



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PENGARUH STRONGROOM SEBAGAI PEREDAM  
VISKOELASTIK EKSENTRIS PADA RESPON SEISMIK  
STRUKTUR 3D DENGAN PEMBATAHAN LENDUTAN**

**SKRIPSI**

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

**BATTA SEPTO VAN BAHTIAR DAMANIK  
0606029265**

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

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

**Nama : Batta Septo Van Bahtiar Damanik**

**NPM : 0606029265**

**Tanda Tangan : .....**

**Tanggal : 6 Juli 2010**

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

Nama : Batta Septo Van Bahtiar Damanik  
NPM : 0606029265  
Program Studi : Teknik Sipil  
Judul Skripsi : Pengaruh *Strongroom* sebagai Peredam  
Viskoelastik Eksentris pada Respon Seismik  
Struktur 3D dengan Pembatasan Lendutan

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 (.....)

Penguji : Mulia Orientilize S.T., M.Eng (.....)

Penguji : Dr. Ing. Josia Irwan R. (.....)

Ditetapkan di : .....

Tanggal : .....

## KATA PENGANTAR/UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur saya naikkan kepada Tuhan Yesus Kristus, karena atas berkat dan pemeliharaan-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Program Studi Teknik Sipil pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya juga menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

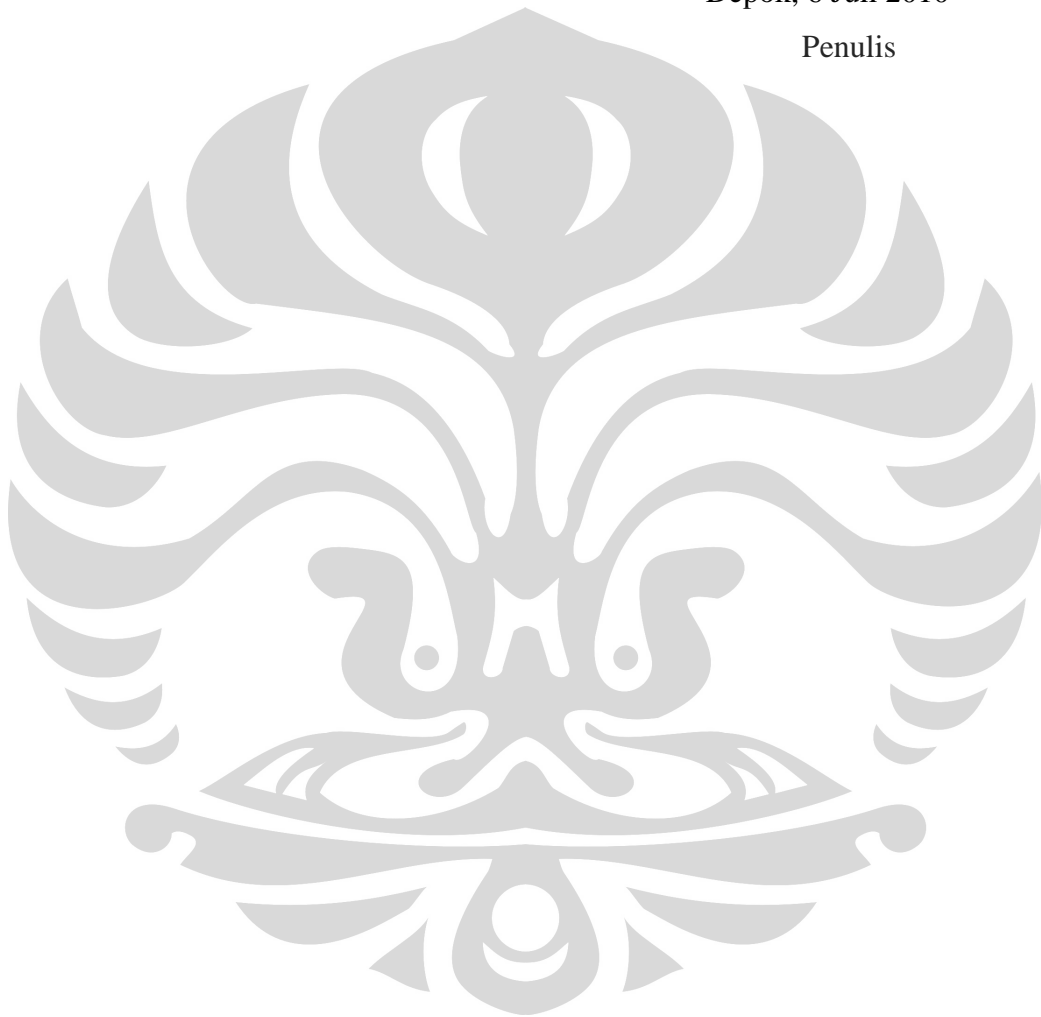
- (1) Dr. Ir. Yuskar Lase, selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
  - (2) Bapak E. Damanik dan Ibu S. Siahaan, kedua orangtua saya yang terus memberikan dorongan moral dan material;
  - (3) Novita Damanik dan Dasma Damanik, kedua saudari saya yang senantiasa mengingatkan saya untuk menyelesaikan skripsi ini tepat pada waktunya;
  - (4) Garlan Ramadhan, Andini Pramudita, dan Stephen Valentino, teman seperjuangan dalam menyelesaikan skripsi ini. Terima kasih untuk diskusi, pengetahuan, bantuan yang telah kita bagi bersama selama penyusunan skripsi kita;
  - (5) Feri Frastiansyah, atas bantuan *software converter* yang dipergunakan untuk *output* Resmat;
  - (6) adik kelompok kecil saya: Joya, Eben, Ricky, Irvan, Yusak, dan Meizar, yang telah memberi dukungan moral juga memberi pinjaman komputer dalam proses simulasi program SAP2000;
  - (7) Melissa, Lois, Eko, Dinan, Sari, Mery, Ibeth, Reni, Lisma, Metha, Saut, dan teman-teman Paduan Suara PO UI terkasih, yang selalu mendukung lewat doa dan perhatian selama proses penyusunan skripsi ini;
  - (8) Siska, Olga, Aga, Togi, Happy, Partogi, Adi, Nana, Satria, Norman, Inggrid, Kristina, Lusi, Vera, Lukman, Ito, Erik, Krisman, Frans, dan teman-teman sepelayanan di POFT dan POUI yang selalu memberi motivasi dan semangat;
- dan

(9) Indra, Gery, Yosua, Halim, Keisha, Andreas, Edward, Icha, David, Dodi, Rangga, dan teman-teman dari angkatan 2006 yang selalu mendukung;

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, 6 Juli 2010

Penulis



**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI  
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

---

---

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

Nama : Batta Septo Van Bahtiar Damanik  
NPM : 0606029265  
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 Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

**Pengaruh *Strongroom* sebagai Peredam Viskoelastik Eksentris pada Respon Seismik Struktur 3D dengan Pembatasan Lendutan**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan 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 : 6 Juli 2010  
Yang menyatakan

(Batta Septo Van Bahtiar Damanik)

## ABSTRAK

Nama : Batta Septo Van Bahtiar Damanik  
Program Studi : Teknik Sipil  
Judul : Pengaruh *Strongroom* sebagai Peredam Viskoelastik Eksentris  
Pada Respon Seismik Struktur 3D dengan Pembatasan Lendutan

*Strongroom* adalah ruangan yang terbuat dari dinding beton setebal 30 cm untuk mengamankan penyimpanan barang berharga pada bank. Umumnya, *strongroom* hanya dimodelkan sebagai beban merata, tanpa memperhitungkan kekakuannya. Dari penelitian ini, saat *strongroom* dimodelkan secara lengkap sebagai dinding beton, respon struktur yang terjadi bernilai jauh lebih besar. Namun demikian, supaya respon struktur dapat direduksi dan tetap dalam jalur permodelan yang benar, maka dapat dipergunakan tambahan peredam viskoelastik yang dibatasi lendutannya di sekeliling dinding *strongroom*. Penambahan ini bisa mengurangi reaksi dasar torsi hingga 75%. Dari penelitian ini juga, posisi yang eksentris dari *strongroom* ternyata memperbesar respon perpindahan dari struktur.

Kata kunci:

*Strongroom*, peredam viskoelastik, eksentris, pembatasan lendutan, respon seismik

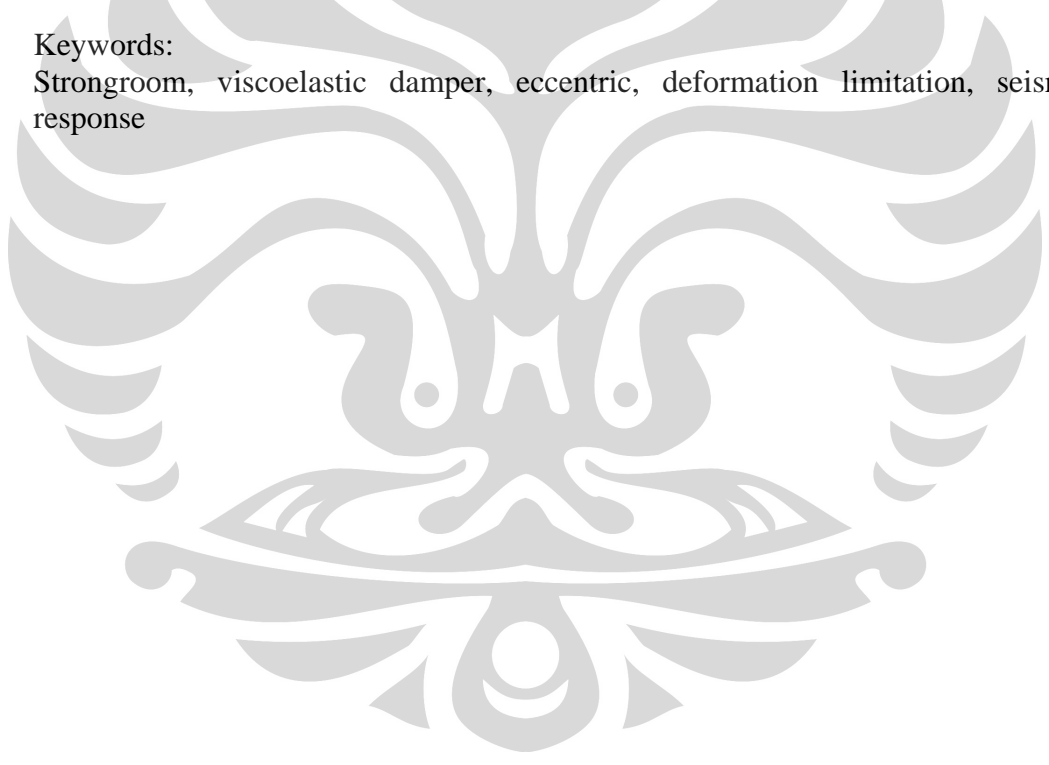
## ABSTRACT

Name : Batta Septo Van Bahtiar Damanik  
Study Program: Civil Engineering  
Title : Effect of Strongroom as Eccentric Viscoelastic Damper in Three Dimension Structural Seismic Response with Limitation of Displacement

Strongroom is a room made by 30 cm-thick reinforced concrete to secure the storage of valuable items at a bank. In general practice, the engineering designer only input the model of strongroom as a distributed load, regardless of its stiffness. From this study, when strongroom modeled as a concrete wall, the magnitudes of structural responses appear much larger. However, those responses can be reduced by adding viscoelastic damper with limited deformation on the wall around strongroom. This addition can reduce the base torsion reaction up to 75%. Also from this study, the eccentric position of the strongroom turned out to enlarge the displacement response of the structure.

**Keywords:**

Strongroom, viscoelastic damper, eccentric, deformation limitation, seismic response





## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR/UCAPAN TERIMA KASIH .....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	vi
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS .....	vi
ABSTRAK.....	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xiv
DAFTAR NOTASI.....	xv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xvii
<b>1. PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang Masalah.....	1
1.2 Tujuan Penulisan.....	2
1.3 Metode Penelitian .....	3
1.4 Ruang Lingkup Pembahasan.....	3
1.5 Sistematika penulisan.....	4
<b>2. TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>5</b>
2.1 Persamaan Dinamik .....	5
2.2 Analisis Riwayat Respon .....	6
2.2.1 Karakteristik Modal .....	6
2.2.2 Ekspansi Modal dari Lendutan dan Gaya .....	7
2.2.3 Respon Modal .....	8
2.2.4 Analisis Riwayat Waktu Nonlinier .....	9
2.3 Peredam Viskoelastik.....	10
2.3.1 General Linear Model .....	10
2.3.2 Model Modulus Kompleks.....	11
2.4 Percepatan Gempa El-Centro.....	13
<b>3. METODE PENELITIAN DAN PERMODELAN .....</b>	<b>15</b>
3.1 Alur Berpikir .....	15

3.2 Permodelan Struktur .....	16
3.2.1 Pembebanan .....	16
3.2.2 Geometri dan Properti Struktur .....	17
3.3 Model Peredam Viskoelastik .....	20
3.4 Variasi Parameter yang Dianalisis .....	27
3.4.1 Variasi Posisi.....	27
3.4.2 Variasi Percepatan Gempa .....	27
3.4.3 Variasi Lainnya .....	31
3.5 Perhitungan SAP2000 .....	33
3.5.1 Integrasi pada Program SAP2000 dengan Direct Integration .....	33
<b>4. SIMULASI DAN ANALISIS .....</b>	<b>35</b>
4.1 Analisis.....	35
4.1.1 Analisis Variasi Posisi .....	38
4.1.2 Analisis Variasi Kekakuan.....	49
4.1.3 Analisis Variasi Pembatasan Perpindahan <i>Strongroom</i> .....	58
4.1.4 Analisis Variasi Percepatan Gempa .....	64
4.2 Rangkuman Hasil Analisis.....	69
<b>5. KESIMPULAN DAN SARAN.....</b>	<b>73</b>
5.1 Kesimpulan .....	73
5.2 Saran.....	74
<b>DAFTAR REFERENSI .....</b>	<b>75</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1. Konfigurasi dari Peredam Viskoelastis .....	10
Gambar 2. 2. Ilustrasi Model Maxwell .....	11
Gambar 2. 3. Ilustrasi Model Kelvin.....	11
Gambar 2. 4. Eksitasi gempa El-Centro komponen E-W .....	14
Gambar 3. 1. Alur Berpikir .....	15
Gambar 3. 2. Denah Bangunan .....	18
Gambar 3. 3. Potongan Melintang .....	19
Gambar 3. 4. Tampak Tiga Dimensi.....	19
Gambar 3. 5. Contoh Posisi <i>Strongroom</i> .....	20
Gambar 3. 6. Detail Potongan <i>Strongroom</i> .....	21
Gambar 3. 7. Detail Pemasangan Peredam pada Bagian Dinding dan Balok.....	22
Gambar 3. 8. Permodelan <i>Strongroom</i> pada SAP2000.....	24
Gambar 3. 9. <i>Constraints</i> pada Penutup Pelat .....	24
Gambar 3. 10. Ilustrasi <i>Link</i> .....	26
Gambar 3. 11. Variasi Posisi.....	27
Gambar 3. 12. Respon Spektrum Gempa El Centro Komponen E-W.....	28
Gambar 3. 13. Respon Spektrum Gempa Sintetik Wilayah 3 (ECMOD) vs Wilayah 3 Tanah Lunak .....	29
Gambar 3. 14. Grafik Riwayat Waktu Gempa Sintetik Wilayah 3 Tanah Lunak (ECMOD) .....	29
Gambar 3. 15. Riwayat Waktu $A \sin 0.5 T_n$ .....	30
Gambar 3. 16. Riwayat Waktu $A \sin T_n$ .....	30
Gambar 3. 17. Riwayat Waktu $A \sin 2T_n$ .....	31

Gambar 3. 18. Respon Spektrum Rencana untuk Percepatan Gempa Sinusoidal	31
Gambar 4. 1. Partisipasi Massa UX	36
Gambar 4. 2. Partisipasi Massa UY	37
Gambar 4. 3. Variasi Posisi Horizontal	39
Gambar 4. 4. Variasi Posisi Vertikal	39
Gambar 4. 5. Periode Getar Alami dalam Variasi Posisi Lantai 4 (Horizontal)	40
Gambar 4. 6. Periode Getar Alami dalam Variasi Posisi A (Vertikal)	40
Gambar 4. 7. Perpindahan Lantai UX dalam Variasi Posisi Lantai 4 (Horizontal)	41
Gambar 4. 8. Perpindahan Lantai UX dalam Variasi Posisi A (Vertikal)	41
Gambar 4. 9. Perpindahan Lantai RZ dalam Variasi Posisi Lantai 4 (Horizontal)	42
Gambar 4. 10. Perpindahan Lantai RZ dalam Variasi Posisi A (vertikal)	42
Gambar 4. 11. Perpindahan <i>Strongroom</i> UX dalam Variasi Posisi Horizontal	43
Gambar 4. 12. Perpindahan <i>Strongroom</i> RZ Dalam Variasi Posisi Horizontal	44
Gambar 4. 13. Perpindahan <i>Strongroom</i> UX dalam Variasi Posisi Vertikal	44
Gambar 4. 14. Perpindahan <i>Strongroom</i> RZ dalam Variasi Posisi Vertikal	45
Gambar 4. 15. Gaya Geser Dasar X dalam Variasi Posisi Horizontal	47
Gambar 4. 16. Torsi Dasar Z dalam Variasi Posisi Horizontal	47
Gambar 4. 17. Gaya Geser Dasar X dalam Variasi Posisi Vertikal	48
Gambar 4. 18. Torsi Dasar Z dalam Variasi Posisi Vertikal	48
Gambar 4. 19. Periode Getar Alami dalam Variasi Kekakuan	50
Gambar 4. 20. Partisipasi Massa UX	50
Gambar 4. 21. Partisipasi Massa UY	51
Gambar 4. 22. Perpindahan Lantai Bangunan UX	52
Gambar 4. 23. Perpindahan Lantai Bangunan RZ	52

Gambar 4. 24. Perpindahan <i>Strongroom</i> UX.....	53
Gambar 4. 25. Perpindahan <i>Strongroom</i> RZ.....	53
Gambar 4. 26. Gaya Geser Peredam terhadap Waktu.....	55
Gambar 4. 27. Deformasi peredam terhadap waktu.....	55
Gambar 4. 28. Perbandingan deformasi terhadap gaya geser <i>gap</i> dan <i>hook</i> .....	56
Gambar 4. 29. Gaya Geser Dasar X pada Variasi Kekakuan.....	56
Gambar 4. 30. Torsi Dasar pada Variasi Kekakuan.....	57
Gambar 4. 31. Perpindahan Lantai Bangunan Arah UX.....	58
Gambar 4. 32. Perpindahan Lantai Bangunan RZ .....	58
Gambar 4. 33. Perpindahan <i>Strongroom</i> Arah UX.....	59
Gambar 4. 34. Perpindahan <i>Strongroom</i> Arah RZ.....	59
Gambar 4. 35. Gaya Geser Peredam Terhadap Waktu dalam Variasi Pembatasan Perpindahan.....	61
Gambar 4. 36. Deformasi Peredam Terhadap Waktu dalam Variasi Pembatasan Perpindahan.....	61
Gambar 4. 37. Deformasi Link Gap dan Hook Terhadap Gaya Geser dalam Variasi Pembatasan Perpindahan .....	62
Gambar 4. 38. Gaya Geser Dasar X dalam Variasi Batasan Lendutan.....	63
Gambar 4. 39. Torsi Dasar Z dalam Variasi Pembatasan Lendutan .....	63
Gambar 4. 40. Perpindahan Lantai Bangunan UX.....	65
Gambar 4. 41. Perpindahan Lantai Bangunan Arah RZ .....	65
Gambar 4. 42. Perpindahan <i>Strongroom</i> Arah UX .....	66
Gambar 4. 43. Perpindahan <i>Strongroom</i> RZ.....	66
Gambar 4. 44. Gaya Geser Dasar X.....	68
Gambar 4. 45. Torsi Dasar Z.....	68

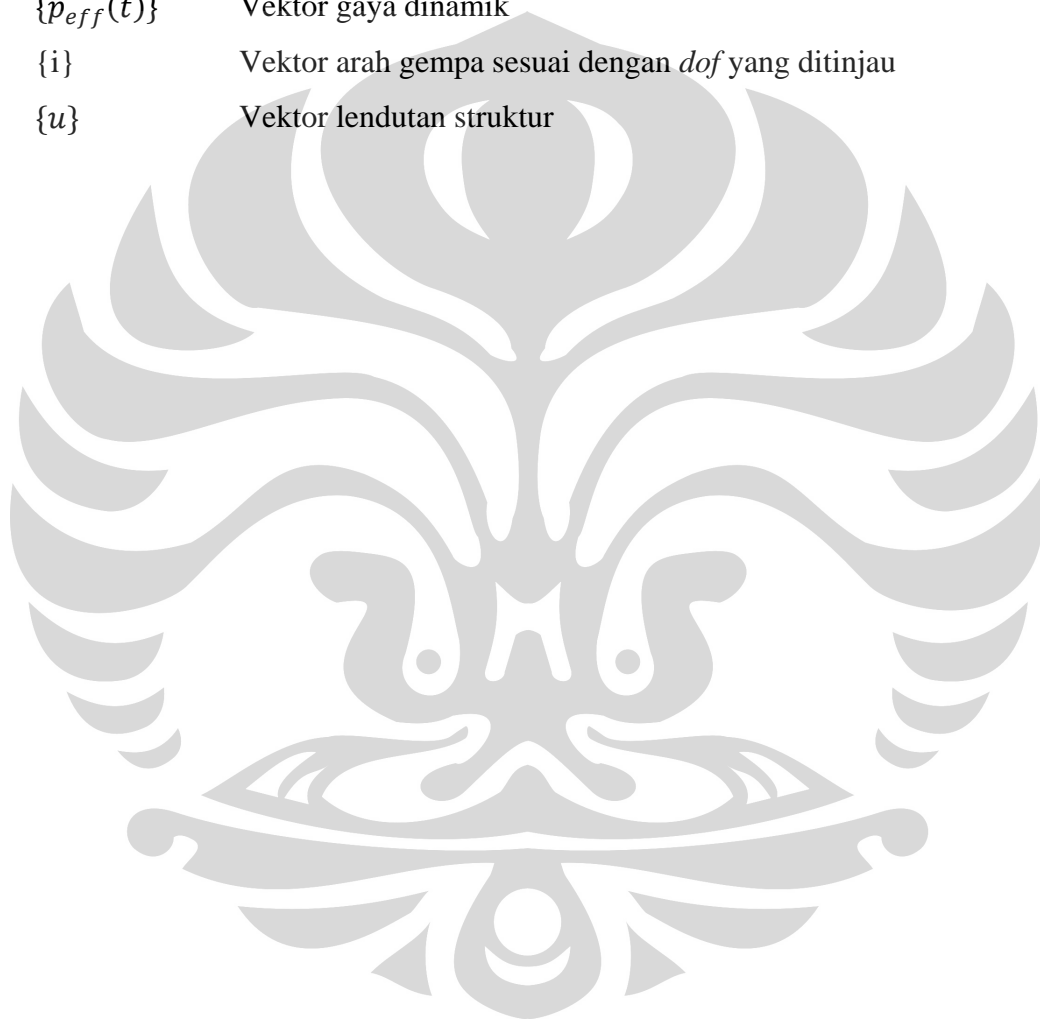
## DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1. Ringkasan Pembebanan .....	17
Tabel 3. 2. Faktor Pengali Elemen Struktur.....	20
Tabel 3. 3. Ringkasan Penggunaan <i>Link</i> .....	26
Tabel 3. 4. Variasi Permodelan.....	32
Tabel 4. 1. Signifikansi Selisih .....	35
Tabel 4. 2. Periode Getar Alami dalam Variasi Model (Satuan Detik) .....	36
Tabel 4. 3. Reaksi Dasar Bangunan .....	37
Tabel 4. 4. Perpindahan <i>Strongroom</i> Relatif Terhadap Lantai .....	45
Tabel 4. 5. Perpindahan <i>Strongroom</i> Relatif Terhadap Lantai .....	54
Tabel 4. 6. Perpindahan <i>Strongroom</i> Relatif Terhadap Lantai .....	59
Tabel 4. 7. Perpindahan <i>Strongroom</i> Relatif Terhadap Lantai .....	67
Tabel 4. 8. Variasi Posisi.....	70
Tabel 4. 9. Variasi Kekakuan.....	71
Tabel 4. 10. Variasi Pembatasan Lendutan <i>Strongroom</i> .....	71
Tabel 4. 11. Variasi Percepatan Gempa.....	72

## DAFTAR NOTASI

A	Simbol yang digunakan dalam variasi posisi, mewakili posisi 1, 5, 9, 13
B	Simbol yang digunakan dalam variasi posisi, mewakili posisi 2, 6, 10, 14
C	Simbol yang digunakan dalam variasi posisi, mewakili posisi 3, 7, 11, 15
D	Simbol yang digunakan dalam variasi posisi, mewakili posisi 4, 8, 12, 16
ECMOD	Percepatan gempa El Centro yang dimodifikasi terhadap respon spektrum gempa wilayah 3 tanah lunak SNI 1726-2002
$E_c$	Modulus elastisitas beton
$f_c'$	Kekuatan tekan beton
$I$	Inersia penampang
$r_z$	Respon perpindahan torsi arah z
$T_n$	Periode getar alami
$u_x$	Respon perpindahan arah x
$u_y$	Respon perpindahan arah y
$G''$	Modulus kehilangan dari peredam viskoelastik
$G'$	Modulus penyimpanan dari peredam viskoelastik
$\gamma_{beton}$	Berat jenis beton
$E_s$	Modulus elastisitas baja
$\{R_E\}$	Gaya luar yang bekerja pada persamaan getaran bebas tak teredam
$\{p_i\}$	Vektor eksitasi gempa
$\{\ddot{u}\}$	Vektor percepatan struktur
$\{\dot{u}\}$	Vektor kecepatan struktur
$\ddot{u}_g$	Percepatan tanah akibat gempa.
$\{\phi_n\}$	Vektor fungsi bentuk yang tidak bervariasi terhadap waktu
$A_n$	Konstanta integrasi yang dapat dihitung berdasarkan kondisi awal pada persamaan lendutan harmonik sederhana
$B_n$	Konstanta integrasi yang dapat dihitung berdasarkan kondisi awal pada persamaan lendutan harmonik sederhana
$[C]$	Matriks redaman, bersifat simetris dan semi definit positif
$G_e$	Modulus karet dari peredam viskoelastik
$G_g$	Modulus gelas dari peredam viskoelastik

$[M]$	Matriks massa, bersifat simetris dan semi definit positif
$q_n(t)$	Koordinat modal ke-n yang bervariasi terhadap waktu
$\{s\}$	Distribusi spasial dari percepatan gempa efektif
$\eta_v$	Faktor kehilangan
$\lambda_n$	Nilai eigen
$\omega_n$	Frekuensi modal
$[K]$	Matriks kekakuan bersifat simetris dan definit positif
$\{p_{eff}(t)\}$	Vektor gaya dinamik
$\{i\}$	Vektor arah gempa sesuai dengan <i>dof</i> yang ditinjau
$\{u\}$	Vektor lendutan struktur





## DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1. Periode Getar dan Partisipasi Massa dalam Variasi Posisi
- Lampiran 2. Perpindahan Bangunan pada Variasi Posisi
- Lampiran 3. Perpindahan *Strongroom* pada Variasi Posisi
- Lampiran 4. Reaksi Dasar pada Variasi Posisi
- Lampiran 5. Partisipasi Massa dan Periode Getar pada Variasi Kekakuan
- Lampiran 6. Perpindahan Lantai Bangunan dan *Strongroom* pada Variasi Kekakuan
- Lampiran 7. Reaksi Dasar pada Variasi Kekakuan
- Lampiran 8. Perpindahan Lantai Bangunan dan *Strongroom* pada Variasi Pembatasan Lendutan
- Lampiran 9. Reaksi Dasar pada Variasi Pembatasan Lendutan
- Lampiran 10. Perpindahan Lantai Bangunan dan *Strongroom* pada Variasi Percepatan Gempa
- Lampiran 11. Reaksi Dasar pada Variasi Percepatan Gempa

# BAB 1 PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang Masalah

Bank merupakan sebuah wadah yang berperan aktif dalam menunjang kegiatan pembangunan nasional dan regional. Pengertian bank menurut Menurut UU No. 10 Tahun 1998,

Bank adalah badan usaha yang menghimpun dana dari masyarakat dalam bentuk simpanan dan menyalurkannya kepada masyarakat dalam kredit dan atau bentuk-bentuk lainnya dalam rangka meningkatkan taraf hidup orang banyak. Sehingga, adanya bank atau tidak dalam suatu daerah berdampak langsung pada taraf hidup masyarakat.

