$M_3$ ( $kNm$ )	Maks	8,004
		Min	-8,073
$\omega_M = \omega_{h11}$	$P$ ( $kN$ )	Maks	4,801
		Min	-4,837
	$V_2$ ( $kN$ )	Maks	0,66
		Min	-0,631
	$M_3$ ( $kNm$ )	Maks	1,73
		Min	-1,656

**Tabel 4.4.** Perbandingan gaya dalam elemen balok pada kondisi resonansi dalam arah X

Frekuensi Getar Mesin	Gaya Dalam		Nilai	Posisi
$\omega_M = \omega_{h1}$	$P$ (kN)	Maks	0,499	Lt. 3: $Bx_1, Bx_3, Bx_{16}, Bx_{18}$
		Min	-0,5	
	$V_2$ (kN)	Maks	2,305	Lt. 1: $Bx_9, Bx_{12}$
		Min	-2,277	
	$M_3$ (kNm)	Maks	6,169	Lt. 1: $Bx_9, Bx_{12}$
		Min	-6,128	Lt.1: $Bx_7, Bx_{10}$
$\omega_M = \omega_{h2}$	$P$ (kN)	Maks	0,738	Lt. 3: $Bx_1, Bx_3, Bx_{16}, Bx_{18}$
		Min	-0,738	
	$V_2$ (kN)	Maks	4,398	Lt. 1: $Bx_9, Bx_{12}$
		Min	-4,398	
	$M_3$ (kNm)	Maks	11,719	Lt. 1: $Bx_9, Bx_{12}$
		Min	-11,719	
$\omega_M = \omega_{h3}$	$P$ (kN)	Maks	0,331	Lt. 1: $Bx_1, Bx_3, Bx_{16}, Bx_{18}$
		Min	-0,331	
	$V_2$ (kN)	Maks	2,052	Lt. 1: $Bx_9, Bx_{12}$
		Min	-2,067	
	$M_3$ (kNm)	Maks	5,44	Lt. 1: $Bx_9, Bx_{12}$
		Min	-5,482	
$\omega_M = \omega_{h11}$	$P$ (kN)	Maks	0,524	Lt. 1: $Bx_1, Bx_3, Bx_{16}, Bx_{18}$
		Min	-0,523	
	$V_2$ (kN)	Maks	0,46	Lt. 1: $By_{13}$
		Min	-0,46	
	$M_3$ (kNm)	Maks	0,626	Lt. 2: $Bx_8, Bx_{11}$
		Min	-0,614	

Pada kondisi resonansi dengan pola getar global, posisi elemen yang mengalami gaya dalam elemen terbesar cenderung tidak berubah. Perubahan hanya terjadi pada nilai gaya dalam elemen, nilai maksimum diberikan pada kondisi  $\omega_M = \omega_{h2}$  yaitu sebesar 12,2 kN dan 0,74 kN untuk gaya dalam aksial kolom dan balok, 5,39 kN dan 4,4 kN untuk gaya dalam geser kolom dan balok, serta 17,15 kNm dan 11,72 kNm untuk gaya dalam momen kolom dan balok. Pada kondisi  $\omega_M = \omega_{h11}$ , letak gaya dalam elemen berada pada balok yang sengaja dilemahkan dan kolom-kolom yang berdekatan dengan balok lemah.

Perbandingan simpangan maksimum yang terjadi pada mesin untuk tiap variasi frekuensi getar adalah sebagai berikut.

**Tabel 4.5.** Perbandingan simpangan mesin pada kondisi resonansi dalam arah X

Frekuensi Getar Mesin	Step	Simpangan Mesin		
		$U_X (mm) \times 10^{-1}$	$U_Z (mm) \times 10^{-3}$	$R_Y (rad) \times 10^{-6}$
$\omega_M = \omega_{h1}$	Maks	5,18	1,23	6,15
	Min	-5,10	-1,22	-6,22
$\omega_M = \omega_{h2}$	Maks	9,71	1,26	12,00
	Min	-9,71	-1,23	-12,00
$\omega_M = \omega_{h3}$	Maks	4,44	1,30	5,85
	Min	-4,48	-1,22	-5,79
$\omega_M = \omega_{h11}$	Maks	0,09	6,17	0,31
	Min	-0,09	-6,32	-0,30

Simpangan mesin arah  $U_X$  dan  $R_Y$  mencapai maksimum pada kondisi  $\omega_M = \omega_{h2}$ , yaitu sebesar  $9,71 \times 10^{-1} mm$  dan  $1,20 \times 10^{-5} rad$ , sedangkan simpangan mesin arah  $U_Z$  mencapai maksimum pada kondisi  $\omega_M = \omega_{h11}$ , yaitu sebesar  $6,17 \times 10^{-3} mm$ .

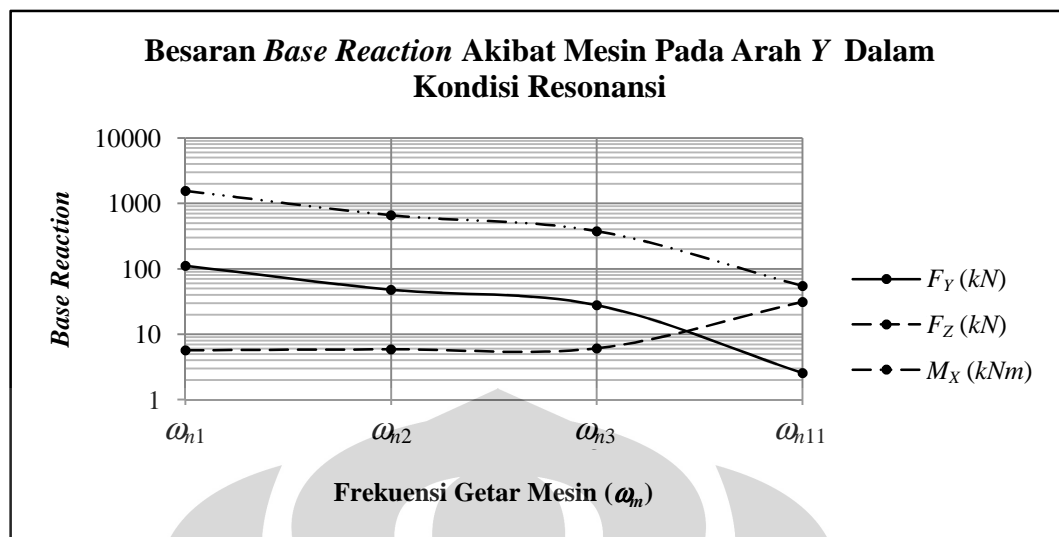
#### 4.1.1.2 Konfigurasi Mesin Arah Sumbu Y

Simulasi model struktur dengan konfigurasi mesin arah sumbu Y menghasilkan *base reaction* struktur sebagai berikut.

**Tabel 4.6.** Perbandingan *base reaction* struktur pada kondisi resonansi dalam arah Y

Frekuensi Getar Mesin	Step	Base Reaction		
		$F_Y (kN)$	$F_Z (kN)$	$M_X (kNm)$
$\omega_M = \omega_{h1}$	Maks	110,949	5,681	1561,391
	Min	-110,955	-5,701	-1561,266
$\omega_M = \omega_{h2}$	Maks	47,215	5,730	658,808
	Min	-47,897	-5,893	-648,570
$\omega_M = \omega_{h3}$	Maks	27,782	5,700	365,993
	Min	-27,323	-6,091	-376,228
$\omega_M = \omega_{h11}$	Maks	2,316	31,135	50,538
	Min	-2,554	-29,890	-54,544

Dalam bentuk kurva dapat digambarkan sebagai berikut.



**Gambar 4.3.** Grafik perbandingan *base reaction* struktur terhadap frekuensi getar dalam kondisi resonansi pada mesin arah Y

Dari grafik tersebut, terlihat bahwa  $F_Y$  dan  $M_X$  mencapai maksimum pada saat frekuensi getar mesin bersesuaian dengan pola getar pertama, sedangkan  $F_Z$  mencapai maksimum pada saat frekuensi getar mesin bersesuaian dengan pola getar ke-11. Pada saat frekuensi getar mesin mendekati pola getar pertama,  $F_X$  dan  $M_Y$  mengalami kenaikan hingga dua dan empat kali lipat jika dibandingkan dengan ketika mendekati pola getar kedua dan ketiga, atau sebesar 110,95 kN dan 1561,4 kNm. Pada saat frekuensi getar mesin mendekati pola getar ke-11,  $F_Z$  mengalami kenaikan hingga lima kali lipat jika dibandingkan dengan ketika mendekati pola getar awal struktur, atau sebesar 31,1 kN.

Pada kondisi resonansi dengan pola getar global, posisi elemen yang mengalami gaya dalam elemen terbesar cenderung tidak berubah. Perubahan hanya terjadi pada nilai gaya dalam elemen, nilai maksimum diberikan pada kondisi  $\omega_M = \omega_{h1}$  yaitu sebesar 11,6 kN dan 0,72 kN untuk gaya dalam aksial kolom dan balok, 5,27 kN dan 4,19 kN untuk gaya dalam geser kolom dan balok, serta 15,02 kNm dan 12,53 kNm untuk gaya dalam momen kolom dan balok. Pada kondisi  $\omega_M = \omega_{h11}$ , letak gaya dalam elemen berada pada balok yang sengaja dilemahkan dan kolom-kolom yang berdekatan dengan balok lemah. Perbandingan gaya dalam elemen yang terjadi di kolom dan balok struktur pada tiap frekuensi getar mesin dapat dilihat pada tabel berikut.

**Tabel 4.7.** Perbandingan gaya dalam elemen kolom pada kondisi resonansi dalam arah Y

<b>Frekuensi Getar Mesin</b>	<b>Gaya Dalam</b>		<b>Nilai</b>	<b>Posisi</b>
$\omega_M = \omega_{h1}$	$P$ (kN)	Maks	11,643	Lt. 1: C <sub>7</sub> , C <sub>13</sub>
		Min	-11,642	
	$V_3$ (kN)	Maks	5,269	Lt. 1: C <sub>8</sub> , C <sub>11</sub> , C <sub>14</sub> , C <sub>17</sub>
		Min	-5,269	
	$M_2$ (kNm)	Maks	15,022	Lt. 1: C <sub>11</sub> , C <sub>17</sub>
		Min	-15,021	
$\omega_M = \omega_{h2}$	$P$ (kN)	Maks	4,948	Lt. 1: C <sub>7</sub> , C <sub>13</sub>
		Min	-4,865	
	$V_3$ (kN)	Maks	2,271	Lt. 1: C <sub>8</sub> , C <sub>11</sub> , C <sub>14</sub> , C <sub>17</sub>
		Min	-2,238	
	$M_2$ (kNm)	Maks	6,463	Lt. 1: C <sub>11</sub> , C <sub>17</sub>
		Min	-6,369	
$\omega_M = \omega_{h3}$	$P$ (kN)	Maks	2,782	Lt. 1: C <sub>12</sub> , C <sub>18</sub>
		Min	-2,848	Lt. 1: C <sub>7</sub> , C <sub>13</sub>
	$V_3$ (kN)	Maks	1,292	Lt. 1: C <sub>8</sub> , C <sub>11</sub> , C <sub>14</sub> , C <sub>17</sub>
		Min	-1,316	
	$M_2$ (kNm)	Maks	3,671	Lt. 1: C <sub>11</sub> , C <sub>17</sub>
		Min	-3,743	
$\omega_M = \omega_{h11}$	$P$ (kN)	Maks	3,179	Lt. 1: C <sub>10</sub> , C <sub>16</sub>
		Min	-3,121	
	$V_3$ (kN)	Maks	0,275	Lt. 3: C <sub>8</sub> , C <sub>14</sub>
		Min	-0,272	
	$M_2$ (kNm)	Maks	0,711	Lt. 3: C <sub>8</sub> , C <sub>14</sub>
		Min	-0,716	



**Tabel 4.8.** Perbandingan gaya dalam elemen balok pada kondisi resonansi dalam arah Y

Frekuensi Getar Mesin	Gaya Dalam		Nilai	Posisi
$\omega_M = \omega_{h1}$	$P$ (kN)	Maks	0,72	Lt. 1: $By_1, By_5, By_{16}, By_{20}$
		Min	-0,72	
	$V_2$ (kN)	Maks	4,19	Lt. 1: $By_7, By_9, By_{12}, By_{14}$
		Min	-4,191	
	$M_3$ (kNm)	Maks	12,534	Lt. 1: $By_1, By_5, By_{16}, By_{20}$
		Min	-12,533	
$\omega_M = \omega_{h2}$	$P$ (kN)	Maks	0,326	Lt. 1: $By_1, By_5, By_{16}, By_{20}$
		Min	-0,326	
	$V_2$ (kN)	Maks	1,788	Lt. 1: $By_7, By_9, By_{12}, By_{14}$
		Min	-1,762	
	$M_3$ (kNm)	Maks	5,332	Lt. 1: $By_1, By_{16}$
		Min	-5,327	Lt. 1: $By_5, By_{20}$
$\omega_M = \omega_{h3}$	$P$ (kN)	Maks	0,21	Lt. 3: $By_1, By_{16}$
		Min	-0,211	Lt. 3: $By_5, By_{20}$
	$V_2$ (kN)	Maks	1,004	Lt. 1: $By_7, By_9, By_{12}, By_{14}$
		Min	-1,033	
	$M_3$ (kNm)	Maks	3,068	Lt. 1: $By_5, By_{20}$
		Min	-3,072	Lt. 1: $By_1, By_{16}$
$\omega_M = \omega_{h11}$	$P$ (kN)	Maks	0,218	Lt. 2: $By_5, By_{20}$
		Min	-0,21	Lt. 2: $By_1, By_{16}$
	$V_2$ (kN)	Maks	0,448	Lt. 1: $By_8, By_{13}$
		Min	-0,448	
	$M_3$ (kNm)	Maks	0,527	Lt. 1: $By_8, By_{13}$
		Min	-0,527	

Perbandingan simpangan maksimum yang terjadi pada mesin untuk tiap variasi frekuensi getar adalah sebagai berikut.

**Tabel 4.9.** Perbandingan simpangan mesin pada kondisi resonansi dalam arah Y

Frekuensi Getar Mesin	Step	Simpangan Mesin		
		$U_Y$ (mm) $\times 10^{-1}$	$U_Z$ (mm) $\times 10^{-4}$	$R_X$ (rad) $\times 10^{-6}$
$\omega_M = \omega_{h1}$	Maks	12,70	6,39	10,00
	Min	-12,70	-6,40	-10,00
$\omega_M = \omega_{h2}$	Maks	5,30	6,63	4,54
	Min	-5,21	-6,44	-4,48
$\omega_M = \omega_{h3}$	Maks	2,90	6,84	2,61
	Min	-3,00	-6,41	-2,66
$\omega_M = \omega_{h11}$	Maks	0,11	32,70	0,16
	Min	-0,10	-33,30	-0,17

Simpangan mesin arah  $U_Y$  dan  $R_X$  mencapai maksimum pada kondisi  $\omega_M = \omega_{h1}$ , yaitu sebesar  $1,27 \text{ mm}$  dan  $1 \times 10^{-5} \text{ rad}$ , sedangkan simpangan mesin arah  $U_Z$  mencapai maksimum pada kondisi  $\omega_M = \omega_{h11}$ , yaitu sebesar  $3,33 \times 10^{-3} \text{ mm}$ .

#### 4.1.2 Analisis Perilaku Respon Struktur Terhadap Variasi Isolator

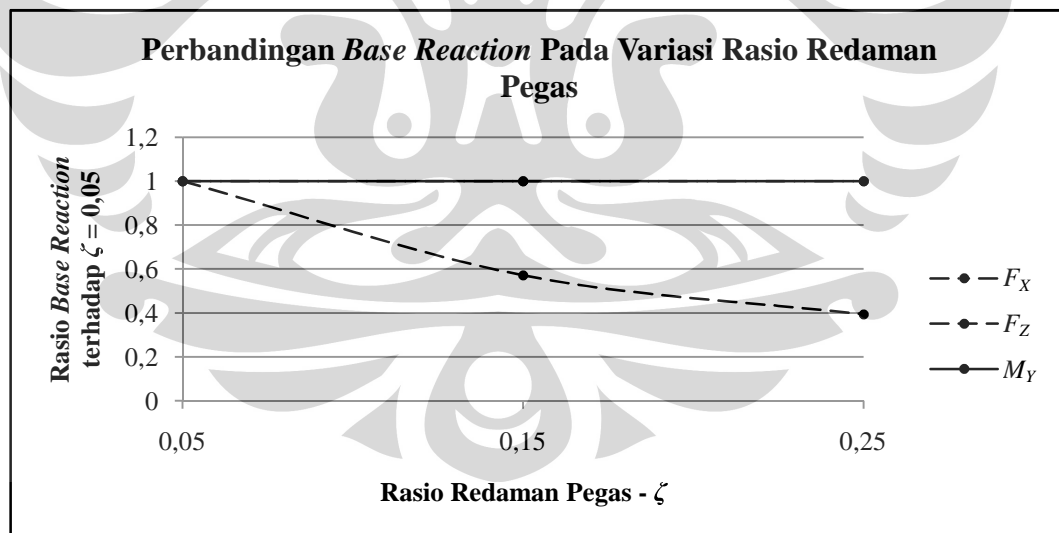
##### 4.1.2.1 Variasi Rasio Redaman Pegas

Perbandingan *base reaction* dari struktur dengan variasi rasio redaman pegas dapat dilihat sebagai berikut.

Tabel 4.10. Perbandingan *base reaction* struktur terhadap variasi rasio redaman

Gaya	Step	$\zeta_M = 5\%$	$\zeta_M = 15\%$	$\zeta_M = 25\%$
$F_X \text{ (kN)}$	Maks	12,338	12,338	12,338
	Min	-13,558	-13,558	-13,558
$F_Z \text{ (kN)}$	Maks	45,579	26,060	17,964
	Min	-45,617	-26,060	-17,964
$M_Y \text{ (kNm)}$	Maks	175,028	175,028	175,028
	Min	-191,936	-191,936	-191,936

Dalam bentuk kurva dapat digambarkan sebagai berikut.



Gambar 4.4. Grafik perbandingan *base reaction* struktur terhadap variasi rasio redaman pegas

Pada grafik di atas terlihat bahwa variasi rasio redaman pegas mesin hanya berpengaruh pada  $F_Z$  saja, sedangkan besaran  $F_X$  dan  $M_Y$  tetap. Hal ini dikarenakan frekuensi getar mesin berdekatan dengan frekuensi pola getar alami mesin pada arah  $U_Z$ . Trend yang terjadi adalah semakin besar rasio redaman,

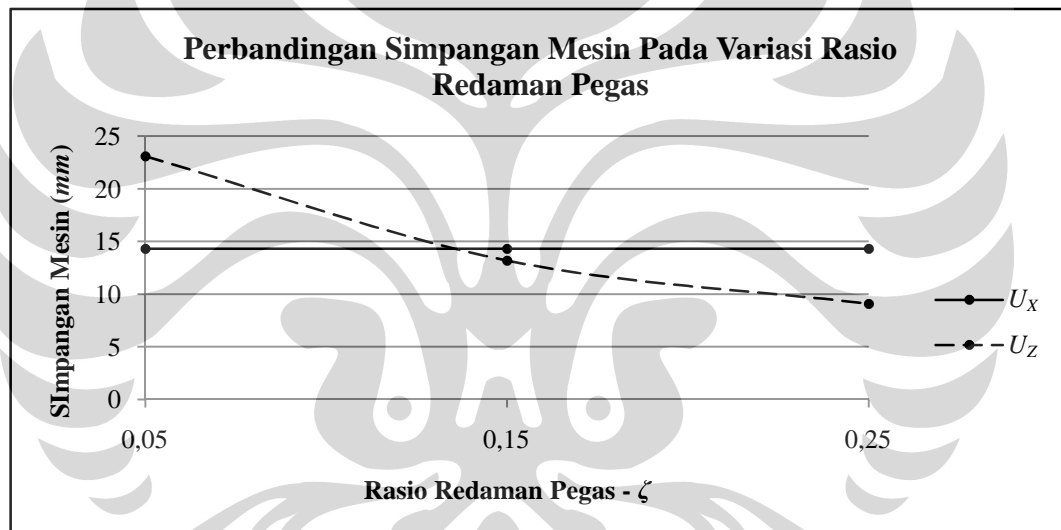
maka besaran  $F_Z$  semakin turun, yaitu dari 45,6 kN pada konfigurasi  $\zeta = 5\%$  menjadi 17,96 kN pada konfigurasi  $\zeta = 25\%$ .

Perbandingan lendutan maksimum pada mesin akibat variasi rasio redaman pegas adalah sebagai berikut.

**Tabel 4.11.** Perbandingan simpangan mesin terhadap variasi rasio redaman

<i>Displ</i>	<b>Step</b>	$\zeta_M = 5\%$	$\zeta_M = 15\%$	$\zeta_M = 25\%$
$U_X$ (mm)	Maks	10,01	10,01	10,01
	Min	-14,32	-14,32	-14,32
$U_Z$ (mm)	Maks	23,08	13,19	9,09
	Min	-23,06	-13,18	-9,09

Atau dalam bentuk kurva dapat dilihat sebagai berikut.



**Gambar 4.5.** Grafik perbandingan simpangan mesin terhadap variasi rasio redaman pegas

Pada grafik terlihat redaman pegas berbanding terbalik dengan  $U_Z$ , sementara  $U_X$  cenderung tetap. Hal ini dikarenakan frekuensi getar mesin berdekatan dengan frekuensi pola getar alami mesin arah  $U_Z$ . Penurunan terjadi pada  $U_Z$  yaitu dari 23 mm pada konfigurasi  $\zeta = 5\%$  menjadi 9 mm pada konfigurasi  $\zeta = 25\%$ .

Perbandingan gaya dalam elemen struktur untuk variasi redaman pegas dapat dilihat sebagai berikut.

**Tabel 4.12.** Perbandingan gaya dalam elemen kolom terhadap variasi rasio redaman

Gaya Dalam		$\zeta_M = 5\%$		$\zeta_M = 15\%$		$\zeta_M = 25\%$	
		Nilai	Posisi	Nilai	Posisi	Nilai	Posisi
$P$ ( $kN$ )	Maks	11,35	Lt. 1-3: $C_9, C_{10}$	6,67	Lt. 1-3: $C_9, C_{10}$	4,72	Lt. 1-3: $C_9, C_{10}$
	Min	-11,37		-6,69		-4,78	
$V_2$ ( $kN$ )	Maks	1,34	Lt. 3: $C_{15}, C_{16}$	1,04	Lt. 3: $C_{15}, C_{16}$	0,88	Lt. 3: $C_{15}, C_{16}$
	Min	-1,35		-0,90		-0,76	
$M_3$ ( $kNm$ )	Maks	4,73	Lt. 3: $C_{15}, C_{16}$	2,98	Lt. 3: $C_{15}, C_{16}$	2,45	Lt. 3: $C_{15}, C_{16}$
	Min	-4,51		-3,40		-2,81	

**Tabel 4.13.** Perbandingan gaya dalam elemen balok terhadap variasi rasio redaman

Gaya Dalam		$\zeta_M = 5\%$		$\zeta_M = 15\%$		$\zeta_M = 25\%$	
		Nilai	Posisi	Nilai	Posisi	Nilai	Posisi
$P$ ( $kN$ )	Maks	0,82	Lt. 3:	0,82	Lt. 3:	0,82	Lt. 3:
	Min	-0,82	$Bx_8, Bx_{11}$	-0,82	$Bx_8, Bx_{11}$	-0,82	$Bx_8, Bx_{11}$
$V_2$ ( $kN$ )	Maks	10,91	Lt. 3:	6,40	Lt. 3:	4,52	Lt. 3:
	Min	-10,86	$Bx_8, Bx_{11}$	-6,46	$Bx_8, Bx_{11}$	-4,65	$Bx_8, Bx_{11}$
$M_3$ ( $kNm$ )	Maks	12,54	Lt. 3:	7,48	Lt. 3:	5,37	Lt. 3:
	Min	-12,49	$Bx_8, Bx_{11}$	-7,42	$Bx_8, Bx_{11}$	-5,31	$Bx_8, Bx_{11}$

Pada tabel tersebut, dapat disimpulkan bahwa pada kolom terjadi penurunan gaya dalam akibat kenaikan redaman pegas. Penurunan gaya dalam terbesar pada kolom terjadi pada gaya dalam aksial hingga mencapai 58,4%, yaitu dari 11,37  $kN$  pada konfigurasi  $\zeta = 5\%$  menjadi 4,78  $kN$  pada konfigurasi  $\zeta = 25\%$ . Trend yang serupa juga terjadi pada gaya dalam geser dan momen balok, dimana gaya-gaya dalam maksimum berada pada tiap-tiap balok yang menopang mesin. Penurunan gaya dalam terbesar pada balok terjadi pada gaya dalam geser hingga mencapai 57,4%, yaitu dari 10,91  $kN$  pada konfigurasi  $\zeta = 5\%$  menjadi 4,65  $kN$  pada konfigurasi  $\zeta = 25\%$ .