Sebagian besar kegiatan transaksi pada bank dilakukan pada sebuah gedung. Pentingnya gedung yang aman dan tahan dari gangguan luar memberikan jaminan kegiatan di dalamnya dapat berlangsung terus menerus dan memiliki produktivitas yang baik. Nasabah dapat memiliki kepercayaan terhadap suatu bank jika bank tersebut mempunyai tingkat keamanan yang tinggi. Satu hal yang perlu diperhatikan untuk meningkatkan tingkat keamanan dan kenyamanan ini adalah dengan membangun sebuah *strongroom* pada bank.

*Strongroom* adalah sebuah ruangan yang memiliki pengamanan ketat untuk menyimpan uang, barang-barang berharga, dan dokumen penting. Semua barang yang disimpan di sana dimaksudkan untuk dilindungi dari pencurian, pemakaian sembarangan, kebakaran, bencana alam, mirip seperti brankas. Namun, perbedaannya dengan brankas, *strongroom* dibangun terintegrasi dengan gedung bank dilapisi dinding yang diperkuat serta sebuah pintu yang memiliki kombinasi penguncian yang rumit. Dindingnya biasanya memiliki tebal 1 ft (31 cm) dan pintunya sendiri memiliki tebal 3,5 ft (1,1 m).

Dalam pembangunan praktisnya, *strongroom* dibangun dengan material beton bertulang, dan kadang ditambah peredam untuk mengurangi efek seismik pada struktur tersebut. Biasanya, para praktisi di Indonesia tidak ambil pusing dalam pembangunan struktur *strongroom*, dan *menginput* data struktur ini sebagai beban terbagi merata tanpa memperhitungkan sumbangan kekakuan yang berarti.

Padahal, dengan memiliki dinding dan pintu yang tebal, kekakuan dari *strongroom* ini sendiri bisa mencapai ratusan kilonewton per meter. Apalagi jika *strongroom* ini dibangun tidak segaris dengan sumbu pusat massa gedung, maka akan terjadi eksentrisitas dari kekakuan struktur. Hal ini akan memperlemah kekuatan struktur apabila dikenai oleh gaya dinamik. Untuk itu, pada skripsi ini, perilaku struktur *strongroom* ini dimodelkan dengan memperhitungkan sumbangan kekakuan dan massanya terhadap struktur gedung, dengan tambahan perangkat khusus berupa peredam viskoelastik di sekeliling dindingnya. Peredam ini berguna dalam untuk mengontrol struktur terhadap adanya gaya dinamik yang bekerja pada struktur.

Dalam beberapa tahun terakhir, konsep dari kontrol struktur telah mengambil peran penting dalam desain seismik dari suatu struktur. Filosofinya adalah menyediakan desain yang ekonomis dan aman dengan menambahkan sebuah sistem perangkat inovatif untuk mereduksi gaya dan lendutan pada struktur. Dengan memodifikasi properti dinamik dari sistem, perangkat ini bertujuan untuk mengontrol respon dan *demand* disipasi energi pada member struktur. Cara kerja dari perangkat khusus ini dipicu oleh gerakan dari struktur dan, dipandu oleh skema kontrol, mereduksi respon total dari sistem dan akan mencapai goal design dalam mitigasi kerusakan seismik.

Berbagai metode kontrol respon telah diimplementasikan dalam prosedur desain dan secara umum dapat dibedakan menjadi tiga bagian: *passive control*, *active control*, dan *semi-active control*. Di antara skema ini, *passive control* dikembangkan paling awal dan telah digunakan dalam dunia praktik desain seismik karena hanya membutuhkan perawatan minimum dan tidak membutuhkan energi listrik untuk mengoperasikannya.

## 1.2 Tujuan Penulisan

Tujuan penulisan skripsi ini adalah menganalisis respon dinamik struktur bank secara tiga dimensi yang dipasangkan *strongroom* dengan peredam eksentris berupa material viskoelastik yang lendutannya dibatasi, dengan bantuan program SAP.

### 1.3 Metode Penelitian

Penulisan skripsi ini dilakukan melalui tahapan-tahapan kerja sebagai berikut:

1. Penelusuran literatur

Dalam tahapan ini, penulis mempelajari dasar-dasar teori dari analisis dinamik melalui buku-buku, jurnal, tugas akhir, yang sudah dikembangkan mengenai penggunaan peredam gempa viskoleasik pada struktur bangunan tiga dimensi.

2. Modelisasi bangunan tiga dimensi

Tahapan ini membuat model struktur bank secara tiga dimensi yang disederhanakan.

3. Input Pemrograman

Pada tahapan ini, melakukan input data yang telah dimodelkan ke dalam software SAP 2000 v11. Diagram alir dari input pemrograman ini akan dijelaskan pada bab III

4. Simulasi

Hasil dari simulasi ini akan diperoleh respon dinamik struktur berupa lendutan setiap modal analisis, partisipasi massa, dan respon dinamik lainnya.

5. Analisa dan Kesimpulan

Pada tahapan ini, dipaparkan mengenai analisis terhadap respon yang didapat pada bab sebelumnya.

### 1.4 Ruang Lingkup Pembahasan

Pembahasan masalah pada skripsi ini adalah model struktur bangunan gedung bank lima lantai secara tiga dimensi, dengan sebuah *strongroom*. Simulasi yang dilakukan meliputi struktur tanpa *strongroom*, struktur dengan *strongroom* yang modelkan sebagai beban merata, *strongroom* yang dimodelkan sebagai dinding beton, dan *strongroom* yang dimodelkan sebagai dinding beton dengan

peredam viskoelastik. Keempat struktur ini akan diteliti dengan analisis respon dinamik menggunakan analisa riwayat waktu (*time history analysis*) dengan bantuan software SAP 2000 v11. Adapun rekaman percepatan gempa yang digunakan adalah gempa El-Centro (tahun 1941) arah timur barat dengan modifikasi terhadap percepatan gempa wilayah 3 tanah lunak di Indonesia.

## **1.5 Sistematika penulisan**

### **Bab 1 Pendahuluan**

Ada bab ini dijelaskan mengenai latar belakang, tujuan, metode penulisan, dan ruang lingkup pembahasan dari penelitian pada skripsi ini.

### **Bab 2 Tinjauan Pustaka**

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai uraian singkat teori-teori dinamika struktur meliputi masalah beban dinamik, parameter-parameter dinamik, penggunaan peredam pada struktur, dan memaparkan secara singkat percepatan gempa El-Centro.

### **Bab 3 Metode Penelitian dan Permodelan**

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai alur berpikir dalam penelitian ini, kemudian penjelasan parameter yang akan dimasukkan, serta penjabaran hasil yang diinginkan untuk diteliti. Di sini juga akan dijabarkan mengenai data bangunan yang akan dimasukkan, denah bangunan, model bangunan tiga dimensi, dan proses analisis dengan menggunakan program SAP 2000 v11.

### **Bab 4 Simulasi dan Analisis**

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai hasil dari analisis dinamik, bagaimana efek dari perilaku struktur jika diberikan berbagai parameter yang telah dijabarkan pada bab III.

### **Bab 5 Kesimpulan dan Saran**

Pada bab ini akan dimasukkan kesimpulan dari analisis yang telah dijabarkan pada bab sebelumnya. Saran atau tambahan yang penulis pikirkan dalam penyempurnaan penelitian juga tercantum pada bagian ini.

## BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Persamaan Dinamik

Getaran tanah akibat gempa bumi merupakan peristiwa dinamik, sehingga dalam menganalisis struktur terhadap beban gempa lebih tepat jika menggunakan analisis dinamik dibandingkan dengan analisis statik. Percepatan gempa merupakan gaya dinamik nondeterministik yaitu gaya dinamik yang bila diulang tidak akan menghasilkan gaya yang sama dengan gaya sebelumnya. Persamaan umum kesetimbangan dinamik dari sebuah struktur bererajat kebebasan banyak (MDOF) adalah:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{p_{eff}(t)\} \dots \quad (2.1)$$

di mana:

$[M]$  = matriks massa, bersifat simetris dan semi definit positif

$[C]$  = matriks redaman, bersifat simetris dan semi definit positif

$[K]$  = matriks kekakuan bersifat simetris dan definit positif

$\{\ddot{u}\}$  = vektor percepatan struktur

$\{\dot{u}\}$  = vektor kecepatan struktur

$\{u\}$  = vektor lendutan struktur

$\{p_{eff}(t)\}$  = vektor gaya dinamik

Jika struktur bangunan dikenakan gaya luar yang berupa beban dinamik, maka ada tiga komponen gaya yang melawan beban dinamik tersebut, yaitu:

- Gaya inersia (kelembaman) yang merupakan perkalian massa dan percepatan struktur.
- Gaya redaman yang merupakan perkalian koefisien redaman dan kecepatan struktur
- Gaya elastik yang merupakan perkalian kekakuan dan lendutan (*displacement*) struktur.

Beban gempa pada dasarnya merupakan gaya inersia yang bekerja di pusat massa akibat percepatan tanah yang disebabkan oleh gempa. Pada saat terjadi gempa, tanah dan bangunan mengalami percepatan. Gaya inersia bekerja sesuai

dengan percepatan total struktur yaitu vektor  $\{i\}$  yang menyatakan pengaruh dari pergerakan tanah terhadap DOF struktur. Persamaan dinamik gempa menjadi:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = - [M]\{i\}\ddot{u}_g \dots \quad (2.2)$$

di mana  $\{i\}$  adalah vektor arah gempa sesuai dengan *DoF* yang ditinjau dan  $\ddot{u}_g$  adalah percepatan tanah akibat gempa.

Respon kinematik struktur yang berupa lendutan, kecepatan dan percepatan struktur didapat dengan menyelesaikan persamaan dinamik. Sebelum menyelesaikan persamaan dinamik, perlu dilakukan modelisasi massa kekakuan dan redaman struktur untuk mendapatkan matriks massa, kekakuan dan redaman struktur.

## 2.2 Analisis Riwayat Respon

Pada bagian ini akan dikembangkan prosedur analisis untuk menentukan respon dari struktur terhadap gerakan tanah akibat gempa  $\ddot{u}_g(t)$ , identik pada segala titik dari struktur.

### 2.2.1. Karakteristik Modal

Persamaan dinamik biasa untuk MDOF, dapat dilihat sebagai berikut:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{R_E\} \quad (2.3)$$

Pada persamaan getaran bebas tak teredam, dengan gaya luar yang bekerja  $\{R_E\} = 0$  dan struktur tidak teredam ( $[C] = 0$ ), permasalahan struktur diformulasikan:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{0\} \quad (2.4)$$

Untuk menyelesaikan persamaan diatas, maka diambil persamaan lendutan sebagai berikut:

$$\{u_{n(t)}\} = \sum_{n=1}^N \{\phi_n\} q_n(t) \quad (2.5)$$

dimana:  $\{\phi_n\}$  = vektor fungsi bentuk yang tidak bervariasi terhadap waktu

$q_n(t)$  = Koordinat modal ke-n yang bervariasi terhadap waktu

Fungsi  $q_n(t)$  merupakan fungsi lendutan harmonik sederhana yaitu:

$$q_n(t) = A_n \cos(\omega_n t) + B_n \sin(\omega_n t) \quad (2.6)$$

dimana  $A_n$  dan  $B_n$  adalah konstanta integrasi yang dapat dihitung berdasarkan kondisi awal. Dengan mengkombinasikan persamaan (2.5) dan (2.6) serta mensubstitusikannya ke dalam persamaan (2.4), maka akan diperoleh persamaan berikut:

$$[k\phi_n - \omega_n^2 m\phi_n]\{q_n(t)\} = 0 \quad (2.7)$$

Solusi trivial dari persamaan diatas saat  $q_n(t) = 0$  akan menghasilkan  $u(t) = 0$  yang berarti tidak ada pergerakan dalam struktur. Solusi non trivial persamaan diatas adalah sebagai berikut:

$$([K] - \omega_n^2 [M])\{\phi_n\} = 0 \quad (2.8)$$

$$|[K] - \omega_n^2 [M]| = 0 \quad (2.9)$$

$$|[K] - \lambda_n [M]| = 0 \quad (2.10)$$

dimana  $\lambda_n = \omega_n^2$  merupakan *eigenvalue*.

Penyelesaian persamaan polinomial ini akan menghasilkan N akar real dan positif untuk masing-masing  $\lambda_n$ , karena matriks massa dan matriks kekakuan struktur merupakan matriks simetris dan definitif positif. Akar-akar real ini akan menghasilkan n buah frekuensi getar alami yang disebut sebagai nilai eigen dimana  $\lambda_1 \leq \lambda_2 \leq \lambda_3 \leq \dots \leq \lambda_n$ . Jika nilai eigen tersebut dimasukkan ke dalam persamaan (2.5), maka akan diperoleh N buah vektor independen  $\phi_n$ , yang dikenal sebagai eigen vektor atau pola getar alami.

### 2.2.2 Ekspansi Modal dari Lendutan dan Gaya

Lendutan  $\{u\}$  dari sebuah sistem *N-DOF* dapat diekspresikan sebagai superposisi dari tiap kontribusi modal,

$$\{u(t)\} = \sum_{n=1}^N \phi_n q_n(t) \dots \quad (2.11)$$

di mana

$\phi_n$  = moda getaran dari sistem, hasil solusi nilai eigen

$q_n(t)$  = fungsi lendutan yang bervariasi terhadap waktu, dinyatakan dalam fungsi harmonik.



Distribusi spasial dari percepatan gempa efektif  $\{p_{eff}(t)\}$  didefinisikan sebagai  $\{s\} = [M]\{i\}$ . Distribusi gaya ini dapat diekspansi sebagai jumlah dari distribusi gaya inersia modal  $\{s_n\}$

$$[M]\{i\} = \sum_{n=1}^N \Gamma_n [M]\phi_n \dots \quad (2.12)$$

di mana

$$\Gamma_n = \frac{L_n}{M_n} \quad L_n = \{\phi_n\}^T [M]\{i\} \quad M_n = \{\phi_n\}^T [M]\{\phi_n\} \dots \quad (2.13)$$

Persamaan (2.13) untuk koefisien  $\Gamma_n$  dapat diturunkan dengan melakukan premultiply kedua sisi pada persamaan (2.12) oleh  $\{\phi_n\}^T$  dan menggunakan properti ortogonalitas dari tiap modal. Kontribusi dari moda ke-n terhadap vektor eksitasi  $[M]\{i\}$  adalah

$$\{s_n\} = \Gamma_n [M]\{\phi_n\} \dots \quad (2.14)$$

yang mana independen terhadap bagaimana cara mode dinormal-isasi.

### 2.2.3 Respon Modal

Persamaan modal untuk eksistensi gempa dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\ddot{D}_n + 2\zeta_n \omega_n \dot{D}_n + \omega_n^2 D_n = -\{\phi_n\}^T [M]\{i\} \ddot{u}_g(t) \quad (2.15)$$

dengan

$$q_n(t) = \Gamma_n D_n(t) \dots \quad (2.16)$$

Dari persamaan ini, maka total kontribusi dari moda ke-n pada nilai lendutan adalah

$$\{u(t)\} = \sum_{n=1}^N \phi_n q_n(t) = \sum_{n=1}^N \Gamma_n \{\phi_n\} D_n(t) \dots \quad (2.17)$$

Sehingga, kontribusi moda ke-n  $r_n(t)$  terhadap setiap kuantitas respon  $r(t)$  ditentukan dalam persamaan berikut,

$$r_n(t) = \sum_{n=1}^N r_n(t) = \sum_{n=1}^N r_n^{st} A_n(t) \quad (2.18)$$

### 2.2.4 Analisis Riwayat Waktu Nonlinier

Solusi analitik untuk setiap persamaan getaran pada sistem struktur berderajat kebebasan banyak tidak selalu berhasil jika eksitasi atau gaya yang diberikan  $\{p_{eff}(t)\}$  bervariasi terhadap waktu atau jika sistem tidak linier. Untuk tiap kasus seperti ini dibutuhkan metode numerik dengan metode langkah waktu untuk integrasi dari persamaan diferensialnya.

Tujuan untuk menyelesaikan sistem persamaan diferensial sistem struktur berderajat kebebasan banyak secara numerik

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + \{f_s(u, \dot{u})\} = \{p(t)\} \quad (2.19)$$

dengan kondisi awal

$$\{u\} = \{u(0)\} \text{ dan } \{\dot{u}\} = \{\dot{u}(0)\} \quad (2.20)$$

pada saat  $t = 0$ . Solusinya akan menyediakan vektor lendutan  $\{u(t)\}$  sebagai fungsi dari waktu. Skala waktu dibagi menjadi beberapa urutan dari langkah waktu, biasanya berupa durasi konstan  $\Delta t$ . Eksitasi didefinisikan sebagai waktu diskret  $t_i = i \Delta t$ ; pada waktu ini, dilambangkan sebagai waktu  $i$ , vector eksitasi adalah  $\{p_i\} \equiv \{p(t_i)\}$ . Responnya akan ditentukan pada waktu yang sama dan dilambangkan  $\{u_i\} \equiv \{u(t_i)\}$ ,  $\{\dot{u}_i\} \equiv \{\dot{u}(t_i)\}$ , dan  $\{\ddot{u}_i\} \equiv \{\ddot{u}(t_i)\}$ .

Dimulai dengan mengetahui respon dari sistem pada waktu I, maka persamaan getarannya menjadi

$$[M]\{\ddot{u}\}_i + [C]\{\dot{u}\}_i + \{f_s\}_i = \{p\}_i \quad (2.21)$$

metode langkah waktu memudahkan kita untuk melangkah ke depan dan menentukan respon  $\{u\}_{i+1}$ ,  $\{\dot{u}\}_{i+1}$ , dan  $\{\ddot{u}\}_{i+1}$  dari sistem waktu  $i + 1$ :

$$[M]\{\ddot{u}\}_{i+1} + [C]\{\dot{u}\}_{i+1} + \{f_s\}_{i+1} = \{p\}_{i+1} \quad (2.22)$$

Ketika diaplikasikan secara sukses dengan  $i = 0, 1, 2, 3, \dots$  prosedur metode langkah waktu memebrikan respon yang diinginkan pada tiap waktu instan  $i = 1, 2, 3, \dots$ . Kondisi awal yang diketahui saat  $i = 0$ , merupakan hal yang penting untuk memulai prosedur ini.

Penyelesaian dari metode langkah waktu ini dapat menggunakan integrasi langsung dengan menggunakan metode *central difference* dan metode *Newmark*.

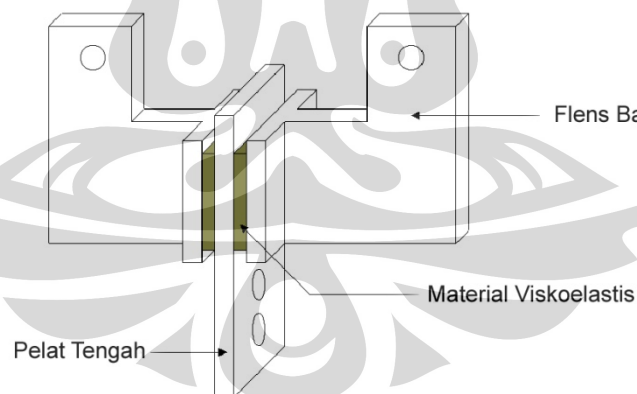
### 2.3 Peredam Viskoelastik

Properti dari peredam viskoelastik biasanya digambarkan dalam modulus penyimpanan (modulus storage)  $G'$ , modulus kehilangan (loss modulus)  $G''$ , dan faktor kehilangan (loss factor)  $\eta_v$  (Mahmoodi 1969), dan sebagainya. Pada umumnya semua properti ini bergantung pada frekuensi beban dan temperatur lingkungan dan bisa dideskripsikan melalui berbagai metode permodelan viskoelastik.

Untuk aplikasi praktis, telah didemonstrasikan bahwa properti dari peredam viskoelastik dapat diambil melalui analisis regresi pada data tes yang memasukkan nilai frekuensi dan temperatur udara (Chang et al 1996). Sebagai contoh, properti peredam material viskoelastik 3M ISD110 diekspresikan sebagai:

$$G' = e^{10,17443} \times T^{-3,10205} \times F^{0,475466}$$

$$\eta_v \approx 1,2 \dots \quad (2.23)$$



Gambar 2. 1. Konfigurasi dari Peredam Viskoelastik  
Sumber: K.C. Chang, Y.Y. Lin, M.L. Lai (1998)

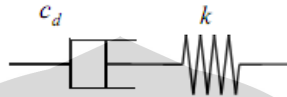
#### 2.3.1 General Linear Model

Persamaan konvensional untuk material viskoelastis yang berperilaku linier adalah berupa persamaan diferensial biasa yang menghubungkan turunan waktu dari tegangan dan regangan:

$$\tau(t) + \sum_{m=1}^M a_m \frac{d^m \tau(t)}{dt^m} = b_0 \gamma(t) + \sum_{n=1}^N b_n \frac{d^n \tau(t)}{dt^n} \quad (2.24)$$

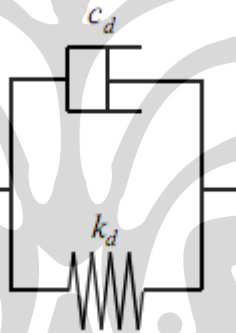
di mana  $\tau(t)$  dan  $\gamma(t)$  merupakan tegangan dan regangan geser, dan  $a_m$  dan  $b_n$  adalah koefisien berupa konstanta. Maxwell dan Kelvin memberikan 2 penurunan yang sederhana dengan menggunakan satu suku turunan pertama saja:

$$\text{Maxwell Model: } \tau(t) + a \frac{d\tau(t)}{dt} = G\gamma(t) \dots \quad (2.25)$$



Gambar 2. 2. Ilustrasi Model Maxwell

$$\text{Kelvin Model: } \tau(t) = G_0 \gamma(t) + G_1 \frac{d\gamma(t)}{dt} \dots \quad (2.26)$$



Gambar 2. 3. Ilustrasi Model Kelvin

### 2.3.2 Model Modulus Kompleks

Salah satu alternatif untuk menggambarkan perilaku material viskoelastik di bawah pengaruh beban dinamis adalah menggunakan modulus kompleks, yang merupakan fungsi dari frekuensi eksitasi, untuk menghubungkan tegangan dan regangan. Ketika sebuah material viskoelastik diberikan beban sinusoidal dengan frekuensi  $\omega$ , respon tegangan dan regangan geser juga berupa fungsi harmonik dengan frekuensi yang sama namun berbeda fase. Zhang et al. (1989) menunjukkan hubungan tegangan-regangan sebagai berikut

$$\tau(t) = G'(\omega)\gamma(t) + \frac{G''(\omega)}{\omega} \dot{\gamma}(t) \dots \quad (2.27)$$

Pada ekspresi ini  $G'(\omega)$ , merepresentasikan modulus elastis, yang didefinisikan sebagai *modulus penyimpanan* dari material, menyatakan besar energi yang pulih (*recoverably energy*) selama deformasi. Koefisien redaman dari peredam ini adalah  $G''(\omega)/\omega$  dan  $G''(\omega)$  adalah modulus kehilangan yang menyatakan besar energi yang terdisipasi selama siklus gerakan terjadi. Variabel yang lain yang juga penting adalah  $\eta$ , yang didefinisikan sebagai  $\eta(\omega) = G''(\omega)/G'(\omega)$ , yang memberikan besar dari disipasi energi dari material viskoelastik. Sehingga, modulus kompleksnya dituliskan sebagai:

$$G(\omega) = G'(\omega) + iG''(\omega) \quad (2.28)$$

Pada penelitian lanjutan, dibutuhkan variable  $G(t)$  yaitu modulus relaksasi tegangan, yang dapat ditentukan secara eksperimen untuk setiap material yang diketahui. Shen dan Soong menyatakannya sebagai:

$$G(t) = G_e + \frac{G_g - G_e}{(1 + \frac{t}{t_0})^\alpha} \dots \quad (2.29)$$

Dalam ekspresi ini,  $G_e$  dan  $G_g$  dinamakan modulus karet (*rubbery modulus*) dan modulus gelas (*glassy modulus*), dengan  $t_0$  merupakan waktu relaksasi, dan  $\alpha$  adalah konstanta yang menggambarkan transisi antara daerah karet dan gelas.

Setelah kita mendapatkan model konstitutif untuk menggambarkan respon geser dari peredam material viskoelastik, hubungan gaya-displacement dapat dibuat berdasarkan persamaan (2.15). Gaya yang disediakan oleh tiap peredam viskoelastik direpresentasikan sebagai fungsi linier dari displacement  $u$  dan kecepatan  $\dot{u}$  dari peredam,

$$F = \bar{k}(\omega)u + \bar{c}(\omega)\dot{u} \dots \quad (2.30)$$

di mana kekakuan  $\bar{k}$  dan redaman  $\bar{c}$  merupakan fungsi dari modulus penyimpanan dan modulus kehilangan sebagai berikut:

$$\bar{k}(\omega) = bG'(\omega), \quad \bar{c}(\omega) = bG''(\omega)/\omega \dots \quad (2.31)$$

dengan  $b$  adalah faktor ukuran dari perangkat yaitu rasio luas dengan ketebalan lapisan viskoelastik. Sehingga, persamaan gerakan dari keseluruhan sistem dapat ditulis dalam bentuk

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + ([C] + [\bar{C}])\{\dot{u}(t)\} + ([K] + [\bar{K}])\{u(t)\} = \{f(t)\} \dots \quad (2.32)$$

di mana  $[M]$ ,  $[C]$ ,  $[K]$  adalah matriks massa, redaman dan kekakuan dari struktur asli,  $f$  adalah eksitasi, dan matriks konstanta  $[\bar{C}]$  dan  $[\bar{K}]$  merepresentasikan redaman dan kekakuan yang disumbangkan oleh peredam.