#### 4.1.2.2 Variasi Kekakuan Pegas

Berikut adalah perbandingan frekuensi getar struktur untuk tiap-tiap varian kekakuan pegas.

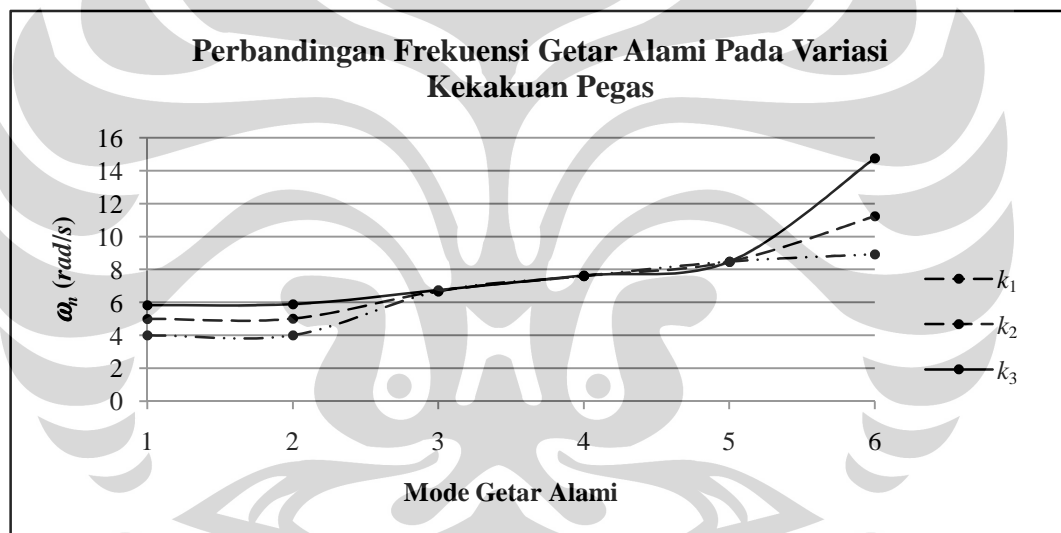
**Tabel 4.14.** Perbandingan pola getar alami mesin terhadap variasi kekakuan pegas

Mode	$k_M = k_1$		$k_M = k_2$		$k_M = k_3$	
	Arah	$\omega_n$ (rad/s)	Arah	$\omega_n$ (rad/s)	Arah	$\omega_n$ (rad/s)
1	$U_Y M_3$	4,004	$U_Y M_3$	4,997	$U_Y M_3$	5,843
2	$U_X M_3$	4,010	$U_X M_3$	5,014	$U_X M_3$	5,901
6	$U_Z M_3$	8,921	$U_Z M_3$	11,234	$U_Z M_3$	14,750

**Tabel 4.15.** Perbandingan pola getar alami struktur terhadap variasi kekakuan pegas

Mode	$k_M = k_1$		$k_M = k_2$		$k_M = k_3$	
	Arah	$\omega_n$ (rad/s)	Arah	$\omega_n$ (rad/s)	Arah	$\omega_n$ (rad/s)
3	$U_Y$	6,671	$U_Y$	6,693	$U_Y$	6,757
4	$U_X$	7,598	$U_X$	7,611	$U_X$	7,636
5	$R_Z$	8,474	$R_Z$	8,474	$R_Z$	8,474

Dalam bentuk kurva dapat digambarkan sebagai berikut.

**Gambar 4.6.** Grafik perbandingan  $\omega_n$  struktur terhadap variasi kekakuan pegas

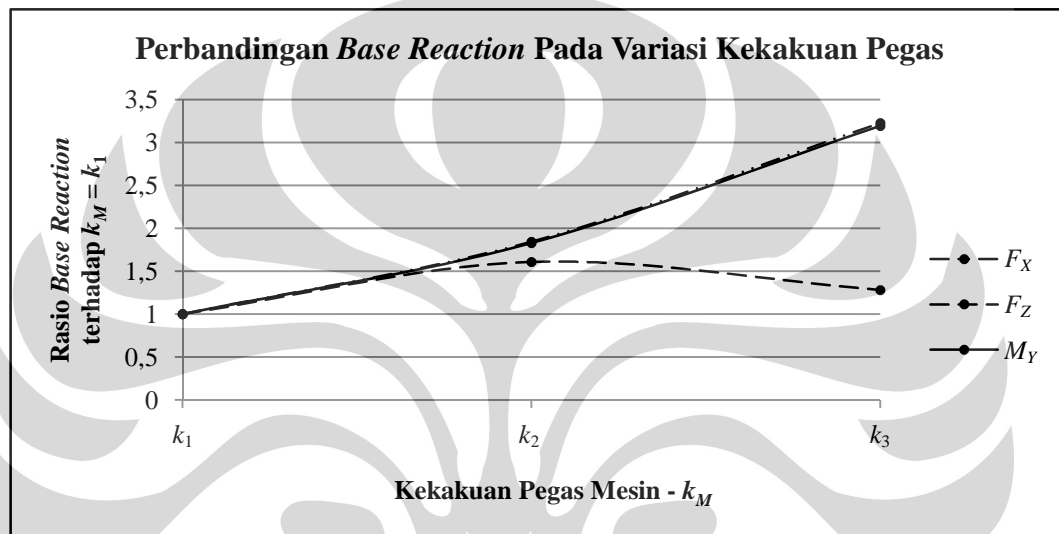
Pada grafik tersebut, terlihat bahwa kenaikan variabel kekakuan pegas mesin menyebabkan kenaikan pada frekuensi pola getar alami struktur dan mesin. Kenaikan frekuensi getar pada mode getar alami struktur terlihat sangat kecil, yaitu sebesar 0,5% pada arah X, dibandingkan dengan kenaikan frekuensi getar pada mode getar alami mesin yang mencapai 47%. Hal ini disebabkan rasio kekakuan pegas terhadap kekakuan struktur pada mode tersebut sangat kecil yaitu sebesar 0,09%, dimana kekakuan struktur pada arah X sebesar 150.082,3 kN/m.

Perbandingan *base reaction* struktur dengan variasi kekakuan pegas dapat dilihat sebagai berikut.

**Tabel 4.16.** Perbandingan *base reaction* terhadap variasi kekakuan pegas

Gaya	Step	$k_M = k_1$	$k_M = k_2$	$k_M = k_3$
$F_X$ (kN)	Maks	7,354	12,338	20,213
	Min	-5,397	-13,558	-23,742
$F_Z$ (kN)	Maks	16,212	26,060	20,352
	Min	-16,173	-26,060	-20,731
$M_Y$ (kNm)	Maks	105,010	175,028	286,408
	Min	-74,516	-191,936	-335,292

Atau dapat juga digambarkan dalam bentuk kurva sebagai berikut.

**Gambar 4.7.** Grafik perbandingan *base reaction* struktur terhadap variasi kekakuan pegas

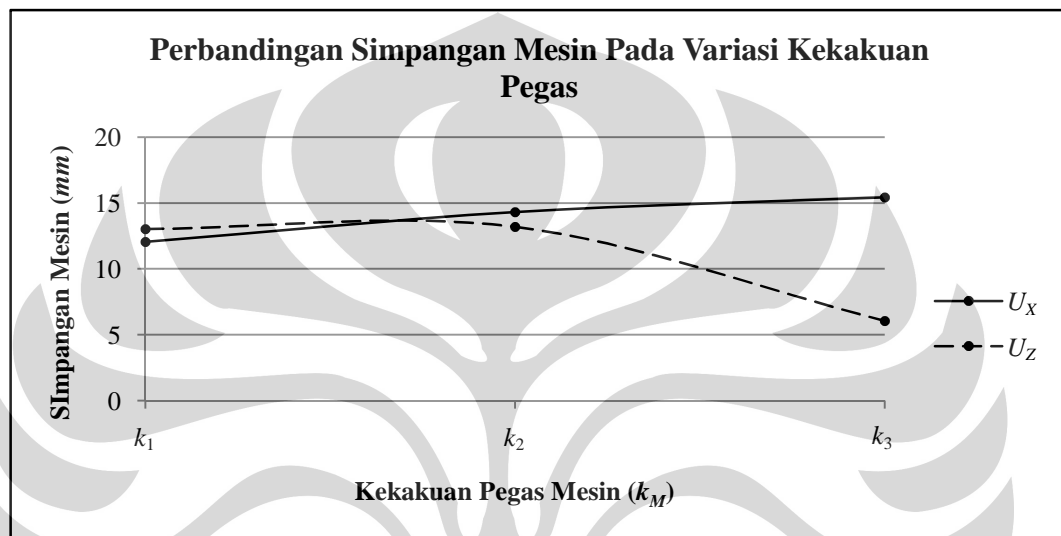
Pada grafik tersebut, terlihat bahwa kekakuan pegas berbanding lurus terhadap besaran  $F_X$  dan  $M_Y$ , dimana kenaikan yang terjadi ketika kekakuan pegas mesin  $k_M$  diubah dari  $k_1$  menjadi  $k_3$  mencapai lebih dari tiga kali lipat atau dari sebesar 105 kNm menjadi sebesar 335,29 kNm untuk momen guling arah Y. Sedangkan pada  $F_Z$ , terjadi kenaikan puncak pada mesin dengan kekakuan pegas  $k_M = k_2$  yaitu menjadi sebesar 26,06 kN, diakibatkan oleh terjadinya kondisi resonansi antara frekuensi getar mesin ( $\omega_M = 10,47$  rad/s) dengan mode getar alami mesin arah  $U_Z$  (mode 6 dengan  $\omega_i = 11,2$  rad/s).

Perbandingan lendutan maksimum pada mesin akibat variasi kekakuan pegas adalah sebagai berikut.

**Tabel 4.17.** Perbandingan simpangan mesin terhadap variasi kekakuan pegas

<i>Displ</i>	<b>Step</b>	$k_M = k_1$	$k_M = k_2$	$k_M = k_3$
$U_X$ (mm)	Maks	12,04	10,01	13,26
	Min	-11,88	-14,32	-15,43
$U_Z$ (mm)	Maks	13,02	13,19	6,05
	Min	-13,04	-13,18	-5,93

Atau dalam bentuk kurva dapat dilihat sebagai berikut.

**Gambar 4.8.** Grafik perbandingan simpangan mesin terhadap variasi kekakuan pegas

Terjadi peningkatan simpangan  $U_Z$  akibat resonansi menjadi 13,2 mm pada  $k_M = k_2$ . Sedangkan perubahan kekakuan pegas dapat dikatakan berbanding lurus dengan perubahan simpangan  $U_X$ . Kenaikan simpangan yang terjadi pada mesin mencapai 28,3% yaitu dari 12 mm untuk  $k_M = k_1$  menjadi 15,4 mm untuk  $k_M = k_3$ .

Perbandingan gaya dalam elemen struktur untuk variasi kekakuan pegas dapat dilihat sebagai berikut.

**Tabel 4.18.** Perbandingan gaya dalam elemen kolom terhadap variasi kekakuan pegas

<b>Gaya Dalam</b>		$k_M = k_1$		$k_M = k_2$		$k_M = k_3$	
		<b>Nilai</b>	<b>Posisi</b>	<b>Nilai</b>	<b>Posisi</b>	<b>Nilai</b>	<b>Posisi</b>
$P$ (kN)	Maks	4,08	Lt. 1-3: C <sub>9</sub> , C <sub>10</sub>	6,67	Lt. 1-3: C <sub>9</sub> , C <sub>10</sub>	5,70	Lt. 1-3: C <sub>9</sub> , C <sub>10</sub>
	Min	-4,05		-6,69		-5,64	
$V_2$ (kN)	Maks	0,54	Lt. 3: C <sub>15</sub> , C <sub>16</sub>	1,04	Lt. 3: C <sub>15</sub> , C <sub>16</sub>	1,20	Lt. 3: C <sub>15</sub> , C <sub>16</sub>
	Min	-0,57		-0,90		-1,06	
$M_3$ (kNm)	Maks	1,92	Lt. 3: C <sub>15</sub> , C <sub>16</sub>	2,98	Lt. 3: C <sub>15</sub> , C <sub>16</sub>	3,72	Lt. 1: C <sub>14</sub> , C <sub>17</sub> Lt. 3: C <sub>15</sub> , C <sub>16</sub>
	Min	-1,85		-3,40		-3,74	

**Tabel 4.19.** Perbandingan gaya dalam elemen balok terhadap variasi kekakuan pegas

Gaya Dalam		$k_M = k_1$		$k_M = k_2$		$k_M = k_3$	
		Nilai	Posisi	Nilai	Posisi	Nilai	Posisi
$P$ ( $kN$ )	Maks	0,43	Lt. 3:	0,82	Lt. 3:	1,23	Lt. 3:
	Min	-0,43	$Bx_8, Bx_{11}$	-0,82	$Bx_8, Bx_{11}$	-1,22	$Bx_8, Bx_{11}$
$V_2$ ( $kN$ )	Maks	3,91	Lt. 3:	6,40	Lt. 3:	4,95	Lt. 3:
	Min	-3,82	$Bx_8, Bx_{11}$	-6,46	$Bx_8, Bx_{11}$	-5,38	$Bx_8, Bx_{11}$
$M_3$ ( $kNm$ )	Maks	4,49	Lt. 3:	7,48	Lt. 3:	6,46	Lt. 3:
	Min	-4,57	$Bx_8, Bx_{11}$	-7,42	$Bx_8, Bx_{11}$	-6,20	$Bx_8, Bx_{11}$

Pada tabel tersebut, dapat disimpulkan bahwa pada kolom terjadi kenaikan gaya dalam berbanding lurus dengan kekakuan pegas. Kenaikan terbesar terjadi pada gaya dalam momen yaitu mencapai 94% dari kondisi  $k_M = k_1$  sebesar 1,92  $kNm$  menjadi 3,74  $kNm$  pada kondisi  $k_M = k_3$ . Trend yang serupa juga terjadi pada balok, dimana gaya-gaya dalam maksimum berada pada tiap-tiap balok yang menopang mesin. Kenaikan terbesar terjadi pada gaya dalam aksial yaitu mencapai 186% dari kondisi  $k_M = k_1$  sebesar 0,43  $kN$  menjadi 1,23  $kN$  pada kondisi  $k_M = k_3$ . Pada kondisi  $k_M = k_2$ , terjadi pembesaran pada gaya dalam aksial kolom serta gaya dalam geser dan momen balok akibat resonansi.

#### 4.1.3 Analisis Perilaku Respon Struktur Terhadap Variasi Massa Mesin

Berikut adalah perbandingan frekuensi getar struktur untuk tiap-tiap varian massa mesin.

**Tabel 4.20.** Perbandingan pola getar alami mesin terhadap variasi massa mesin

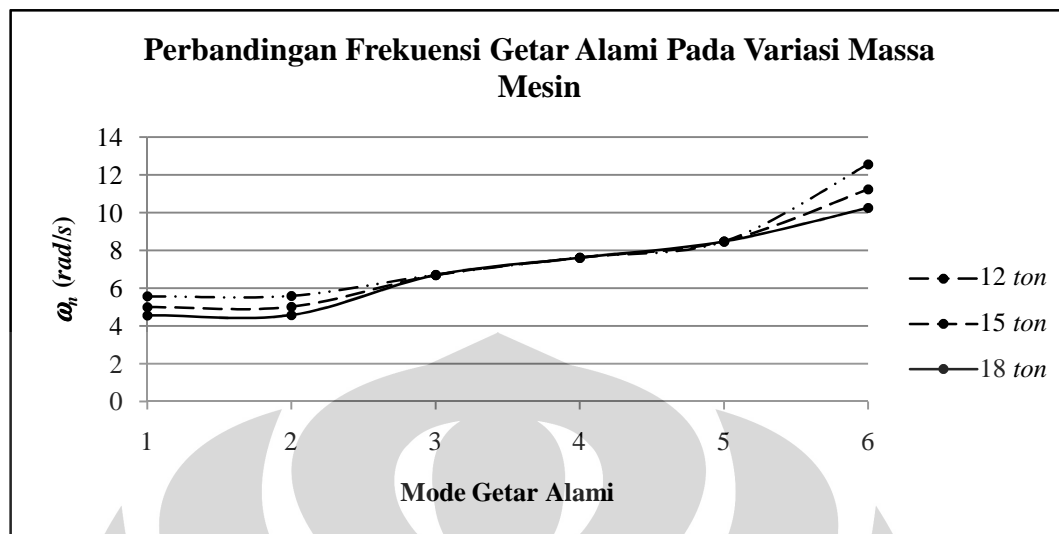
Mode	$m_M = 12 \text{ ton}$		$m_M = 15 \text{ ton}$		$m_M = 18 \text{ ton}$	
	Arah	$\omega_n$ (rad/s)	Arah	$\omega_n$ (rad/s)	Arah	$\omega_n$ (rad/s)
1	$U_Y M_3$	5,572	$U_Y M_3$	4,997	$U_Y M_3$	4,566
2	$U_X M_3$	5,601	$U_X M_3$	5,014	$U_X M_3$	4,579
6	$U_Z M_3$	12,560	$U_Z M_3$	11,234	$U_Z M_3$	10,255

**Tabel 4.21.** Perbandingan pola getar alami struktur terhadap variasi massa mesin

Mode	$m_M = 12 \text{ ton}$		$m_M = 15 \text{ ton}$		$m_M = 18 \text{ ton}$	
	Arah	$\omega_n$ (rad/s)	Arah	$\omega_n$ (rad/s)	Arah	$\omega_n$ (rad/s)
3	$U_Y$	6,711	$U_Y$	6,693	$U_Y$	6,687
4	$U_X$	7,617	$U_X$	7,611	$U_X$	7,608
5	$R_Z$	8,474	$R_Z$	8,474	$R_Z$	8,474



Dalam bentuk kurva dapat digambarkan sebagai berikut.



**Gambar 4.9.** Grafik perbandingan  $\omega_h$  struktur terhadap variasi massa mesin

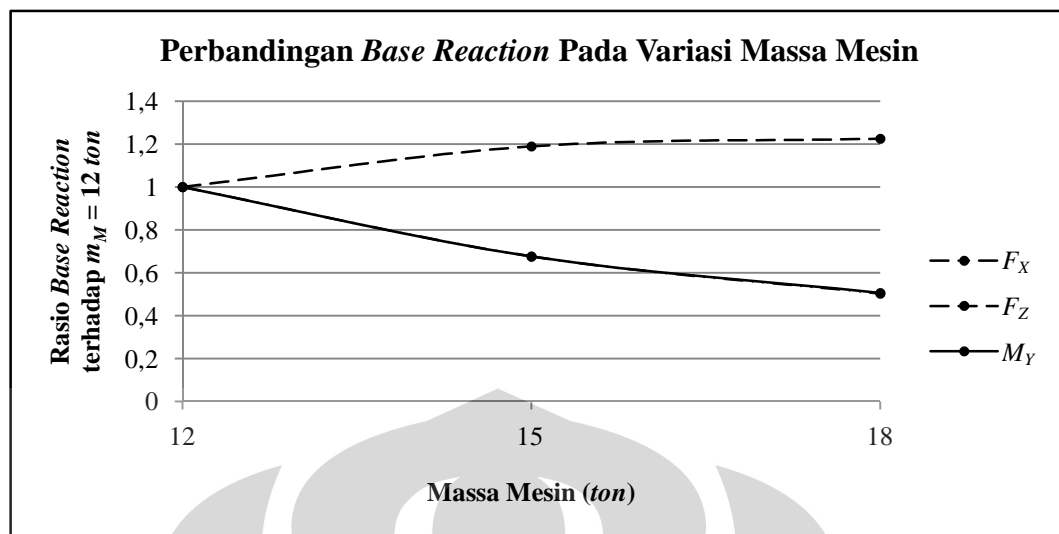
Pada grafik tersebut, terlihat bahwa kenaikan massa mesin menyebabkan penurunan pada frekuensi pola getar alami struktur dan mesin. Penurunan frekuensi getar pada mode getar alami struktur terlihat sangat kecil yaitu mencapai 0,3% dibandingkan dengan penurunan frekuensi getar pada mode getar alami mesin yang mencapai 18,35%. Hal ini disebabkan rasio massa mesin terhadap massa struktur pada mode tersebut sangat kecil yaitu sebesar 0,69% massa struktur, dimana massa total struktur dengan konfigurasi satu mesin adalah sebesar 2590,872 ton.

Perbandingan *base reaction* dari struktur dengan variasi massa mesin dapat dilihat sebagai berikut.

**Tabel 4.22.** Perbandingan *base reaction* terhadap variasi massa mesin

Gaya	Step	$m_M = 12 \text{ ton}$	$m_M = 15 \text{ ton}$	$m_M = 18 \text{ ton}$
$F_X \text{ (kN)}$	Maks	15,462	12,338	10,092
	Min	-20,071	-13,558	-9,482
$F_Z \text{ (kN)}$	Maks	21,882	26,060	26,837
	Min	-21,910	-26,060	-26,837
$M_Y \text{ (kNm)}$	Maks	218,224	175,028	143,695
	Min	-283,898	-191,936	-133,547

Atau dapat juga digambarkan dalam bentuk kurva sebagai berikut.



Gambar 4.10. Grafik perbandingan *base reaction* struktur terhadap variasi massa mesin

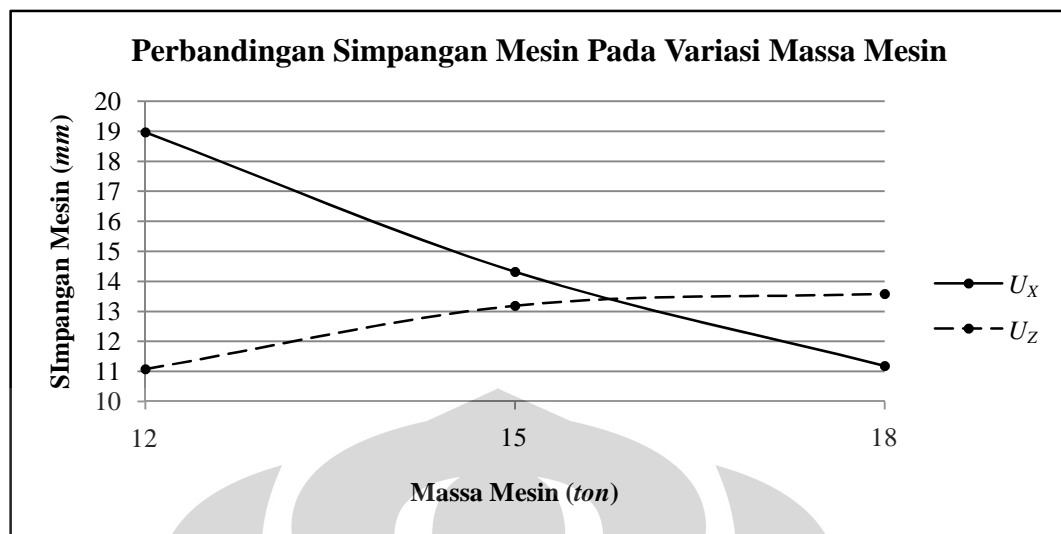
Pada grafik tersebut, terlihat bahwa perubahan massa mesin berbanding terbalik terhadap perubahan besaran  $F_X$  dan  $M_Y$ . Penurunan terbesar terjadi pada  $F_X$  yaitu mencapai 49,7% atau dari sebesar 20,07 kN pada konfigurasi  $m_M = 12$  ton menjadi sebesar 10,09 kN pada konfigurasi  $m_M = 18$  ton. Sedangkan pada  $F_Z$ , terjadi kenaikan yang dipengaruhi oleh kondisi resonansi akibat frekuensi getar alami mode ke-6 yang bergerak turun mendekati frekuensi getar mesin seiring kenaikan massa mesin. Penurunan  $F_Z$  mencapai 22,48% atau dari 21,91 kN konfigurasi  $m_M = 12$  ton menjadi 26,84 kN pada konfigurasi  $m_M = 18$  ton.

Perbandingan lendutan maksimum pada mesin akibat variasi massa mesin adalah sebagai berikut.

Tabel 4.23. Perbandingan simpangan mesin terhadap variasi massa mesin

<i>Displ</i>	<b>Step</b>	$m_M = 12$ ton	$m_M = 15$ ton	$m_M = 18$ ton
$U_X$ (mm)	Maks	14,64	10,01	9,79
	Min	-18,97	-14,32	-11,18
$U_Z$ (mm)	Maks	11,09	13,19	13,58
	Min	-11,06	-13,18	-13,58

Atau dalam bentuk kurva dapat dilihat sebagai berikut.