Soong et al (1995) mengimplementasikan modal energi regangan untuk memperkirakan frekuensi modal dan rasio redaman yang termodifikasi. Prosedurnya dimulai dari analisis nilai eigen dari struktur asli untuk menghitung frekuensi  $\omega_n$  dan mode shape  $\phi_n$  untuk tiap modal ke- $n$ . Persamaannya dinyatakan sebagai berikut:

$$\zeta_n = \frac{\eta(\omega_n) E_v}{2 E_n} \dots \quad (2.32)$$

dengan  $\eta(\omega_n)$  adalah faktor kehilangan pada frekuensi mode ke- $n$ ,  $E_v$  adalah energi maksimum yang tersimpan pada peredam viskoelastik, dan  $E_n$  adalah energi regangan total dari sistem termasuk peredam untuk tiap mode ke- $n$ . Kedua energi ini dapat dihitung dalam persamaan berikut:

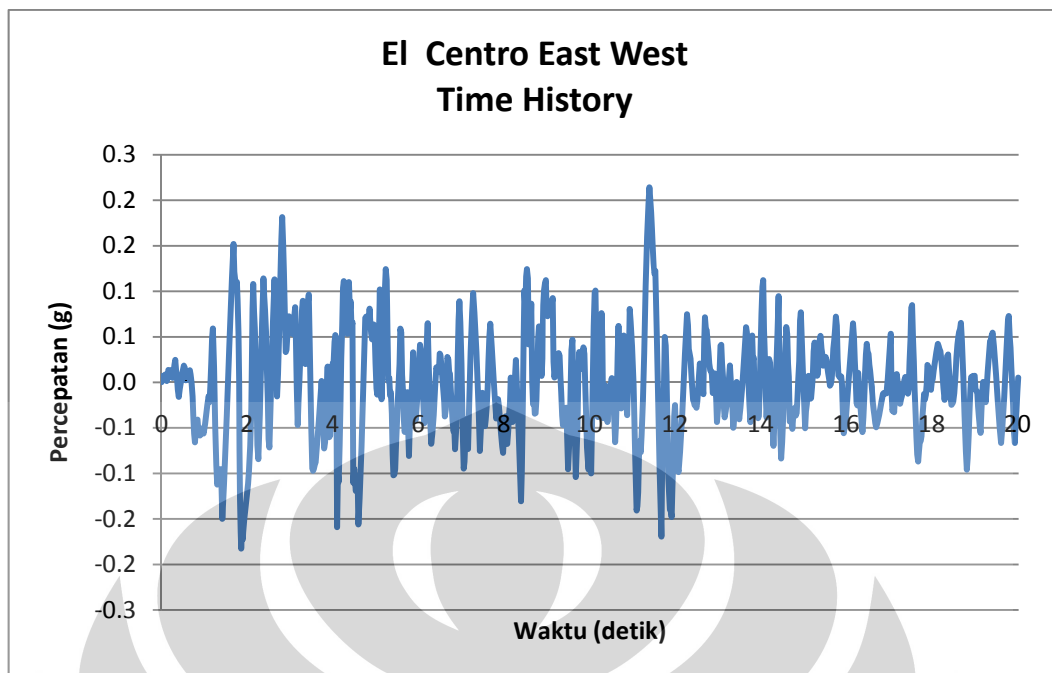
$$E_v = \{\phi_n\}^T [\bar{K}] \{\phi_n\}, \quad E_n = \{\phi_n\}^T ([K] + [\bar{K}]) \{\phi_n\} \dots \quad (2.33)$$

Frekuensi modal termodifikasi untuk tiap mode ke- $n$  diperkirakan dengan menggunakan persamaan berikut.

$$\omega_n = \left[ \frac{\{\phi_n\}^T ([K] + [\bar{K}]) \{\phi_n\}}{\{\phi_n\}^T [M] \{\phi_n\}} \right]^{1/2} \dots \quad (2.34)$$

#### 2.4. Percepatan Gempa El-Centro

Dalam melakukan analisis gempa, kita memerlukan data yang akan dimasukkan sebagai eksitasi percepatan gempa. Untuk itu, diperlukan data rekaman yang terdapat dalam literatur yang dijadikan acuan sebagai percepatan gempanya. Sebagai berikut.

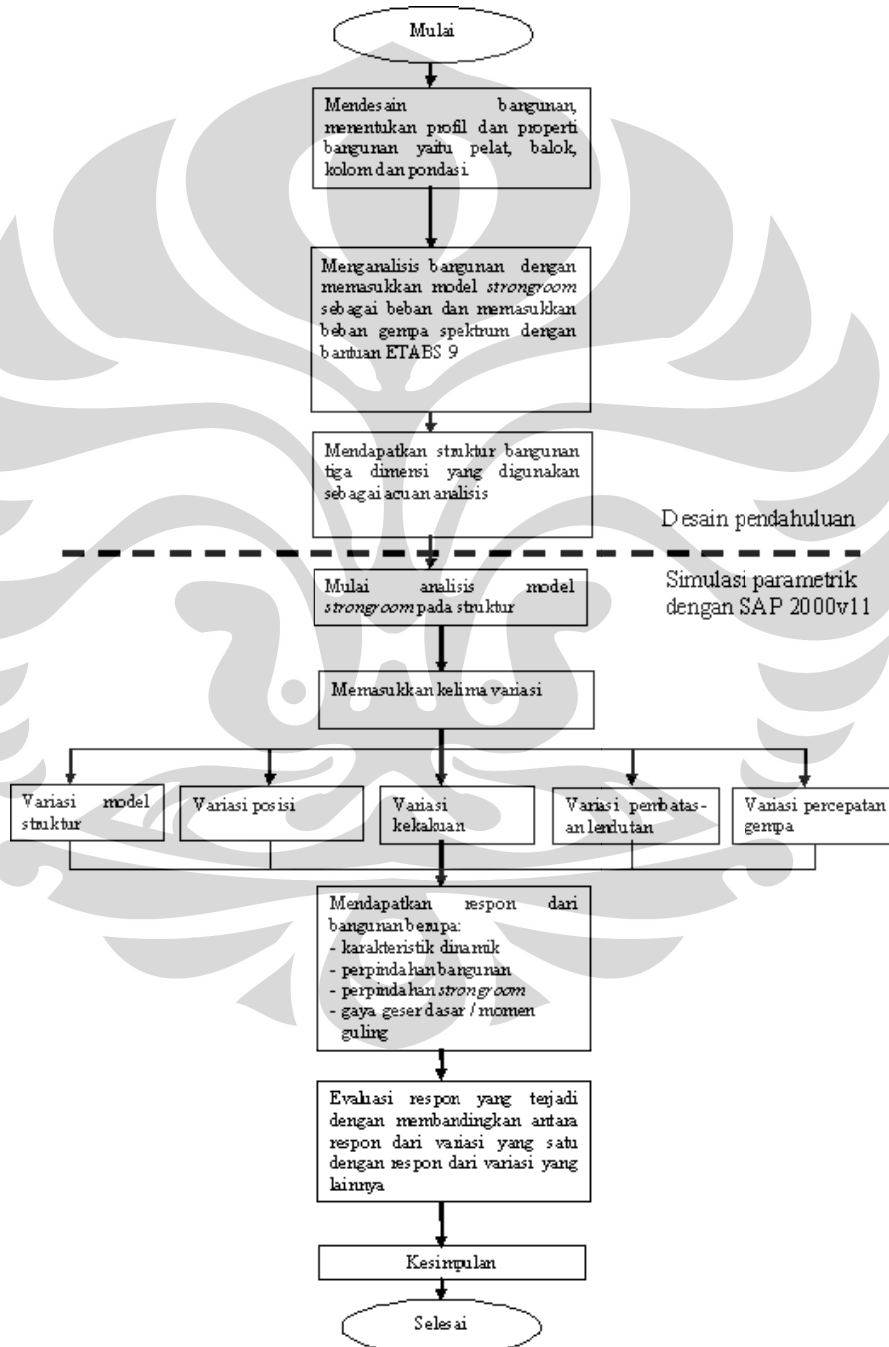


Gambar 2. 4. Eksitasi gempa El-Centro komponen E-W  
Sumber: Vibrationdata El Centro Earthquake

## BAB 3 METODE PENELITIAN DAN PERMODELAN

### 3.1 Alur Berpikir

Secara singkat, metode penelitian pada skripsi ini dinyatakan dalam diagram berikut



Gambar 3. 1. Alur Berpikir



### 3.2 Permodelan Struktur

Seperti yang dijelaskan pada Bab I, penulis hendak meneliti bagaimana respon dari bangunan yang jika kekakuan salah satu ruangnya jauh lebih besar daripada kekakuan ruangan lainnya pada struktur secara keseluruhan. Oleh karena itu, dibutuhkan permodelan struktur yang rinci untuk dapat melaksanakan penelitian ini.

#### 3.2.1 Pembebanan

Pembebanan pada struktur didasarkan pada Pedoman Perencanaan Pembebanan untuk Rumah dan Gedung, SKBI-1.3.53.1987. Selain pembebanan gempa yang akan dijelaskan selanjutnya, pada skripsi ini menggunakan tipe-tipe beban sebagai berikut:

a. Beban mati dan beban mati tambahan

Beban mati adalah berat dari seluruh bagian dari struktur yang bersifat tetap. Beban mati akan diperhitungkan secara otomatis dari program, setelah tiap dimensi dan properti penampang balok, pelat, kolom, dan dinding dimasukkan terlebih dahulu. Sedangkan beban mati tambahan muncul akibat berat dari elemen nonstruktural. Beban mati tambahan yang digunakan antara lain partisi dan penutup lantai ( $1,1 \text{ kN/m}^2$ ), mortar lantai ( $0,2 \text{ kN/m}^2$ ), serta beban pemasangan peralatan elektrikal dan mekanikal ( $1 \text{ kN/m}^2$ )

b. Beban hidup

Beban hidup adalah beban yang terjadi akibat penghunian atau penggunaan struktur gedung, baik akibat beban yang berasal dari orang maupun barang yang dapat berpindah, atau mesin dan peralatan serta komponen yang tidak merupakan bagian yang tetap dalam struktur yang dapat diganti selama masa hidup dari struktur gedung tersebut. Struktur yang dirancang merupakan struktur bangunan perkantoran bank, maka pada lantai sebesar  $2,5 \text{ kN/m}^2$  dan  $\text{kN/m}^2$  untuk lantai atap.

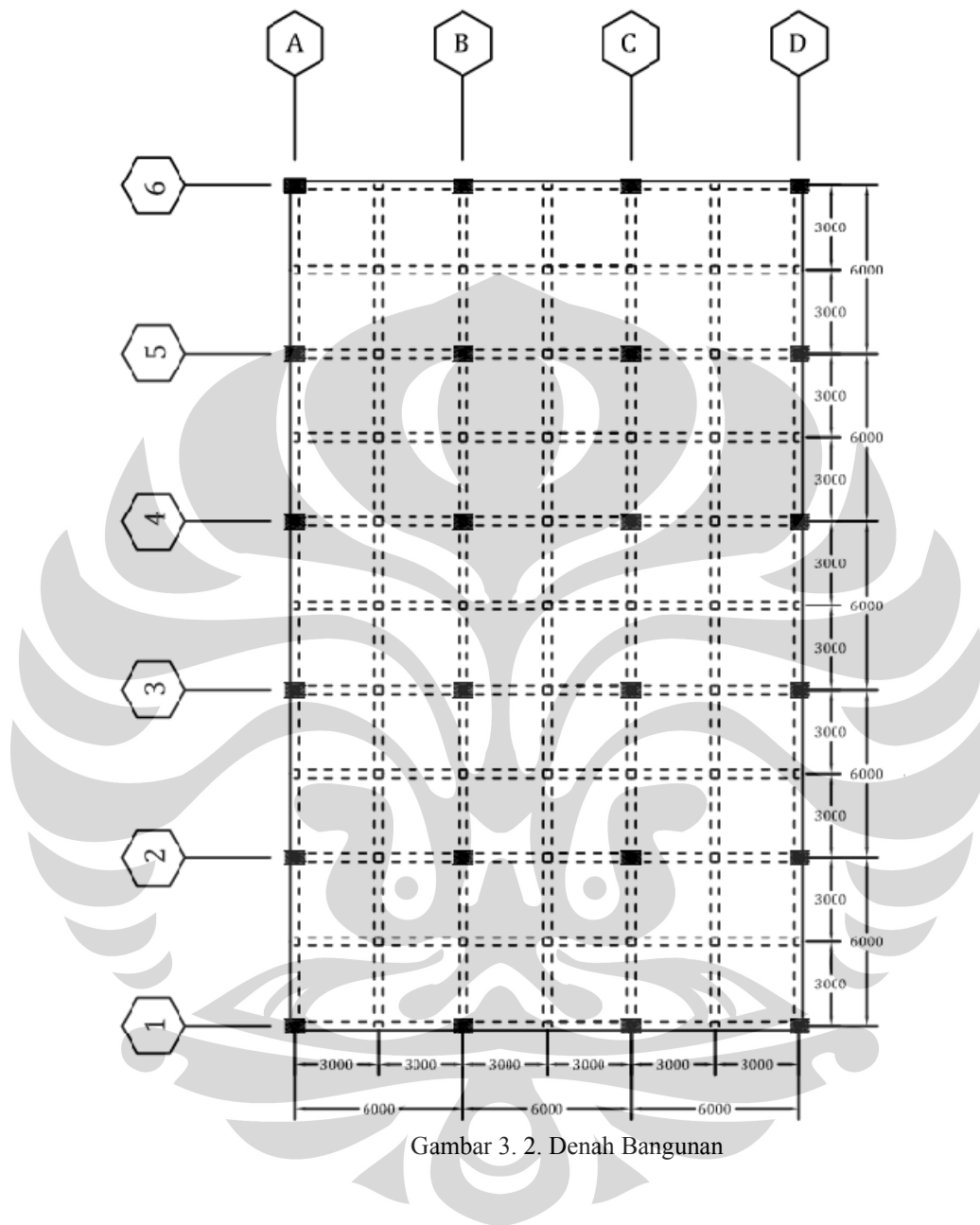
Tabel 3. 1. Ringkasan Pembebanan

Beban Hidup	
a. Lantai	2,5 kN/m <sup>2</sup>
b. Atap	1 kN/m <sup>2</sup>
Beban Mati (Tambahan)	
	2,3 kN/m <sup>2</sup>
a. Partisi	1,1 kN/m <sup>2</sup>
b. Mortar	0,2 kN/m <sup>2</sup>
c. ME	1 kN/m <sup>2</sup>

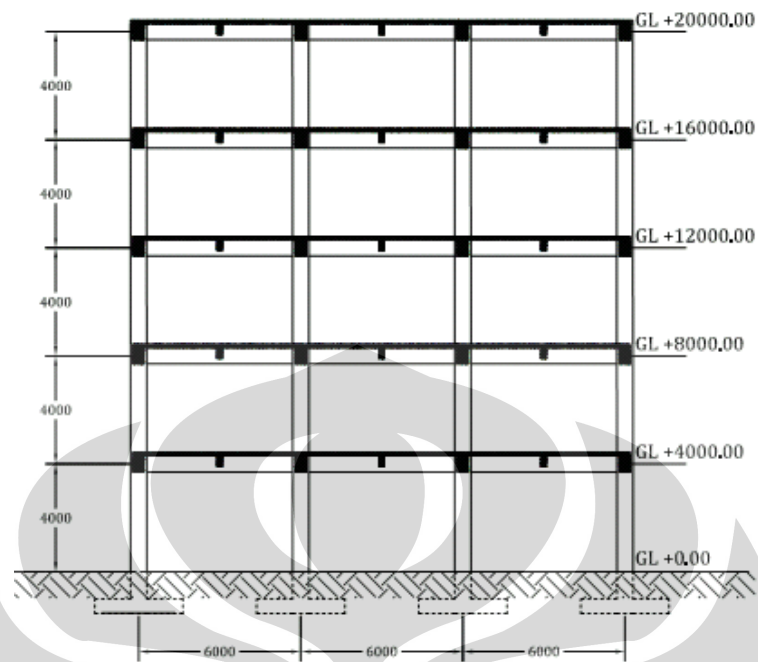
### 3.2.2 Geometri dan Properti Struktur

Pada skripsi ini, akan digunakan gedung bank berupa struktur beton tiga dimensi dengan spesifikasi dan gambar sebagai berikut:

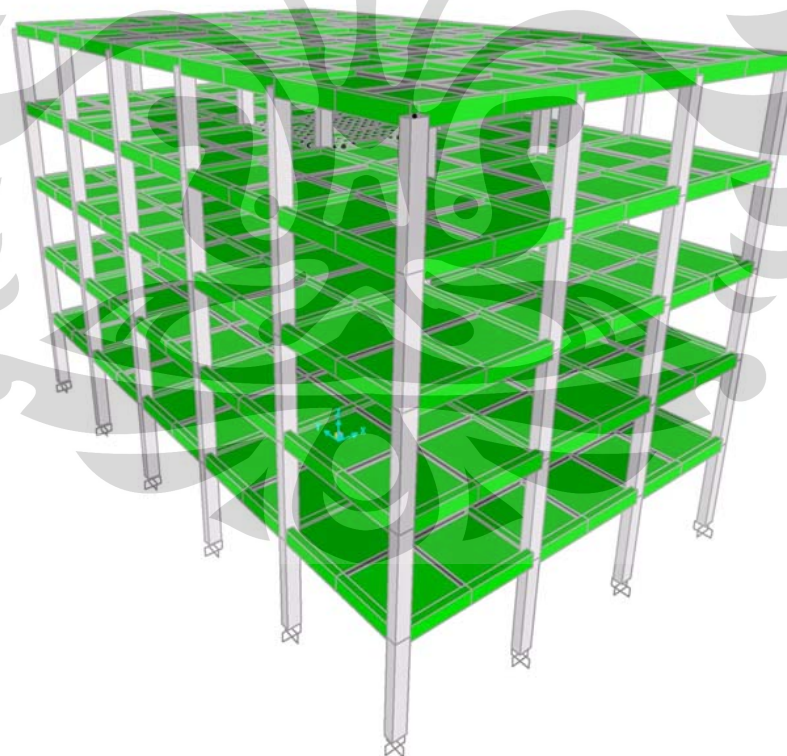
- Luas Bangunan : 18 x 30 = 540 m<sup>2</sup>
- Tinggi Bangunan : 20 m
- Jumlah Tingkat : 5 Tingkat
- Beton K350
  - ❖ Kekuatan Tekan ( $f_c'$ ) : 0,083 x 350 kg/cm<sup>2</sup> ≈ 30 MPa
  - ❖ Modulus Elastisitas ( $E_c$ ) : 4700√ $f_c'$  = 25439 MPa
  - ❖ Berat Jenis ( $\gamma_{beton}$ ) : 2400 kg / m<sup>3</sup>
- Baja Tulangan
  - ❖  $f_y$  : 400 MPa
  - ❖  $E_s$  : 2 x 10<sup>5</sup> MPa
- Dimensi Struktur
  - ❖ Ukuran balok anak : 200 x 400 m<sup>2</sup>
  - ❖ Ukuran balok induk : 300 x 600 m<sup>2</sup>
  - ❖ Ukuran kolom : 400 x 600 m<sup>2</sup>



Gambar 3. 2. Denah Bangunan



Gambar 3. 3. Potongan Melintang



Gambar 3. 4. Tampak Tiga Dimensi

Satu hal lagi yang perlu diperhitungkan dalam perancangan bangunan tahan gempa adalah sifat menurunnya kekuatan/inersia dari elemen struktur akibat

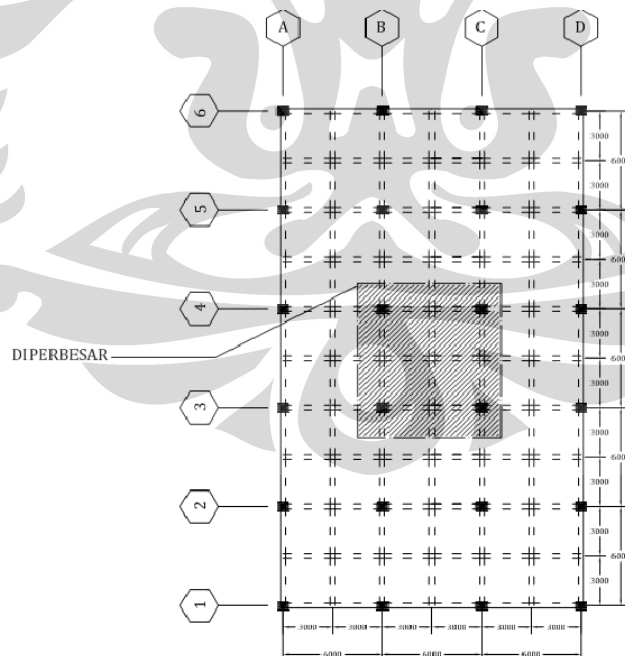
beban gempa. Penurunan kekuatan disebabkan retaknya penampang akibat gaya bolak balik sehingga memperkecil kontribusi kekuatan nominal penampang struktur. Untuk itu, diperlukan faktor pengali (*modifier factor*) untuk mengantisipasi hal ini.

Tabel 3. 2. Faktor Pengali Elemen Struktur

Nama	Modifier Factor
Balok Induk	$I_{22} = 0.35$ $I_{33} = 0.35$
Balok Anak	$I_{22} = 0.35$ $I_{33} = 0.35$
Kolom	$I_{22} = 0.7$ $I_{33} = 0.7$

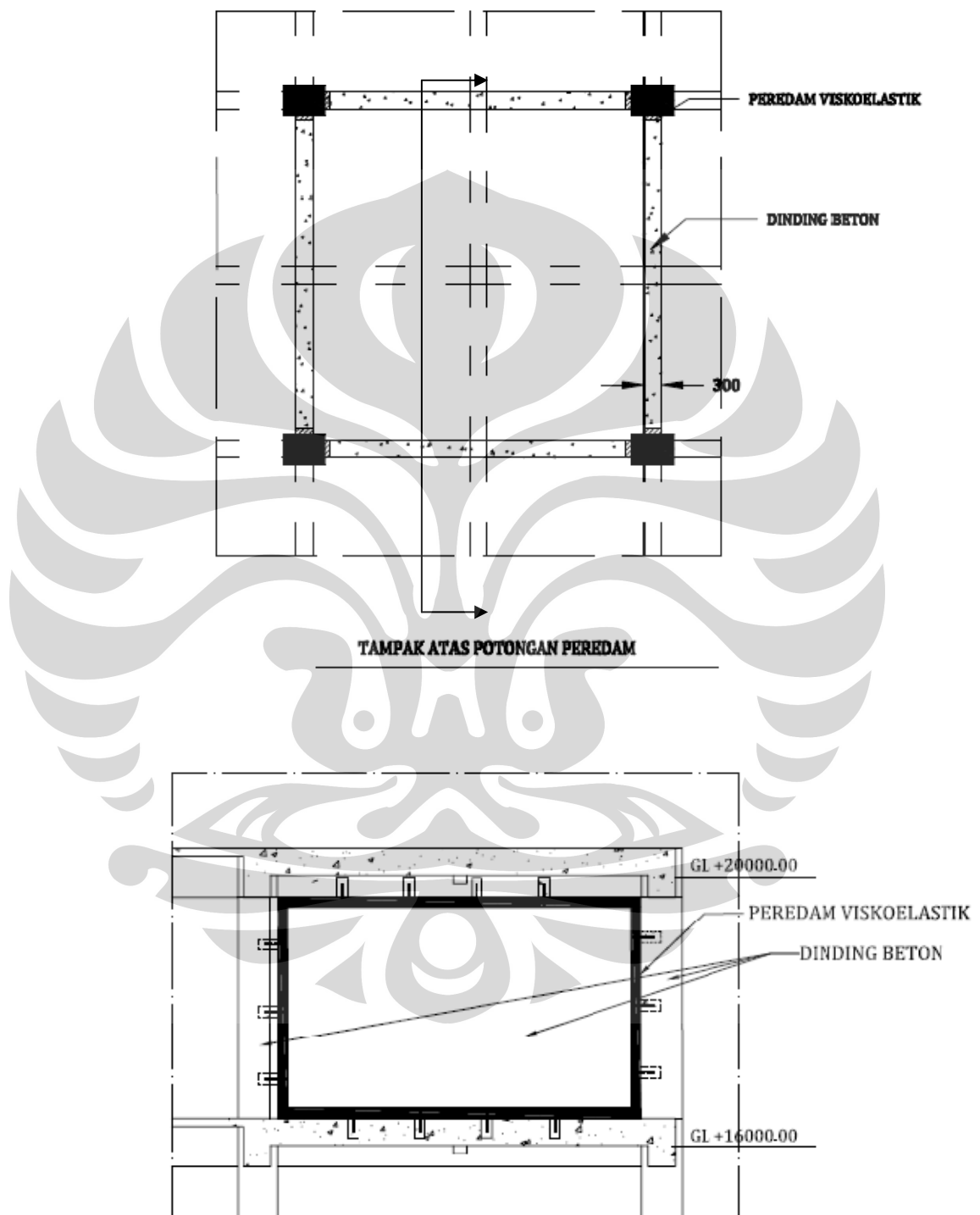
### 3.3 Model Peredam Viskoelastik

Peredam akan dipasang untuk mengurangi efek kekakuan yang tinggi dari *strong room*. Contoh pemasangan peredam pada pemodelan dalam penelitian ini dilihat dalam gambar berikut:

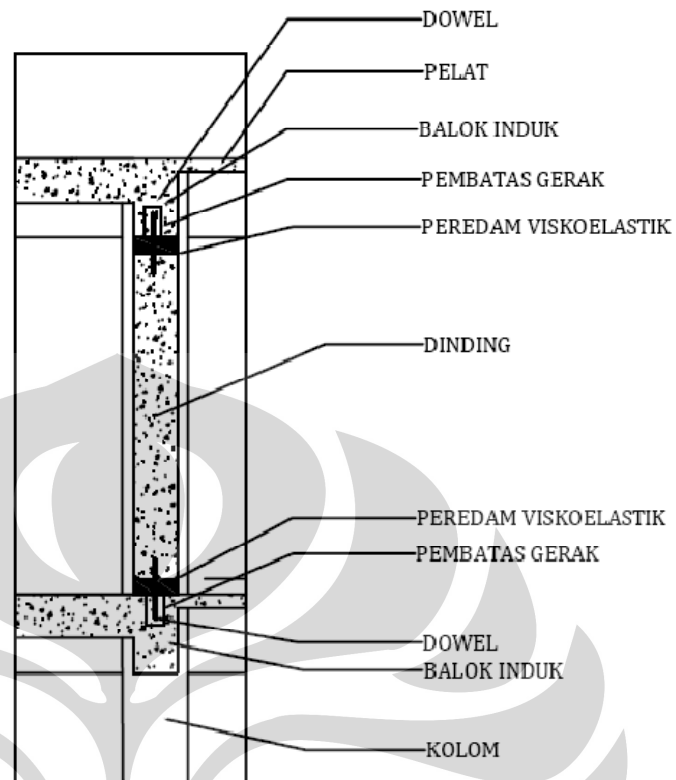


Gambar 3. 5. Contoh Posisi *Strongroom*

Dari gambar 3.5, bagian yang diarsir merupakan daerah tempat *strongroom* dipasang beserta dengan peredamnya. Potongan dari ruangan tersebut setelah dipasang peredam viskoelastik adalah sebagai berikut.



Gambar 3. 6. Detail Potongan *Strongroom*



Gambar 3. 7. Detail Pemasangan Peredam pada Bagian Dinding dan Balok

Ada empat macam model struktur yang akan disimulasikan dalam skripsi ini, yaitu model struktur tanpa *strongroom*, model struktur dengan *strongroom* sebagai beban merata, model struktur dengan *strongroom* sebagai dinding beton, model struktur dengan *strongroom* sebagai dinding dengan tambahan peredam viskoelastik. Untuk model yang kedua dan ketiga disebutkan dijadikan sebagai acuan yang kemudian dibandingkan dengan hasil-hasil dari variasi parametrik yang dijalankan pada model keempat. Ini bertujuan untuk membandingkan, apa saja kekurangan dan kelebihan dari masing-masing permodelan, sehingga didapatkan analisis yang akurat dalam perancangan *strongroom*. Secara rinci, permodelan *strongroom* dalam penelitian ini dijelaskan sebagai berikut

a. *Strongroom* sebagai beban merata

Ukuran dinding	: 5400 x 5600 mm <sup>2</sup>
Tinggi	: 4000 mm
Tebal dinding	: 300 mm

Berat dinding:

$$24 \text{ kN/m}^3 \times 0,3 \text{ m} \times 4 \text{ m} \times 5,4 \text{ m} = 155,52$$

$$24 \text{ kN/m}^3 \times 0,3 \text{ m} \times 4 \text{ m} \times 5,6 \text{ m} = 161,28$$

$$24 \text{ kN/m}^3 \times 0,3 \text{ m} \times 4 \text{ m} \times 5,4 \text{ m} = 155,52$$

$$24 \text{ kN/m}^3 \times 0,3 \text{ m} \times 4 \text{ m} \times 5,6 \text{ m} = \underline{161,28} +$$

$$633,6 \text{ kN}$$

Berat pelat penutup:

Tebal pelat penutup atas dan bawah (ditotal dengan pelat lantai) 200 mm, total 400 mm, dengan lebar 5600 mm x 5400 mm

$$5,6 \text{ m} \times 5,4 \text{ m} \times 0,4 \text{ m} \times 24 \text{ kN/m}^3 = 290.304 \text{ kN}$$

Berat mati tambahan *strongroom* = 1 ton/m<sup>2</sup> = 10 kN/m<sup>2</sup>

$$5,6 \text{ m} \times 5,4 \text{ m} \times 10 \text{ kN/m}^2 = 302.04 \text{ kN}$$

Total

$$633,6 \text{ kN} + 290.304 \text{ kN} + 302.04 \text{ kN} = 1226.304 \text{ kN}$$

Maka beban terbagi merata yang dimasukkan:

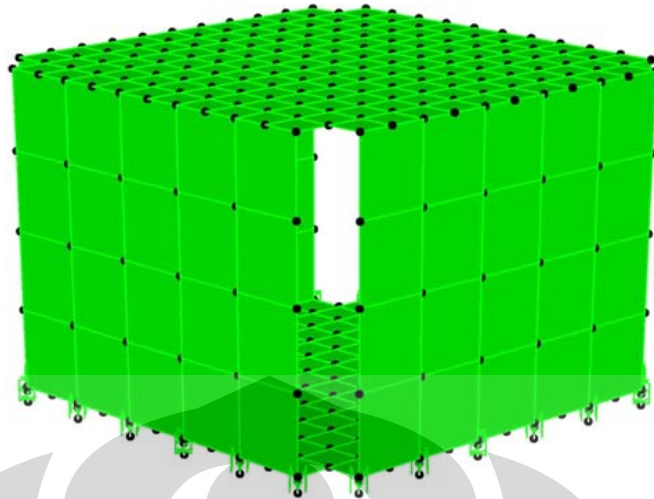
$$1226.304 \text{ kN} / (5.4 \times 5.6) = 40.552 \text{ kN/m}^2$$

b. *Strongroom* sebagai dinding shell

Dinding *strongroom* dimodelkan sebagai empat buah area *shell* dengan ketebalan 30 cm yang mengelilingi sebuah ruangan ukuran 6 x 6 meter persegi. Area shell ini didiskretisasi menjadi ukuran persegi 1 x 1 meter persegi. Untuk mencegah perilaku *strongroom* yang “menempel” dengan kolom, maka, panjang dinding tersebut hanya lima meter, sehingga menyisakan ruang kosong antara kolom dan dinding masing-masing setengah meter di kiri dan kanannya.

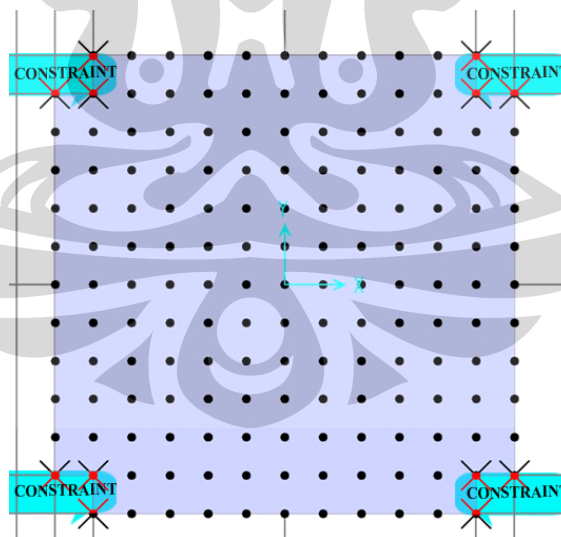
Tinggi *strongroom* empat meter, dan di bagian atas dan dibawahnya dipasang penutup berupa area *shell*. Dalam kondisi nyatanya, ketebalan pelat *strongroom* dipasang sebesar 30 cm untuk mencegah terjadinya lendutan yang berlebihan akibat beban yang cukup besar dalam *strongroom*.





Gambar 3. 8. Permodelan *Strongroom* pada SAP2000

Untuk lebih memastikan keempat bagian dinding bekerja secara bersama-sama, maka tiga buah nodal pada penutup pelat yang menghubungkan ujung dinding satu dengan dinding lainnya diberikan *joint constraint*. Adanya *constraint* mengakibatkan setiap titik bergerak secara berbarengan.



Gambar 3. 9. *Constraints* pada Penutup Pelat

Untuk mengakomodir beban akibat beban hidup pada *strongroom*, yang tentunya lebih besar daripada beban hidup biasa, maka pelat lantai pada

daerah *strongroom* juga diberikan beban hidup tambahan sebesar  $1 \text{ ton/m}^2$  yang setara dengan  $10 \text{ kN/m}^2$ .

c. Tipe *link* yang digunakan dan batasannya

Peredam viskoelastik terdiri atas dua jenis model utama, yaitu model peredam dan pegas. Maka, dalam permodelan SAP2000, peredam viskoelastik didefinisikan sebagai dua macam *link* yaitu *link* linier (representasi pegas) dan *link* damper (representasi peredam). Kedua *link* ini dipasang secara paralel dan menghubungkan dua joint.

Untuk membatasi pergerakannya, dipasang juga *link* lain, yaitu *link gap* dan *hook*. Kedua *link* ini merupakan elemen nonlinier, karena baru diijinkan untuk bekerja setelah mengalami deformasi dengan batasan tertentu (batasan akan divariasikan dalam variasi batasan pergerakan).

Di dalam SAP2000 sendiri, secara matematis elemen *gap* didefinisikan sebagai berikut,

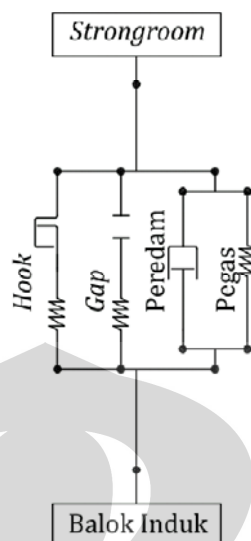
$$f = \begin{cases} k(d + open) & \text{jika } d + open < 0 \\ 0 & \text{lainnya} \end{cases} \quad (3.1)$$

dengan nilai  $k$  adalah konstanta pegas dan *open* adalah bukaan awal dari *gap* yang harus bernilai positif atau nol. Sedangkan elemen *hook* didefinisikan sebagai berikut,

$$f = \begin{cases} k(d - open) & \text{jika } d - open > 0 \\ 0 & \text{lainnya} \end{cases} \quad (3.2)$$

dengan nilai  $k$  adalah konstanta pegas dan *open* adalah bukaan awal dari *hook* yang harus bernilai positif atau nol.

Kekakuan kedua elemen ini dimasukkan sangat besar, yaitu  $100000 \text{ kN/m}$ , mengingat, elemen ini berfungsi untuk membatasi gerak dari *strongroom*. Arah yang diijinkan untuk kedua *link* ini bergerak adalah perpindahan arah horizontal  $u_x$  dan  $u_y$ , serta puntir  $r_z$ , untuk mencegah dinding meloncat-loncat ke atas dan bawah ataupun bergerak miring.

Gambar 3. 10. Ilustrasi *Link*

Semua *link* ini dipasang di dasar dari *strongroom* dan sejarak 15 cm di atas balok induk, dengan jarak 15 cm itu berupa elemen kaku yang di-*constraint* kedua ujungnya.

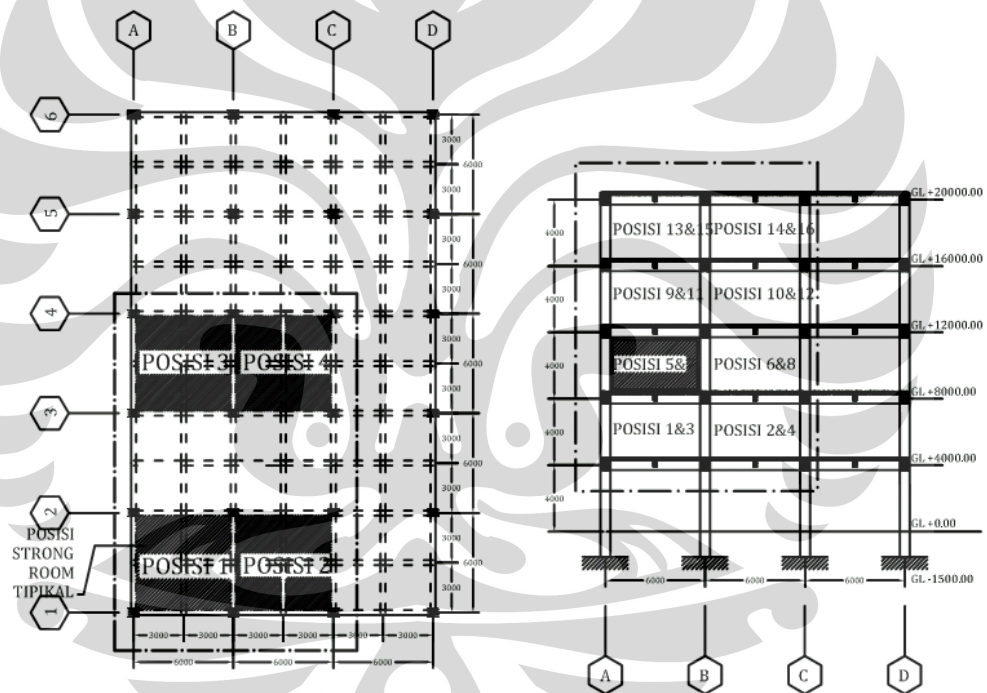
Tabel 3. 3. Ringkasan Penggunaan *Link*

<p><i>Link</i> Linier (pegas)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kekakuan</li> <li>• Redaman</li> <li>• Arah gerak yang diijinkan</li> </ul>	<p>: divariasikan</p> <p>: nol</p> <p>: U2 (arah x), U3 (arah y), dan R1 (rotasi z)</p>
<p><i>Link Damper</i> (peredam)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kekakuan</li> <li>• Redaman</li> <li>• Arah gerak yang diijinkan</li> </ul>	<p>: nol</p> <p>: divariasikan</p> <p>: U2 (arah x), U3 (arah y), dan R1 (rotasi z)</p>
<p><i>Link Gap</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kekakuan</li> <li>• Redaman</li> <li>• Arah gerak yang diijinkan</li> </ul>	<p>: 100000 kN/m</p> <p>: nol</p> <p>: U2 (arah x), U3 (arah y), dan R1 (rotasi z)</p>
<p><i>Link Hook</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kekakuan</li> <li>• Redaman</li> <li>• Arah gerak yang diijinkan</li> </ul>	<p>: 100000 kN/m</p> <p>: nol</p> <p>: U2 (arah x), U3 (arah y), dan R1 (rotasi z)</p>

### 3.4 Variasi Parameter yang Dianalisis

#### 3.4.1 Variasi Posisi

Untuk mengetahui respon secara menyeluruh dari peredam viskoelastik terhadap percepatan gempa yang akan diberikan pada bangunan, maka diperlukan beberapa variasi penempatan *strongroom* pada bangunan ini. Seperti yang dicontohkan barusan, *strongroom* dibangun di lantai dua pada grid B-C-3-4. Untuk variasi yang lainnya dapat ditentukan sebagai berikut.



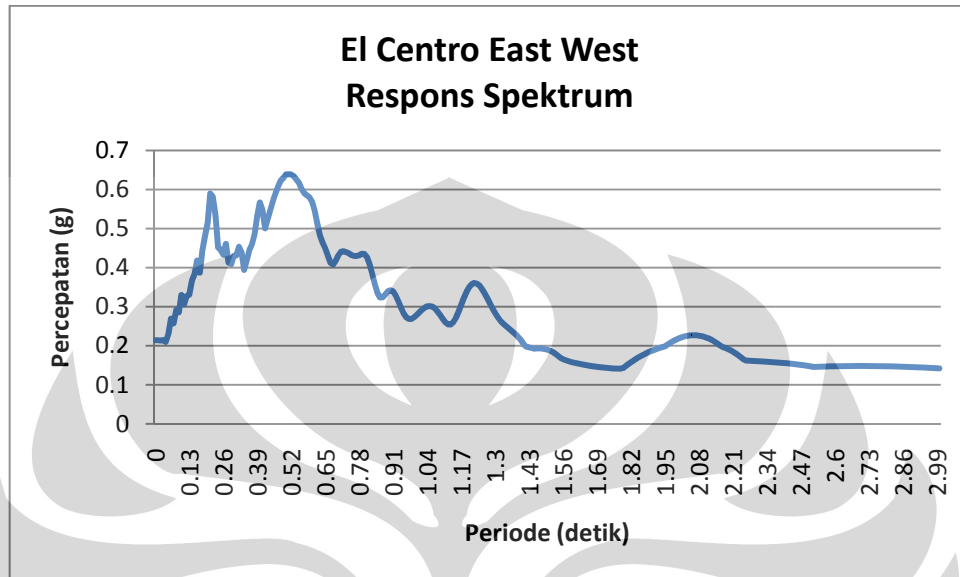
Gambar 3. 11. Variasi Posisi

#### 3.4.2 Variasi Percepatan Gempa

Ada dua jenis percepatan gempa yang akan dimasukkan kedalam pembebanan struktur, yaitu percepatan gempa El-Centro komponen E-W yang dimodifikasi dan percepatan gempa sinusioidal. Untuk catatan, semua percepatan gempa hanya akan dimasukkan ke dalam komponen arah x saja.

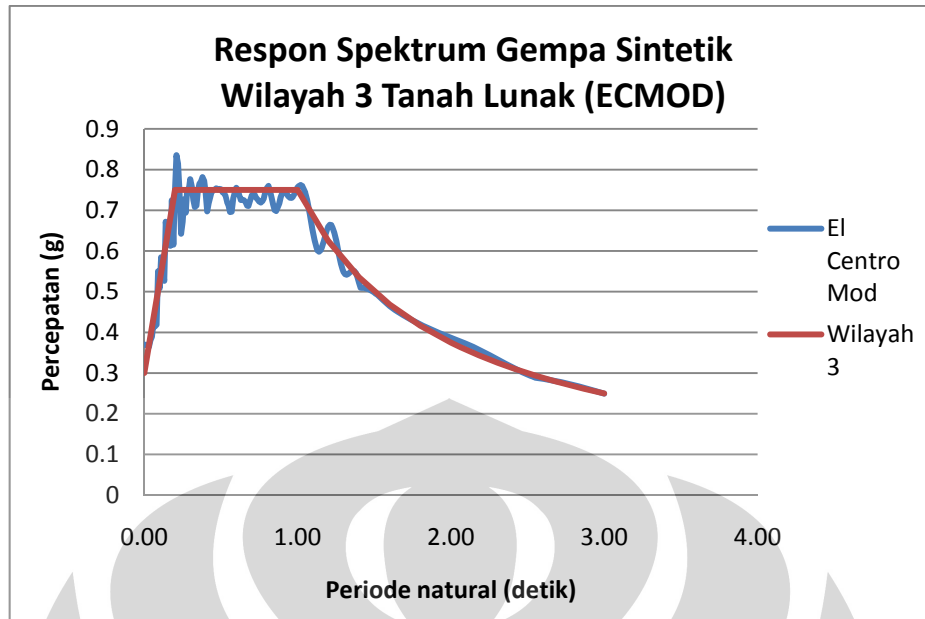
a. Percepatan gempa El-Centro komponen E-W yang dimodifikasi

Percepatan gempa El-Centro komponen E-W yang sudah dicantumkan pada bab dua memiliki kurva respon spektrum sebagai berikut,

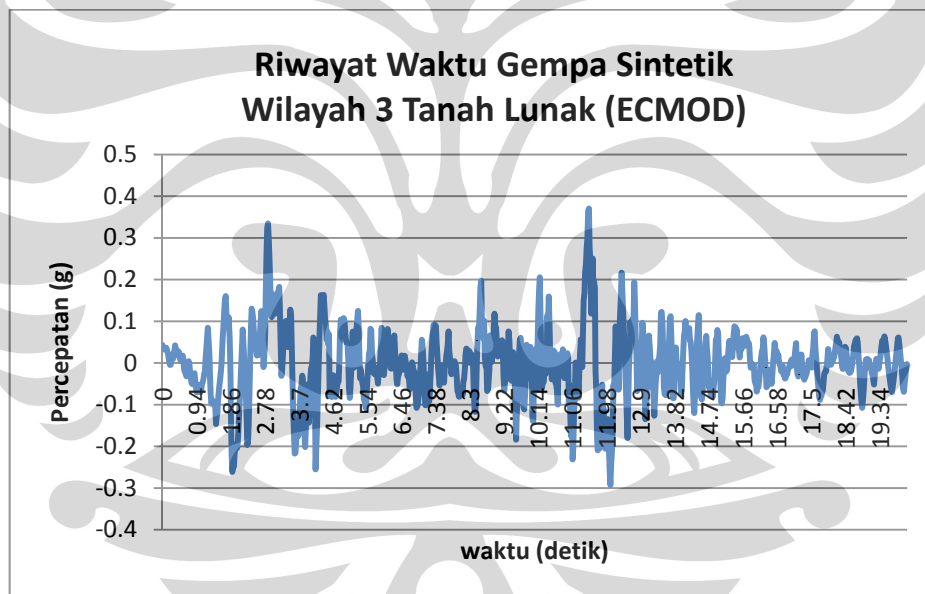


Gambar 3. 12. Respon Spektrum Gempa El Centro Komponen E-W

Untuk dapat dipergunakan dalam penelitian yang ada di Indonesia, maka diperlukan modifikasi dari data riwayat waktu gempa tersebut agar sesuai dengan respon spektrum gempa wilayah tiga tanah lunak, sesuai dengan SNI-03-1726-2002 mengenai Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Bangunan Gedung. Percepatan gempa ini dimodifikasi menggunakan program Resmat, sehingga didapatkan grafik respon spektrum dan grafik riwayat waktu sebagai berikut:



Gambar 3. 13. Respon Spektrum Gempa Sintetik Wilayah 3 (ECMOD) vs Wilayah 3 Tanah Lunak



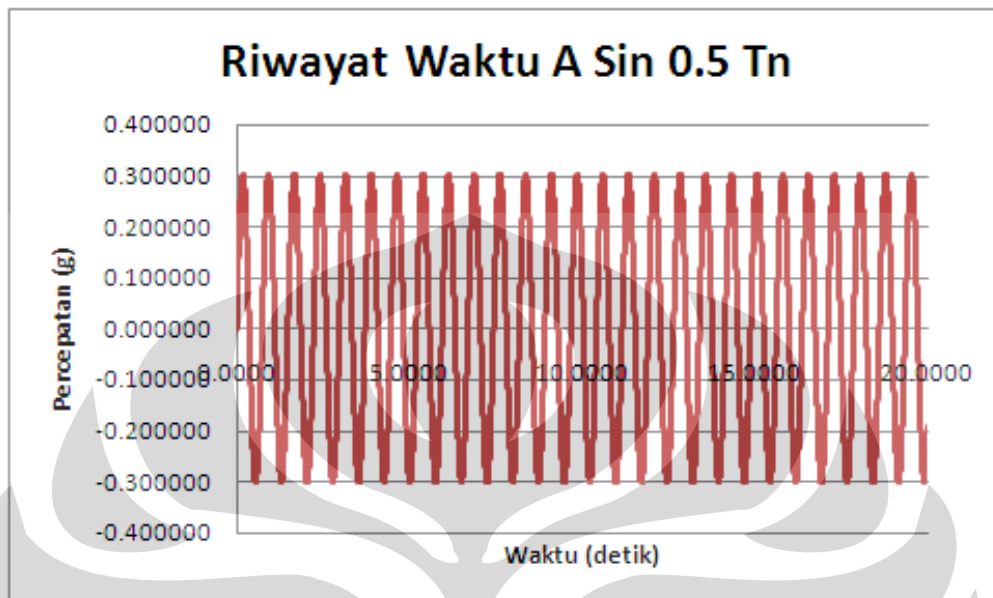
Gambar 3. 14. Grafik Riwayat Waktu Gempa Sintetik Wilayah 3 Tanah Lunak (ECMOD)

#### b. Sinusoidal

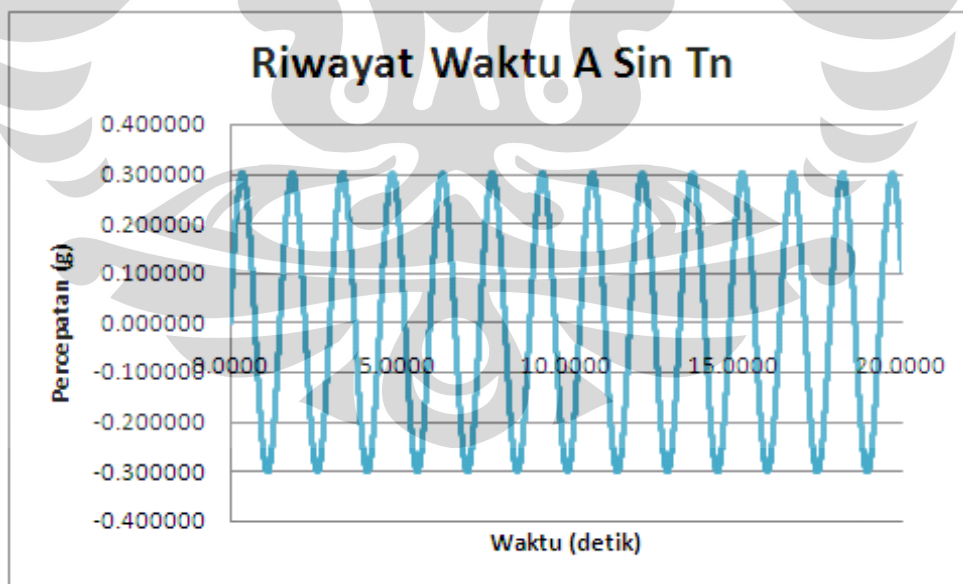
Selain percepatan gempa sintetik yang berasal dari gempa El-Centro komponen E-W yang dimodifikasi (disingkat ECMOD), juga dimasukkan percepatan gempa berupa gaya sinusoidal dengan periode gaya sebesar setengah, satu, dan dua kali periode getar alami ( $0.5 T_n$ ,  $T_n$ , dan  $2T_n$ ). Masing-masing gaya diperhitungkan menggunakan rumus sebagai berikut

$$A(t) = 0.3g \sin \frac{2\pi t}{T_n} \dots \quad (3.3)$$

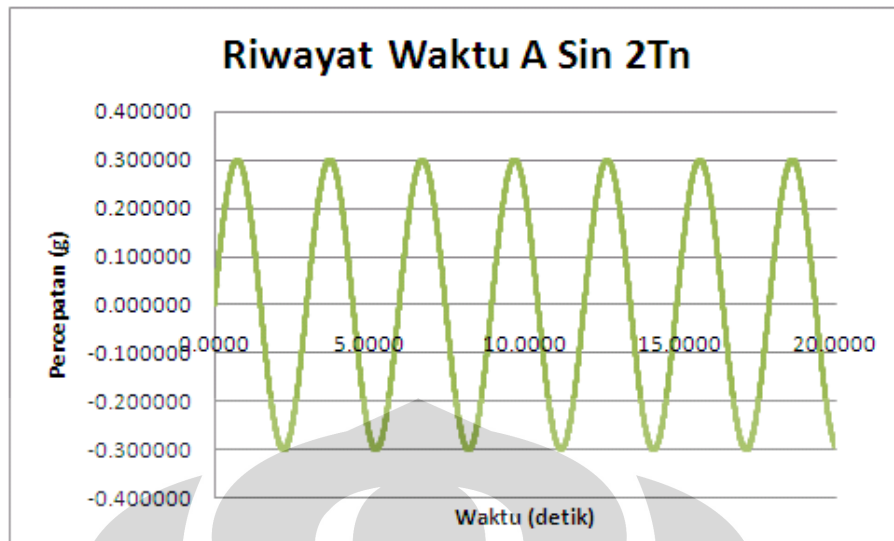
sehingga didapat grafik sebagai berikut,



Gambar 3. 15. Riwayat Waktu A Sin 0.5 T<sub>n</sub>

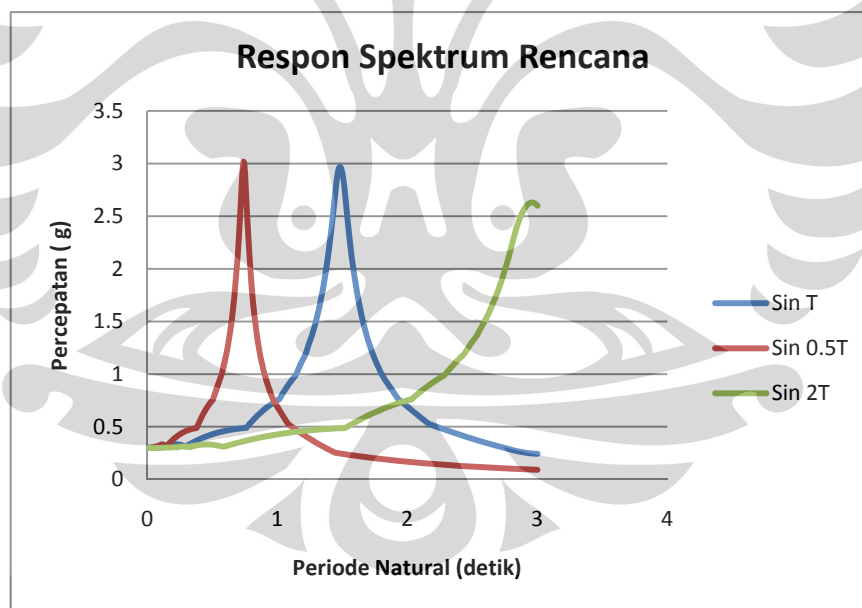


Gambar 3. 16. Riwayat Waktu A Sin T<sub>n</sub>



Gambar 3. 17. Riwayat Waktu A Sin  $2T_n$

Dengan menggunakan bantuan program Resmat, maka didapatkan juga respon spektrum dari masing-masing percepatan gempa sinusoidal sebagai berikut



Gambar 3. 18. Respon Spektrum Rencana untuk Percepatan Gempa Sinusoidal

### 3.4.3 Variasi Lainnya

Variasi parameter lainnya berupa variasi kekakuan dari peredam viskoelastik, dan pembatasan pergerakan dari peredam viskoelastik. Oleh karena itu, dapat ditampilkan dalam tabel sebagai berikut,



Tabel 3. 4. Variasi Permodelan

Variasi	Parameter				
	1. Modelisasi struktur	2. Posisi	3. Kekakuan	4. Batasan pergerakan	5. Percepatan gempa
<b>1. Modelisasi struktur</b>	Empat model: a. tanpa <i>strongroom</i> b. beban merata c. dinding beton d. dinding beton dengan peredam	Posisi 5	$k = 6000 \text{ kN/m}$	10 mm	ECMOD
<b>2. Posisi</b> a. vertikal b. horisontal	dinding beton dengan peredam	Posisi 1 s.d. Posisi 16	$k = 6000 \text{ kN/m}$	10 mm	ECMOD
<b>3. Kekakuan</b>	dinding beton dengan peredam	Posisi 5	4000 $\text{kN/m}$ , 6000 $\text{kN/m}$ , 8000 $\text{kN/m}$ , 10000 $\text{kN/m}$ , 12000 $\text{kN/m}$	10 mm	ECMOD
<b>4. Batasan pergerakan</b>	dinding beton dengan peredam	Posisi 5	$k = 6000 \text{ kN/m}$	5 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm, 25 mm	ECMOD
<b>5. Percepatan gempa</b> a. Sinusoidal b. ECMOD	dinding beton dengan peredam	Posisi 5	$k = 6000 \text{ kN/m}$	10 mm	Percepatan gempa sinusoidal dengan periode $0,5 T_n$ , $T_n$ , dan $2 T_n$ serta percepatan gempa sintetik wilayah 3 tanah lunak (ECMOD)

Dari tiap parameter tersebut, hasil yang diharapkan untuk diambil adalah:

- Periode getar dan partisipasi massa struktur
- Lendutan pada *strongroom* dan pada struktur
- Reaksi dasar dari struktur
- Gaya dalam pada peredam gempa

### 3.5 Perhitungan SAP2000

#### 3.5.1 Integrasi pada Program SAP2000 dengan Direct Integration

Untuk menjalankan program SAP2000, dibutuhkan data masukan berupa Analysis Case, yaitu kasus yang mendefinisikan bagaimana beban-bena yang kita masukkan diaplikasikan terhadap struktur dan bagaimana perhitungan respon struktur. Umumnya, pengguna program SAP2000 akan mendefinisikan kasus beban mati dan beban hidup sebagai statik linier (*linear static*), dan perhitungan respon modal sebagai analisis vektor eigen (*modal eigen vector*). Tambahannya pada skripsi ini adalah digunakannya kasus riwayat waktu nonlinier dengan integrasi langsung (*direct integration nonlinier time history*).