**Gambar 4.11.** Grafik perbandingan simpangan mesin terhadap variasi massa mesin

Pada grafik terlihat besaran  $U_z$  mengalami kenaikan hingga sebesar 22,5% akibat kondisi resonansi, yaitu dari sebesar 11,1 mm pada konfigurasi  $m_M = 12$  ton menjadi sebesar 13,6 mm pada konfigurasi  $m_M = 18$  ton. Sedangkan pada  $U_x$  perubahan massa mesin berbanding terbalik dengan perubahan simpangan mesin. Penurunan mencapai 41% yaitu dari sebesar 19 mm konfigurasi  $m_M = 12$  ton menjadi sebesar 11,2 mm pada konfigurasi  $m_M = 18$  ton.

Perbandingan gaya dalam elemen struktur untuk variasi massa mesin dapat dilihat sebagai berikut.

**Tabel 4.24.** Perbandingan gaya dalam elemen kolom terhadap variasi massa mesin

Gaya Dalam		$m_M = 12$ ton		$m_M = 15$ ton		$m_M = 18$ ton	
		Nilai	Posisi	Nilai	Posisi	Nilai	Posisi
$P$ (kN)	Maks	5,79	Lt. 1-3: $C_9, C_{10}$	6,67	Lt. 1-3: $C_9, C_{10}$	6,82	Lt. 1-3: $C_9, C_{10}$
	Min	-5,83		-6,69		-6,79	
$V_2$ (kN)	Maks	1,19	Lt. 3: $C_{15}, C_{16}$	1,04	Lt. 3: $C_{15}, C_{16}$	0,90	Lt. 3: $C_{15}, C_{16}$
	Min	-0,97		-0,90		-0,83	
$M_3$ (kNm)	Maks	3,14	Lt. 1: $C_{14}, C_{17}$	2,98	Lt. 3: $C_{15}, C_{16}$	2,89	Lt. 3: $C_{15}, C_{16}$
	Min	-3,77	Lt. 3: $C_{15}, C_{16}$	-3,40		-3,03	

**Tabel 4.25.** Perbandingan gaya dalam elemen balok terhadap variasi massa mesin

Gaya Dalam		$m_M = 12 \text{ ton}$		$m_M = 15 \text{ ton}$		$m_M = 18 \text{ ton}$	
		Nilai	Posisi	Nilai	Posisi	Nilai	Posisi
$P$ ( $kN$ )	Maks	1,08	Lt. 3:	0,82	Lt. 3:	0,64	Lt. 3:
	Min	-1,08	$Bx_8, Bx_{11}$	-0,82	$Bx_8, Bx_{11}$	-0,64	$Bx_8, Bx_{11}$
$V_2$ ( $kN$ )	Maks	5,56	Lt. 3:	6,40	Lt. 3:	6,58	Lt. 3:
	Min	-5,73	$Bx_8, Bx_{11}$	-6,46	$Bx_8, Bx_{11}$	-6,53	$Bx_8, Bx_{11}$
$M_3$ ( $kNm$ )	Maks	6,46	Lt. 3:	7,48	Lt. 3:	7,53	Lt. 3:
	Min	-6,47	$Bx_8, Bx_{11}$	-7,42	$Bx_8, Bx_{11}$	-7,54	$Bx_8, Bx_{11}$

Pada tabel tersebut, dapat disimpulkan bahwa pada kolom terjadi penurunan gaya dalam geser dan momen akibat kenaikan massa mesin, dimana penurunan terbesar terjadi pada gaya dalam geser sebesar 24% atau dari sebesar 1,19  $kN$  pada konfigurasi  $m_M = 12 \text{ ton}$  menjadi 0,9  $kN$  pada konfigurasi  $m_M = 18 \text{ ton}$ . Gaya dalam aksial kolom mengalami kenaikan akibat pengaruh resonansi sebesar 24% atau dari sebesar 5,83  $kN$  pada konfigurasi  $m_M = 12 \text{ ton}$  menjadi 6,82  $kN$  pada konfigurasi  $m_M = 18 \text{ ton}$ . Trend yang sebaliknya terjadi pada balok, dimana gaya-gaya dalam maksimum berada pada tiap-tiap balok yang menopang mesin. Pada balok terjadi penurunan gaya dalam aksial akibat kenaikan massa mesin sebesar 40,74% atau dari sebesar 1,08  $kN$  pada konfigurasi  $m_M = 12 \text{ ton}$  menjadi 0,64  $kN$  pada konfigurasi  $m_M = 18 \text{ ton}$ . Selain itu terjadi kenaikan gaya dalam geser dan momen pada balok akibat kondisi resonansi, dimana kenaikan terbesar pada gaya dalam momen sebesar 16,5% atau dari sebesar 6,47  $kN$  pada konfigurasi  $m_M = 12 \text{ ton}$  menjadi 7,54  $kN$  pada konfigurasi  $m_M = 18 \text{ ton}$ .

## 4.2 ANALISIS RESPON STRUKTUR DENGAN DUA MESIN

### 4.2.1 Analisis Respon Struktur Terhadap Variasi Posisi Mesin

Pada penelitian ini, kombinasi mesin dimodelkan sebagai dua mesin identik. Variansi dilakukan dengan mengubah kombinasi posisi mesin pada lantai 1, lantai 2, dan lantai 3. Pada varian pertama mesin diletakkan di lantai 1 dan lantai 2, pada varian kedua mesin diletakkan di lantai 1 dan lantai 3, sedangkan pada varian ketiga mesin diletakkan di lantai 2 dan lantai 3. Dari hasil penelitian model struktur tersebut, didapatkan perbandingan modal pada tiap varian sebagai berikut.

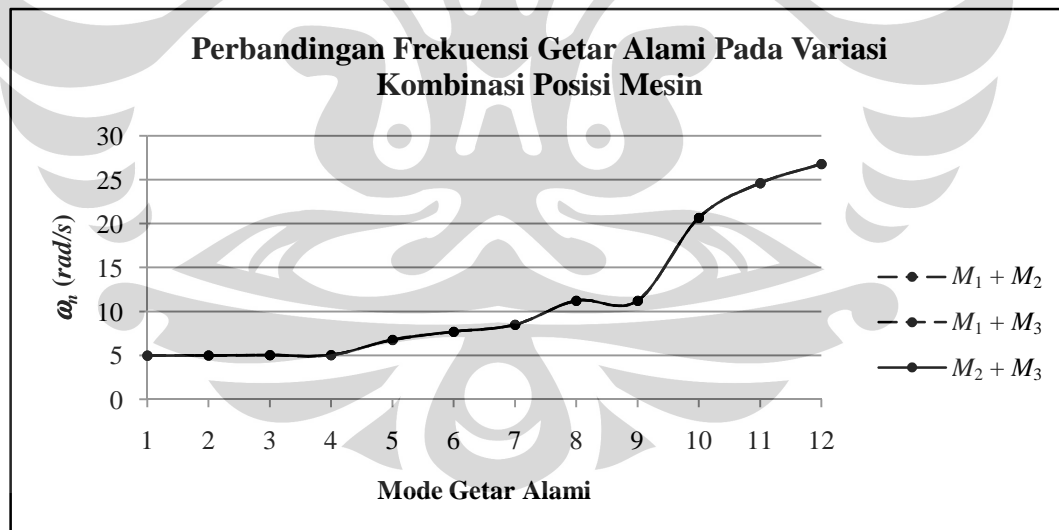
Tabel 4.26. Perbandingan pola getar alami mesin terhadap kombinasi posisi mesin

Mode	$M_1 + M_2$		$M_1 + M_3$		$M_2 + M_3$	
	Arah	$\omega_n$ (rad/s)	Arah	$\omega_n$ (rad/s)	Arah	$\omega_n$ (rad/s)
1	$U_Y M_{1+2}$	5,007	$U_Y M_{1+3}$	4,995	$U_Y M_{2+3}$	4,984
2	$U_X M_{1+2}$	5,021	$U_X M_{1+3}$	5,013	$U_X M_{2+3}$	5,007
3	$U_Y M_{1+2}$	5,026	$U_Y M_{1+3}$	5,025	$U_Y M_{2+3}$	5,026
4	$U_X M_{1+2}$	5,030	$U_X M_{1+3}$	5,030	$U_X M_{2+3}$	5,030
8	$U_Z M_{1+2}$	11,235	$U_Z M_{1+3}$	11,234	$U_Z M_{2+3}$	11,233
9	$U_Z M_{1+2}$	11,238	$U_Z M_{1+3}$	11,238	$U_Z M_{2+3}$	11,237

Tabel 4.27. Perbandingan pola getar alami struktur terhadap kombinasi posisi mesin

Mode	$M_1 + M_2$		$M_1 + M_3$		$M_2 + M_3$	
	Arah	$\omega_n$ (rad/s)	Arah	$\omega_n$ (rad/s)	Arah	$\omega_n$ (rad/s)
5	$U_Y$	6,761	$U_Y$	6,779	$U_Y$	6,794
6	$U_X$	7,695	$U_X$	7,709	$U_X$	7,718
7	$R_Z$	8,488	$R_Z$	8,486	$R_Z$	8,485
10	$U_Y$	20,670	$U_Y$	20,663	$U_Y$	20,664
11	$U_X$	24,610	$U_X$	24,605	$U_X$	24,607
12	$R_Z$	26,785	$R_Z$	26,795	$R_Z$	26,792

Dalam bentuk kurva dapat digambarkan sebagai berikut.

Gambar 4.12. Grafik perbandingan  $\omega_n$  terhadap variasi kombinasi posisi mesin

Pada mode awal global struktur (mode 5 dan 6), semakin tinggi konfigurasi mesin, terjadi kenaikan frekuensi getar alami dengan kisaran kenaikan sebesar 0,48%. Selain itu terjadi penurunan frekuensi getar alami pada mode awal mesin akibat kenaikan kombinasi posisi mesin dengan kisaran penurunan sebesar

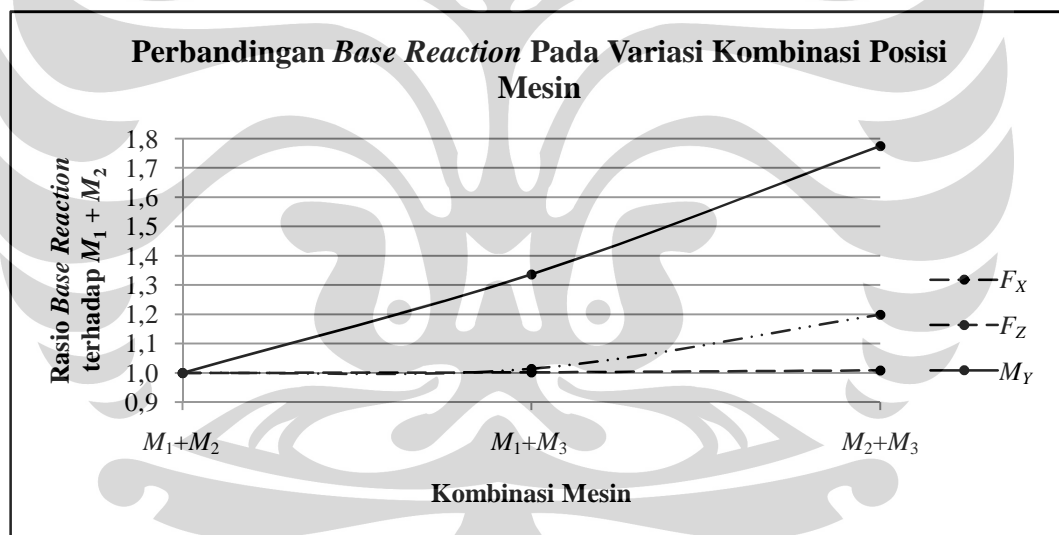
0,46%. Hal ini terjadi karena pada mode awal struktur dan mesin tidak berada dalam satu fase.

Selain itu, perbandingan *base reaction* akibat kombinasi mesin untuk variasi posisi mesin dapat dilihat sebagai berikut.

**Tabel 4.28.** Perbandingan *base reaction* terhadap kombinasi posisi mesin

<i>Base Reaction</i>		$M_1 + M_2$	$M_1 + M_3$	$M_2 + M_3$
$F_X$ (kN)	Maks	4,555	4,620	5,036
	Min	-3,548	-4,002	-5,458
$F_Z$ (kN)	Maks	25,870	25,930	26,089
	Min	-24,436	-24,491	-24,657
$M_Y$ (kNm)	Maks	41,353	54,631	69,792
	Min	-47,613	-63,638	-84,474

Atau dapat juga digambarkan dalam bentuk kurva sebagai berikut.



**Gambar 4.13.** Grafik perbandingan *base reaction* terhadap variasi kombinasi posisi mesin

Trend yang terjadi adalah semakin tinggi konfigurasi mesin, *base reaction* mengalami kenaikan. Kenaikan  $F_X$  mencapai 19,82% atau dari sebesar 4,56 kN pada kombinasi mesin di lantai 1 dan 2 ( $M_1 + M_2$ ) menjadi 5,46 kN pada kombinasi mesin di lantai 2 dan 3 ( $M_2 + M_3$ ). Sedangkan pada  $M_Y$  mencapai 77,42% atau dari sebesar 47,6 kNm pada kombinasi mesin di lantai 1 dan 2 ( $M_1 + M_2$ ) menjadi 84,5 kNm pada kombinasi mesin di lantai 2 dan 3 ( $M_2 + M_3$ ).

Sedangkan perbandingan *displacement* pada tiap mesin akibat kombinasi mesin untuk variasi posisi mesin dapat dilihat sebagai berikut.

**Tabel 4.29.** Perbandingan simpangan mesin terhadap kombinasi posisi mesin

Mesin	Displ	Step	$M_1 + M_2$	$M_1 + M_3$	$M_2 + M_3$
$M_1$	$U_X$ (mm)	Maks	4,44	4,44	4,45
		Min	-4,45	-4,45	-4,43
	$U_Z$ (mm)	Maks	6,17	6,17	6,16
		Min	-6,54	-6,54	-6,54
$M_2$	$U_X$ (mm)	Maks	4,44	4,45	4,46
		Min	-4,44	-4,43	-4,43
	$U_Z$ (mm)	Maks	6,17	6,16	6,16
		Min	-6,54	-6,54	-6,54

Dari tabel di atas, dapat disimpulkan bahwa simpangan pada mesin tidak tergantung oleh letak ketinggian mesin. Kedua mesin memiliki simpangan yang sama, yaitu 4,45 mm pada arah X dan 6,54 mm pada arah Z.

Perbandingan gaya dalam elemen struktur akibat kombinasi mesin untuk variasi posisi mesin dapat dilihat sebagai berikut.

**Tabel 4.30.** Perbandingan gaya dalam elemen kolom terhadap kombinasi posisi mesin

Gaya Dalam		$M_1 + M_2$		$M_1 + M_3$		$M_2 + M_3$	
		Nilai	Posisi	Nilai	Posisi	Nilai	Posisi
$P$ (kN)	Maks	5,97	Lt. 1: $C_9, C_{10}$	5,90	Lt. 1: $C_9, C_{10}$	5,90	Lt. 1 & 2: $C_9, C_{10}, C_{15}, C_{16}$
	Min	-6,58	$C_{15}, C_{16}$	-6,52	$C_{15}, C_{16}$	-6,50	$C_{10}, C_{15}, C_{16}$
$V_2$ (kN)	Maks	0,60	Lt. 2: $C_9, C_{10}$	0,42	Lt. 1: $C_9, C_{10}$	0,68	Lt. 3: $C_9, C_{10}, C_{15}, C_{16}$
	Min	-0,68	$C_{15}, C_{16}$	-0,52	$C_{15}, C_{16}$	-0,74	$C_{15}, C_{16}$
$M_3$ (kNm)	Maks	1,72	Lt. 2: $C_{15}, C_{16}$	1,46	Lt. 1 & 3: $C_{15}, C_{16}$	1,91	Lt. 3: $C_{15}, C_{16}$
	Min	-1,68		-1,38	Lt. 2: $C_{15}, C_{16}$	-1,79	

**Tabel 4.31.** Perbandingan gaya dalam elemen balok terhadap kombinasi posisi mesin

Gaya Dalam		$M_1 + M_2$		$M_1 + M_3$		$M_2 + M_3$	
		Nilai	Posisi	Nilai	Posisi	Nilai	Posisi
$P$ (kN)	Maks	0,36	Lt. 1 & 2:	0,28	Lt. 1 & 3:	0,38	Lt. 2 & 3:
	Min	-0,37	$B_{x8}, B_{x11}$	-0,28	$B_{x8}, B_{x11}$	-0,36	$B_{x8}, B_{x11}$
$V_2$ (kN)	Maks	2,90	Lt. 1 & 2:	2,90	Lt. 1 & 3:	2,92	Lt. 2 & 3:
	Min	-3,15	$B_{x8}, B_{x11}$	-3,13	$B_{x8}, B_{x11}$	-3,11	$B_{x8}, B_{x11}$
$M_3$ (kNm)	Maks	3,57	Lt. 1 & 2:	3,65	Lt. 1 & 3:	3,60	Lt. 2 & 3:
	Min	-3,15	$B_{x8}, B_{x11}$	-3,23	$B_{x8}, B_{x11}$	-3,21	$B_{x8}, B_{x11}$

Pada tabel tersebut, dapat disimpulkan bahwa pada kolom terjadi penurunan gaya dalam aksial ketika mesin diletakkan pada kombinasi lantai yang lebih tinggi. Besaran penurunan 1,2% yaitu dari 6,58 *kN* pada konfigurasi mesin di lantai satu dan lantai dua ( $M_1 + M_2$ ) menjadi 6,5 *kN* pada konfigurasi mesin di lantai dua dan lantai 3 ( $M_2 + M_3$ ). Trend yang terjadi pada gaya-gaya dalam balok adalah maksimum pada tiap-tiap balok yang menopang mesin. Pada gaya dalam aksial balok, terjadi penurunan hingga sebesar 26,3% ketika mesin diletakkan dengan posisi berjauhan ( $M_1 + M_3$ ) yang mungkin terjadi akibat penurunan pengaruh tiap mesin satu sama lain.

#### 4.2.2 Analisis Respon Struktur Terhadap Variasi Massa Mesin

Pada penelitian ini, kombinasi mesin dimodelkan dengan dua massa yang berbeda, yaitu 15 *ton* dan 18 *ton*. Variansi dilakukan dengan menaikkan massa salah satu mesin. Pada varian pertama mesin dengan massa yang lebih besar diletakkan di lantai 3, sedangkan pada varian kedua mesin dengan massa yang lebih besar diletakkan di lantai 1. Dari hasil penelitian model struktur tersebut, didapatkan perbandingan modal pada tiap varian sebagai berikut.

Tabel 4.32. Perbandingan pola getar alami mesin terhadap kombinasi massa mesin

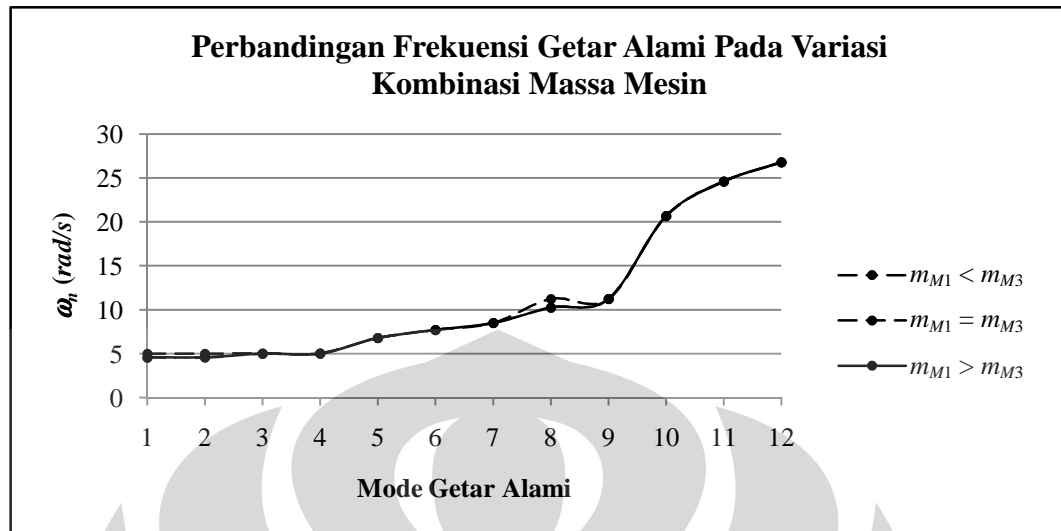
Mode	$m_{M1} < m_{M3}$		$m_{M1} = m_{M3}$		$m_{M1} > m_{M3}$	
	Arah	$\omega_n$ (rad/s)	Arah	$\omega_n$ (rad/s)	Arah	$\omega_n$ (rad/s)
1	$U_Y M_3$	4,567	$U_Y M_{1+3}$	4,995	$U_Y M_1$	4,585
2	$U_X M_3$	4,579	$U_X M_{1+3}$	5,013	$U_X M_1$	4,591
3	$U_Y M_1$	5,022	$U_Y M_{1+3}$	5,025	$U_Y M_3$	4,999
4	$U_X M_1$	5,029	$U_X M_{1+3}$	5,030	$U_X M_3$	5,014
8	$U_Z M_3$	10,255	$U_Z M_{1+3}$	11,234	$U_Z M_1$	10,258
9	$U_Z M_1$	11,237	$U_Z M_{1+3}$	11,238	$U_Z M_3$	11,234

Tabel 4.33. Perbandingan pola getar alami struktur terhadap kombinasi massa mesin

Mode	$m_{M1} < m_{M3}$		$m_{M1} = m_{M3}$		$m_{M1} > m_{M3}$	
	Arah	$\omega_n$ (rad/s)	Arah	$\omega_n$ (rad/s)	Arah	$\omega_n$ (rad/s)
5	$U_Y$	6,773	$U_Y$	6,779	$U_Y$	6,778
6	$U_X$	7,706	$U_X$	7,709	$U_X$	7,709
7	$R_Z$	8,486	$R_Z$	8,486	$R_Z$	8,486
10	$U_Y$	20,663	$U_Y$	20,663	$U_Y$	20,663
11	$U_X$	24,605	$U_X$	24,605	$U_X$	24,605
12	$R_Z$	26,795	$R_Z$	26,795	$R_Z$	26,794



Dalam bentuk kurva dapat digambarkan sebagai berikut.



**Gambar 4.14.** Grafik perbandingan  $\omega_h$  terhadap variasi kombinasi massa mesin

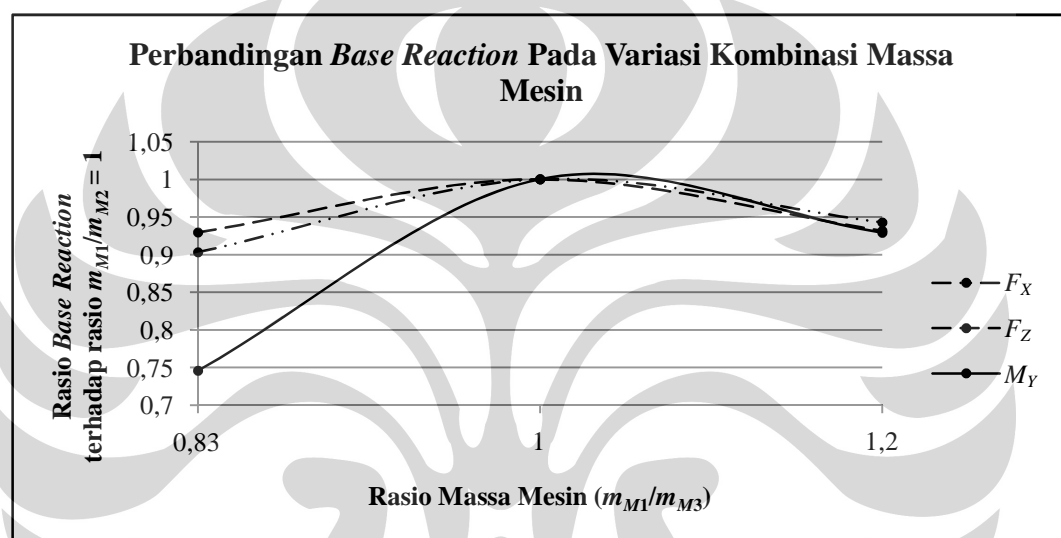
Dari tabel dan grafik tersebut terlihat bahwa kenaikan massa mesin yang bekerja pada salah satu lantai justru menyebabkan penurunan pada frekuensi getar alami struktur. Penurunan frekuensi getar alami terbesar terjadi pada mode-mode awal struktur dan mesin ketika massa mesin di lantai 3 lebih besar daripada massa pada mesin di lantai 1 ( $m_{M1} < m_{M3}$ ) yaitu sebesar 0,09% pada mode awal struktur (mode 5) dan 8,6% pada mode awal mesin (mode 1 dan 2). Selain itu terlihat juga terdapat perubahan arah mode getar awal pada mesin. Trend yang terjadi pada mode getar alami mesin adalah mode getar awal bekerja pada mesin dengan massa yang lebih besar. Pada grafik, dampak variasi massa mesin terhadap pola getar terlihat cukup kecil. Hal ini disebabkan oleh rasio massa mesin terhadap massa total struktur yang sangat kecil. Total massa mesin yang bekerja adalah 33 ton sedangkan massa total struktur murni adalah sebesar 2515,032 ton atau dapat dikatakan total massa mesin hanya 1,31% dari massa total struktur murni.