Integrasi langsung dari persamaan gerakan keseluruhan tanpa menggunakan superposisi modal tersedia pada SAP 2000v11. Ketika penggunaan superposisi modal lebih akurat dan efisien, integrasi langsung memiliki keuntungan sebagai berikut

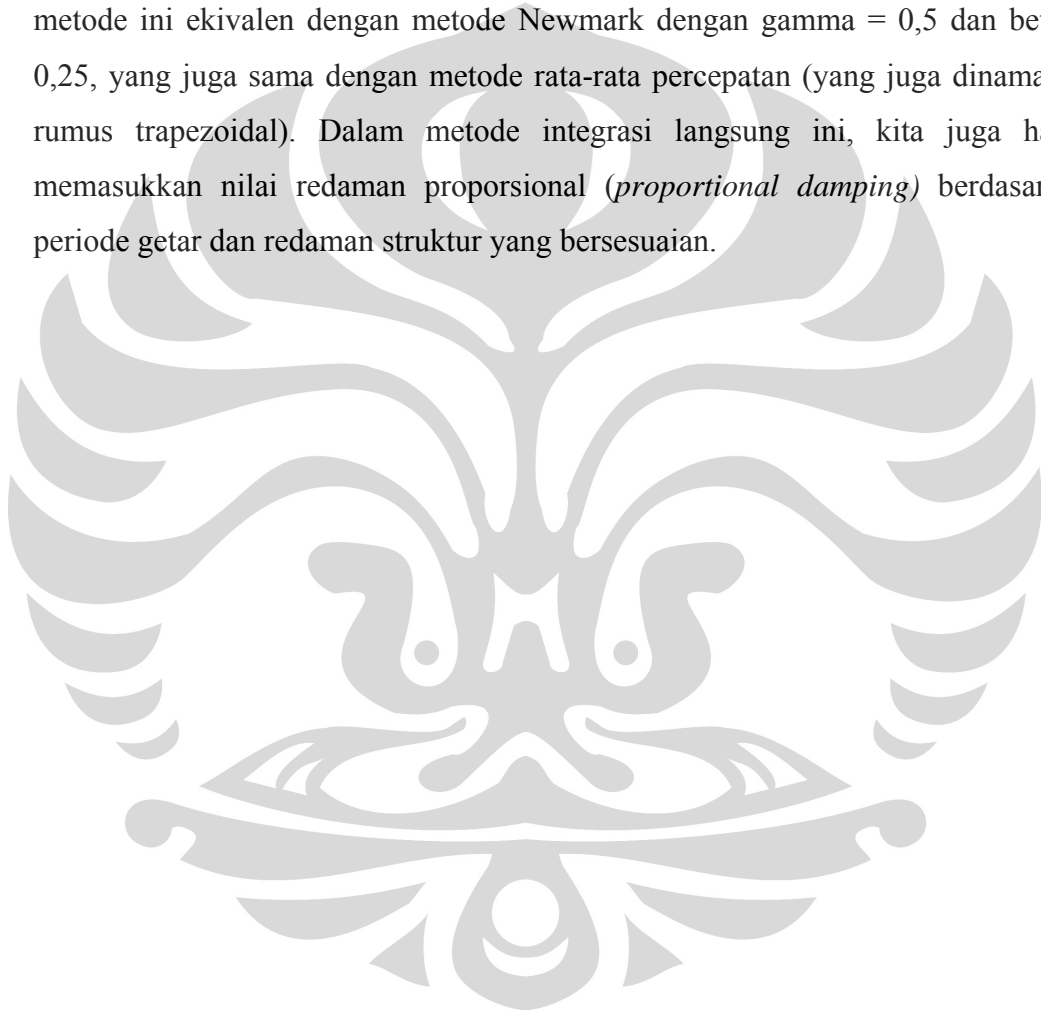
- Peredam penuh yang merupakan pasangan (*couple*) dari moda dapat diperhitungkan
- Akibat dari masalah propagasi gelombang (*wave propagation*) yang dapat mengeksitasi sejumlah besar mode dapat diselesaikan secara efisien oleh integrasi langsung
- Setiap tipe nonlinieritas tersedia pada SAP2000 dan dapat dimasukkan dalam analisis integrasi langsung nonlinier.

Hasil integrasi langsung sangat sensitif terhadap ukuran langkah waktu yang sebenarnya tidak terlalu berpengaruh pada superposisi modal. Nonlinieritas dapat dipilih sesuai keinginan:

- Tidak ada

- Efek *P-delta*
- Efek lendutan yang besar

Pada integrasi langsung dengan riwayat waktu, redaman dalam struktur dimodelkan menggunakan matriks redaman penuh. Dalam menganalisis integrasi langsung dari analisis riwayat waktu, SAP2000 v11 menggunakan metode Hilber-Hughes Taylor Alpha (HHT), yang menggunakan parameter dinamakan alpha. Parameter ini dapat diambil nilainya antara 0 dan  $-1/3$ . Untuk nilai  $\alpha = 0$ , metode ini ekuivalen dengan metode Newmark dengan  $\gamma = 0,5$  dan  $\beta = 0,25$ , yang juga sama dengan metode rata-rata percepatan (yang juga dinamakan rumus trapezoidal). Dalam metode integrasi langsung ini, kita juga harus memasukkan nilai redaman proporsional (*proportional damping*) berdasarkan periode getar dan redaman struktur yang bersesuaian.



## BAB 4 SIMULASI DAN ANALISIS

### 4.1 Analisis

Setelah semua data dimasukkan dan program SAP2000 dijalankan, maka akan ditinjau keempat hasil berikut,

- karakteristik dinamik struktur, yaitu periode getar alami (enam ragam getar awal) dan partisipasi massa,
- perpindahan arah  $u_x$ ,  $u_y$ , dan  $r_z$  di pusat denah bangunan di tiap lantai,
- perpindahan *strongroom* arah  $u_x$ ,  $u_y$ , dan  $r_z$ , serta
- reaksi dasar bangunan, berupa gaya geser arah  $x$  dan  $y$ , momen guling arah  $x$  dan  $y$  serta torsi  $z$ .

Dalam proses analisis tiap variasi, data-data yang dibandingkan akan bersifat fluktuatif, dengan selisih perbedaan yang mungkin besar, namun mungkin juga kecil. Sehingga untuk mengklasifikasi sifat perbedaan yang terjadi dipergunakan tabel persentase selisih sebagai berikut:

Tabel 4. 1. Signifikansi Selisih

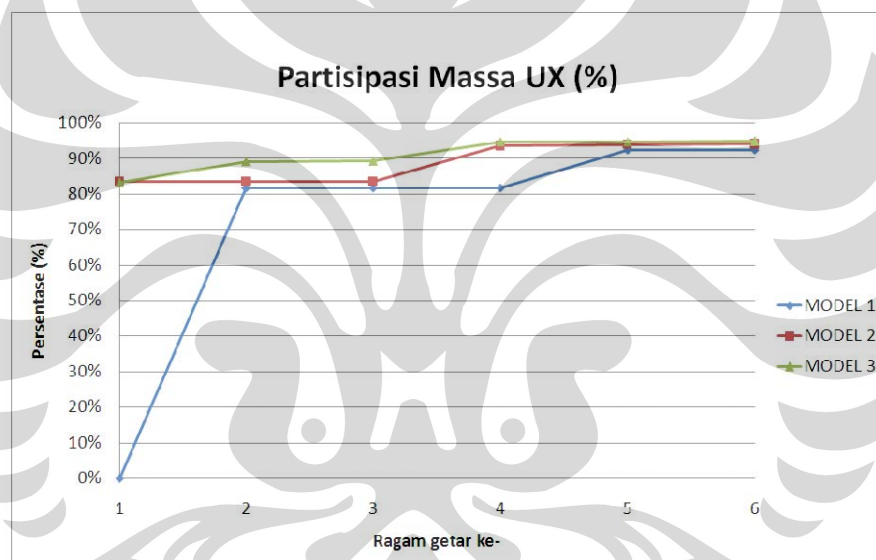
Persentase selisih	Signifikansi	Singkatan
<10%	Kecil	K
$10\% \geq x > 30\%$	Agak Sedang	AS
$30\% \geq x > 50\%$	Sedang	S
$50\% \geq x > 70\%$	Besar	B
$70\% \geq x > 90\%$	Sangat besar	SB
> 90%	Ekstrim	E

Hal pertama yang dibahas dalam penelitian ini adalah tiga macam variasi struktur, yaitu struktur tanpa *strongroom* (selanjutnya disebut sebagai *model 1-M1*), struktur dengan permodelan *strongroom* sebagai beban merata (selanjutnya disebut sebagai *model 2-M2*), serta struktur dengan permodelan *strongroom* sebagai dinding beton (selanjutnya disebut sebagai *model 3-M3*). Kemudian, hasil dari ketiga variasi struktur ini akan dibandingkan terhadap struktur dengan permodelan *strongroom* sebagai dinding beton dengan peredam (selanjutnya

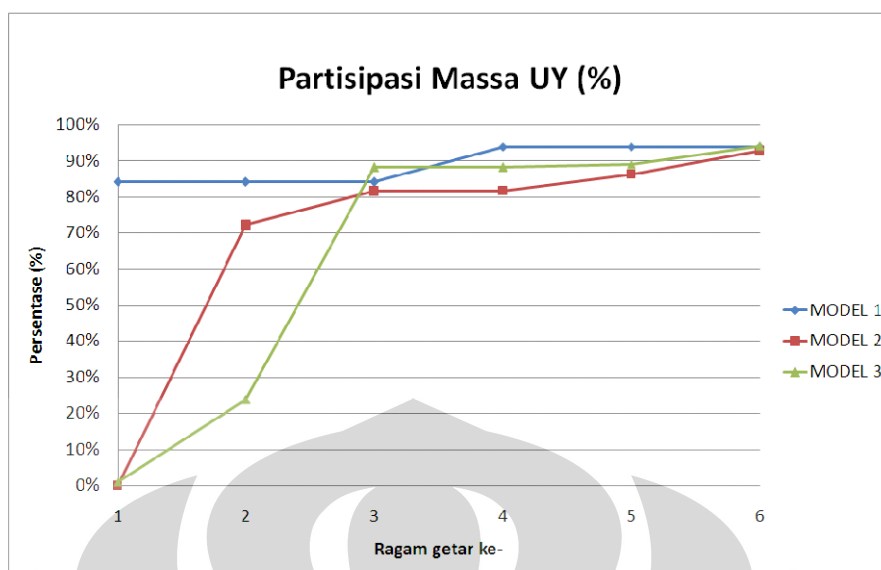
disebut *model 4*), yang mana model 4 ini memiliki variasi parameter yang dapat dilihat pada tabel 3.4.

Tabel 4. 2. Periode Getar Alami dalam Variasi Model (Satuan Detik)

	MODEL 1 (M1)	MODEL 2 (M2)	MODEL 3 (M3)
<b>Mode 1</b>	1.48116	1.540324	1.366503
<b>Mode 2</b>	1.293016	1.270566	1.088288
<b>Mode 3</b>	1.157622	1.247243	1.031202
<b>Mode 4</b>	0.477447	0.526029	0.488618
<b>Mode 5</b>	0.399305	0.428832	0.394552
<b>Mode 6</b>	0.361695	0.403294	0.39252



Gambar 4. 1. Partisipasi Massa UX



Gambar 4. 2. Partisipasi Massa UY

Dari tabel 4.2, terlihat kenaikan periode getar dari model 2 terhadap model 1. Ini menandakan struktur dengan permodelan *strongroom* sebagai beban merata akan lebih fleksibel daripada struktur tanpa *strongroom*. Namun periode getar tersebut menurun saat *strongroom* dianggap sebagai dinding beton biasa.

Sedangkan, berdasarkan gambar 4.1 dan 4.2, ragam getar pertama dari model 1 merupakan ragam getar translasi dominan arah y, selanjutnya translasi dominan arah x. Sebaliknya, untuk model 2 dan 3, ragam getar pertama memiliki partisipasi massa yang dominan arah x, selanjutnya dominan arah y.

Tabel 4. 3. Reaksi Dasar Bangunan

	GAYA GESER X (kN)	GAYA GESER Y (kN)	MOMEN X (kNm)	MOMEN Y (kNm)	TORSI Z (kNm)
MODEL 1 (M1)	10336.913	0.000	0.009	162762.620	0.000
MODEL 2 (M2)	11046.550	107.450	556.159	150508.200	15950.911
MODEL 3 (M3)	12223.915	2182.069	30852.180	171363.610	43761.778

Untuk model 1, terlihat bahwa respon torsi, gaya geser y dan momen x mendekati nol pada dasar bangunan. Ini disebabkan struktur tidak memiliki eksentrisitas kekakuan dan massa, sehingga reaksi dasarnya hanya pada arah percepatan gempa saja. Namun, pada kedua struktur lain, yaitu model 2 dan model

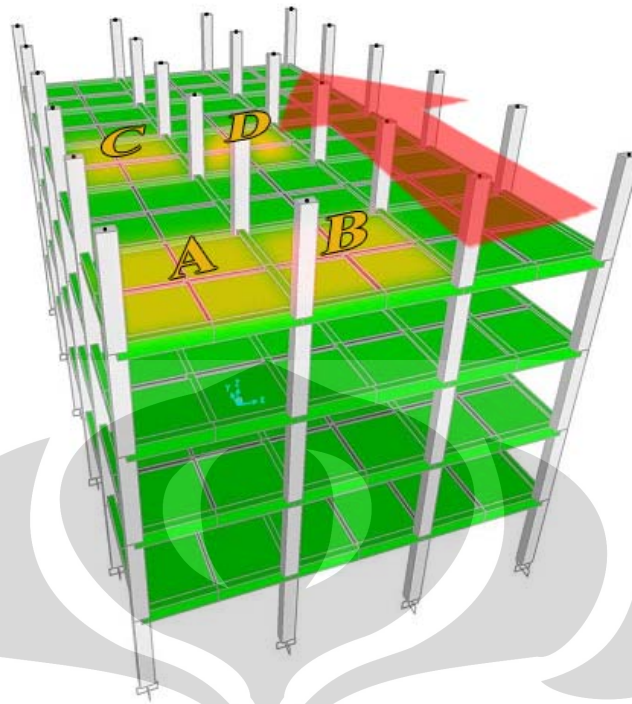
3, timbul reaksi gaya geser  $y$ , torsi  $z$  dan momen  $x$  pada dasar struktur seperti yang ditunjukkan oleh seperti pada tabel 4.3. di atas.

Perlu diperhatikan juga bahwa nilai reaksi dasar pada model 3 jauh lebih besar dibandingkan dengan model 2, mencapai hampir 3 kali lipatnya pada reaksi torsi. Padahal, pada praktik sehari-hari, kebanyakan perencana memodelkan *strongroom* ini seperti pada model 2. Ini merupakan kondisi yang *underdesign*. Oleh karena itu, permodelan *strongroom* yang lebih tepat adalah model 3 yang tidak hanya memperhitungkan pengaruh massa tapi juga kekakuan.

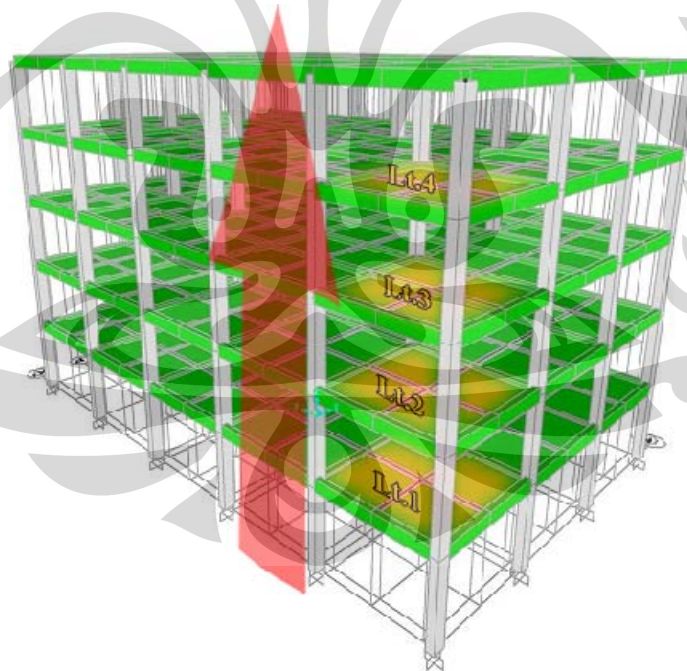
Tidak perlu khawatir, pada penelitian ini juga akan dipaparkan mengenai usulan model lainnya, yaitu model 4, struktur dengan *strongroom* yang dilengkapi peredam viskoelastik, yang diharapkan dapat mereduksi reaksi dasar bangunan. Analisis model 4 ini divariasikan seperti yang diuraikan pada tabel 3.4. Nantinya juga akan disisipkan perbandingan dengan hasil dari model 2 dan model 3.

#### 4.1.1 Analisis Variasi Posisi

Sebanyak enam belas posisi diteliti dalam variasi ini. Selanjutnya, keenam belas variasi disimbolkan hanya dalam empat alfabet: A menyatakan variasi posisi 1, 5, 9, dan 13; B menyatakan variasi posisi 2, 6, 10, 14; C mewakili posisi 3, 7, 11, 15; dan D mewakili posisi 4, 8, 12, 16. Dalam proses analisisnya, keenam belas posisi ini dipecah menjadi dua bagian: berdasarkan variasi secara horizontal dan variasi secara vertikal. Untuk analisis secara horizontal, setiap parameter dibandingkan menurut alfabetnya terhadap satu lantai (lihat gambar 4.3). Sedangkan dalam analisis secara vertikal, setiap parameter akan dibandingkan menurut lantainya terhadap satu alfabet (lihat gambar 4.4).



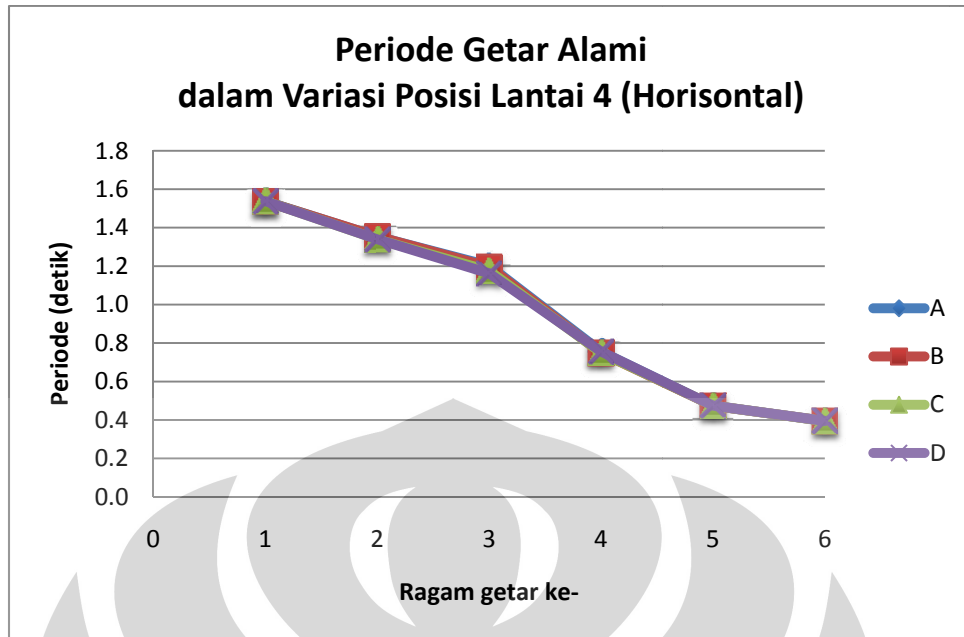
Gambar 4. 3. Variasi Posisi Horizontal



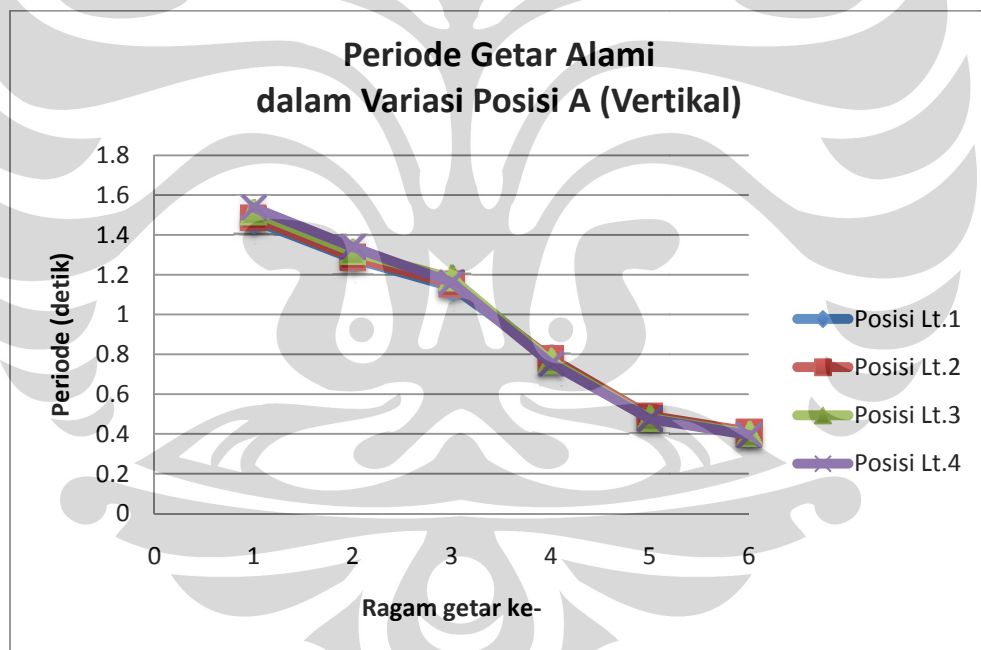
Gambar 4. 4. Variasi Posisi Vertikal

- a. Karakteristik dinamik dari struktur





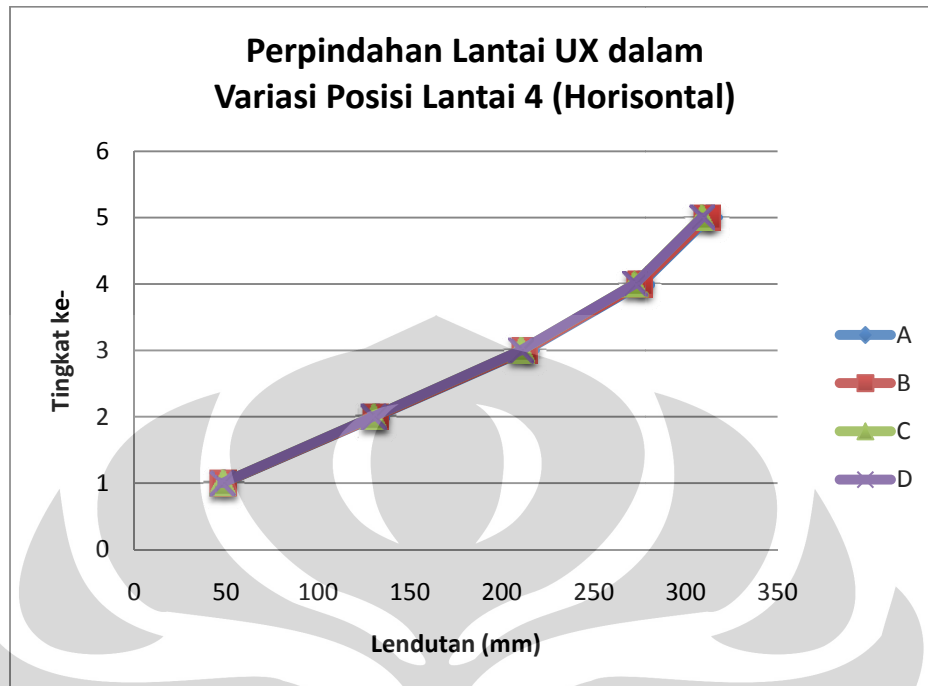
Gambar 4. 5. Periode Getar Alami dalam Variasi Posisi Lantai 4 (Horizontal)



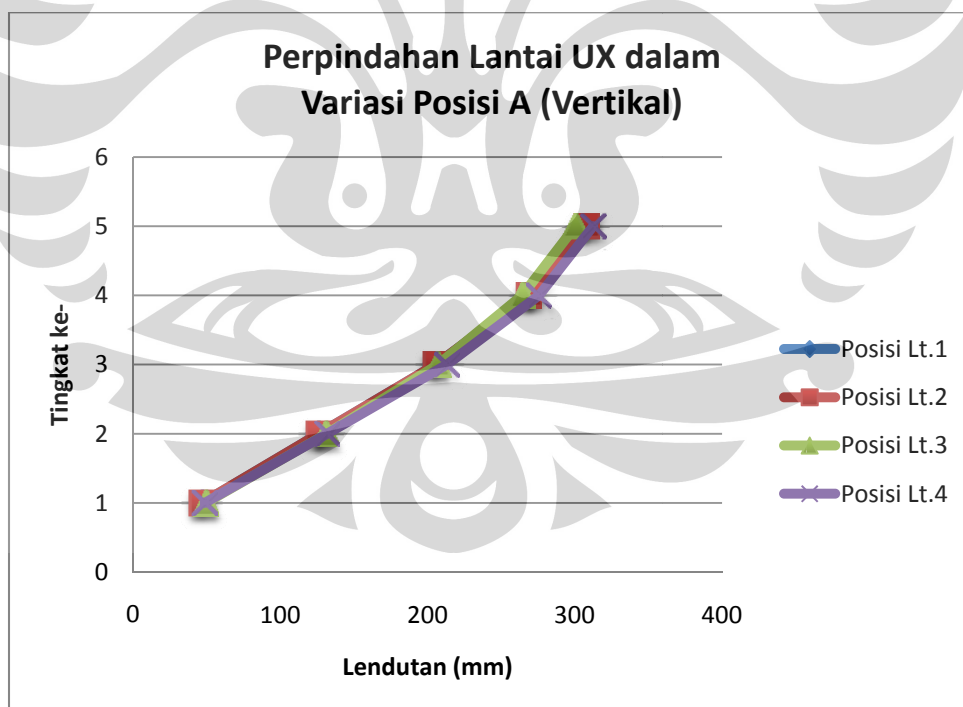
Gambar 4. 6. Periode Getar Alami dalam Variasi Posisi A (Vertikal)

Secara horizontal (gambar 4.5), hasil periode getar dari variasi posisi pada lantai 4 cenderung berimpit. Sedangkan secara vertikal (gambar 4.6), hasil periode getar membesar seiring meningkatnya elevasi lantai. Selisih periode getar antara lantai 1 dengan lantai 4 adalah 0,064 detik, atau 4,38%. Untuk periode getar lainnya dapat dilihat dalam lampiran 1.

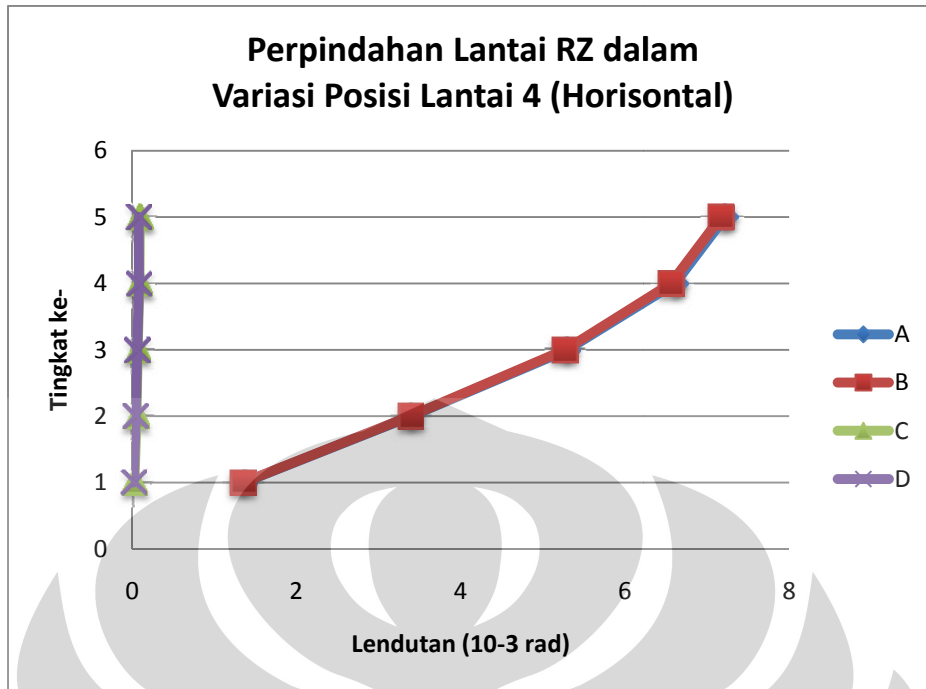
b. Perpindahan struktur dan *strongroom*



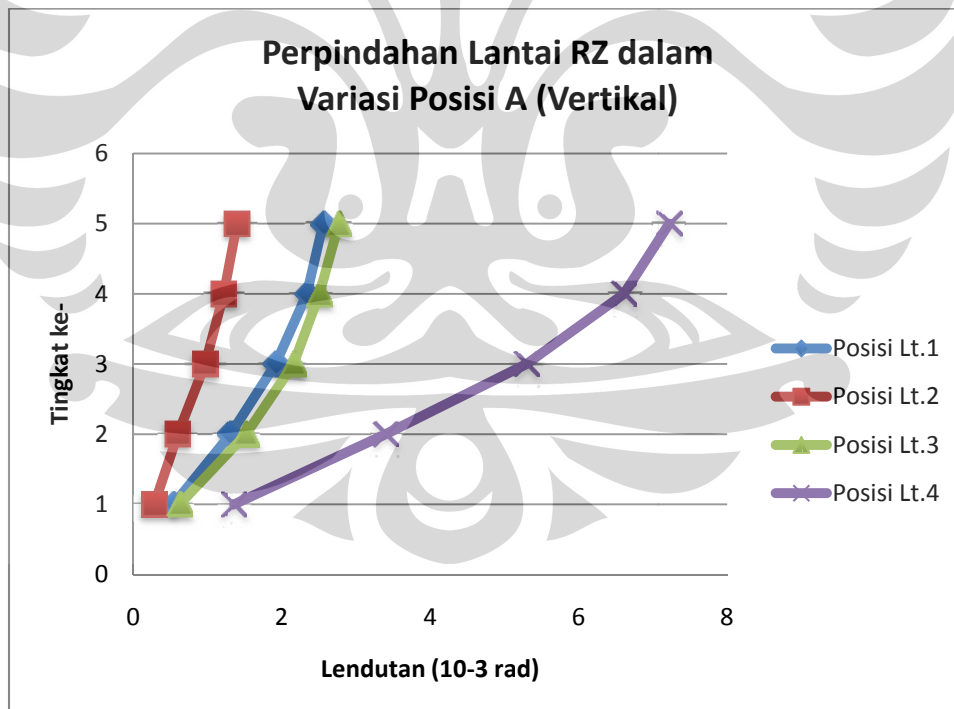
Gambar 4. 7. Perpindahan Lantai UX dalam Variasi Posisi Lantai 4 (Horisontal)



Gambar 4. 8. Perpindahan Lantai UX dalam Variasi Posisi A (Vertikal)



Gambar 4. 9. Perpindahan Lantai RZ dalam Variasi Posisi Lantai 4 (Horisontal)

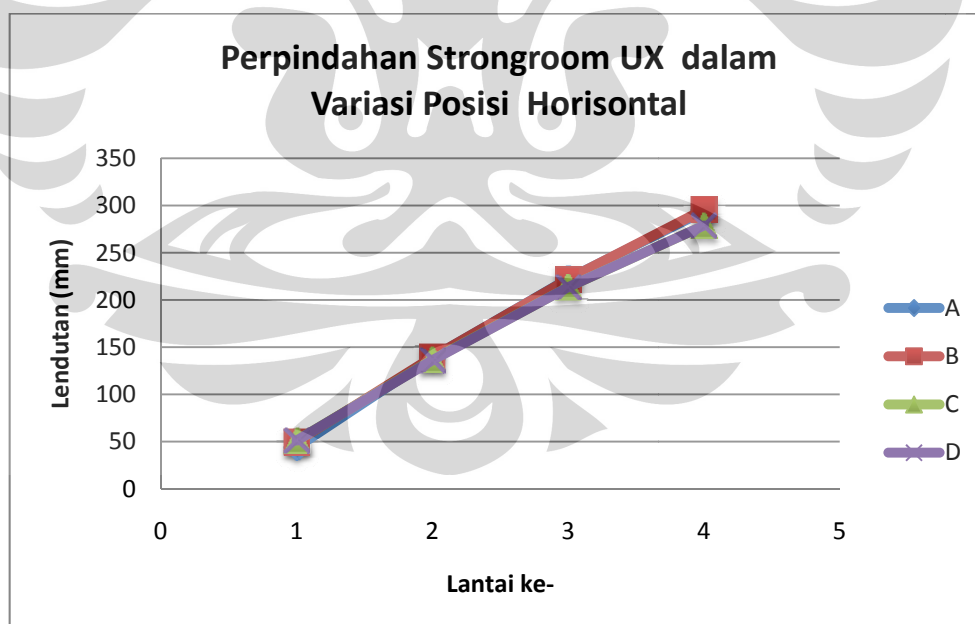


Gambar 4. 10. Perpindahan Lantai RZ dalam Variasi Posisi A (vertikal)

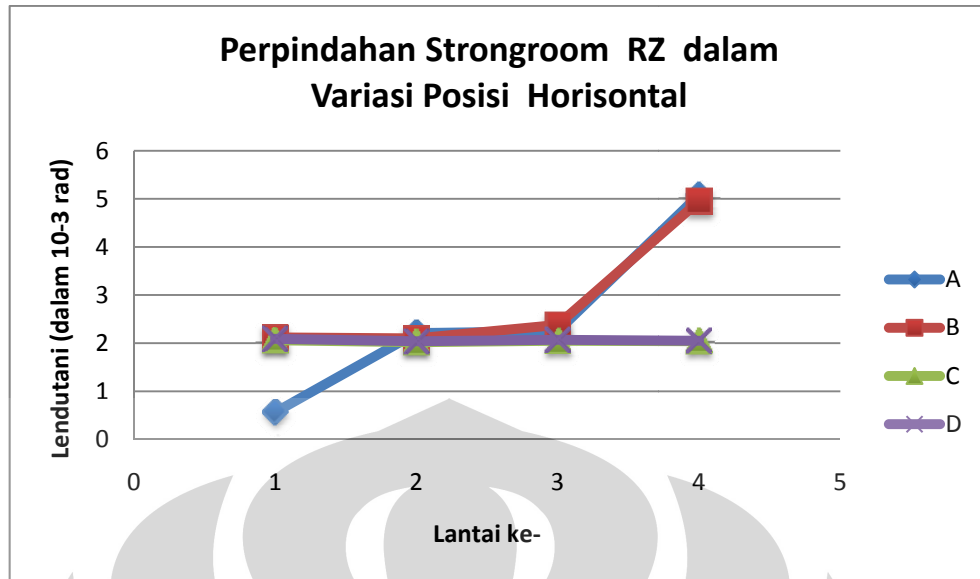
Berdasarkan gambar 4.7, perubahan penempatan *strongroom* pada posisi A sampai D menyebabkan naiknya perpindahan lantai ux. Namun, selisihnya hanya 0,56 mm (0,3%) saja, dan termasuk kategori kecil. Sedangkan dari gambar 4.8, kenaikan elevasi lantai tempat meletakkan *strongroom* ternyata juga memperbesar perpindahan struktur. Selisih terbesarnya mencapai 7,57 mm (3,7%), juga dalam kategori kecil.

Sedangkan, berdasarkan gambar 4.9, perpindahan lantai arah z (rz) paling besar terjadi saat *strongroom* diletakkan pada posisi A. Selisih terbesarnya mencapai  $2,43 \times 10^{-3}$  rad (95,1%) dan termasuk dalam kategori ekstrim. Sedangkan berdasarkan Gambar 4.10, perpindahan struktur akan makin besar saat elevasi lantai penempatan *strongroom* makin tinggi. Selisih terbesarnya mencapai  $4,66 \times 10^{-3}$  rad (182%), juga dalam kategori ekstrim.

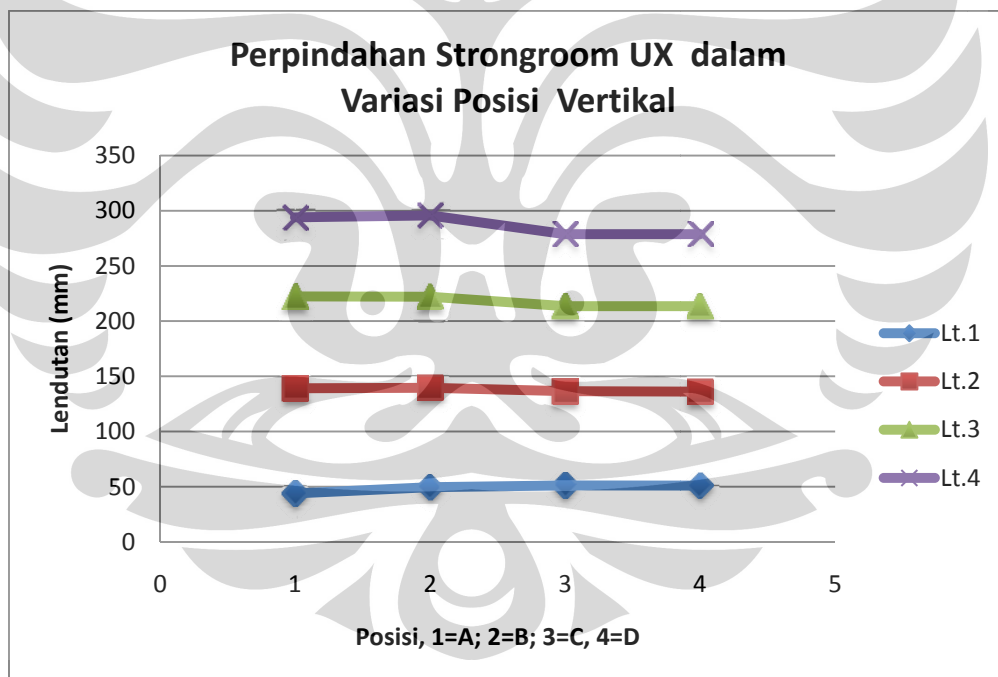
Karena peninjauan parameter perpindahan rz yang mendapat predikat ekstrim, maka dapat ditarik kesimpulan bahwa posisi *strongroom* yang memberikan efek perpindahan terkecil adalah posisi D (sentris pada denah) di lantai satu, dan yang terbesar adalah posisi A (posisi eksentris) di lantai empat.



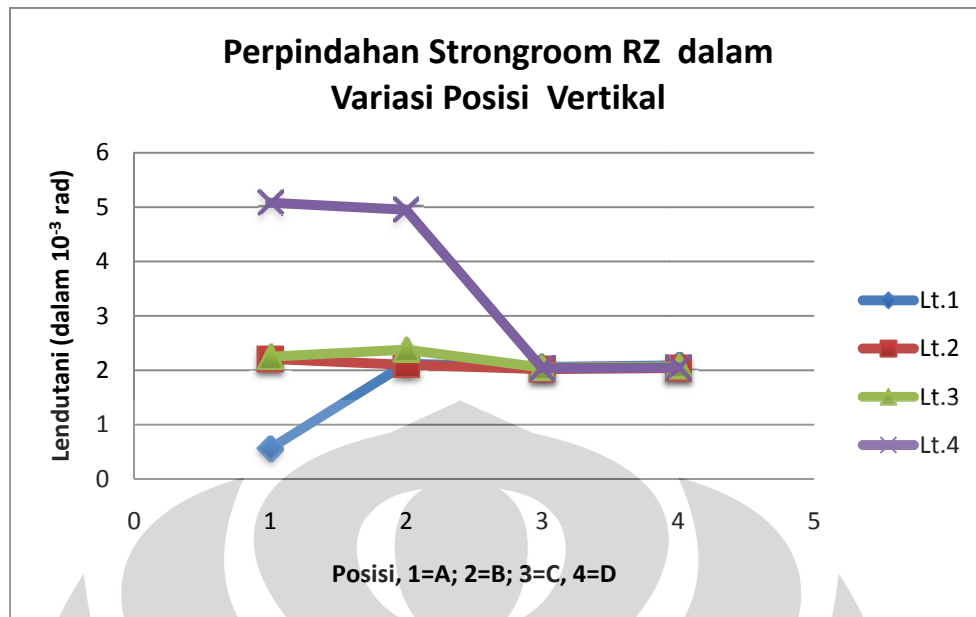
Gambar 4. 11. Perpindahan *Strongroom* UX dalam Variasi Posisi Horizontal



Gambar 4. 12. Perpindahan *Strongroom* RZ Dalam Variasi Posisi Horizontal



Gambar 4. 13. Perpindahan *Strongroom* UX dalam Variasi Posisi Vertikal



Gambar 4. 14. Perpindahan *Strongroom* RZ dalam Variasi Posisi Vertikal

Tabel 4. 4. Perpindahan *Strongroom* Relatif Terhadap Lantai

Posisi	Perpindahan Bangunan (m)	Perpindahan Strongroom (m)	Perpindahan Relatif (m)	Perpindahan Relatif (mm)
1	0.044413	0.04390	0.00051	0.513
2	0.04563	0.04964	0.00401	4.01
3	0.046968	0.05114	0.00417	4.172
4	0.04709	0.05108	0.00399	3.99
5	0.133486	0.13916	0.00567	5.674
6	0.133982	0.13957	0.00559	5.588
7	0.131024	0.13660	0.00558	5.576
8	0.13073	0.13620	0.00547	5.47
9	0.215132	0.22244	0.00731	7.308
10	0.216148	0.22210	0.00595	5.952
11	0.207601	0.21356	0.00596	5.959
12	0.20766	0.21356	0.00590	5.9
13	0.287542	0.29407	0.00653	6.528
14	0.289257	0.29568	0.00642	6.423
15	0.272373	0.27882	0.00645	6.447
16	0.27242	0.27879	0.00637	6.37

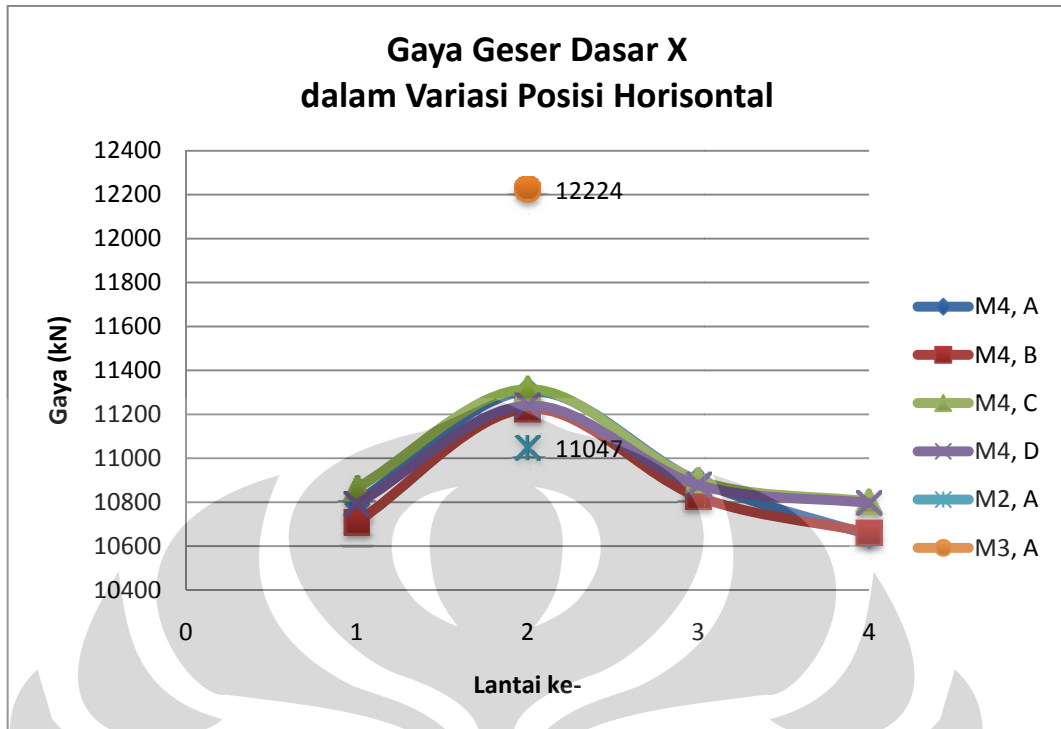
Berdasarkan gambar 4.11, perpindahan *strongroom* ux paling besar terjadi saat *strongroom* diletakkan pada posisi B, dan paling kecil di posisi C. Selisihnya mencapai 16,98 mm (6,1%) yang termasuk kategori kecil. Sedangkan berdasarkan gambar 4.13, perpindahan *strongroom* ux akan semakin besar saat *strongroom* diletakkan pada elevasi lantai yang semakin tinggi. Selisihnya mencapai 570%, yang termasuk kategori ekstrim.

Sedangkan, berdasarkan gambar 4.12 dan 4.14, pola grafik perpindahan *strongroom* rz, baik arah horisontal maupun vertikal tidak mengikuti kecenderungan yang seragam. Namun bisa dilihat, efek perpindahan terkecil terjadi saat *strongroom* diletakkan pada posisi A di lantai satu, sedangkan efek terbesarnya terjadi saat *strongroom* diletakkan pada posisi A di lantai empat. Selisih keduanya sebesar  $4,15 \times 10^{-3} \text{ rad}$  (805%). Untuk drift/perpindahan *strongroom* relatif terhadap lantai bangunan dapat dilihat pada tabel 4.4. Tabel ini memperlihatkan bahwa pembatas gerak bekerja dengan baik sehingga pergeseran maksimum *strongroom* relatif terhadap lantai bangunan sebesar 7 mm (pembatas geraknya 10 mm).

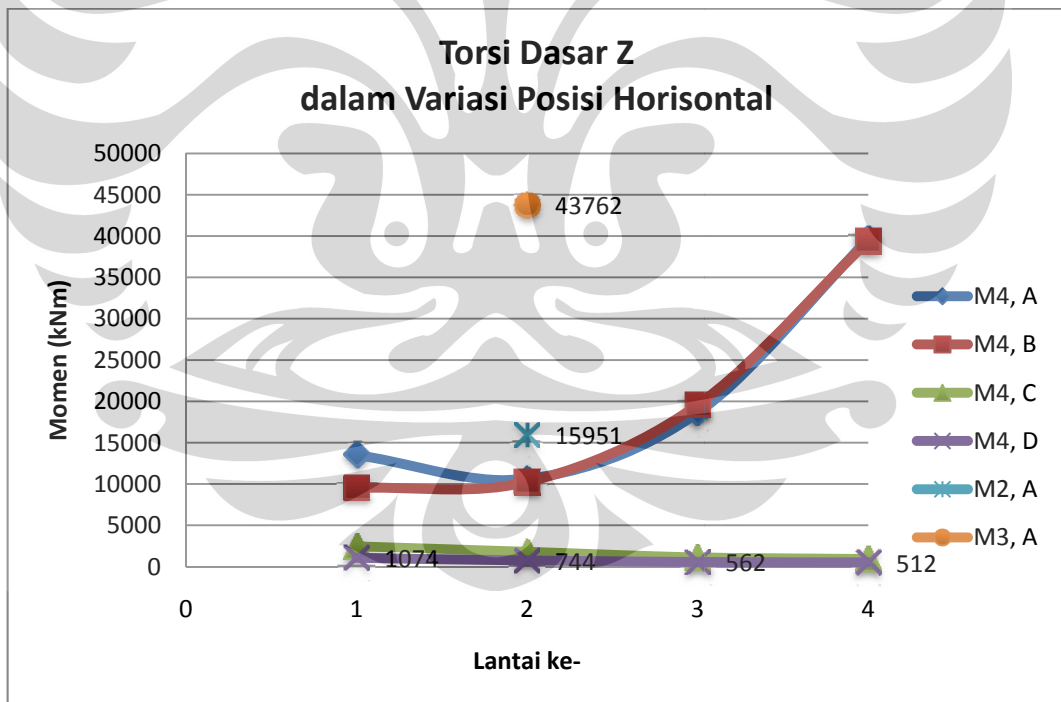
Dapat disimpulkan, *strongroom* paling baik diletakkan pada posisi yang memberikan efek perpindahan paling kecil, yaitu pada posisi A atau C di lantai satu.

### c. Respon reaksi dasar dari struktur

Pada analisis bagian ini, akan diperlihatkan juga hasil dari model 2 dan model 3.

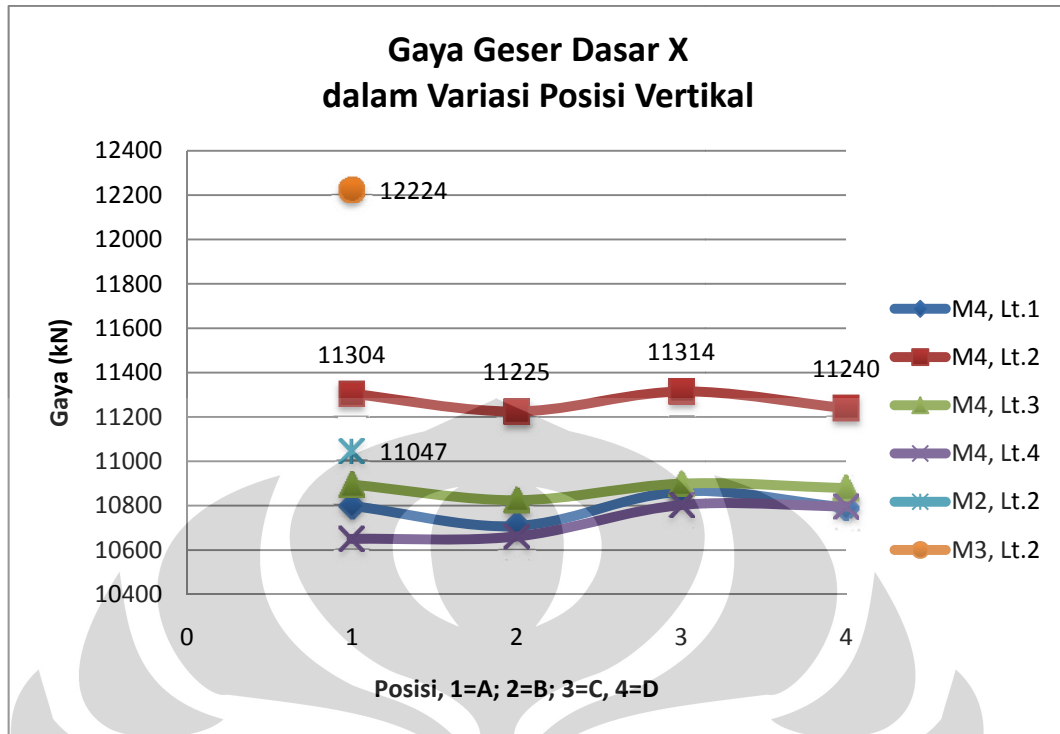


Gambar 4. 15. Gaya Geser Dasar X dalam Variasi Posisi Horizontal

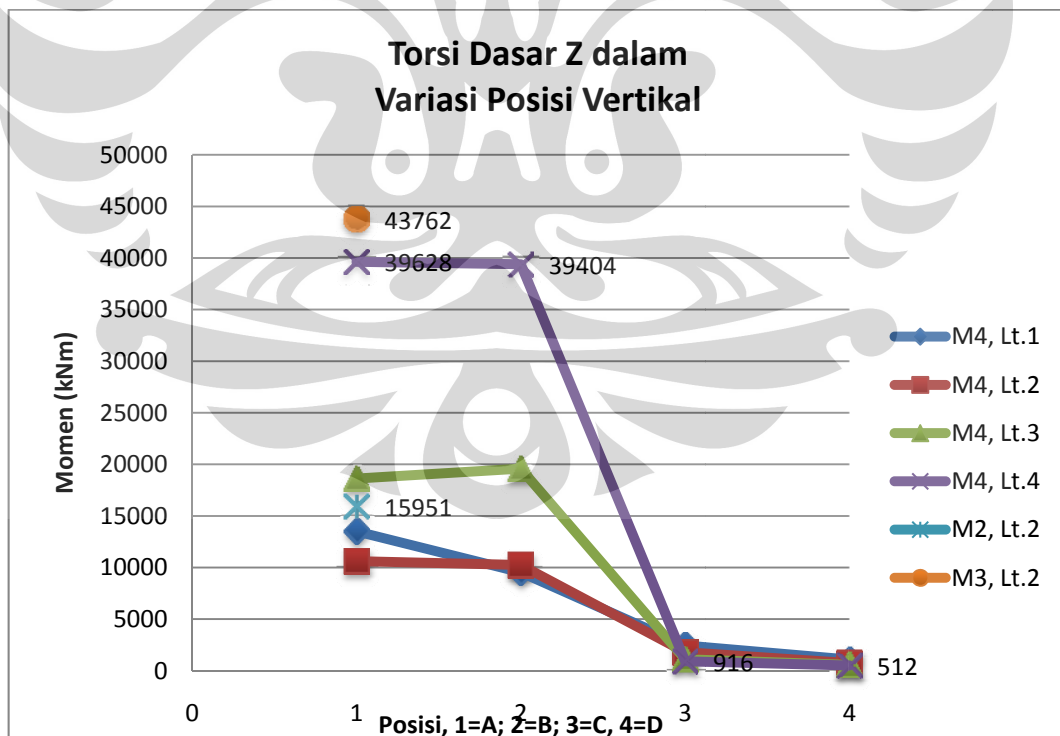


Gambar 4. 16. Torsi Dasar Z dalam Variasi Posisi Horizontal





Gambar 4. 17. Gaya Geser Dasar X dalam Variasi Posisi Vertikal



Gambar 4. 18. Torsi Dasar Z dalam Variasi Posisi Vertikal

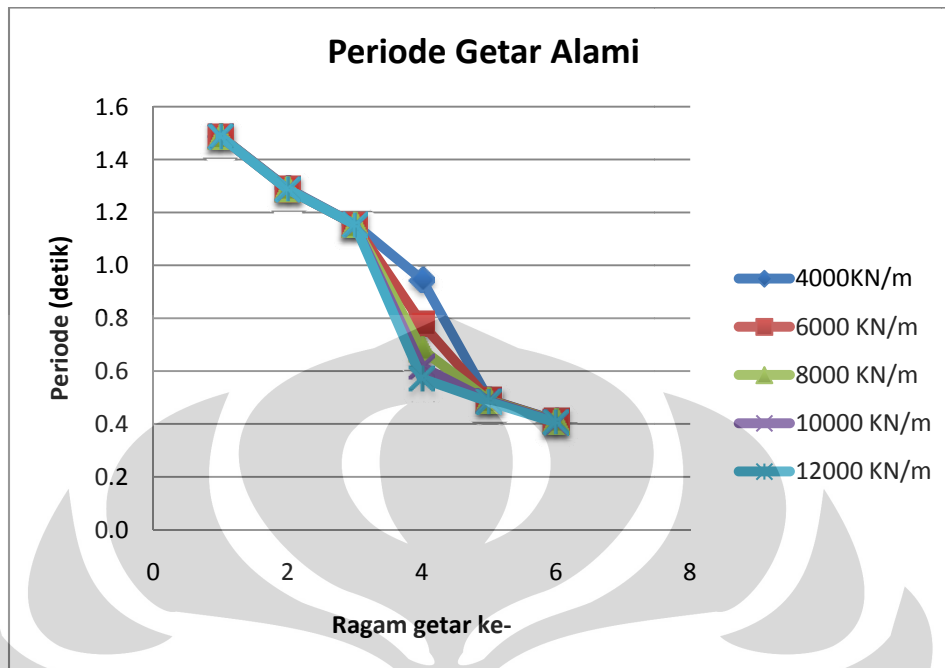
Berdasarkan gambar 4.15, penempatan *strongroom* pada posisi C akan memberikan respon gaya geser dasar x terbesar, sedangkan penempatan *strongroom* pada posisi B akan memberikan respon terkecil. Selisih antara kedua posisi ini sebesar 1,4%. Sedangkan berdasarkan gambar 4.17, penempatan *strongroom* pada lantai 2 akan memberikan respon terbesar terhadap struktur, sedangkan penempatan *strongroom* pada lantai 4 akan memberikan respon terkecil, selisihnya hingga 5,6%. Jika struktur model 4 ini dibandingkan pada posisi yang sama dengan model 2 dan model 3, model 3 memiliki respon gaya geser dasar x terbesar. Selisihnya sebesar 8,1%. Model 2 menerima gaya geser x yang lebih kecil daripada model 4, dengan selisih sebesar 2,3%.