Perbandingan *base reaction* akibat kombinasi mesin di lantai 1 dan di lantai 3 ( $\omega_{M1} \neq 0$ ;  $\omega_{M3} \neq 0$ ) untuk variasi massa mesin dapat dilihat sebagai berikut.

**Tabel 4.34.** Perbandingan *base reaction* terhadap kombinasi massa mesin

<b>Base Reaction</b>		$m_{M1} < m_{M3}$	$m_{M1} = m_{M3}$	$m_{M1} > m_{M3}$
$F_X$ (kN)	Maks	4,174	4,620	4,356
	Min	-3,189	-4,002	-3,720
$F_Z$ (kN)	Maks	24,105	25,930	24,161
	Min	-21,224	-24,491	-21,295
$M_Y$ (kNm)	Maks	46,200	54,631	52,110
	Min	-47,467	-63,638	-59,127

Atau dapat juga digambarkan dalam bentuk kurva rasio sebagai berikut.

**Gambar 4.15.** Grafik perbandingan *base reaction* terhadap variasi kombinasi massa mesin

Dari grafik tersebut terlihat bahwa kenaikan massa mesin yang bekerja pada salah satu lantai justru menyebabkan penurunan pada *base reaction*, dimana penurunan terbesar terjadi ketika massa mesin di lantai 3 yang diperbesar ( $m_{M1} < m_{M3}$ ). Penurunan yang terbesar terjadi pada  $M_Y$ , yaitu mencapai 25,41% atau dari sebesar 63,64 kNm pada konfigurasi  $m_{M1} = m_{M3}$  menjadi 47,47 kNm pada konfigurasi  $m_{M1} < m_{M3}$ .

Sedangkan perbandingan *displacement* pada tiap mesin akibat kombinasi mesin di lantai 1 dan di lantai 3 ( $\omega_{M1} \neq 0$ ;  $\omega_{M3} \neq 0$ ) untuk variasi massa mesin dapat dilihat sebagai berikut.

**Tabel 4.35.** Perbandingan simpangan mesin terhadap kombinasi massa mesin

Mesin	Displ	Step	$m_{M1} < m_{M3}$	$m_{M1} = m_{M3}$	$m_{M1} > m_{M3}$
$M_1$	$U_X$ (mm)	Maks	4,44	4,44	4,13
		Min	-4,45	-4,45	-4,11
	$U_Z$ (mm)	Maks	6,17	6,17	4,63
		Min	-6,54	-6,54	-5,71
$M_3$	$U_X$ (mm)	Maks	4,12	4,45	4,45
		Min	-4,09	-4,43	-4,43
	$U_Z$ (mm)	Maks	4,63	6,16	6,16
		Min	-5,71	-6,54	-6,54

Simpangan maksimum terjadi pada mesin dengan massa yang lebih kecil yaitu sebesar 4,45 mm pada arah X dan 6,54 mm pada arah Z. Kenaikan massa mesin menghasilkan penurunan simpangan mesin, yaitu 7,4% pada arah X dan 12,7% pada arah Z, untuk kenaikan salah satu massa mesin sebesar 20%.

Perbandingan gaya dalam elemen struktur akibat kombinasi mesin di lantai 1 dan di lantai 3 ( $\omega_{M1} \neq 0$ ;  $\omega_{M3} \neq 0$ ) untuk variasi massa mesin adalah:

**Tabel 4.36.** Perbandingan gaya dalam elemen kolom terhadap kombinasi massa mesin

Gaya Dalam		$m_{M1} < m_{M3}$		$m_{M1} = m_{M3}$		$m_{M1} > m_{M3}$	
		Nilai	Posisi	Nilai	Posisi	Nilai	Posisi
$P$ (kN)	Maks	5,15	Lt. 1: $C_9, C_{10}$	5,90	Lt. 1: $C_9, C_{10}$	5,12	Lt. 1: $C_9$
	Min	-6,04	$C_{15}, C_{16}$	-6,52	$C_{15}, C_{16}$	-6,02	$C_{10}, C_{15}, C_{16}$
$V_2$ (kN)	Maks	0,39	Lt. 1: $C_9, C_{10}$	0,42	Lt. 1: $C_9, C_{10}$	0,37	Lt. 1: $C_9, C_{10}$
	Min	-0,48	Lt. 1: $C_{15}, C_{16}$	-0,52	$C_{15}, C_{16}$	-0,44	Lt. 1: $C_{15}, C_{16}$
$M_3$ (kNm)	Maks	1,39	Lt. 2: $C_{15}, C_{16}$	1,46	Lt. 1 & 3: $C_{15}, C_{16}$	1,40	Lt. 3 & 4: $C_{15}, C_{16}$
	Min	-1,30		-1,38	Lt. 2: $C_{15}, C_{16}$	-1,18	

**Tabel 4.37.** Perbandingan gaya dalam elemen kolom terhadap kombinasi massa mesin

Gaya Dalam		$m_{M1} < m_{M3}$		$m_{M1} = m_{M3}$		$m_{M1} > m_{M3}$	
		Nilai	Posisi	Nilai	Posisi	Nilai	Posisi
$P$ (kN)	Maks	0,28	Lt. 1:	0,28	Lt. 1 & 3:	0,26	Lt. 3:
	Min	-0,28	$B_{x8}, B_{x11}$	-0,28	$B_{x8}, B_{x11}$	-0,27	$B_{x8}, B_{x11}$
$V_2$ (kN)	Maks	2,88	Lt. 1:	2,90	Lt. 1 & 3:	2,90	Lt. 3:
	Min	-3,13	$B_{x8}, B_{x11}$	-3,13	$B_{x8}, B_{x11}$	-3,12	$B_{x8}, B_{x11}$
$M_3$ (kNm)	Maks	3,61	Lt. 1:	3,65	Lt. 1 & 3:	3,65	Lt. 3:
	Min	-3,21	$B_{x8}, B_{x11}$	-3,23	$B_{x8}, B_{x11}$	-3,21	$B_{x8}, B_{x11}$

Pada tabel tersebut, dapat disimpulkan bahwa pada kolom terjadi penurunan gaya dalam aksial sebesar 7,67% dan penurunan gaya dalam geser sebesar 15% ketika massa yang lebih besar diletakkan di lantai 1. Trend yang terjadi pada gaya-gaya dalam balok adalah maksimum pada balok yang menopang mesin yang lebih kecil.

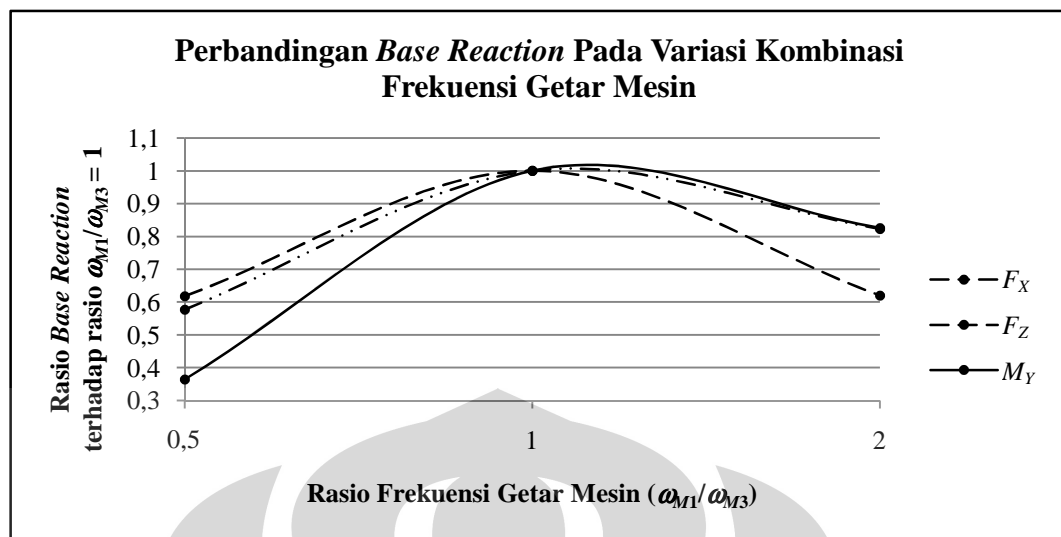
#### 4.2.3 Analisis Respon Struktur Terhadap Variasi Frekuensi Getar Mesin

Pada penelitian ini, kombinasi mesin dimodelkan dengan dua frekuensi yang berbeda, yaitu 150 rpm dan 300 rpm. Variansi dilakukan dengan menaikkan frekuensi getar salah satu mesin. Pada varian pertama mesin dengan frekuensi 300 rpm diletakkan di lantai 3, sedangkan pada varian kedua mesin dengan frekuensi 300 rpm diletakkan di lantai 1. Perbandingan *base reaction* akibat kombinasi mesin di lantai 1 dan di lantai 3 ( $\omega_{M1} \neq 0$ ;  $\omega_{M3} \neq 0$ ) untuk variasi frekuensi getar mesin dapat dilihat sebagai berikut.

Tabel 4.38. Perbandingan *base reaction* terhadap kombinasi frekuensi getar mesin

<i>Base Reaction</i>		$\omega_{M1} < \omega_{M3}$	$\omega_{M1} = \omega_{M3}$	$\omega_{M1} > \omega_{M3}$
$F_X$ (kN)	Maks	4,174	4,620	4,356
	Min	-3,189	-4,002	-3,720
$F_Z$ (kN)	Maks	24,105	25,930	24,161
	Min	-21,224	-24,491	-21,295
$M_Y$ (kNm)	Maks	46,200	54,631	52,110
	Min	-47,467	-63,638	-59,127

Kenaikan frekuensi getar mesin yang bekerja pada salah satu lantai justru menyebabkan penurunan pada *base reaction*, dimana penurunan terbesar terjadi ketika frekuensi getar mesin di lantai 3 yang diperbesar ( $\omega_{M1} < \omega_{M3}$ ). Penurunan yang terbesar terjadi pada  $F_X$  dan  $M_Y$ . Penurunan  $F_X$  mencapai 42,27%, atau dari 4,62 kN pada kondisi  $\omega_{M1} = \omega_{M3}$  menjadi 4,17 kN pada kondisi  $\omega_{M1} < \omega_{M3}$  dimana  $\omega_{M3}$  adalah dua kali lipat  $\omega_{M1}$ . Penurunan  $M_Y$  mencapai 63,56%, atau dari 63,64 kN pada kondisi  $\omega_{M1} = \omega_{M3}$  menjadi 47,47 kN pada kondisi  $\omega_{M1} < \omega_{M3}$  dimana  $\omega_{M3}$  adalah dua kali lipat  $\omega_{M1}$ . Dalam bentuk kurva dapat dilihat sebagai berikut.



Gambar 4.16. Grafik perbandingan *base reaction* terhadap variasi kombinasi frekuensi getar mesin

Perbandingan *displacement* mesin akibat kombinasi mesin di lantai 1 dan di lantai 3 ( $\omega_{M1} \neq 0$ ;  $\omega_{M3} \neq 0$ ) untuk variasi frekuensi getar mesin sebagai berikut.

Tabel 4.39. Perbandingan simpangan mesin terhadap kombinasi frekuensi getar mesin

Mesin	Displ	Step	$\omega_{M1} < \omega_{M3}$	$\omega_{M1} = \omega_{M3}$	$\omega_{M1} > \omega_{M3}$
$M_1$	$U_x$ (mm)	Maks	4,44	4,44	1,24
		Min	-4,45	-4,45	-1,25
	$U_z$ (mm)	Maks	6,17	6,17	2,30
		Min	-6,54	-6,54	-1,53
$M_3$	$U_x$ (mm)	Maks	1,24	4,45	4,45
		Min	-1,25	-4,43	-4,44
	$U_z$ (mm)	Maks	2,30	6,16	6,17
		Min	-1,53	-6,54	-6,54

Terlihat bahwa simpangan maksimum terjadi pada mesin yang bekerja dengan frekuensi getar yang dekat dengan mode getar awal atau dalam kasus ini pada mesin dengan frekuensi getar yang lebih kecil. Simpangan maksimum yang terjadi adalah sebesar 4,45 mm pada arah X dan 6,54 mm pada arah Z. Kenaikan 100% pada salah satu frekuensi getar mesin mengakibatkan penurunan simpangan pada mesin tersebut sebesar 71,9% pada arah X dan 64,8% pada arah Z, atau menjadi sebesar 1,25 mm pada arah X dan 2,3 mm pada arah Z.

Perbandingan gaya dalam elemen struktur akibat kombinasi mesin di lantai 1 dan di lantai 3 ( $\omega_{M1} \neq 0$ ;  $\omega_{M3} \neq 0$ ) untuk variasi frekuensi getar mesin dapat dilihat sebagai berikut.

**Tabel 4.40.** Perbandingan gaya dalam elemen kolom terhadap kombinasi frekuensi getar mesin

Gaya Dalam		$\omega_{M1} < \omega_{M3}$		$\omega_{M1} = \omega_{M3}$		$\omega_{M1} > \omega_{M3}$	
		Nilai	Posisi	Nilai	Posisi	Nilai	Posisi
$P$ (kN)	Maks	3,02	Lt. 1: $C_9, C_{10},$ $C_{15}, C_{16}$	5,90	Lt. 1: $C_9, C_{10},$ $C_{15}, C_{16}$	2,99	Lt. 1-3: $C_9, C_{10},$ $C_{15}, C_{16}$
	Min	-4,05		-6,52		-3,94	Lt. 1: $C_9, C_{10}$
$V_2$ (kN)	Maks	0,36	Lt. 1: $C_9, C_{10}$	0,42	Lt. 1: $C_9, C_{10},$ $C_{15}, C_{16}$	0,34	Lt. 4: $C_{15}, C_{16}$
	Min	-0,41	Lt. 1: $C_9, C_{10},$ $C_{15}, C_{16}$	-0,52		-0,40	Lt. 3: $C_{15}, C_{16}$
$M_3$ (kNm)	Maks	1,31	Lt. 1: $C_9, C_{10}$	1,46	Lt. 1 & 3: $C_{15}, C_{16}$	1,38	Lt. 3: $C_{15}, C_{16}$
	Min	-1,15	Lt. 2: $C_{15}, C_{16}$	-1,38	Lt. 2: $C_{15}, C_{16}$	-1,14	

**Tabel 4.41.** Perbandingan gaya dalam elemen balok terhadap kombinasi frekuensi getar mesin

Gaya Dalam		$\omega_{M1} < \omega_{M3}$		$\omega_{M1} = \omega_{M3}$		$\omega_{M1} > \omega_{M3}$	
		Nilai	Posisi	Nilai	Posisi	Nilai	Posisi
$P$ (kN)	Maks	0,27	Lt. 1:	0,28	Lt. 1 & 3:	0,26	Lt. 3:
	Min	-0,27	$Bx_8, Bx_{11}$	-0,28	$Bx_8, Bx_{11}$	-0,26	$Bx_8, Bx_{11}$
$V_2$ (kN)	Maks	2,86	Lt. 1:	2,90	Lt. 1 & 3:	2,89	Lt. 3:
	Min	-3,15	$Bx_8, Bx_{11}$	-3,13	$Bx_8, Bx_{11}$	-3,13	$Bx_8, Bx_{11}$
$M_3$ (kNm)	Maks	3,58	Lt. 1:	3,65	Lt. 1 & 3:	3,63	Lt. 3:
	Min	-3,19	$Bx_8, Bx_{11}$	-3,23	$Bx_8, Bx_{11}$	-3,20	$Bx_8, Bx_{11}$

Pada tabel tersebut, dapat disimpulkan bahwa trend yang berlaku pada gaya-gaya dalam elemen kolom adalah mengalami penurunan akibat kenaikan salah satu frekuensi getar mesin yaitu sebesar 39,6% untuk gaya dalam aksial, 23,1% untuk gaya dalam geser, dan 5,5% untuk gaya dalam momen. Trend yang berlaku untuk gaya-gaya dalam pada balok adalah maksimum pada balok yang menopang mesin dengan frekuensi getar lebih kecil atau lebih dekat dengan mode getar awal.

#### 4.2.4 Analisis Respon Struktur Terhadap Variasi Kekakuan Pegas

Pada penelitian ini, kekakuan pegas salah satu mesin dinaikkan. Pada varian pertama mesin dengan kekakuan pegas yang lebih besar diletakkan di lantai 3 ( $k_{M1} < k_{M3}$ ), sedangkan pada varian kedua mesin dengan kekakuan pegas yang

lebih besar diletakkan di lantai 1 ( $k_{M1} > k_{M3}$ ). Dari hasil penelitian model struktur dengan memvariasikan kekakuan pegas, didapatkan perbandingan modal pada tiap varian sebagai berikut.

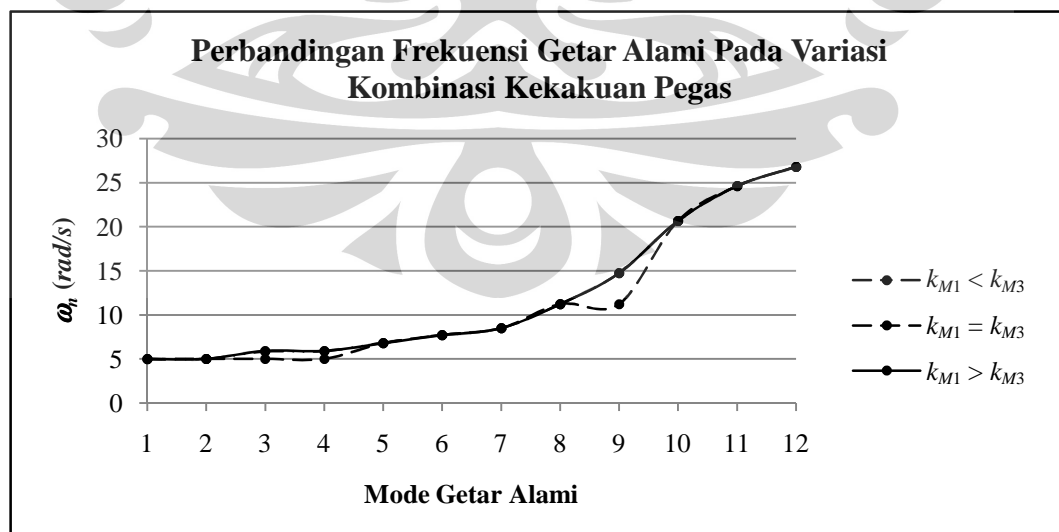
**Tabel 4.42.** Perbandingan pola getar alami mesin terhadap kombinasi kekakuan pegas

Mode	$k_{M1} < k_{M3}$		$k_{M1} = k_{M3}$		$k_{M1} > k_{M3}$	
	Arah	$\omega_n$ (rad/s)	Arah	$\omega_n$ (rad/s)	Arah	$\omega_n$ (rad/s)
1	$U_Y M_1$	5,022	$U_Y M_{1+3}$	4,995	$U_Y M_3$	4,998
2	$U_X M_1$	5,029	$U_X M_{1+3}$	5,013	$U_X M_3$	5,014
3	$U_Y M_3$	5,851	$U_Y M_{1+3}$	5,025	$U_Y M_1$	5,922
4	$U_X M_3$	5,903	$U_X M_{1+3}$	5,030	$U_X M_1$	5,936
8	$U_Z M_1$	11,237	$U_Z M_{1+3}$	11,234	$U_Z M_3$	11,234
9	$U_Z M_3$	14,750	$U_Z M_{1+3}$	11,238	$U_Z M_1$	14,757

**Tabel 4.43.** Perbandingan pola getar alami struktur terhadap kombinasi kekakuan pegas

Mode	$k_{M1} < k_{M3}$		$k_{M1} = k_{M3}$		$k_{M1} > k_{M3}$	
	Arah	$\omega_n$ (rad/s)	Arah	$\omega_n$ (rad/s)	Arah	$\omega_n$ (rad/s)
5	$U_Y$	6,837	$U_Y$	6,779	$U_Y$	6,786
6	$U_X$	7,732	$U_X$	7,709	$U_X$	7,711
7	$R_Z$	8,486	$R_Z$	8,486	$R_Z$	8,486
10	$U_Y$	20,665	$U_Y$	20,663	$U_Y$	20,666
11	$U_X$	24,605	$U_X$	24,605	$U_X$	24,606
12	$R_Z$	26,795	$R_Z$	26,795	$R_Z$	26,795

Dalam bentuk kurva dapat digambarkan sebagai berikut.



**Gambar 4.17.** Grafik perbandingan  $\omega_n$  terhadap variasi kombinasi kekakuan pegas

Kenaikan kekakuan pegas mesin yang bekerja pada salah satu lantai justru menyebabkan kenaikan pada frekuensi getar alami struktur. Kenaikan frekuensi getar alami terbesar terjadi pada mode-mode awal struktur ketika kekakuan pegas pada mesin di lantai 3 lebih besar daripada kekakuan pegas pada mesin di lantai 1 ( $k_{M1} < k_{M3}$ ) yaitu sebesar 0,85% pada mode awal struktur (mode 5). Selain itu terlihat juga terdapat perubahan arah mode getar awal pada mesin. Trend yang terjadi pada mode getar alami mesin adalah mode getar awal bekerja pada mesin yang ditopang oleh pegas yang lebih fleksibel. Kekakuan struktur dapat dihitung sebagai hasil perkalian massa total struktur terhadap kuadrat dari frekuensi getar radial pada pola getar alami yang ditinjau. Pada mode awal struktur (mode 5), dari hasil perhitungan tersebut didapatkan kekakuan struktur adalah sebesar 151.247,9  $kN/m$  atau dapat dikatakan total kekakuan pegas pada arah X hanya 0,18% dari kekakuan struktur pada mode awal.

Perbandingan *base reaction* akibat kombinasi mesin di lantai 1 dan lantai 3 ( $\omega_{M1} \neq 0$ ;  $\omega_{M3} \neq 0$ ) untuk variasi kekakuan pegas mesin adalah sebagai berikut.