Berdasarkan gambar 4.16, penempatan *strongroom* pada posisi D akan memberikan respon torsi dasar z terkecil, sedangkan penempatan pada posisi A akan memberikan respon terbesar. Selisih antara keduanya mencapai 39117 *kNm* (7643%). Berdasarkan gambar 4.18, penempatan *strongroom* pada lantai 4 akan memberikan respon torsi dasar z terbesar, tetapi penempatan pada lantai 2 akan memberikan respon terkecil, selisihnya hingga 26123 *kNm* (193%). Jika struktur model 4 dalam variasi ini dibandingkan pada posisi yang sama dengan model 2 dan model 3, model 3 memiliki respon torsi dasar z lebih besar. Selisihnya sebesar 33134 *kNm* (311,8%). Respon torsi dasar z dari model 2 juga masih lebih besar daripada model 4, dengan selisih sebesar 5323 *kN* (50,1%).

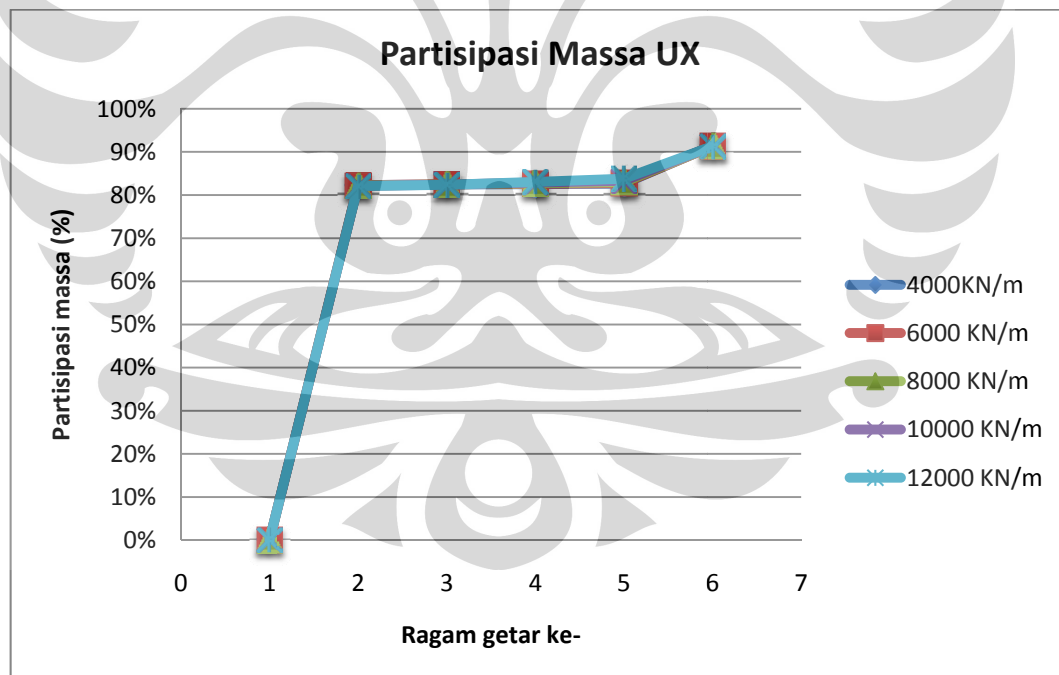
#### 4.1.2 Analisis Variasi Kekakuan

Ada 5 macam kekakuan peredam viskoelastik yang divariasikan, yaitu 4000 *kN/m*, 6000 *kN/m*, 8000 *kN/m*, 10000 *kN/m*, dan 12000 *kN/m*. Dalam beberapa grafik, akan ditampilkan juga perbandingan dengan hasil dari model 2 dan model 3.

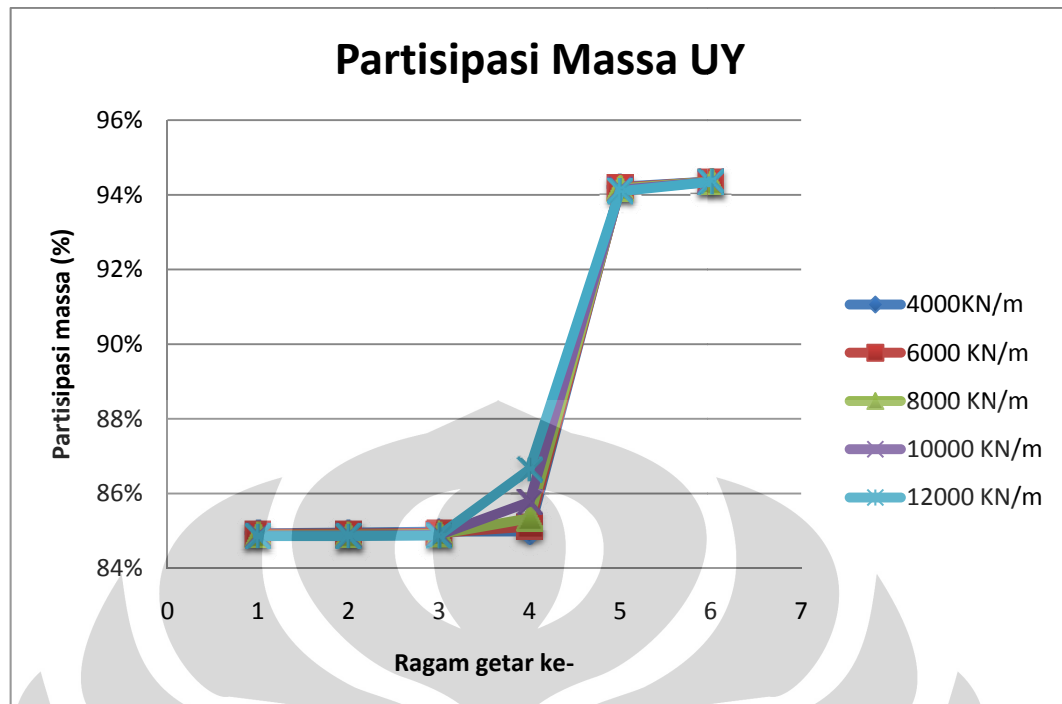
## a. Karakteristik dinamik dari struktur



Gambar 4. 19. Periode Getar Alami dalam Variasi Kekakuan



Gambar 4. 20. Partisipasi Massa UX

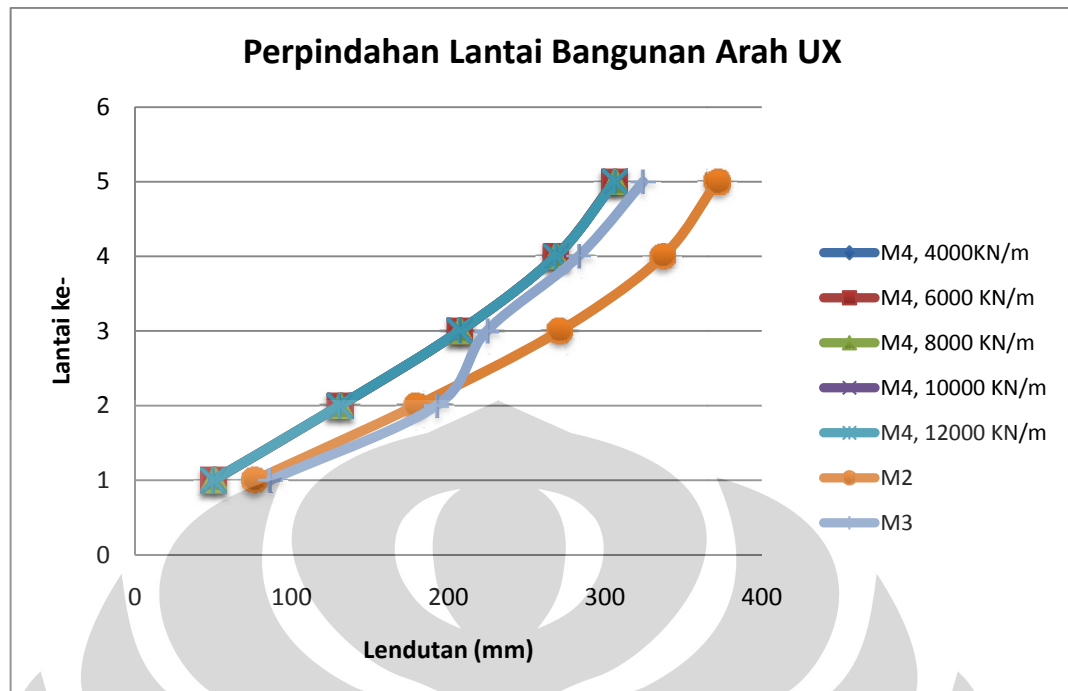


Gambar 4. 21. Partisipasi Massa UY

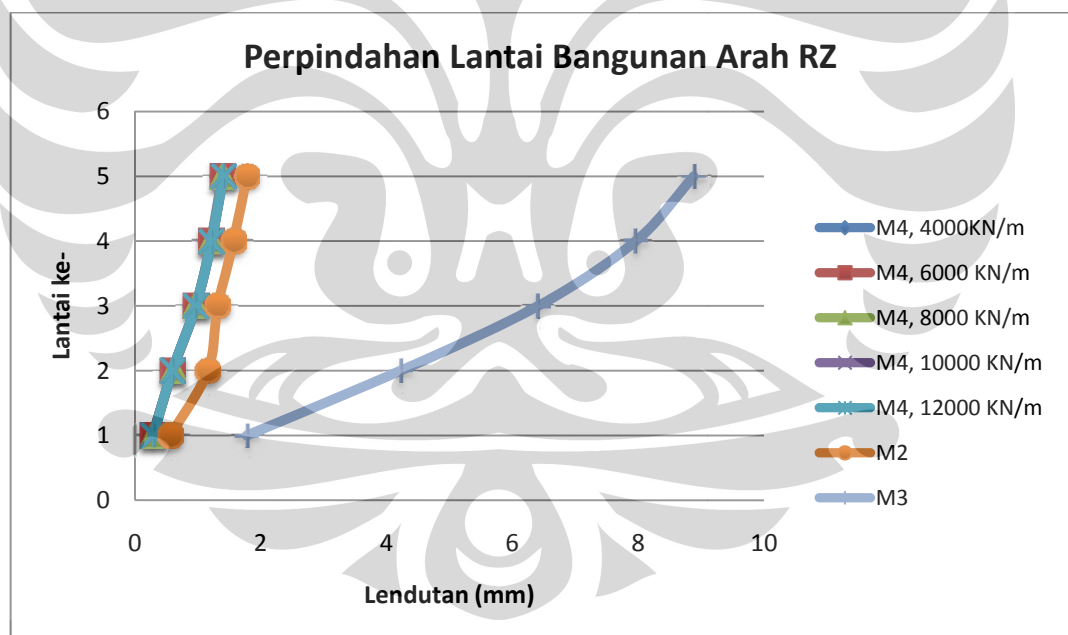
Berdasarkan gambar 4.20 dan 4.21 mengenai partisipasi massa timbul, dapat disimpulkan bahwa ragam getar pertama dan kedua, secara berurutan merupakan ragam getar translasi arah y dan translasi arah x. Periode getar alami dari kelima variasi tersebut cukup berimpit dan hanya terlihat berbeda pada ragam getar keempat. Kecenderungan pada ragam getar keempat ini adalah menurunnya periode getar alami seiring meningkatnya nilai kekakuan peredam *strongroom*. Sehingga, dapat disimpulkan bahwa semakin besar kekakuan peredam *strongroom*, maka semakin kecil nilai periode getar alami bangunan.

b. Perpindahan struktur dan *strongroom*

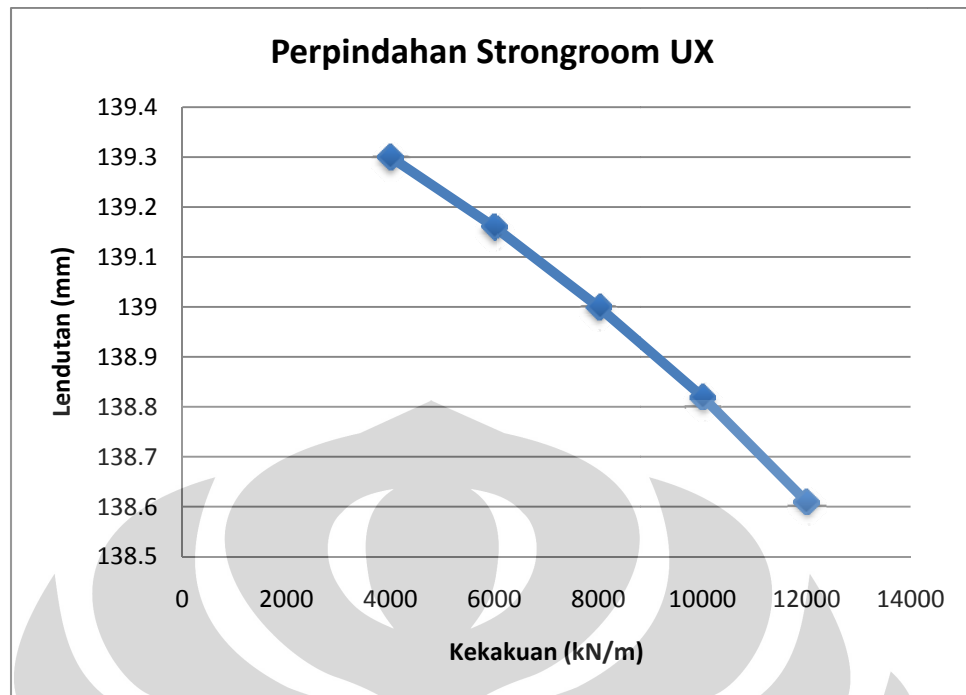
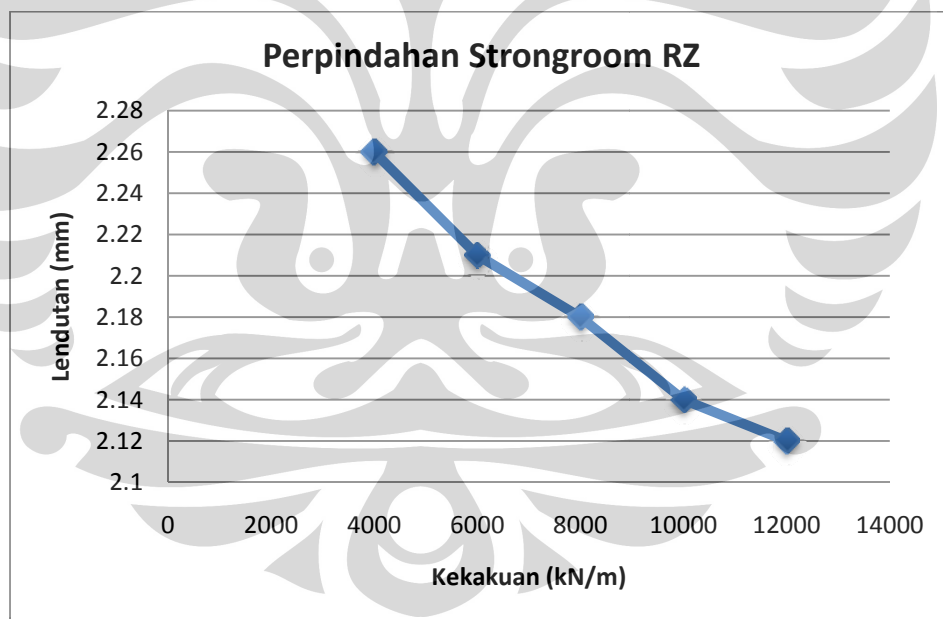
Berikut ini akan diperlihatkan grafik perbandingan perpindahan dari struktur pada tiap lantai:



Gambar 4. 22. Perpindahan Lantai Bangunan UX



Gambar 4. 23. Perpindahan Lantai Bangunan RZ

Gambar 4. 24. Perpindahan *Strongroom* UXGambar 4. 25. Perpindahan *Strongroom* RZ

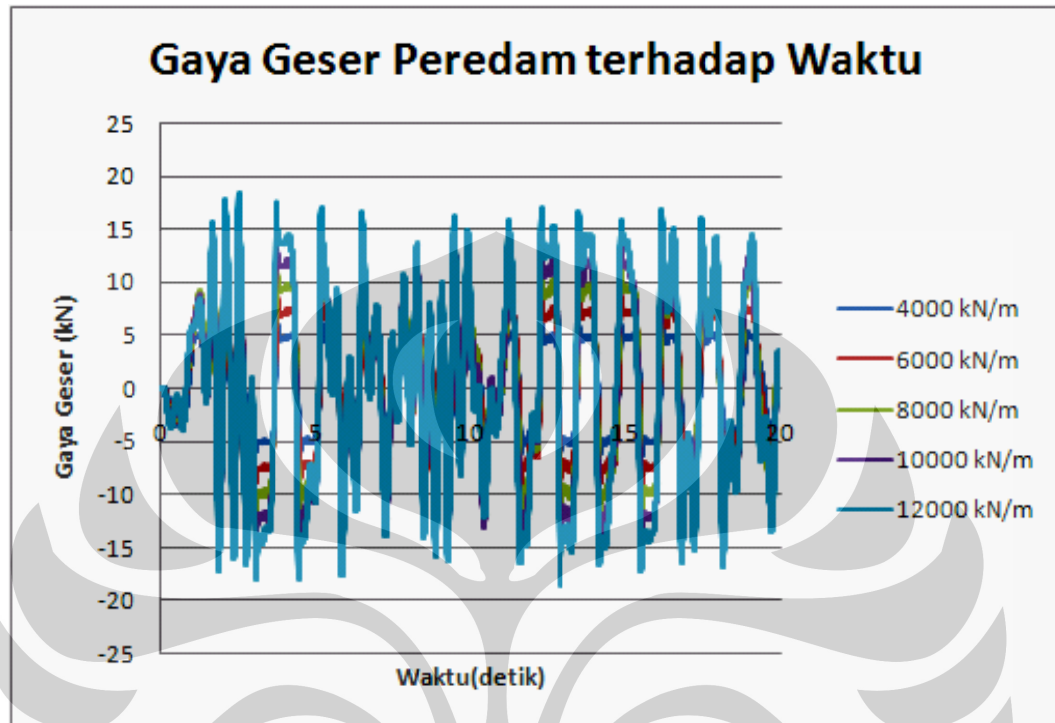
Tabel 4. 5. Perpindahan *Strongroom* Relatif Terhadap Lantai

Kekakuan ( <i>kN/m</i> )	Perpindahan Bangunan (m)	Perpindahan Strongroom (m)	Drift Relatif (m)	Drift Relatif (mm)
4000	0.133575	0.13930	0.00573	5.725
6000	0.133486	0.13916	0.00567	5.674
8000	0.133426	0.13900	0.00557	5.574
10000	0.133407	0.13882	0.00541	5.413
12000	0.133405	0.13861	0.00521	5.205

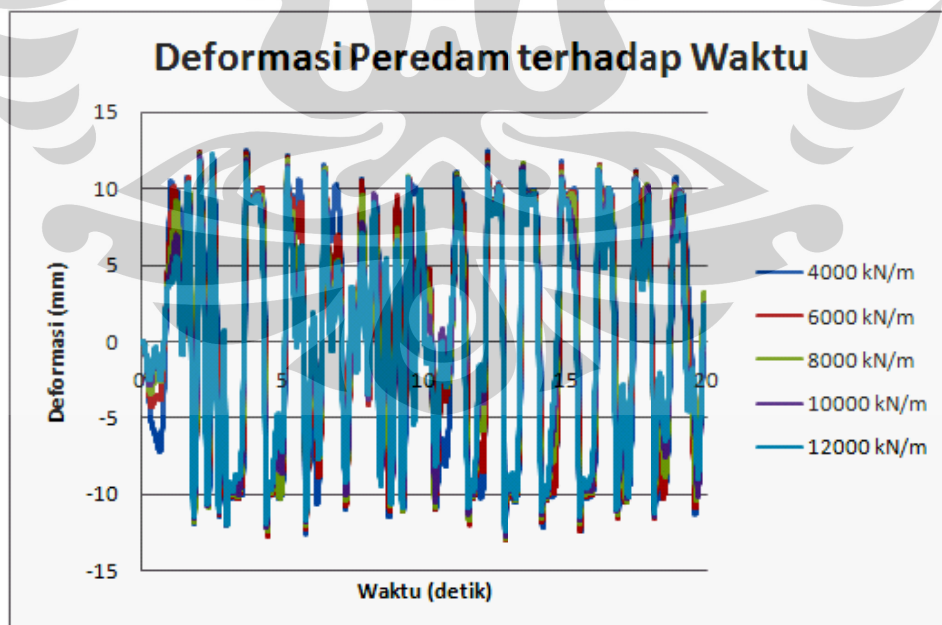
Berdasarkan gambar 4.22, kelima variasi kekakuan peredam *strongroom* memiliki respon perpindahan lantai bangunan *ux* yang cukup seragam. Respon perpindahan yang cukup seragam ini ternyata nilainya lebih kecil daripada respon perpindahan pada model 2 dan model 3. Dengan catatan, selisih perpindahan lantai bangunan *ux* pada model 2 dan model 3 terhadap variasi kekakuan ini secara berurutan mencapai 51,5% dan 72,3%. Pada arah *rz*, kelima variasi kekakuan peredam *strongroom* memiliki respon yang menyerupai respon perpindahan lantai *ux*. Respon perpindahan lantai *rz* pada model 2 dan model 3 juga jauh lebih besar, dengan selisih hingga 101,9% untuk model 2, dan 603% untuk model 3. Sedangkan, jika ditinjau berdasarkan perpindahan *strongroom* yang terjadi, yaitu gambar 4.24 dan 4.25 perpindahan *strongroom* *ux* dan *rz* cenderung mengecil seiring bertambahnya kekakuan. Namun, persentase penurunan perpindahan ini hanya sekitar 0,5%, yaitu dalam kategori kecil. Juga dapat dilihat pada tabel 4.4, perpindahan *strongroom* relatif terhadap lantai bangunan makin kecil saat kekakuan makin besar.

Dapat disimpulkan bahwa ketika kekakuan peredam divariasikan, nilai perpindahan lantai baik dalam *ux* dan *rz* tidak berubah secara signifikan. Namun, perpindahan *strongroom* *ux* dan *rz* cenderung mengecil seiring bertambahnya kekakuan. Dapat disimpulkan juga bahwa nilai perpindahan lantai bangunan model 4 dalam variasi ini lebih kecil daripada model 2 dan model 3, dengan selisih sampai 603%.