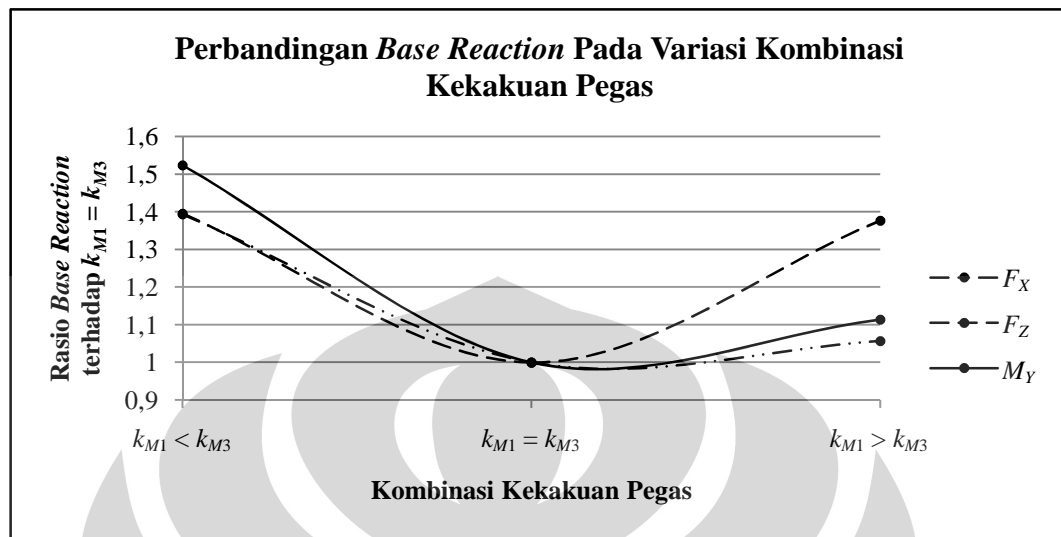
**Tabel 4.44.** Perbandingan *base reaction* terhadap kombinasi kekakuan pegas

<b>Base Reaction</b>		$k_{M1} < k_{M3}$	$k_{M1} = k_{M3}$	$k_{M1} > k_{M3}$
$F_X$ (kN)	Maks	6,100	4,620	4,881
	Min	-6,438	-4,002	-4,519
$F_Z$ (kN)	Maks	36,141	25,930	35,641
	Min	-36,180	-24,491	-35,683
$M_Y$ (kNm)	Maks	75,9019	54,631	58,988
	Min	-96,9286	-63,638	-70,889

Kenaikan kekakuan pegas mesin yang bekerja pada salah satu lantai justru menyebabkan kenaikan pada *base reaction*, dimana kenaikan terbesar terjadi ketika kekakuan pegas pada mesin di lantai 3 yang diperbesar ( $k_{M1} < k_{M3}$ ). Kenaikan yang terjadi pada  $F_X$  mencapai 39,35% atau dari sebesar 4,62  $kN$  pada konfigurasi  $k_{M1} = k_{M3}$  menjadi 6,44  $kN$  pada konfigurasi  $k_{M1} < k_{M3}$ . Sedangkan besaran kenaikan pada  $M_Y$  mencapai 52,31% atau dari sebesar 63,64  $kNm$  pada konfigurasi  $k_{M1} = k_{M3}$  menjadi 96,93  $kNm$  pada konfigurasi  $k_{M1} < k_{M3}$ . Selain itu, kenaikan juga terjadi pada  $F_Z$  dimana hal ini juga dipengaruhi oleh kondisi resonansi dengan mode getar ke-9. Besaran kenaikan  $F_Z$  adalah mencapai 39,5%



atau dari sebesar 25,93 kN pada konfigurasi  $k_{M1} = k_{M3}$  menjadi 36,98 kN pada konfigurasi  $k_{M1} < k_{M3}$ . Dalam bentuk kurva dapat dilihat sebagai berikut.



**Gambar 4.18.** Grafik perbandingan *base reaction* terhadap variasi kombinasi kekakuan pegas

Perbandingan *displacement* tiap mesin akibat kombinasi mesin di lantai 1 dan di lantai 3 ( $\omega_{M1} \neq 0$ ;  $\omega_{M3} \neq 0$ ) untuk variasi kekakuan pegas adalah:

**Tabel 4.45.** Perbandingan simpangan mesin terhadap kombinasi kekakuan pegas

Mesin	Displ (mm)	Step	$k_{M1} < k_{M3}$	$k_{M1} = k_{M3}$	$k_{M1} > k_{M3}$
$M_1$	$U_X$	Maks	4,45	4,44	5,27
		Min	-4,45	-4,45	-5,21
	$U_Z$	Maks	6,17	6,17	8,13
		Min	-6,54	-6,54	-8,14
$M_3$	$U_X$	Maks	5,19	4,45	4,47
		Min	-5,22	-4,43	-4,44
	$U_Z$	Maks	8,13	6,16	6,16
		Min	-8,14	-6,54	-6,54

Simpangan maksimum terjadi pada mesin yang ditopang oleh pegas yang lebih kaku yaitu sebesar 5,22 mm pada arah X dan 8,14 mm pada arah Z. Kenaikan yang terjadi pada arah Z juga dipengaruhi oleh kondisi resonansi dengan pola getar mesin arah Z (mode 9). Persentase kenaikan simpangan akibat perubahan kombinasi kekakuan pegas mesin adalah sebesar 17,3% untuk arah X dan 24,5% untuk arah Z.

Perbandingan gaya dalam elemen struktur akibat kombinasi mesin di lantai 1 dan di lantai 3 ( $\omega_{M1} \neq 0$ ;  $\omega_{M3} \neq 0$ ) untuk variasi kekakuan pegas dapat dilihat sebagai berikut.

**Tabel 4.46.** Perbandingan gaya dalam elemen kolom terhadap kombinasi kekakuan pegas

Gaya Dalam		$k_{M1} < k_{M3}$		$k_{M1} = k_{M3}$		$k_{M1} > k_{M3}$	
		Nilai	Posisi	Nilai	Posisi	Nilai	Posisi
$P$ ( $kN$ )	Maks	8,75	Lt. 1: $C_9, C_{10}$ ,	5,90	Lt. 1: $C_9, C_{10}$ ,	8,94	Lt. 1: $C_9, C_{10}$ ,
	Min	-8,80	$C_{15}, C_{16}$	-6,52	$C_{15}, C_{16}$	-9,01	$C_{15}, C_{16}$
$V_2$ ( $kN$ )	Maks	0,85	Lt. 3: $C_{15}, C_{16}$	0,42	Lt. 1: $C_9, C_{10}$ ,	0,91	Lt. 1: $C_9, C_{10}$ ,
	Min	-0,84	Lt. 3: $C_9, C_{10}$	-0,52	$C_{15}, C_{16}$	-0,99	Lt. 1: $C_9, C_{10}$
$M_3$ ( $kNm$ )	Maks	3,04	Lt. 3: $C_9, C_{10}$	1,46	Lt. 1 & 3: $C_{15}, C_{16}$	3,03	Lt. 1: $C_9, C_{10}$ ,
	Min	-2,98	Lt. 3: $C_{15}, C_{16}$	-1,38	Lt. 2: $C_{15}, C_{16}$	-2,86	$C_{15}, C_{16}$

**Tabel 4.47.** Perbandingan gaya dalam elemen balok terhadap kombinasi kekakuan pegas

Gaya Dalam		$k_{M1} < k_{M3}$		$k_{M1} = k_{M3}$		$k_{M1} > k_{M3}$	
		Nilai	Posisi	Nilai	Posisi	Nilai	Posisi
$P$ ( $kN$ )	Maks	0,43	Lt. 3:	0,28	Lt. 1 & 3:	0,47	Lt. 1:
	Min	-0,42	$Bx_8, Bx_{11}$	-0,28	$Bx_8, Bx_{11}$	-0,46	$Bx_8, Bx_{11}$
$V_2$ ( $kN$ )	Maks	6,67	Lt. 3:	2,90	Lt. 1 & 3:	6,69	Lt. 1:
	Min	-6,80	$Bx_8, Bx_{11}$	-3,13	$Bx_8, Bx_{11}$	-6,83	$Bx_8, Bx_{11}$
$M_3$ ( $kNm$ )	Maks	7,60	Lt. 3:	3,65	Lt. 1 & 3:	7,53	Lt. 1:
	Min	-7,58	$Bx_8, Bx_{11}$	-3,23	$Bx_8, Bx_{11}$	-7,51	$Bx_8, Bx_{11}$

Pada tabel tersebut, dapat disimpulkan bahwa kenaikan kekakuan pegas salah satu mesin akan menyebabkan kenaikan gaya dalam pada struktur, dimana kenaikan terbesar untuk gaya dalam aksial dan geser terjadi ketika kekakuan pegas mesin di lantai 3 yang diperbesar ( $k_{M1} < k_{M3}$ ). Trend yang berlaku untuk gaya dalam geser dan momen pada kolom adalah maksimum pada level lantai yang menopang mesin dengan pegas lebih kaku dengan besaran kenaikan mencapai 38,2% untuk gaya dalam aksial, 90,4% untuk gaya dalam geser, dan 108,2% untuk gaya dalam momen. Pada balok, gaya dalam maksimum berada pada level lantai yang menopang mesin yang lebih kaku, dengan besaran kenaikan mencapai 67,8% untuk gaya dalam aksial, 118,2% untuk gaya dalam geser, dan 107,7% untuk gaya dalam momen.

#### 4.2.5 Analisis Respon Struktur Terhadap Variasi Arah Getar Mesin

Pada penelitian ini, kombinasi mesin dimodelkan sebagai dua mesin identik yang dikonfigurasi pada arah  $X$  dan arah  $Y$ . Variansi dilakukan dengan mengubah konfigurasi arah mesin pada lantai 1 dan lantai 3, dimana pada varian pertama mesin dengan arah getar sejajar sumbu  $Y$  global diletakkan di lantai 3, sedangkan pada varian kedua mesin arah getar sejajar sumbu  $Y$  global diletakkan di lantai 1. Perbandingan modal pada tiap varian adalah sebagai berikut.

**Tabel 4.48.** Perbandingan pola getar alami mesin terhadap kombinasi arah getar mesin

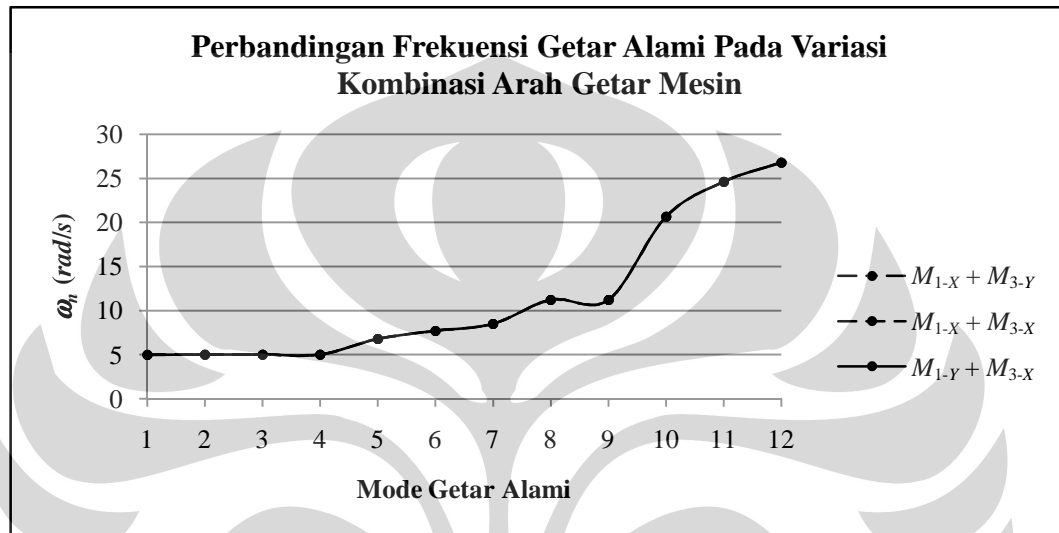
Mode	$M_{1-X} + M_{3-Y}$		$M_{1-X} + M_{3-X}$		$M_{1-Y} + M_{3-X}$	
	Arah	$\omega_n$ (rad/s)	Arah	$\omega_n$ (rad/s)	Arah	$\omega_n$ (rad/s)
1	$U_Y M_{1+3}$	5,000	$U_Y M_{1+3}$	4,995	$U_Y M_{1+3}$	4,996
2	$U_X M_{1+3}$	5,009	$U_X M_{1+3}$	5,013	$U_X M_{1+3}$	5,012
3	$U_Y M_{1+3}$	5,026	$U_Y M_{1+3}$	5,025	$U_X M_{1+3}$	5,026
4	$U_X M_{1+3}$	5,030	$U_X M_{1+3}$	5,030	$U_Y M_{1+3}$	5,029
8	$U_Z M_{1+3}$	11,232	$U_Z M_{1+3}$	11,234	$U_Z M_{1+3}$	11,233
9	$U_Z M_{1+3}$	11,238	$U_Z M_{1+3}$	11,238	$U_Z M_{1+3}$	11,237

**Tabel 4.49.** Perbandingan pola getar alami struktur terhadap kombinasi arah getar mesin

Mode	$M_{1-X} + M_{3-Y}$		$M_{1-X} + M_{3-X}$		$M_{1-Y} + M_{3-X}$	
	Arah	$\omega_n$ (rad/s)	Arah	$\omega_n$ (rad/s)	Arah	$\omega_n$ (rad/s)
5	$U_Y$	6,777	$U_Y$	6,779	$U_Y$	6,777
6	$U_X$	7,711	$U_X$	7,709	$U_X$	7,710
7	$R_Z$	8,486	$R_Z$	8,486	$R_Z$	8,486
10	$U_Y$	20,665	$U_Y$	20,663	$U_Y$	20,663
11	$U_X$	24,601	$U_X$	24,605	$U_X$	24,604
12	$R_Z$	26,793	$R_Z$	26,795	$R_Z$	26,794

Perubahan konfigurasi arah getar salah satu mesin memberikan dampak perubahan pada frekuensi getar alami struktur. Pada pola getar awal global struktur arah  $U_Y$  (mode 5), frekuensi getar alami mengalami penurunan ketika salah satu mesin bekerja pada arah  $Y$  dengan persentase mencapai 0,03%. Sebaliknya pada pola getar awal global struktur arah  $U_X$  (mode 6), frekuensi getar alami mengalami kenaikan ketika salah satu mesin bekerja pada arah  $Y$ , dimana kenaikan terbesar terjadi ketika mesin di lantai 3 bekerja pada arah  $Y$  sebesar 0,03%. Perilaku ini berkebalikan dengan yang terjadi pada pola getar awal mesin. Pada pola getar awal mesin arah  $U_Y$  (mode 1), frekuensi getar alami mengalami

kenaikan ketika salah satu mesin bekerja pada arah  $Y$ , dimana kenaikan terbesar terjadi ketika mesin di lantai 3 bekerja pada arah  $Y$  dengan persentase kenaikan mencapai 0,1%. Sebaliknya pada pola getar awal mesin arah  $U_X$  (mode 2), frekuensi getar alami mengalami penurunan ketika salah satu mesin bekerja pada arah  $Y$ , dimana penurunan terbesar terjadi ketika mesin di lantai 3 bekerja pada arah  $Y$  sebesar 0,08%. Dalam bentuk kurva dapat digambarkan sebagai berikut.



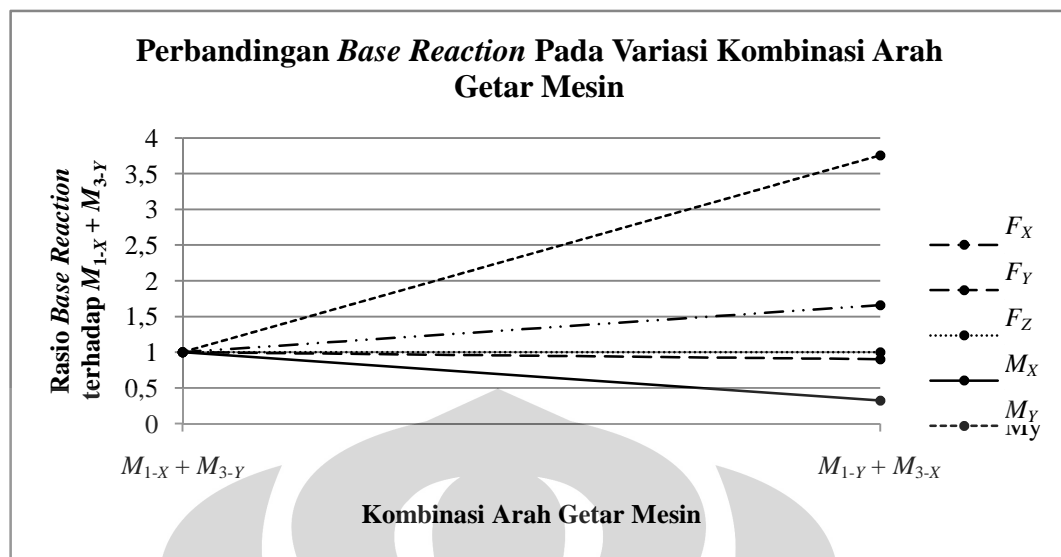
**Gambar 4.19.** Grafik perbandingan  $\omega_n$  terhadap variasi kombinasi arah getar mesin

Perbandingan *base reaction* akibat kombinasi mesin di lantai 1 dan di lantai 3 ( $\omega_{M1} \neq 0$ ;  $\omega_{M3} \neq 0$ ) untuk variasi massa mesin adalah sebagai berikut.

**Tabel 4.50.** Perbandingan *base reaction* terhadap kombinasi arah getar mesin

<b>Base Reaction</b>		$M_{1-X} + M_{3-Y}$	$M_{1-Y} + M_{3-X}$
$F_X$ (kN)	Maks	2,132	2,810
	Min	-1,787	-3,535
$F_Y$ (kN)	Maks	2,463	2,261
	Min	-2,505	-1,929
$F_Z$ (kN)	Maks	25,894	25,921
	Min	-24,450	-24,481
$M_X$ (kNm)	Maks	35,851	11,570
	Min	-33,278	-10,349
$M_Y$ (kNm)	Maks	13,470	41,709
	Min	-13,005	-50,618

Atau dapat juga digambarkan dalam bentuk kurva sebagai berikut.



**Gambar 4.20.** Grafik perbandingan *base reaction* terhadap variasi kombinasi arah getar mesin

Ketika mesin di lantai 3 bekerja pada arah  $X$ , terjadi kenaikan *base reaction*  $F_X$ ,  $F_Z$ , dan  $M_Y$ , tetapi juga terjadi penurunan pada  $F_Y$  dan  $M_X$ . Penurunan terbesar terjadi pada  $M_X$ , yaitu mencapai 67,73% atau dari 35,85  $kNm$  pada konfigurasi  $M_{1-X} + M_{3-Y}$  menjadi 11,57  $kNm$  pada konfigurasi  $M_{1-Y} + M_{3-X}$ , dan kenaikan terbesar terjadi pada  $M_Y$  sebesar 275,77% atau dari 13,47  $kNm$  pada konfigurasi  $M_{1-X} + M_{3-Y}$  menjadi 50,62  $kNm$  pada konfigurasi  $M_{1-Y} + M_{3-X}$ .

Perbandingan simpangan tiap mesin akibat kombinasi mesin di lantai 1 dan lantai 3 ( $\omega_{M1} \neq 0$ ;  $\omega_{M3} \neq 0$ ) pada variasi arah getar mesin sebagai berikut.

**Tabel 4.51.** Perbandingan simpangan mesin terhadap kombinasi arah getar mesin

Mesin	Displ	Step	$M_{1-X} + M_{3-Y}$	$M_{1-Y} + M_{3-X}$
$M_1$	$U_X$ (mm)	Maks	4,44	0,02
		Min	-4,46	-0,02
	$U_Y$ (mm)	Maks	0,02	3,95
		Min	-0,02	-4,09
	$U_Z$ (mm)	Maks	6,16	6,16
		Min	-6,54	-6,54
$M_3$	$U_X$ (mm)	Maks	0,02	4,45
		Min	-0,02	-4,44
	$U_Y$ (mm)	Maks	3,96	0,02
		Min	-4,12	-0,02
	$U_Z$ (mm)	Maks	6,16	6,16
		Min	-6,54	-6,54

Dari tabel tersebut terlihat bahwa pengaruh getaran mesin satu sama lain adalah kecil, sehingga simpangan maksimum terjadi pada arah yang bersesuaian dengan arah getar mesin. Simpangan maksimum yang terjadi adalah sebesar 4,45 mm pada arah X, 4,12 mm pada arah Y, dan 6,54 mm pada arah Z.

Perbandingan gaya dalam elemen struktur akibat kombinasi mesin di lantai 1 dan lantai 3 ( $\omega_{M1} \neq 0$ ;  $\omega_{M3} \neq 0$ ) untuk variasi arah getar mesin adalah

**Tabel 4.52.** Perbandingan gaya dalam elemen kolom terhadap kombinasi arah getar mesin

Gaya Dalam		$M_{1-X} + M_{3-Y}$		$M_{1-Y} + M_{3-X}$	
		Nilai	Posisi	Nilai	Posisi
$P$ (kN)	Maks	5,95	Lt. 1: C <sub>9</sub> , C <sub>10</sub> , C <sub>15</sub> , C <sub>16</sub>	5,93	Lt. 1: C <sub>9</sub> , C <sub>10</sub> , C <sub>15</sub> , C <sub>16</sub>
	Min	-6,53		-6,54	
$V_2$ (kN)	Maks	0,35	Lt. 1: C <sub>9</sub> , C <sub>10</sub>	0,34	Lt. 4: C <sub>15</sub> , C <sub>16</sub>
	Min	-0,40		-0,41	Lt. 3: C <sub>15</sub> , C <sub>16</sub>
$V_3$ (kN)	Maks	0,29	Lt. 4: C <sub>10</sub> , C <sub>16</sub>	0,27	Lt. 2: C <sub>10</sub> , C <sub>16</sub>
	Min	-0,29	Lt. 3: C <sub>10</sub> , C <sub>16</sub>	-0,32	Lt. 1: C <sub>9</sub> , C <sub>15</sub>
$M_2$ (kNm)	Maks	0,99	Lt. 4: C <sub>10</sub> , C <sub>16</sub>	1,04	Lt. 2: C <sub>10</sub> , C <sub>16</sub>
	Min	-0,96	Lt. 3: C <sub>10</sub> , C <sub>16</sub>	-0,86	Lt. 1: C <sub>9</sub> , C <sub>15</sub>
$M_3$ (kNm)	Maks	1,32	Lt. 1: C <sub>9</sub> , C <sub>10</sub>	1,39	Lt. 3: C <sub>15</sub> , C <sub>16</sub>
	Min	-1,10	Lt. 2: C <sub>15</sub> , C <sub>16</sub>	-1,16	

**Tabel 4.53.** Perbandingan gaya dalam elemen balok terhadap kombinasi arah getar mesin

Gaya Dalam		$M_{1-X} + M_{3-Y}$		$M_{1-Y} + M_{3-X}$	
		Nilai	Posisi	Nilai	Posisi
$P$ (kN)	Maks	0,27	Lt. 1: B <sub>x8</sub> , B <sub>x11</sub>	0,26	Lt. 3: B <sub>x8</sub> , B <sub>x11</sub>
	Min	-0,26		-0,26	
$V_2$ (kN)	Maks	2,91	Lt. 3: B <sub>y8</sub> , B <sub>y13</sub>	2,89	Lt. 1: B <sub>y8</sub> , B <sub>y13</sub>
	Min	-3,16	Lt. 1: B <sub>x8</sub> , B <sub>x11</sub>	-3,13	Lt. 3: B <sub>x8</sub> , B <sub>x11</sub>
$M_3$ (kNm)	Maks	3,79	Lt. 1: B <sub>x8</sub> , B <sub>x11</sub>	3,73	Lt. 1: B <sub>y8</sub> , B <sub>y13</sub>
	Min	-3,38	Lt. 3: B <sub>y8</sub> , B <sub>y13</sub>	-3,36	Lt. 3: B <sub>x8</sub> , B <sub>x11</sub>

Pada kolom, letak gaya dalam momen terbesar cenderung berada pada level mesin yang bekerja dalam arah X dimana momen inersia kolom lebih besar dalam arah X global. Pada gaya dalam elemen balok, letak gaya dalam aksial terbesar berada pada level mesin yang bekerja dalam arah X global. Besaran gaya dalam cenderung tidak terlalu banyak berubah.

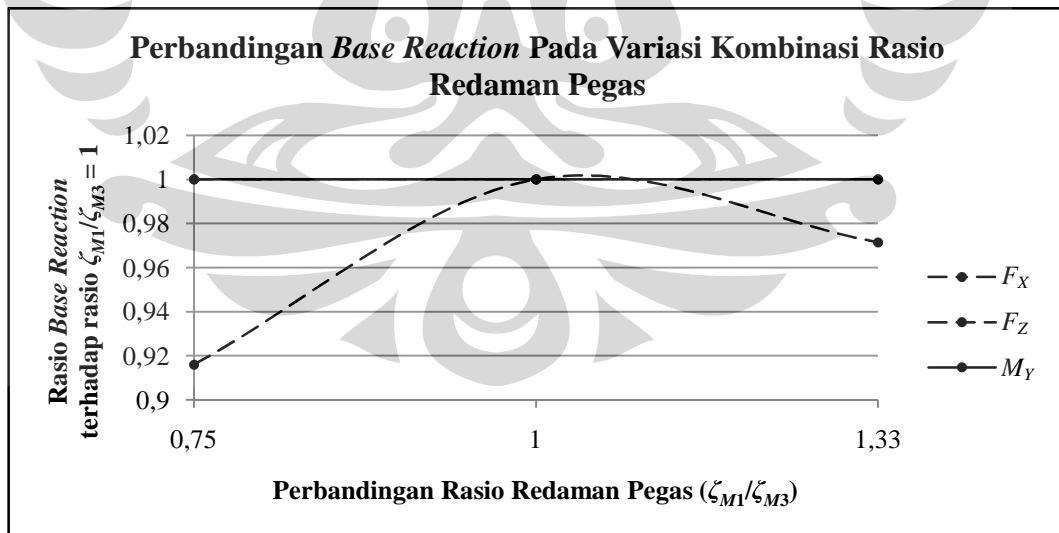
#### 4.2.6 Analisis Respon Struktur Terhadap Variasi Rasio Redaman Pegas

Pada penelitian ini, variasi dua rasio redaman digunakan sebagai bahan perbandingan, yaitu 15% dan 20%. Variansi dilakukan dengan menaikkan rasio redaman pegas pada salah satu mesin. Pada varian pertama mesin dengan rasio redaman pegas yang lebih besar diletakkan di lantai 3, sedangkan pada varian kedua mesin dengan rasio redaman pegas yang lebih besar diletakkan di lantai 1. Perbandingan *base reaction* akibat kombinasi mesin di lantai 1 dan di lantai 3 ( $\omega_{M1} \neq 0$ ;  $\omega_{M3} \neq 0$ ) untuk variasi rasio redaman pegas pada mesin dapat dilihat sebagai berikut.

**Tabel 4.54.** Perbandingan *base reaction* terhadap kombinasi rasio redaman pegas

<i>Base Reaction</i>		$\zeta_{M1} < \zeta_{M3}$	$\zeta_{M1} = \zeta_{M3}$	$\zeta_{M1} > \zeta_{M3}$
$F_X$ (kN)	Maks	4,620	4,620	4,620
	Min	-4,002	-4,002	-4,002
$F_Z$ (kN)	Maks	23,752	25,930	25,190
	Min	-22,039	-24,491	-23,605
$M_Y$ (kNm)	Maks	54,631	54,631	54,631
	Min	-63,638	-63,638	-63,638

Atau dapat juga digambarkan dalam bentuk kurva sebagai berikut.



**Gambar 4.21.** Grafik perbandingan *base reaction* terhadap variasi kombinasi rasio redaman pegas

Dari grafik tersebut terlihat bahwa kenaikan rasio redaman pegas mesin yang bekerja pada salah satu lantai justru menyebabkan penurunan pada *base reaction*, dimana penurunan terbesar terjadi ketika rasio redaman pegas pada mesin di lantai 3 yang diperbesar ( $\zeta_{M1} < \zeta_{M3}$ ). Penurunan hanya terjadi pada  $F_Z$  mencapai 8,40% atau dari sebesar 25,93 *kN* pada konfigurasi  $\zeta_{M1} = \zeta_{M3}$  menjadi 23,75 *kN* pada konfigurasi  $\zeta_{M1} < \zeta_{M3}$ . Penurunan hanya pada  $F_Z$  ini disebabkan frekuensi getar mesin berdekatan dengan frekuensi getar alami mesin pada arah  $U_Z$ , dimana redaman diketahui hanya efektif bekerja pada kondisi resonansi.

Sedangkan perbandingan *displacement* pada tiap mesin akibat kombinasi mesin di lantai 1 dan di lantai 3 ( $\omega_{M1} \neq 0$ ;  $\omega_{M3} \neq 0$ ) untuk variasi rasio redaman pegas dapat dilihat sebagai berikut.

**Tabel 4.55.** Perbandingan simpangan mesin terhadap kombinasi rasio redaman pegas

Mesin	Displ	Step	$\zeta_{M1} < \zeta_{M3}$	$\zeta_{M1} = \zeta_{M3}$	$\zeta_{M1} > \zeta_{M3}$
$M_1$	$U_X$ (mm)	Maks	4,44	4,44	4,44
		Min	-4,45	-4,45	-4,45
	$U_Z$ (mm)	Maks	5,74	6,17	5,75
		Min	-6,17	-6,54	-6,17
$M_3$	$U_X$ (mm)	Maks	4,45	4,45	4,45
		Min	-4,43	-4,43	-4,43
	$U_Z$ (mm)	Maks	5,35	6,16	6,15
		Min	-5,81	-6,54	-6,53

Terlihat bahwa simpangan hanya bekerja pada arah  $U_Z$  dimana frekuensi dari mode getar alami yang bersesuaian  $U_Z$  berdekatan dengan frekuensi getar mesin. Simpangan maksimum terjadi pada mesin yang ditopang oleh pegas dengan rasio redaman yang lebih kecil yaitu sebesar 6,54 *mm*. Kenaikan rasio redaman mesin sebesar 5% mengakibatkan penurunan  $U_Z$  sebesar 11,2% pada mesin tersebut, atau dari 6,54 *mm* pada konfigurasi  $\zeta_M = 15\%$  menjadi 5,81 *mm* pada konfigurasi  $\zeta_M = 20\%$ .

Perbandingan gaya dalam elemen struktur akibat kombinasi mesin di lantai 1 dan di lantai 3 ( $\omega_{M1} \neq 0$ ;  $\omega_{M3} \neq 0$ ) untuk variasi rasio redaman pegas dapat dilihat sebagai berikut.



**Tabel 4.56.** Perbandingan gaya dalam elemen kolom terhadap kombinasi rasio redaman pegas

Gaya Dalam		$\zeta_{M1} < \zeta_{M3}$		$\zeta_{M1} = \zeta_{M3}$		$\zeta_{M1} > \zeta_{M3}$	
		Nilai	Posisi	Nilai	Posisi	Nilai	Posisi
$P$ ( $kN$ )	Maks	5,29	Lt. 1: $C_9, C_{10}$ ,	5,90	Lt. 1: $C_9, C_{10}$ ,	5,68	Lt. 1: $C_9, C_{10}$ ,
	Min	-6,00	$C_{15}, C_{16}$	-6,52	$C_{15}, C_{16}$	-6,33	$C_{15}, C_{16}$
$V_2$ ( $kN$ )	Maks	0,42	Lt. 1: $C_{15}, C_{16}$	0,42	Lt. 1: $C_9, C_{10}$ ,	0,42	Lt. 1: $C_{15}, C_{16}$
	Min	-0,49		-0,52		$C_{15}, C_{16}$	
$M_3$ ( $kNm$ )	Maks	1,38	Lt. 1: $C_{15}, C_{16}$	1,46	Lt. 1 & 3: $C_{15}, C_{16}$	1,40	Lt. 3: $C_{15}, C_{16}$
	Min	-1,31	Lt. 2: $C_{15}, C_{16}$	-1,38	Lt. 2: $C_{15}, C_{16}$	-1,31	Lt. 2: $C_{15}, C_{16}$

**Tabel 4.57.** Perbandingan gaya dalam elemen balok terhadap kombinasi rasio redaman pegas

Gaya Dalam		$\zeta_{M1} < \zeta_{M3}$		$\zeta_{M1} = \zeta_{M3}$		$\zeta_{M1} > \zeta_{M3}$	
		Nilai	Posisi	Nilai	Posisi	Nilai	Posisi
$P$ ( $kN$ )	Maks	0,28	Lt. 1:	0,28	Lt. 1 & 3:	0,28	Lt. 1:
	Min	-0,28	$Bx_8, Bx_{11}$	-0,28	$Bx_8, Bx_{11}$	-0,28	$Bx_8, Bx_{11}$
$V_2$ ( $kN$ )	Maks	2,71	Lt. 1:	2,90	Lt. 1 & 3:	2,90	Lt. 3:
	Min	-2,96	$Bx_8, Bx_{11}$	-3,13	$Bx_8, Bx_{11}$	-3,11	$Bx_8, Bx_{11}$
$M_3$ ( $kNm$ )	Maks	3,42	Lt. 1:	3,65	Lt. 1 & 3:	3,65	Lt. 3:
	Min	-3,02	$Bx_8, Bx_{11}$	-3,23	$Bx_8, Bx_{11}$	-3,21	$Bx_8, Bx_{11}$

Pada tabel tersebut, dapat disimpulkan bahwa kenaikan rasio redaman salah satu mesin terjadi penurunan gaya dalam aksial kolom serta gaya dalam geser dan momen balok, dimana penurunan terbesar terjadi ketika mesin pada lantai 3 memiliki rasio redaman yang lebih besar. Penurunan gaya dalam aksial kolom mencapai 7,98% dari 6,52  $kN$  pada konfigurasi  $\zeta_{M1} = \zeta_{M3}$  menjadi 6  $kN$  pada konfigurasi  $\zeta_{M1} < \zeta_{M3}$ . Trend yang berlaku untuk gaya dalam geser dan momen pada balok adalah maksimum pada balok yang menopang mesin dengan rasio redaman pegas lebih besar. Besaran penurunan gaya dalam geser dan momen maksimum pada balok adalah 5,4% dan 6,3%.

## BAB 5 KESIMPULAN

### 5.1 KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat disusun setelah melalui keseluruhan rangkaian penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Pada variasi frekuensi getar pada kondisi resonansi, dapat disimpulkan bahwa:
  - Respon terbesar akan dihasilkan ketika mesin bekerja dengan frekuensi dan arah getar yang bersesuaian dengan pola getar alami struktur.
  - Frekuensi kerja mesin yang bersesuaian dengan pola getar alami global struktur akan menghasilkan respon global maksimum, sedangkan frekuensi kerja mesin yang bersesuaian dengan pola getar alami lokal struktur akan menghasilkan respon lokal maksimum.
2. Pada variasi variabel isolator, dapat disimpulkan bahwa:
  - Variabel redaman pegas hanya efektif bekerja pada respon struktur yang searah dengan pola getar yang berdekatan dengan frekuensi getar mesin. Redaman berbanding terbalik dengan respon struktur.
  - Kenaikan kekakuan pegas menghasilkan kenaikan frekuensi getar alami struktur. Pengaruh kekakuan pegas ditentukan oleh rasio frekuensi getar mesin terhadap frekuensi getar struktur ( $\omega_M/\omega_n$ ) dimana pada permodelan yang ditinjau  $\omega_M/\omega_n > 1$  sehingga kenaikan kekakuan menyebabkan kenaikan respon struktur.
3. Pada variasi massa mesin, dapat disimpulkan bahwa kenaikan massa mesin menghasilkan penurunan frekuensi getar alami struktur, yang tentunya akan mempengaruhi respon struktur. Pengaruh massa mesin ditentukan oleh rasio frekuensi getar mesin terhadap frekuensi getar struktur ( $\omega_M/\omega_n$ ) dimana pada permodelan yang ditinjau  $\omega_M/\omega_n > 1$  sehingga kenaikan massa mesin menyebabkan penurunan respon struktur.
4. Pada variasi kombinasi posisi mesin, kenaikan ketinggian mesin seharusnya akan menyebabkan penurunan frekuensi getar alami struktur pada mode awal. Tetapi pada permodelan yang ditinjau, kenaikan ketinggian mesin justru menyebabkan kenaikan frekuensi getar alami struktur pada mode awal karena

mesin berperilaku sebagai *mass-damper*. Oleh karena itu respon struktur menjadi kecil jika mesin diletakkan pada level lantai yang rendah.

5. Pada variasi kombinasi massa mesin, dapat disimpulkan bahwa untuk struktur dengan rasio  $\omega_M/\omega_n > 1$  maka massa akan berbanding terbalik terhadap respon struktur. Oleh karena itu respon struktur menjadi lebih kecil jika mesin dengan massa yang lebih besar diletakkan di level lantai yang lebih tinggi.
6. Pada variasi kombinasi frekuensi getar mesin, dapat disimpulkan bahwa jika kombinasi mesin memiliki dua frekuensi kerja yang berbeda, dimana salah satu mesin bekerja dengan frekuensi kerja mendekati frekuensi alami struktur ( $\omega_M/\omega_n \approx 1$ ), respon struktur lebih kecil jika mesin dengan rasio  $\omega_M/\omega_n \approx 1$  diletakkan di level lantai yang lebih rendah.
7. Pada variasi kombinasi kekakuan pegas mesin, dapat disimpulkan bahwa untuk struktur dengan rasio  $\omega_M/\omega_n > 1$ , kekakuan pegas berbanding lurus terhadap respon struktur. Oleh karena itu respon struktur menjadi lebih kecil jika mesin dengan kekakuan pegas yang lebih besar diletakkan di level lantai bawah.
8. Pada variasi kombinasi arah getar mesin, dapat disimpulkan bahwa mesin yang dominan menentukan *base reaction* adalah mesin pada level lantai atas karena efek momen guling yang lebih besar, sedangkan mesin yang dominan menentukan gaya dalam elemen adalah mesin dengan arah getar yang bersesuaian dengan momen inersia terbesar kolom.
9. Pada variasi kombinasi redaman pegas mesin, dapat disimpulkan bahwa redaman yang lebih besar bekerja lebih efektif ketika diaplikasikan pada mesin di level lantai atas dimana *velocity* struktur lebih besar.

## 5.2 SARAN

- Pada proses pengaktifan mesin, frekuensi getar mesin akan naik secara perlahan dari keadaan diam hingga mencapai frekuensi getar operasional, oleh karena itu penambahan  $\omega_M$  pada saat mendekati  $\omega_n$  perlu dipercepat.
- Pada pengaturan konfigurasi mesin, rasio  $\omega_M/\omega_n$  perlu diperhatikan sebagai salah satu acuan untuk menentukan konfigurasi mesin yang efektif.
- Dapat dilakukan studi lanjutan untuk penyederhanaan analisis terhadap pembebanan multi-eksitasi.

## DAFTAR REFERENSI

- Chopra, A. K. (1997). *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering* (International ed.). Singapore: Prentice Hall International, Inc.
- De Silva, C. W. (2005). Vibration Design and Control. Dalam C. W. De Silva (Editor), *Vibration and Shock Handbook*. Boca Raton: Taylor & Francis.
- De Silva, C. W. (2000). *Vibration: Fundamentals and Practice*. Boca Raton: CRC Press.
- Direktorat Penyelidikan Masalah Bangunan. (1983). *Peraturan Pembebanan Indonesia Untuk Gedung*. Bandung: Yayasan Lembaga Penyelidikan Masalah Bangunan.
- Esat, I., & Dabestani, M. (2005). Computer Analysis of Flexibly Supported Multibody Systems. Dalam C. W. de Silva (Editor), *Vibration and Shock Handbook*. Boca Raton: Taylor & Francis.
- Katili, I. (2008). *Metode Elemen Hingga untuk Skeletal*. Jakarta: PT RajaGrafindo Persada.
- Lalanne, C. (2005). Mechanical Shock. Dalam C. W. De Silva (Editor), *Vibration and Shock Handbook*. Boca Raton: Taylor & Francis.
- S., K., J., R., & Nalavade, A. K. (2002, December 16-18). Standardization of Absolute Vibration Level and Damage Factors for Machinery Health Monitoring. *VETOMAC-2*.
- Srinivasulu, P., & Vaidyanathan, C. V. (1982). *Handbook of Machine Foundations*. New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Ltd.

## Lampiran 1. Output Model Dalam Kondisi Resonansi

## Arah Kerja X

## Mode Getar Alami

Mode	$T_n$ (s)	$\omega_n$ (rad/s)	Rasio Partisipasi Massa (%)					
			$U_X$	$U_Y$	$U_Z$	$R_X$	$R_Y$	$R_Z$
1	0,948	6,628	0	85,60	0	66,65	0	0
2	0,832	7,555	83,46	0	0	0	83,76	0
3	0,741	8,475	0	0	0	0	0	83,99
4	0,309	20,365	0	9,92	0	0,31	0	0
5	0,259	24,220	10,88	0	0	0	0,16	0
6	0,235	26,775	0	0	0	0	0	10,77
7	0,183	34,400	0	3,39	0	0,20	0	0
8	0,144	43,698	4,17	0	0	0	0,28	0
9	0,138	45,584	0	0,92	0	0	0	0
10	0,133	47,123	0	0	0	0	0	3,99
11	0,112	56,338	0	0	3,44	0	0	0
12	0,103	61,242	1,30	0	0	0	0,01	0
13	0,101	62,495	0	0	49,39	0	0	0
14	0,100	62,809	0	0	0	16,61	0	0
15	0,099	63,245	0	0	15,85	0	0	0

## Base Reaction

Kasus	Step	$F_X$ (kN)	$F_Z$ (kN)	$M_Y$ (kNm)
$\omega_M = \omega_{n1}$	Maks	56,254	6,928	812,073
	Min	-57,051	-6,960	-823,529
$\omega_M = \omega_{n2}$	Maks	109,360	6,996	1561,666
	Min	-109,356	-7,189	-1561,640
$\omega_M = \omega_{n3}$	Maks	51,665	6,965	729,140
	Min	-51,205	-7,434	-723,182
$\omega_M = \omega_{n11}$	Maks	10,439	38,595	48,977
	Min	-10,271	-37,049	-45,250

## Simpangan Mesin

Kasus	Step	$U_X$ (mm) $\times 10^{-1}$	$U_Z$ (mm) $\times 10^{-3}$	$R_Y$ (rad) $\times 10^{-6}$
$\omega_M = \omega_{n1}$	Maks	5,18	1,23	6,15
	Min	-5,10	-1,22	-6,22
$\omega_M = \omega_{n2}$	Maks	9,71	1,26	12,00
	Min	-9,71	-1,23	-12,00
$\omega_M = \omega_{n3}$	Maks	4,44	1,30	5,85
	Min	-4,48	-1,22	-5,79
$\omega_M = \omega_{n11}$	Maks	0,09	6,17	0,31
	Min	-0,09	-6,32	-0,30

(lanjutan)

**Arah Kerja Y****Mode Getar Alami**

Mode	$T_n$ (s)	$\omega_n$ (rad/s)	Rasio Partisipasi Massa (%)					
			$U_X$	$U_Y$	$U_Z$	$R_X$	$R_Y$	$R_Z$
1	0,948	6,627	0	85,59	0	66,66	0	0
2	0,831	7,558	83,48	0	0	0	83,74	0
3	0,741	8,474	0	0	0	0	0	83,99
4	0,309	20,350	0	9,92	0	0,31	0	0
5	0,259	24,245	10,87	0	0	0	0,16	0
6	0,235	26,771	0	0	0	0	0	10,77
7	0,183	34,387	0	3,40	0	0,20	0	0
8	0,144	43,714	4,16	0	0	0	0,29	0
9	0,138	45,592	0	0,92	0	0	0	0
10	0,133	47,122	0	0	0	0	0	3,99
11	0,112	56,338	0	0	3,44	0	0	0
12	0,103	61,226	1,31	0	0	0	0,01	0
13	0,101	62,285	0	0	45,02	0	0	0
14	0,100	62,724	0	0	0	16,04	0	0
15	0,099	63,283	0	0	19,07	0	0	0

**Base Reaction**

Kasus	Step	$F_Y$ (kN)	$F_Z$ (kN)	$M_X$ (kNm)
$\omega_M = \omega_{n1}$	Maks	110,949	5,681	1561,391
	Min	-110,955	-5,701	-1561,266
$\omega_M = \omega_{n2}$	Maks	47,215	5,730	658,808
	Min	-47,897	-5,893	-648,570
$\omega_M = \omega_{n3}$	Maks	27,782	5,700	365,993
	Min	-27,323	-6,091	-376,228
$\omega_M = \omega_{n11}$	Maks	2,316	31,135	50,538
	Min	-2,554	-29,890	-54,544

**Simpangan Mesin**

Kasus	Step	$U_Y$ (mm) $\times 10^{-1}$	$U_Z$ (mm) $\times 10^{-4}$	$R_X$ (rad) $\times 10^{-6}$
$\omega_M = \omega_{n1}$	Maks	12,70	6,39	10,00
	Min	-12,70	-6,40	-10,00
$\omega_M = \omega_{n2}$	Maks	5,30	6,63	4,54
	Min	-5,21	-6,44	-4,48
$\omega_M = \omega_{n3}$	Maks	2,90	6,84	2,61
	Min	-3,00	-6,41	-2,66
$\omega_M = \omega_{n11}$	Maks	0,11	32,70	0,16
	Min	-0,10	-33,30	-0,17

## Lampiran 2. Output Model Dengan Variasi Rasio Redaman Pegas

**Konfigurasi  $\zeta_M = 5\%$** **Base Reaction**

Step	$F_X$ (kN)	$F_Z$ (kN)	$M_Y$ (kNm)
Maks	12,338	45,579	175,028
Min	-13,558	-45,617	-191,936

**Simpangan Mesin**

Step	$U_X$ (mm)	$U_Z$ (mm)
Maks	10,01	23,08
Min	-14,32	-23,06

**Konfigurasi  $\zeta_M = 15\%$** **Base Reaction**

Step	$F_X$ (kN)	$F_Z$ (kN)	$M_Y$ (kNm)
Maks	12,338	26,060	175,028
Min	-13,558	-26,060	-191,936

**Simpangan Mesin**

Step	$U_X$ (mm)	$U_Z$ (mm)
Maks	10,01	13,19
Min	-14,32	-13,18

**Konfigurasi  $\zeta_M = 25\%$** **Base Reaction**

Step	$F_X$ (kN)	$F_Z$ (kN)	$M_Y$ (kNm)
Maks	12,338	17,964	175,028
Min	-13,558	-17,964	-191,936

**Simpangan Mesin**

Step	$U_X$ (mm)	$U_Z$ (mm)
Maks	10,01	9,09
Min	-14,32	-9,09

## Lampiran 3. Output Model Dengan Variasi Kekakuan Pegas

**Konfigurasi  $k_M = k_1$** **Mode Getar Alami**

Mode	$T_n$ (s)	$\omega_n$ (rad/s)	Rasio Partisipasi Massa (%)					
			$U_X$	$U_Y$	$U_Z$	$R_X$	$R_Y$	$R_Z$
1	1,569	4,004	0	1,59	0	1,46	0	0
2	1,567	4,010	1,20	0	0	0	1,42	0
3	0,942	6,671	0	84,14	0	65,29	0	0
4	0,827	7,598	82,39	0	0	0	82,49	0
5	0,741	8,474	0	0	0	0	0	84,00
6	0,704	8,921	0	0	0,61	0	0	0
7	0,309	20,341	0	9,95	0	0,31	0	0
8	0,260	24,211	10,93	0	0	0	0,15	0
9	0,235	26,770	0	0	0	0	0	10,77
10	0,182	34,515	0	3,43	0	0,20	0	0
11	0,143	43,890	4,19	0	0	0	0,29	0
12	0,137	45,742	0	0,88	0	0	0	0
13	0,133	47,121	0	0	0	0	0	3,99
14	0,116	53,989	0	0	0	0,39	0	0
15	0,111	56,352	0	0	3,21	0	0	0

**Base Reaction**

Step	$F_X$ (kN)	$F_Z$ (kN)	$M_Y$ (kNm)
Maks	7,354	16,212	105,010
Min	-5,397	-16,173	-74,516

**Simpangan Mesin**

Step	$U_X$ (mm)	$U_Z$ (mm)
Maks	12,04	13,02
Min	-11,88	-13,04



(lanjutan)

**Konfigurasi  $k_M = k_2$** **Mode Getar Alami**

Mode	$T_n$ (s)	$\omega_n$ (rad/s)	Rasio Partisipasi Massa (%)					
			$U_X$	$U_Y$	$U_Z$	$R_X$	$R_Y$	$R_Z$
1	1,257	4,997	0	3,55	0	3,09	0	0
2	1,253	5,014	2,01	0	0	0	2,29	0
3	0,939	6,693	0	82,19	0	63,66	0	0
4	0,826	7,611	81,57	0	0	0	81,61	0
5	0,741	8,474	0	0	0	0	0	84,00
6	0,559	11,234	0	0	0,62	0	0	0
7	0,309	20,342	0	9,94	0	0,31	0	0
8	0,260	24,211	10,93	0	0	0	0,15	0
9	0,235	26,770	0	0	0	0	0	10,77
10	0,182	34,516	0	3,43	0	0,20	0	0
11	0,143	43,891	4,19	0	0	0	0,29	0
12	0,137	45,743	0	0,88	0	0	0	0
13	0,133	47,121	0	0	0	0	0	3,99
14	0,115	54,630	0	0	0	0,45	0	0
15	0,111	56,352	0	0	3,21	0	0	0

**Base Reaction**

Step	$F_X$ (kN)	$F_Z$ (kN)	$M_Y$ (kNm)
Maks	12,338	26,060	175,028
Min	-13,558	-26,060	-191,936

**Simpangan Mesin**

Step	$U_X$ (mm)	$U_Z$ (mm)
Maks	10,01	13,19
Min	-14,32	-13,18

(lanjutan)

**Konfigurasi  $k_M = k_3$** **Mode Getar Alami**

Mode	$T_n$ (s)	$\omega_n$ (rad/s)	Rasio Partisipasi Massa (%)					
			$U_X$	$U_Y$	$U_Z$	$R_X$	$R_Y$	$R_Z$
1	1,075	5,843	0	12,48	0	10,30	0	0
2	1,065	5,901	4,16	0	0	0	4,56	0
3	0,930	6,757	0	73,25	0	56,45	0	0
4	0,823	7,636	79,42	0	0	0	79,35	0
5	0,741	8,474	0	0	0	0	0	84,00
6	0,426	14,750	0	0	0,64	0	0	0
7	0,309	20,343	0	9,94	0	0,31	0	0
8	0,260	24,211	10,93	0	0	0	0,15	0
9	0,235	26,770	0	0	0	0	0	10,77
10	0,182	34,518	0	3,43	0	0,20	0	0
11	0,143	43,892	4,19	0	0	0	0,29	0
12	0,137	45,745	0	0,88	0	0	0	0
13	0,133	47,121	0	0	0	0	0	3,99
14	0,113	55,803	0	0	0	0,61	0	0
15	0,111	56,353	0	0	3,20	0	0	0

**Base Reaction**

Step	$F_X$ (kN)	$F_Z$ (kN)	$M_Y$ (kNm)
Maks	20,213	20,352	286,408
Min	-23,742	-20,731	-335,292

**Simpangan Mesin**

Step	$U_X$ (mm)	$U_Z$ (mm)
Maks	13,26	6,05
Min	-15,43	-5,93

## Lampiran 4. Output Model Dengan Variasi Massa Mesin

**Konfigurasi  $m_M = 12 \text{ ton}$** **Mode Getar Alami**

Mode	$T_n$ (s)	$\omega_n$ (rad/s)	Rasio Partisipasi Massa (%)					
			$U_X$	$U_Y$	$U_Z$	$R_X$	$R_Y$	$R_Z$
1	1,128	5,572	0	6,12	0	5,14	0	0
2	1,122	5,601	2,51	0	0	0	2,79	0
3	0,936	6,711	0	79,60	0	61,57	0	0
4	0,825	7,617	81,05	0	0	0	81,09	0
5	0,741	8,474	0	0	0	0	0	84,00
6	0,500	12,560	0	0	0,50	0	0	0
7	0,309	20,342	0	9,96	0	0,31	0	0
8	0,260	24,211	10,94	0	0	0	0,15	0
9	0,235	26,770	0	0	0	0	0	10,77
10	0,182	34,517	0	3,43	0	0,20	0	0
11	0,143	43,891	4,20	0	0	0	0,29	0
12	0,137	45,744	0	0,88	0	0	0	0
13	0,133	47,123	0	0	0	0	0	3,99
14	0,111	56,352	0	0	3,21	0	0	0
15	0,107	58,718	0	0	0	1,59	0	0

**Base Reaction**

Step	$F_X$ (kN)	$F_Z$ (kN)	$M_Y$ (kNm)
Maks	15,462	21,882	218,224
Min	-20,071	-21,910	-283,898

**Simpangan Mesin**

Step	$U_X$ (mm)	$U_Z$ (mm)
Maks	14,64	11,09
Min	-18,97	-11,06

(lanjutan)

**Konfigurasi  $m_M = 15 \text{ ton}$** **Mode Getar Alami**

Mode	$T_n$ (s)	$\omega_n$ (rad/s)	Rasio Partisipasi Massa (%)					
			$U_X$	$U_Y$	$U_Z$	$R_X$	$R_Y$	$R_Z$
1	1,257	4,997	0	3,55	0	3,09	0	0
2	1,253	5,014	2,01	0	0	0	2,29	0
3	0,939	6,693	0	82,19	0	63,66	0	0
4	0,826	7,611	81,57	0	0	0	81,61	0
5	0,741	8,474	0	0	0	0	0	84,00
6	0,559	11,234	0	0	0,62	0	0	0
7	0,309	20,342	0	9,94	0	0,31	0	0
8	0,260	24,211	10,93	0	0	0	0,15	0
9	0,235	26,770	0	0	0	0	0	10,77
10	0,182	34,516	0	3,43	0	0,20	0	0
11	0,143	43,891	4,19	0	0	0	0,29	0
12	0,137	45,743	0	0,88	0	0	0	0
13	0,133	47,121	0	0	0	0	0	3,99
14	0,115	54,630	0	0	0	0,45	0	0
15	0,111	56,352	0	0	3,21	0	0	0

**Base Reaction**

Step	$F_X$ (kN)	$F_Z$ (kN)	$M_Y$ (kNm)
Maks	12,338	26,060	175,028
Min	-13,558	-26,060	-191,936

**Simpangan Mesin**

Step	$U_X$ (mm)	$U_Z$ (mm)
Maks	10,01	13,19
Min	-14,32	-13,18

(lanjutan)

**Konfigurasi  $m_M = 18 \text{ ton}$** **Mode Getar Alami**

Mode	$T_n$ (s)	$\omega_n$ (rad/s)	Rasio Partisipasi Massa (%)					
			$U_X$	$U_Y$	$U_Z$	$R_X$	$R_Y$	$R_Z$
1	1,376	4,566	0	2,84	0	2,53	0	0
2	1,372	4,579	1,87	0	0	0	2,17	0
3	0,940	6,687	0	82,91	0	64,26	0	0
4	0,826	7,608	81,73	0	0	0	81,76	0
5	0,741	8,474	0	0	0	0	0	84,00
6	0,613	10,255	0	0	0,74	0	0	0
7	0,309	20,341	0	9,93	0	0,31	0	0
8	0,260	24,211	10,91	0	0	0	0,15	0
9	0,235	26,770	0	0	0	0	0	10,77
10	0,182	34,515	0	3,42	0	0,20	0	0
11	0,143	43,891	4,19	0	0	0	0,29	0
12	0,137	45,740	0	0,88	0	0	0	0
13	0,133	47,119	0	0	0	0	0	3,99
14	0,124	50,832	0	0	0	0,21	0	0
15	0,111	56,352	0	0	3,21	0	0	0

**Base Reaction**

Step	$F_X$ (kN)	$F_Z$ (kN)	$M_Y$ (kNm)
Maks	10,092	26,837	143,695
Min	-9,482	-26,837	-133,547

**Simpangan Mesin**

Step	$U_X$ (mm)	$U_Z$ (mm)
Maks	9,79	13,58
Min	-11,18	-13,58

## Lampiran 5. Output Model Dengan Kombinasi Posisi Mesin

**Konfigurasi  $M_1 + M_2$** **Mode Getar Alami**

Mode	$T_n$ (s)	$\omega_n$ (rad/s)	Rasio Partisipasi Massa (%)					
			$U_X$	$U_Y$	$U_Z$	$R_X$	$R_Y$	$R_Z$
1	1,255	5,007	0	3,67	0	1,85	0	0
2	1,251	5,021	2,23	0	0	0	1,28	0
3	1,250	5,026	0	0,11	0	0	0	0
4	1,249	5,030	0,15	0	0	0	0	0
5	0,929	6,761	0	81,91	0	64,71	0	0
6	0,816	7,695	81,18	0	0	0	82,53	0
7	0,740	8,488	0	0	0	0	0	83,96
8	0,559	11,235	0	0	1,09	0	0	0
9	0,559	11,238	0	0	0,15	0	0	0
10	0,304	20,670	0	10,04	0	0,26	0	0
11	0,255	24,610	11	0	0	0	0,12	0
12	0,235	26,785	0	0	0	0	0	10,81
13	0,181	34,795	0	3,34	0	0,19	0	0
14	0,142	44,241	4,13	0	0	0	0,29	0
15	0,135	46,374	0	0,92	0	0	0	0

**Base Reaction**

Kasus	Step	$F_X$ (kN)	$F_Z$ (kN)	$M_Y$ (kNm)
$\omega_{M1} \neq 0; \omega_{M2} = 0$	Maks	2,135	12,869	13,505
	Min	-1,796	-12,150	-13,095
$\omega_{M1} = 0; \omega_{M2} \neq 0$	Maks	2,426	13,002	28,281
	Min	-2,057	-12,287	-34,535
$\omega_{M1} \neq 0; \omega_{M2} \neq 0$	Maks	4,555	25,870	41,353
	Min	-3,548	-24,436	-47,613

**Simpangan Mesin**

Mesin	Displ	Step	$\omega_{M1} \neq 0; \omega_{M2} = 0$	$\omega_{M1} = 0; \omega_{M2} \neq 0$	$\omega_{M1} \neq 0; \omega_{M2} \neq 0$
1	$U_X$ (mm)	Maks	4,44	0,02	4,44
		Min	-4,46	-0,02	-4,45
	$U_Z$ (mm)	Maks	6,17	0	6,17
		Min	-6,54	0	-6,54
2	$U_X$ (mm)	Maks	0,02	4,44	4,44
		Min	-0,02	-4,45	-4,44
	$U_Z$ (mm)	Maks	0	6,17	6,17
		Min	0	-6,54	-6,54

(lanjutan)

**Konfigurasi  $M_1 + M_3$** **Mode Getar Alami**

Mode	$T_n$ (s)	$\omega_n$ (rad/s)	Rasio Partisipasi Massa (%)					
			$U_X$	$U_Y$	$U_Z$	$R_X$	$R_Y$	$R_Z$
1	1,258	4,995	0	4,41	0	3,28	0	0
2	1,253	5,013	2,55	0	0	0	2,46	0
3	1,250	5,025	0	0,26	0	0	0	0
4	1,249	5,030	0,31	0	0	0	0,01	0
5	0,927	6,779	0	81,02	0	63,38	0	0
6	0,815	7,709	80,69	0	0	0	81,42	0
7	0,740	8,486	0	0	0	0	0	83,96
8	0,559	11,234	0	0	1,07	0	0	0
9	0,559	11,238	0	0	0,17	0	0	0
10	0,304	20,663	0	10,03	0	0,26	0	0
11	0,255	24,605	11	0	0	0	0,12	0
12	0,234	26,795	0	0	0	0	0	10,81
13	0,181	34,803	0	3,35	0	0,20	0	0
14	0,142	44,244	4,13	0	0	0	0,29	0
15	0,136	46,370	0	0,92	0	0	0	0

**Base Reaction**

Kasus	Step	$F_X$ (kN)	$F_Z$ (kN)	$M_Y$ (kNm)
$\omega_{M1} \neq 0; \omega_{M3} = 0$	Maks	2,132	12,855	13,472
	Min	-1,788	-12,132	-13,008
$\omega_{M1} = 0; \omega_{M3} \neq 0$	Maks	2,810	13,075	41,708
	Min	-3,537	-12,360	-50,640
$\omega_{M1} \neq 0; \omega_{M3} \neq 0$	Maks	4,620	25,930	54,631
	Min	-4,002	-24,491	-63,638

**Simpangan Mesin**

Mesin	Displ	Step	$\omega_{M1} \neq 0; \omega_{M3} = 0$	$\omega_{M1} = 0; \omega_{M3} \neq 0$	$\omega_{M1} \neq 0; \omega_{M3} \neq 0$
1	$U_X$ (mm)	Maks	4,44	0,02	4,44
		Min	-4,46	-0,02	-4,45
	$U_Z$ (mm)	Maks	6,17	0	6,17
		Min	-6,54	0	-6,54
2	$U_X$ (mm)	Maks	0,02	4,45	4,45
		Min	-0,02	-4,44	-4,43
	$U_Z$ (mm)	Maks	0	6,16	6,16
		Min	0	-6,54	-6,54

(lanjutan)

**Konfigurasi  $M_2 + M_3$** **Mode Getar Alami**

Mode	$T_n$ (s)	$\omega_n$ (rad/s)	Rasio Partisipasi Massa (%)					
			$U_X$	$U_Y$	$U_Z$	$R_X$	$R_Y$	$R_Z$
1	1,261	4,984	0	5,63	0	4,29	0	0
2	1,255	5,007	3,35	0	0	0	3,23	0
3	1,250	5,026	0	0,03	0	0	0	0
4	1,249	5,030	0,04	0	0	0	0	0
5	0,925	6,794	0	80,01	0	62,44	0	0
6	0,814	7,718	80,15	0	0	0	80,69	0
7	0,740	8,485	0	0	0	0	0	83,98
8	0,559	11,233	0	0	1,22	0	0	0
9	0,559	11,237	0	0	0,03	0	0	0
10	0,304	20,664	0	10,05	0	0,26	0	0
11	0,255	24,607	11,01	0	0	0	0,12	0
12	0,235	26,792	0	0	0	0	0	10,79
13	0,181	34,791	0	3,35	0	0,20	0	0
14	0,142	44,240	4,13	0	0	0	0,29	0
15	0,135	46,378	0	0,91	0	0	0	0

**Base Reaction**

Kasus	Step	$F_X$ (kN)	$F_Z$ (kN)	$M_Y$ (kNm)
$\omega_{M2} \neq 0; \omega_{M3} = 0$	Maks	2,413	13,003	28,158
	Min	-2,022	-12,286	-34,101
$\omega_{M2} = 0; \omega_{M3} \neq 0$	Maks	2,806	13,086	41,640
	Min	-3,518	-12,371	-50,374
$\omega_{M2} \neq 0; \omega_{M3} \neq 0$	Maks	5,036	26,089	69,792
	Min	-5,458	-24,657	-84,474

**Simpangan Mesin**

Mesin	Displ	Step	$\omega_{M2} \neq 0; \omega_{M3} = 0$	$\omega_{M2} = 0; \omega_{M3} \neq 0$	$\omega_{M2} \neq 0; \omega_{M3} \neq 0$
1	$U_X$ (mm)	Maks	4,44	0,05	4,45
		Min	-4,45	-0,05	-4,43
	$U_Z$ (mm)	Maks	6,17	0	6,16
		Min	-6,54	0	-6,54
2	$U_X$ (mm)	Maks	0,05	4,45	4,46
		Min	-0,05	-4,44	-4,43
	$U_Z$ (mm)	Maks	0	6,16	6,16
		Min	0	-6,54	-6,54



## Lampiran 6. Output Model Dengan Kombinasi Massa Mesin

**Konfigurasi  $m_{M1} < m_{M3}$** **Mode Getar Alami**

Mode	$T_n$ (s)	$\omega_n$ (rad/s)	Rasio Partisipasi Massa (%)					
			$U_X$	$U_Y$	$U_Z$	$R_X$	$R_Y$	$R_Z$
1	1,376	4,567	0	2,79	0	2,47	0	0
2	1,372	4,579	1,86	0	0	0	2,13	0
3	1,251	5,022	0	1,27	0	0,33	0	0
4	1,249	5,029	0,89	0	0	0	0,23	0
5	0,928	6,773	0	81,64	0	63,90	0	0
6	0,815	7,706	80,82	0	0	0	81,54	0
7	0,740	8,486	0	0	0	0	0	83,96
8	0,613	10,255	0	0	0,75	0	0	0
9	0,559	11,237	0	0	0,61	0	0	0
10	0,304	20,663	0	10,02	0	0,26	0	0
11	0,255	24,605	10,99	0	0	0	0,12	0
12	0,234	26,795	0	0	0	0	0	10,81
13	0,181	34,802	0	3,35	0	0,20	0	0
14	0,142	44,243	4,12	0	0	0	0,29	0
15	0,136	46,366	0	0,91	0	0	0	0

**Base Reaction**

Kasus	Step	$F_X$ (kN)	$F_Z$ (kN)	$M_Y$ (kNm)
$\omega_{M1} \neq 0; \omega_{M3} = 0$	Maks	2,132	12,853	13,475
	Min	-1,787	-12,129	-13,026
$\omega_{M1} = 0; \omega_{M3} \neq 0$	Maks	2,168	11,386	32,829
	Min	-2,419	-9,277	-34,472
$\omega_{M1} \neq 0; \omega_{M3} \neq 0$	Maks	4,174	24,105	46,200
	Min	-3,189	-21,224	-47,467

**Simpangan Mesin**

Mesin	Displ	Step	$\omega_{M1} \neq 0; \omega_{M3} = 0$	$\omega_{M1} = 0; \omega_{M3} \neq 0$	$\omega_{M1} \neq 0; \omega_{M3} \neq 0$
1	$U_X$ (mm)	Maks	4,44	0,01	4,44
		Min	-4,46	-0,02	-4,45
	$U_Z$ (mm)	Maks	6,17	0	6,17
		Min	-6,54	0	-6,54
2	$U_X$ (mm)	Maks	0,02	4,12	4,12
		Min	-0,02	-4,10	-4,09
	$U_Z$ (mm)	Maks	0	4,63	4,63
		Min	0	-5,71	-5,71

(lanjutan)

**Konfigurasi  $m_{M1} > m_{M3}$** **Mode Getar Alami**

Mode	$T_n$ (s)	$\omega_n$ (rad/s)	Rasio Partisipasi Massa (%)					
			$U_X$	$U_Y$	$U_Z$	$R_X$	$R_Y$	$R_Z$
1	1,370	4,585	0	1,37	0	0,35	0	0
2	1,369	4,591	1,02	0	0	0	0,25	0
3	1,257	4,999	0	3,26	0	2,89	0	0
4	1,253	5,014	1,93	0	0	0	2,21	0
5	0,927	6,778	0	81,07	0	63,44	0	0
6	0,815	7,709	80,63	0	0	0	81,42	0
7	0,740	8,486	0	0	0	0	0	83,96
8	0,613	10,258	0	0	0,74	0	0	0
9	0,559	11,234	0	0	0,63	0	0	0
10	0,304	20,663	0	10,02	0	0,26	0	0
11	0,255	24,605	10,99	0	0	0	0,12	0
12	0,234	26,794	0	0	0	0	0	10,82
13	0,181	34,803	0	3,34	0	0,20	0	0
14	0,142	44,243	4,12	0	0	0	0,29	0
15	0,136	46,363	0	0,92	0	0	0	0

**Base Reaction**

Kasus	Step	$F_X$ (kN)	$F_Z$ (kN)	$M_Y$ (kNm)
$\omega_{M1} \neq 0; \omega_{M3} = 0$	Maks	1,893	11,206	11,319
	Min	-1,624	-9,112	-8,843
$\omega_{M1} = 0; \omega_{M3} \neq 0$	Maks	2,810	13,073	41,709
	Min	-3,537	-12,357	-50,645
$\omega_{M1} \neq 0; \omega_{M3} \neq 0$	Maks	4,356	24,161	52,110
	Min	-3,720	-21,295	-59,127

**Simpangan Mesin**

Mesin	Displ	Step	$\omega_{M1} \neq 0; \omega_{M3} = 0$	$\omega_{M1} = 0; \omega_{M3} \neq 0$	$\omega_{M1} \neq 0; \omega_{M3} \neq 0$
1	$U_X$ (mm)	Maks	4,13	0,02	4,13
		Min	-4,12	-0,02	-4,11
	$U_Z$ (mm)	Maks	4,64	0	4,63
		Min	-5,71	0	-5,71
2	$U_X$ (mm)	Maks	0,01	4,45	4,45
		Min	-0,02	-4,44	-4,43
	$U_Z$ (mm)	Maks	0	6,16	6,16
		Min	0	-6,54	-6,54

## Lampiran 7. Output Model Dengan Kombinasi Frekuensi Getar Mesin

**Konfigurasi  $\omega_{M1} < \omega_{M3}$** **Base Reaction**

Kasus	Step	$F_X$ (kN)	$F_Z$ (kN)	$M_Y$ (kNm)
$\omega_{M1} \neq 0; \omega_{M3} = 0$	Maks	2,132	12,855	13,472
	Min	-1,788	-12,132	-13,008
$\omega_{M1} = 0; \omega_{M3} \neq 0$	Maks	0,768	3,215	9,848
	Min	-0,789	-4,816	-10,183
$\omega_{M1} \neq 0; \omega_{M3} \neq 0$	Maks	2,667	16,025	23,139
	Min	-2,256	-11,989	-23,192

**Simpangan Mesin**

Mesin	Displ	Step	$\omega_{M1} \neq 0; \omega_{M3} = 0$	$\omega_{M1} = 0; \omega_{M3} \neq 0$	$\omega_{M1} \neq 0; \omega_{M3} \neq 0$
1	$U_X$ (mm)	Maks	4,44	0	4,44
		Min	-4,46	0	-4,45
	$U_Z$ (mm)	Maks	6,17	0	6,17
		Min	-6,54	0	-6,54
2	$U_X$ (mm)	Maks	0,02	1,24	1,24
		Min	-0,02	-1,26	-1,25
	$U_Z$ (mm)	Maks	0	2,30	2,30
		Min	0	-1,53	-1,53

**Konfigurasi  $\omega_{M1} > \omega_{M3}$** **Base Reaction**

Kasus	Step	$F_X$ (kNm)	$F_Z$ (kN)	$M_Y$ (kNm)
$\omega_{M1} \neq 0; \omega_{M3} = 0$	Maks	0,383	3,064	3,570
	Min	-0,461	-4,606	-3,672
$\omega_{M1} = 0; \omega_{M3} \neq 0$	Maks	2,810	13,075	41,708
	Min	-3,537	-12,360	-50,640
$\omega_{M1} \neq 0; \omega_{M3} \neq 0$	Maks	3,064	16,075	43,494
	Min	-3,801	-12,289	-52,566

**Simpangan Mesin**

Mesin	Displ	Step	$\omega_{M1} \neq 0; \omega_{M3} = 0$	$\omega_{M1} = 0; \omega_{M3} \neq 0$	$\omega_{M1} \neq 0; \omega_{M3} \neq 0$
1	$U_X$ (mm)	Maks	1,24	0,01	1,24
		Min	-1,26	-0,02	-1,25
	$U_Z$ (mm)	Maks	2,30	0	2,30
		Min	-1,53	0	-1,53
2	$U_X$ (mm)	Maks	0	4,45	4,45
		Min	0	-4,44	-4,44
	$U_Z$ (mm)	Maks	0	6,16	6,17
		Min	0	-6,54	-6,54

## Lampiran 8. Output Model Dengan Kombinasi Kekakuan Pegas

Konfigurasi  $k_{M1} < k_{M3}$ 

## Mode Getar Alami

Mode	$T_n$ (s)	$\omega_n$ (rad/s)	Rasio Partisipasi Massa (%)					
			$U_X$	$U_Y$	$U_Z$	$R_X$	$R_Y$	$R_Z$
1	1,251	5,022	0	1,41	0	0,41	0	0
2	1,249	5,029	0,93	0	0	0	0,25	0
3	1,074	5,851	0	10,76	0	9	0	0
4	1,064	5,903	3,86	0	0	0	4,26	0
5	0,919	6,837	0	73,51	0	57,25	0	0
6	0,813	7,732	78,76	0	0	0	79,37	0
7	0,740	8,486	0	0	0	0	0	83,96
8	0,559	11,237	0	0	0,62	0	0	0
9	0,426	14,750	0	0	0,65	0	0	0
10	0,304	20,665	0	10,03	0	0,26	0	0
11	0,255	24,605	11	0	0	0	0,12	0
12	0,234	26,795	0	0	0	0	0	10,81
13	0,181	34,805	0	3,35	0	0,20	0	0
14	0,142	44,245	4,13	0	0	0	0,29	0
15	0,135	46,372	0	0,92	0	0	0	0

## Base Reaction

Kasus	Step	$F_X$ (kN)	$F_Z$ (kN)	$M_Y$ (kNm)
$\omega_{M1} \neq 0; \omega_{M3} = 0$	Maks	2,129	12,854	13,437
	Min	-1,786	-12,133	-12,898
$\omega_{M1} = 0; \omega_{M3} \neq 0$	Maks	4,484	28,391	68,285
	Min	-5,899	-28,365	-84,534
$\omega_{M1} \neq 0; \omega_{M3} \neq 0$	Maks	6,100	36,141	75,902
	Min	-6,438	-36,180	-96,929

## Simpangan Mesin

Mesin	Displ	Step	$\omega_{M1} \neq 0; \omega_{M3} = 0$	$\omega_{M1} = 0; \omega_{M3} \neq 0$	$\omega_{M1} \neq 0; \omega_{M3} \neq 0$
1	$U_X$ (mm)	Maks	4,44	0,03	4,45
		Min	-4,46	-0,03	-4,45
	$U_Z$ (mm)	Maks	6,17	0	6,17
		Min	-6,54	0	-6,54
2	$U_X$ (mm)	Maks	0,02	5,21	5,19
		Min	-0,03	-5,22	-5,22
	$U_Z$ (mm)	Maks	0	8,14	8,13
		Min	0	-8,14	-8,14

(lanjutan)

**Konfigurasi  $k_{M1} < k_{M3}$** **Mode Getar Alami**

Mode	$T_n$ (s)	$\omega_n$ (rad/s)	Rasio Partisipasi Massa (%)					
			$U_X$	$U_Y$	$U_Z$	$R_X$	$R_Y$	$R_Z$
1	1,257	4,998	0	3,41	0	2,96	0	0
2	1,253	5,014	1,97	0	0	0	2,24	0
3	1,061	5,922	0	2,90	0	1,17	0	0
4	1,058	5,936	1,23	0	0	0	0,41	0
5	0,926	6,786	0	79,38	0	62,53	0	0
6	0,815	7,711	80,36	0	0	0	81,24	0
7	0,740	8,486	0	0	0	0	0	83,96
8	0,559	11,234	0	0	0,63	0	0	0
9	0,426	14,757	0	0	0,62	0	0	0
10	0,304	20,666	0	10,03	0	0,26	0	0
11	0,255	24,606	11	0	0	0	0,12	0
12	0,234	26,795	0	0	0	0	0	10,81
13	0,181	34,805	0	3,35	0	0,20	0	0
14	0,142	44,245	4,13	0	0	0	0,29	0
15	0,135	46,372	0	0,92	0	0	0	0

**Base Reaction**

Kasus	Step	$F_X$ (kN)	$F_Z$ (kN)	$M_Y$ (kNm)
$\omega_{M1} \neq 0; \omega_{M3} = 0$	Maks	3,622	27,796	22,914
	Min	-3,291	-27,766	-22,426
$\omega_{M1} = 0; \omega_{M3} \neq 0$	Maks	2,809	13,074	41,700
	Min	-3,535	-12,360	-50,610
$\omega_{M1} \neq 0; \omega_{M3} \neq 0$	Maks	4,881	35,641	58,988
	Min	-4,519	-35,683	-70,889

**Simpangan Mesin**

Mesin	Displ	Step	$\omega_{M1} \neq 0; \omega_{M3} = 0$	$\omega_{M1} = 0; \omega_{M3} \neq 0$	$\omega_{M1} \neq 0; \omega_{M3} \neq 0$
1	$U_X$ (mm)	Maks	5,28	0,02	5,27
		Min	-5,21	-0,03	-5,21
	$U_Z$ (mm)	Maks	8,14	0	8,13
		Min	-8,15	0	-8,14
2	$U_X$ (mm)	Maks	0,03	4,45	4,47
		Min	-0,04	-4,44	-4,44
	$U_Z$ (mm)	Maks	0	6,16	6,16
		Min	0	-6,54	-6,54

## Lampiran 9. Output Model Dengan Kombinasi Arah Getar Mesin

Konfigurasi  $M_{1-X} + M_{3-Y}$ 

## Mode Getar Alami

Mode	$T_n$ (s)	$\omega_n$ (rad/s)	Rasio Partisipasi Massa (%)					
			$U_X$	$U_Y$	$U_Z$	$R_X$	$R_Y$	$R_Z$
1	1,257	5,000	0	4,45	0	3,22	0	0
2	1,254	59	2,50	0	0	0	2,50	0
3	1,250	5,026	0	0,16	0	0	0	0
4	1,249	5,030	0,41	0	0	0	0,03	0
5	0,927	6,777	0	81,08	0	63,44	0	0
6	0,815	7,711	80,64	0	0	0	81,35	0
7	0,740	8,486	0	0	0	0	0	83,96
8	0,559	11,232	0	0	0,95	0	0	0
9	0,559	11,238	0	0	0,29	0	0	0
10	0,304	20,665	0	10,04	0	0,26	0	0
11	0,255	24,601	11	0	0	0	0,12	0
12	0,235	26,793	0	0	0	0	0	10,81
13	0,181	34,806	0	3,35	0	0,20	0	0
14	0,142	44,237	4,13	0	0	0	0,29	0
15	0,135	46,373	0	0,92	0	0	0	0

## Base Reaction

Kasus	Step	$F_X$ (kN)	$F_Y$ (kN)	$F_Z$ (kN)	$M_X$ (kNm)	$M_Y$ (kNm)
$\omega_{M1} \neq 0; \omega_{M3} = 0$	Maks	2,132	0	12,863	0	13,470
	Min	-1,787	0	-12,143	0	-13,005
$\omega_{M1} = 0; \omega_{M3} \neq 0$	Maks	0	2,463	13,031	35,851	0
	Min	0	-2,505	-12,308	-33,278	0
$\omega_{M1} \neq 0; \omega_{M3} \neq 0$	Maks	2,132	2,463	25,894	35,851	13,470
	Min	-1,787	-2,505	-24,450	-33,278	-13,005

## Simpangan Mesin

Mesin	Displ	Step	$\omega_{M1} \neq 0; \omega_{M3} = 0$	$\omega_{M1} = 0; \omega_{M3} \neq 0$	$\omega_{M1} \neq 0; \omega_{M3} \neq 0$
1	$U_X$ (mm)	Maks	4,44	0	4,44
		Min	-4,46	0	-4,46
	$U_Y$ (mm)	Maks	0	0,02	0,02
		Min	0	-0,02	-0,02
	$U_Z$ (mm)	Maks	6,17	0	6,16
		Min	-6,54	0	-6,54
2	$U_X$ (mm)	Maks	0,02	0	0,02
		Min	-0,02	0	-0,02
	$U_Y$ (mm)	Maks	0	3,96	3,96
		Min	0	-4,12	-4,12
	$U_Z$ (mm)	Maks	0	6,16	6,16
		Min	0	-6,54	-6,54

(lanjutan)

**Konfigurasi  $M_{1-Y} + M_{3-X}$** **Mode Getar Alami**

Mode	$T_n$ (s)	$\omega_n$ (rad/s)	Rasio Partisipasi Massa (%)					
			$U_X$	$U_Y$	$U_Z$	$R_X$	$R_Y$	$R_Z$
1	1,258	4,996	0	4,21	0	3,23	0	0
2	1,254	5,012	2,78	0	0	0	2,49	0
3	1,250	5,026	0,15	0	0	0	0,01	0
4	1,249	5,029	0	0,37	0	0,01	0	0
5	0,927	6,777	0	81,11	0	63,41	0	0
6	0,815	7,710	80,62	0	0	0	81,39	0
7	0,740	8,486	0	0	0	0	0	83,96
8	0,559	11,233	0	0	1,19	0	0	0
9	0,559	11,237	0	0	0,06	0	0	0
10	0,304	20,663	0	10,04	0	0,26	0	0
11	0,255	24,604	11	0	0	0	0,12	0
12	0,234	26,794	0	0	0	0	0	10,81
13	0,181	34,803	0	3,35	0	0,20	0	0
14	0,142	44,244	4,13	0	0	0	0,29	0
15	0,135	46,377	0	0,91	0	0	0	0

**Base Reaction**

Kasus	Step	$F_X$ (kN)	$F_Y$ (kN)	$F_Z$ (kN)	$M_X$ (kNm)	$M_Y$ (kNm)
$\omega_{M1} \neq 0; \omega_{M3} = 0$	Maks	0	2,261	12,843	11,570	0
	Min	0	-1,929	-12,117	-10,349	0
$\omega_{M1} = 0; \omega_{M3} \neq 0$	Maks	2,810	0	13,079	0	41,709
	Min	-3,535	0	-12,364	0	-50,618
$\omega_{M1} \neq 0; \omega_{M3} \neq 0$	Maks	2,810	2,261	25,921	11,570	41,709
	Min	-3,535	-1,929	-24,481	-10,349	-50,618

**Simpangan Mesin**

Mesin	Displ	Step	$\omega_{M1} \neq 0; \omega_{M3} = 0$	$\omega_{M1} = 0; \omega_{M3} \neq 0$	$\omega_{M1} \neq 0; \omega_{M3} \neq 0$
1	$U_X$ (mm)	Maks	0	0,02	0,02
		Min	0	-0,02	-0,02
	$U_Y$ (mm)	Maks	3,95	0	3,95
		Min	-4,09	0	-4,09
	$U_Z$ (mm)	Maks	6,17	0	6,16
		Min	-6,54	0	-6,54
2	$U_X$ (mm)	Maks	0	4,45	4,45
		Min	0	-4,44	-4,44
	$U_Y$ (mm)	Maks	0,02	0	0,02
		Min	-0,02	0	-0,02
	$U_Z$ (mm)	Maks	0	6,16	6,16
		Min	0	-6,54	-6,54

## Lampiran 10. Output Model Dengan Kombinasi Rasio Redaman Pegas

**Konfigurasi  $\zeta_{M1} < \zeta_{M3}$** **Base Reaction**

Kasus	Step	$F_X$ (kN)	$F_Z$ (kN)	$M_Y$ (kNm)
$\omega_{M1} \neq 0; \omega_{M3} = 0$	Maks	2,132	12,119	13,472
	Min	-1,788	-11,295	-13,008
$\omega_{M1} = 0; \omega_{M3} \neq 0$	Maks	2,810	11,633	41,708
	Min	-3,537	-10,744	-50,640
$\omega_{M1} \neq 0; \omega_{M3} \neq 0$	Maks	4,620	23,752	54,631
	Min	-4,002	-22,039	-63,638

**Simpangan Mesin**

Mesin	Displ	Step	$\omega_{M1} \neq 0; \omega_{M3} = 0$	$\omega_{M1} = 0; \omega_{M3} \neq 0$	$\omega_{M1} \neq 0; \omega_{M3} \neq 0$
1	$U_X$ (mm)	Maks	4,44	0,02	4,44
		Min	-4,46	-0,02	-4,45
	$U_Z$ (mm)	Maks	5,94	0,22	5,74
		Min	-6,35	-0,25	-6,17
2	$U_X$ (mm)	Maks	0,02	4,45	4,45
		Min	-0,02	-4,44	-4,43
	$U_Z$ (mm)	Maks	0,22	5,55	5,35
		Min	-0,25	-5,99	-5,81

**Konfigurasi  $\zeta_{M1} > \zeta_{M3}$** **Base Reaction**

Kasus	Step	$F_X$ (kNm)	$F_Z$ (kN)	$M_Y$ (kNm)
$\omega_{M1} \neq 0; \omega_{M3} = 0$	Maks	2,132	12,139	13,472
	Min	-1,788	-11,317	-13,008
$\omega_{M1} = 0; \omega_{M3} \neq 0$	Maks	2,810	13,050	41,708
	Min	-3,537	-12,325	-50,640
$\omega_{M1} \neq 0; \omega_{M3} \neq 0$	Maks	4,620	25,190	54,631
	Min	-4,002	-23,605	-63,638

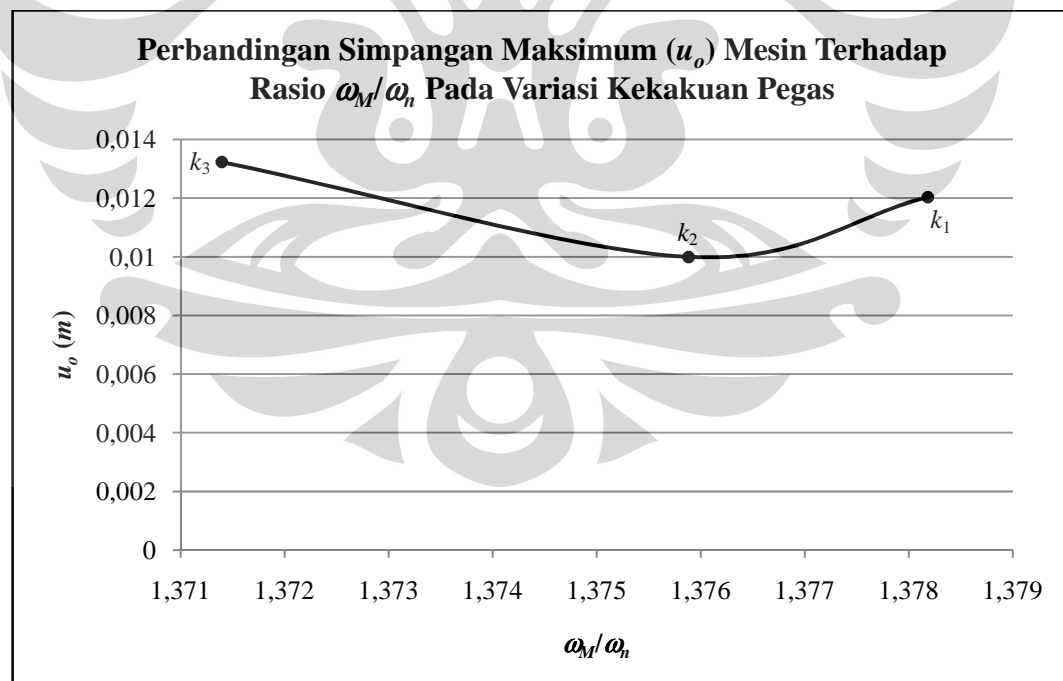
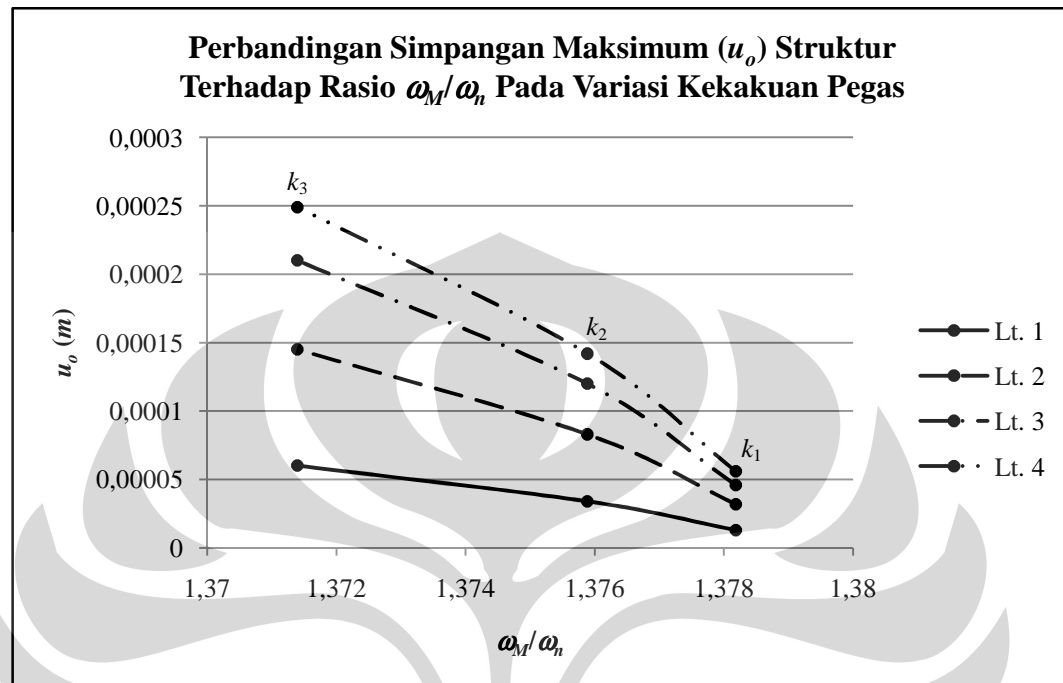
**Simpangan Mesin**

Mesin	Displ	Step	$\omega_{M1} \neq 0; \omega_{M3} = 0$	$\omega_{M1} = 0; \omega_{M3} \neq 0$	$\omega_{M1} \neq 0; \omega_{M3} \neq 0$
1	$U_X$ (mm)	Maks	4,44	0,02	4,44
		Min	-4,46	-0,02	-4,45
	$U_Z$ (mm)	Maks	5,55	0,25	5,75
		Min	-5,99	-0,23	-6,17
2	$U_X$ (mm)	Maks	0,02	4,45	4,45
		Min	-0,02	-4,44	-4,43
	$U_Z$ (mm)	Maks	0,25	5,94	6,15
		Min	-0,23	-6,35	-6,53



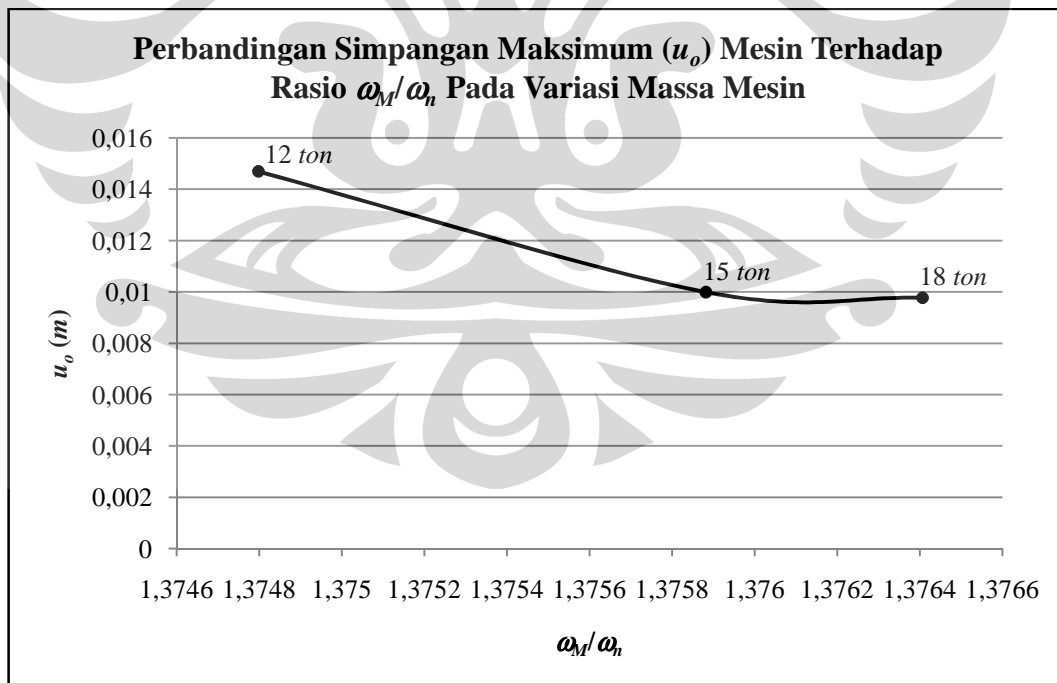
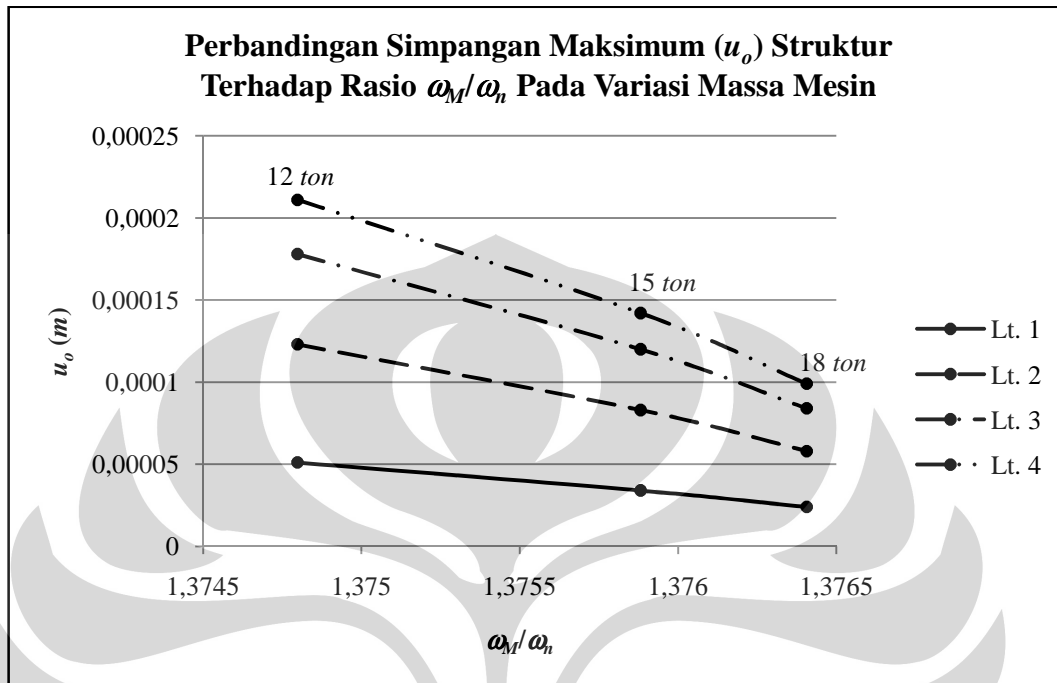
Lampiran 11. Plot  $u_o$  terhadap  $\omega_M/\omega_n$  untuk struktur dengan satu mesin

## 1. Variasi Kekakuan Pegas



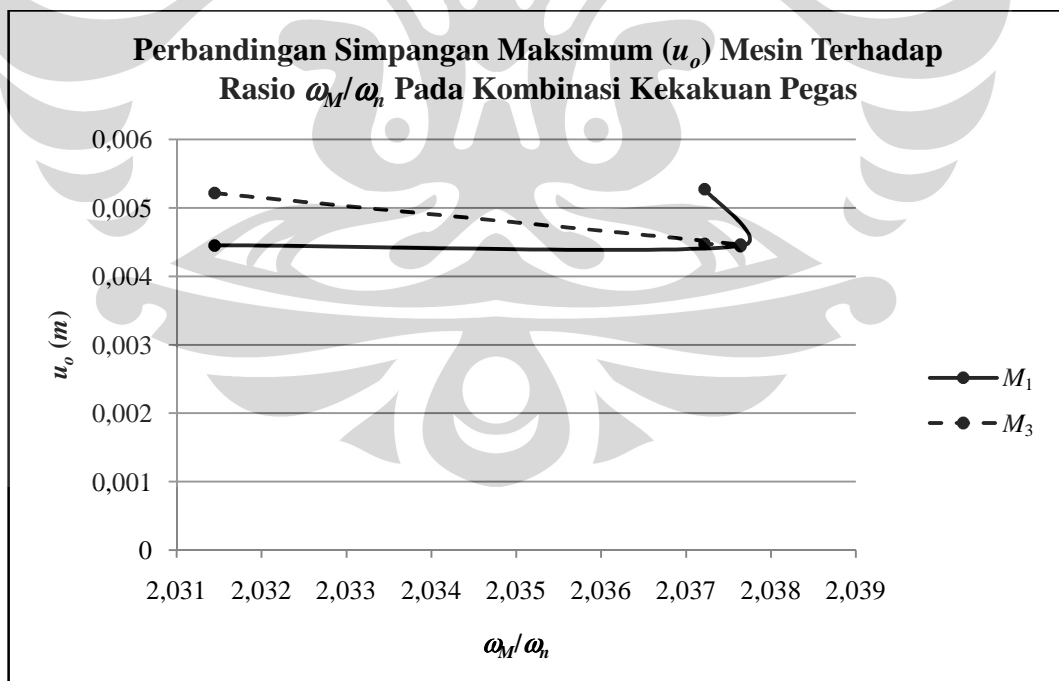
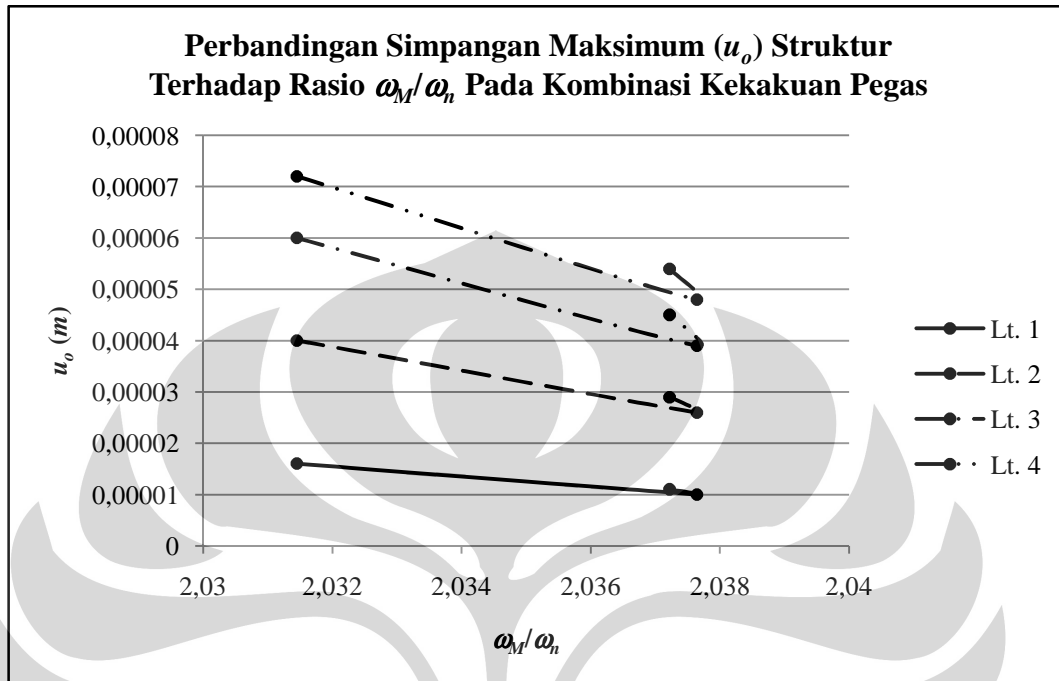
(lanjutan)

2. Variasi Massa Mesin



Lampiran 12. Plot  $u_o$  terhadap  $\omega_M/\omega_n$  untuk struktur dengan dua mesin

### 1. Variasi Kombinasi Kekakuan Pegas



(lanjutan)

## 2. Variasi Kombinasi Massa Mesin