## c. Respon peredam dan pembatas gerak

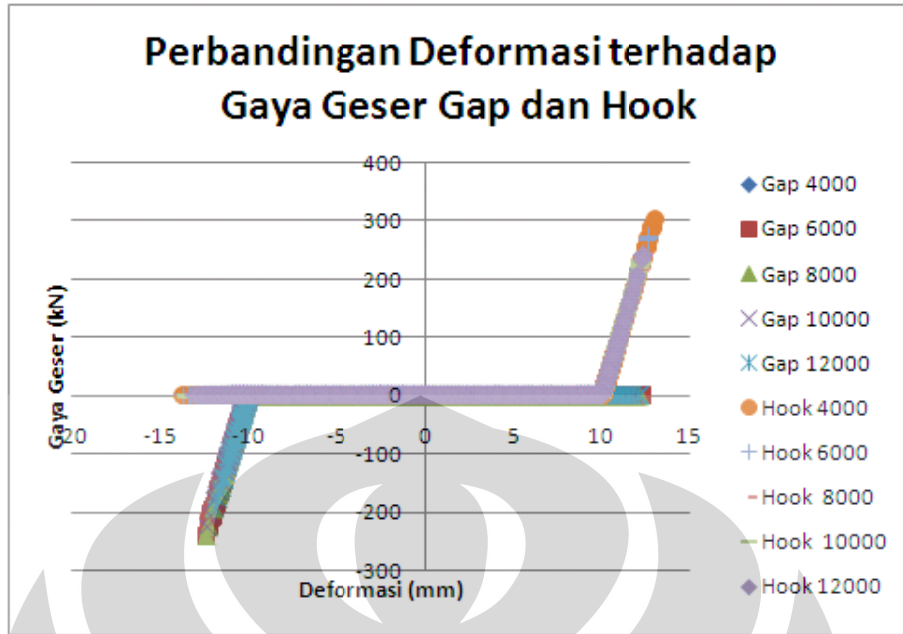


Gambar 4. 26. Gaya Geser Peredam terhadap Waktu



Gambar 4. 27. Deformasi peredam terhadap waktu

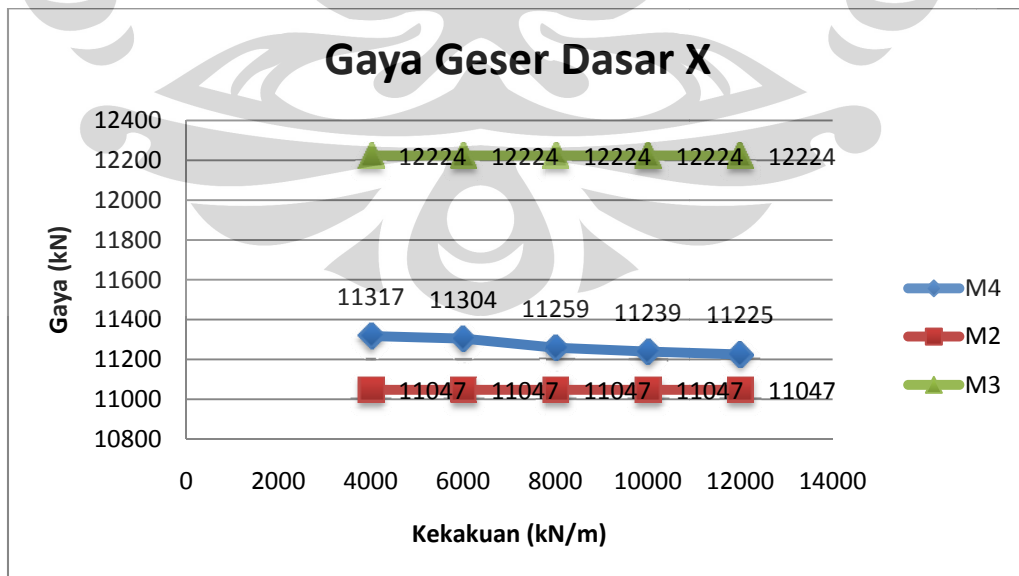




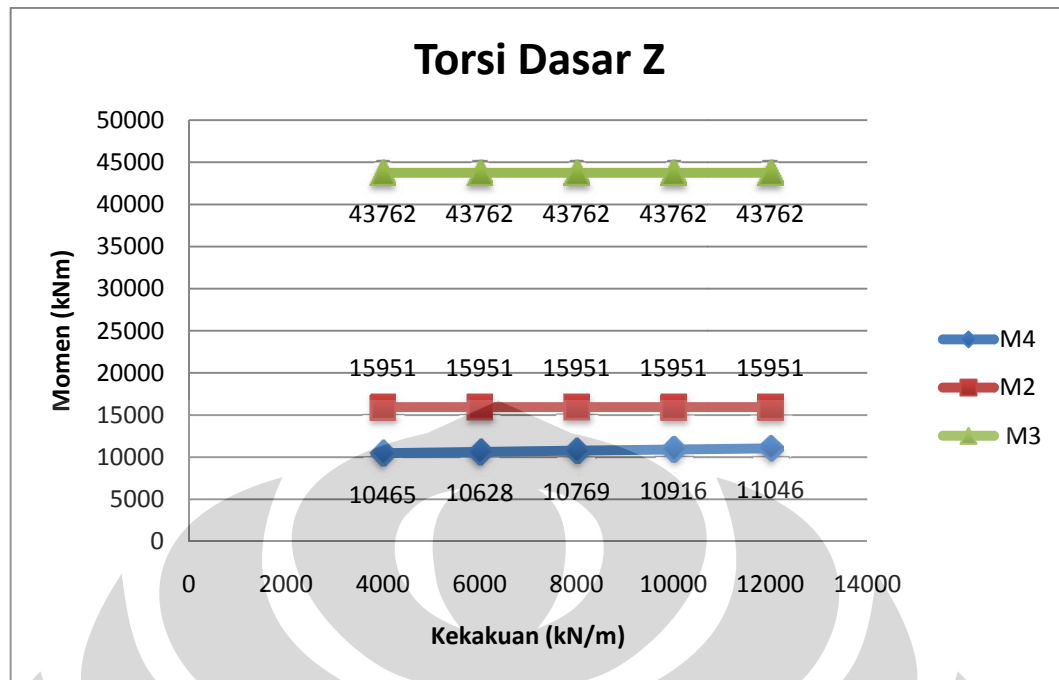
Gambar 4. 28. Perbandingan deformasi terhadap gaya geser *gap* dan *hook*

Berdasarkan gambar 4.26, peningkatan kekakuan peredam berbanding lurus dengan kenaikan gaya geser peredam. Sedangkan, berdasarkan gambar 4.27, perpindahan peredam cenderung mengecil saat kekakuan membesar, walau tidak terlalu signifikan. Terakhir, gambar 4.28 membuktikan bahwa *link gap* dan *hook* hanya akan berdeformasi setelah mencapai perpindahan sebesar 10 mm.

d. Respon reaksi dasar dari struktur



Gambar 4. 29. Gaya Geser Dasar X pada Variasi Kekakuan



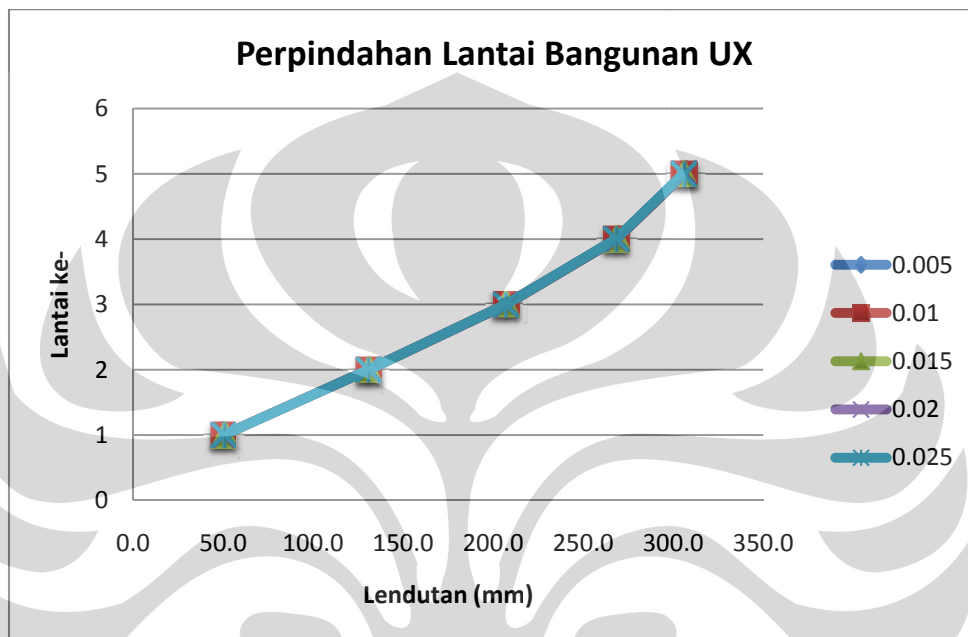
Gambar 4. 30. Torsi Dasar pada Variasi Kekakuan

Berdasarkan gambar 4.29, gaya geser dasar x berkurang saat kekakuan dari peredam semakin tinggi. Nilai minimum gaya geser dasar x ada pada struktur dengan kekakuan peredam terbesar, dengan selisih mencapai 92 kN atau sebesar 0,8%. Jika variasi ini dibandingkan dengan model 2, maka nilai gaya geser dasar x pada model 2 lebih kecil dengan selisih hingga 270.5 kN atau sebesar 2.4%. Jika variasi ini dibandingkan dengan model 3, maka nilai gaya geser x pada model 3 lebih besar dengan selisih hingga 1000 kN, atau tereduksi sebesar 8,2%. Sedangkan, berdasarkan gambar 4.30, nilai torsi dasar z bertambah saat kekakuan peredam diperbesar. Nilai minimumnya ada pada struktur dengan kekakuan terkecil, dengan selisih mencapai 580 kNm. Jika variasi ini dibandingkan dengan model 2, maka nilai torsi dasar z pada model 2 lebih besar dengan selisih hingga 5500 kNm. Torsi dasar z dari variasi ini juga masih lebih kecil terhadap model 3 dengan selisih hingga 33000 kN. Dengan kata lain model 4 ini mereduksi hingga 76,1% gaya pada model 3. Bisa disimpulkan, perubahan kekakuan tidak berpengaruh secara signifikan terhadap respon reaksi dasar bangunan. Namun, memasang peredam pada permodelan *strongroom* dengan dinding *shell* dapat mereduksi torsi secara signifikan hingga 76,1%, dan juga mereduksi gaya geser hingga 8,2%.

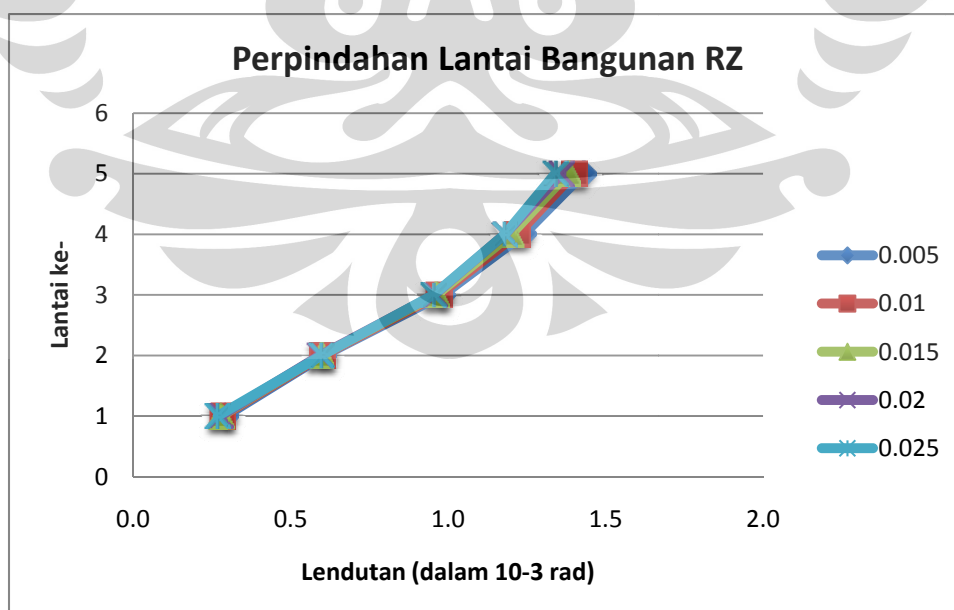
#### 4.1.3 Analisis Variasi Pembatasan Lendutan *Strongroom*

Dalam variasi ini, periode getar alami dan partisipasi massa tidak ditampilkan lagi karena perubahan pembatasan lendutan *strongroom* tidak mempengaruhi massa maupun kekakuan struktur.

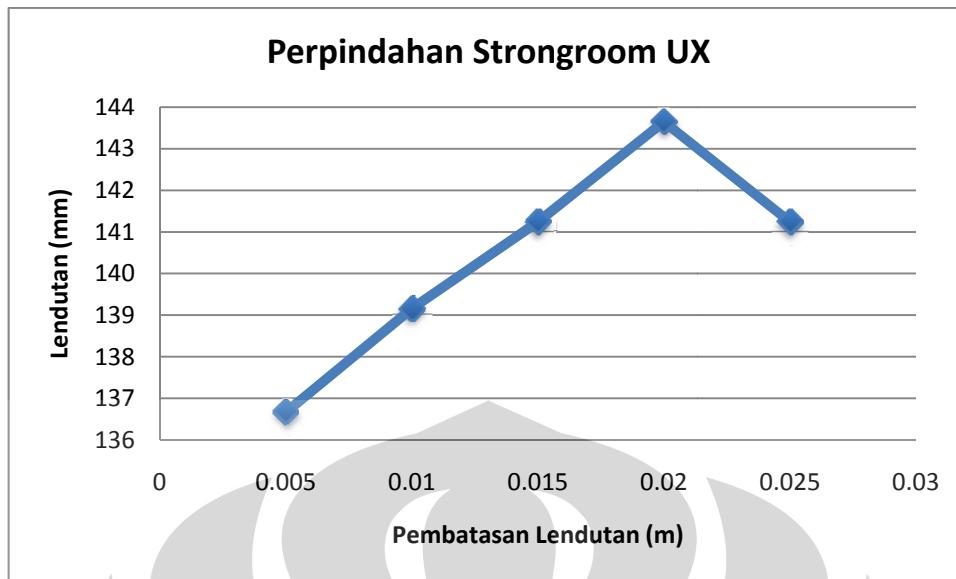
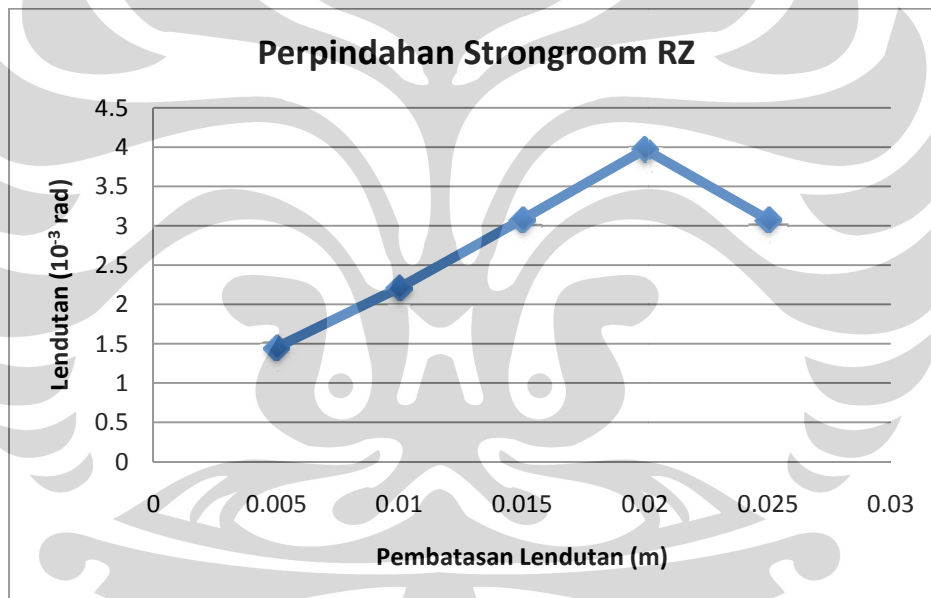
##### a. Perpindahan struktur dan *strongroom*



Gambar 4. 31. Perpindahan Lantai Bangunan Arah UX



Gambar 4. 32. Perpindahan Lantai Bangunan RZ

Gambar 4. 33. Perpindahan *Strongroom* Arah UXGambar 4. 34. Perpindahan *Strongroom* Arah RZTabel 4. 6. Perpindahan *Strongroom* Relatif Terhadap Lantai

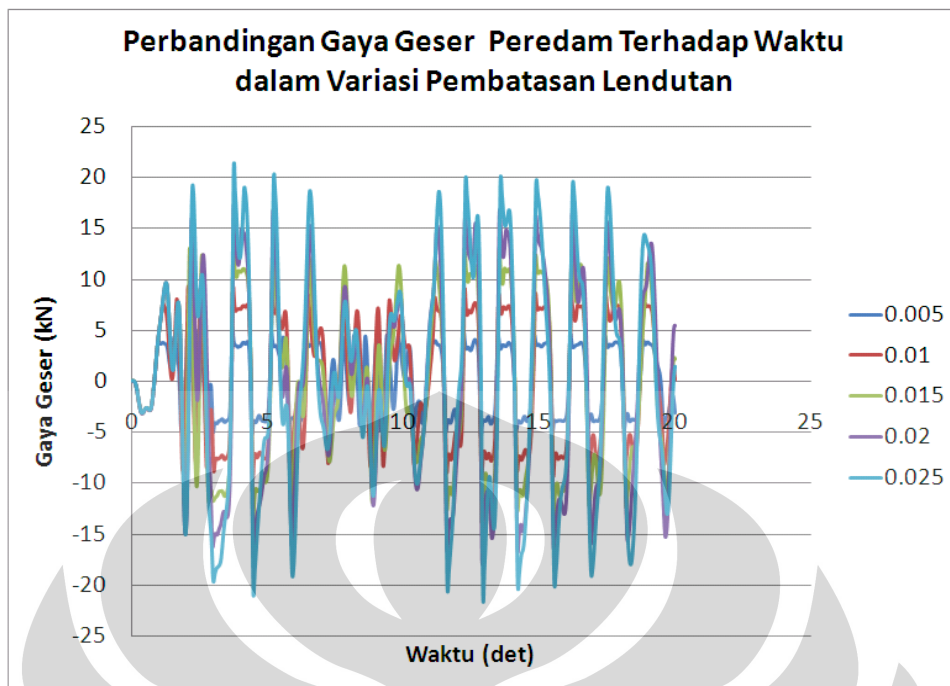
Pembatasan Lendutan (m)	Perpindahan Bangunan (m)	Perpindahan Strongroom (m)	Drift Relatif (m)	Drift Relatif (mm)
0.005	0.13336	0.13666	0.00330	3.304
0.01	0.13349	0.13916	0.00567	5.674
0.015	0.13343	0.14124	0.00781	7.814
0.02	0.13344	0.14365	0.01021	10.214
0.025	0.13348	0.14124	0.00776	7.764

Berdasarkan gambar 4.31, variasi batasan pergerakan *strongroom* tidak memberikan pengaruh yang berarti terhadap perpindahan lantai bangunan arah  $ux$ . Sedangkan, berdasarkan gambar 4.32, variasi batasan pergerakan *strongroom* juga tidak memberikan pengaruh yang berarti terhadap perpindahan bangunan arah  $rz$ . Namun ada sedikit kecenderungan penurunan perpindahan seiring membesarnya batasan pergerakan. Selisihnya termasuk dalam kategori kecil.

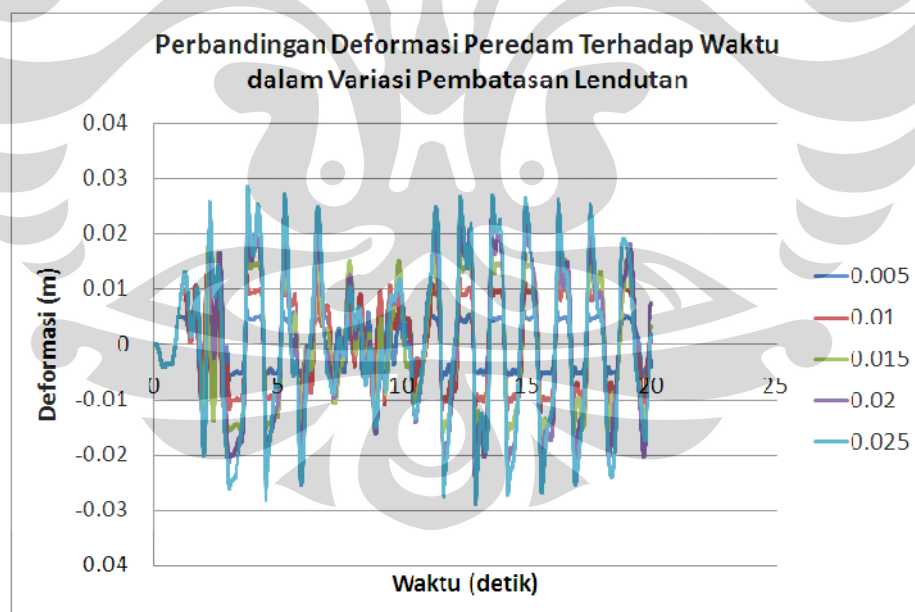
Berdasarkan gambar 4.33, nilai maksimum perpindahan *strongroom* arah  $ux$  terjadi saat *strongroom* dibatasi pergerakannya sebesar  $0,02\text{ m}$ , dan minimum terjadi saat batasan sebesar  $0,005\text{ m}$ . Selisihnya sebesar  $7\text{ mm}$  ( $5,1\%$ ). Kecenderungan pada gambar 4.34 sama dengan gambar 4.33, yaitu nilai perpindahan *strongroom* arah  $rz$  membesar seiring dengan nilai batasan pergerakan, hingga nilai maksimum di pembatasan  $0,02\text{ m}$  dan terkecil pada pembatasan  $0,005\text{ m}$ . Selisihnya mencapai  $2,52 \times 10^{-3}\text{ rad}$  ( $173,8\%$ ). Sedangkan perpindahan *strongroom* relatif terhadap lantai bangunan yang ditunjukkan Tabel 4.4. memiliki *trend* yang sama, yaitu maksimum di pembatasan gerak  $0,02\text{ m}$ .

Sehingga, didapat kesimpulan bahwa pengaruh variasi batasan pergerakan terhadap perpindahan lantai bangunan masih dalam kategori kecil. Namun, efek variasi batasan pergerakan terhadap perpindahan *strongroom* arah  $ux$  dan  $rz$  cukup signifikan, dengan nilai maksimum dicapai pada batasan  $0,02\text{ m}$  dan minimum di  $0,005\text{ mm}$ .

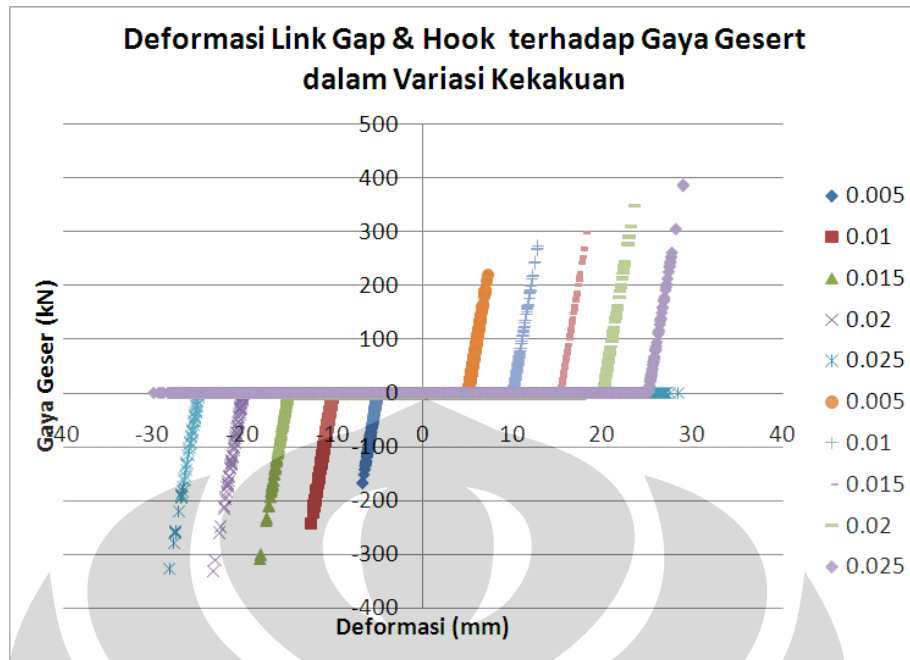
b. Respon peredam dan pembatas gerak



Gambar 4. 35. Gaya Geser Peredam Terhadap Waktu dalam Variasi Pembatasan Perpindahan



Gambar 4. 36. Deformasi Peredam Terhadap Waktu dalam Variasi Pembatasan Perpindahan

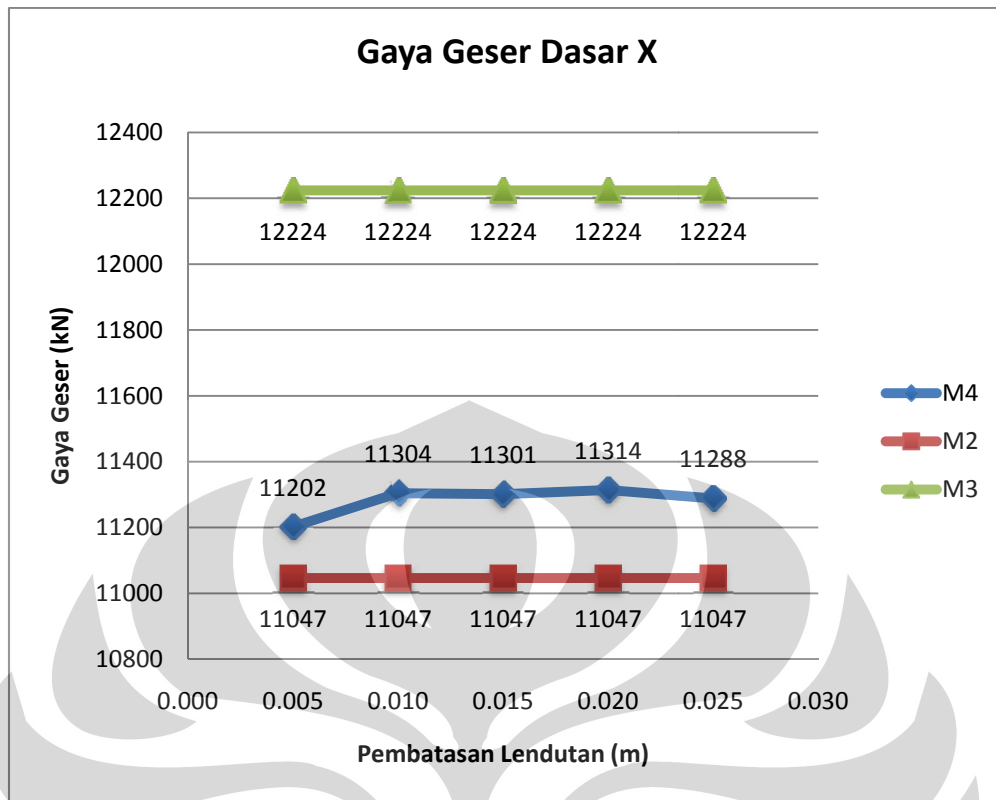


Gambar 4. 37. Deformasi Link Gap dan Hook Terhadap Gaya Geser dalam Variasi Pembatasan Perpindahan

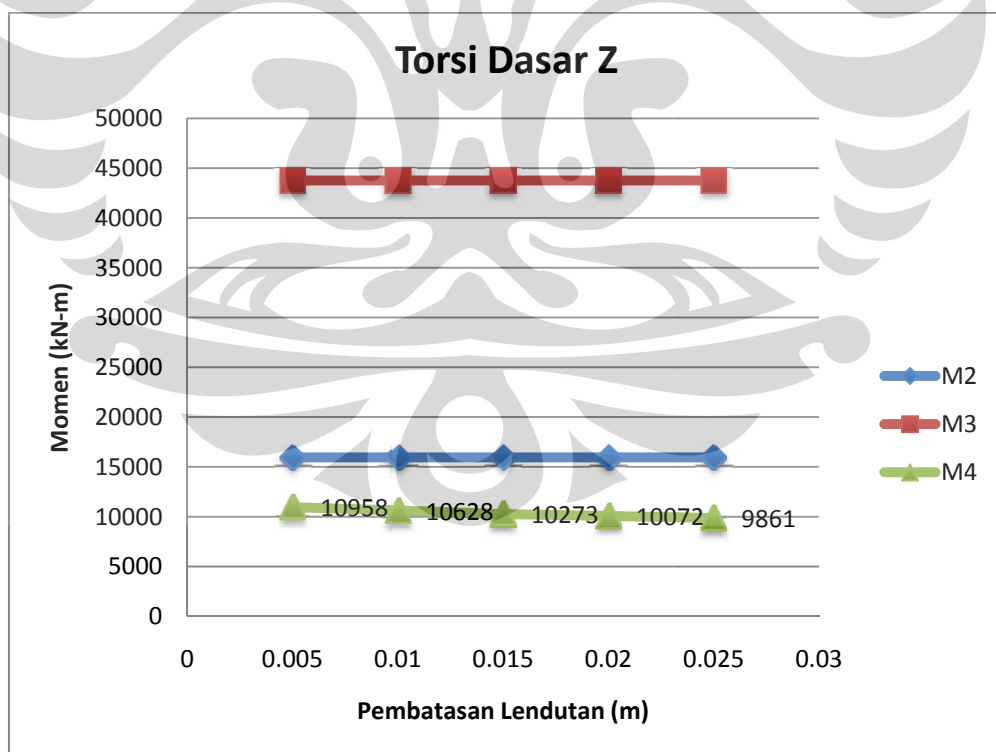
Gambar 4.35 menunjukkan kenaikan gaya geser pada peredam saat batas pergerakan *strongroom* diperbesar. Sedangkan, gambar 4.36 memperlihatkan deformasi dari peredam untuk tiap batasan gerak. Grafik ini menjadi penanda bahwa peningkatan batasan gerak *strongroom* berbanding lurus dengan kenaikan deformasi peredam. Di sini, nilai deformasi maksimum tiap peredam mendekati nilai batasan gerak *strongroom*.

Gambar 4.37 memperlihatkan bahwa *link gap* dan *hook* bekerja sesuai pembatasan perpindahan yang diberikan. Kesimpulan yang dapat diambil adalah saat batasan gerak dari *strongroom* diperbesar, maka gaya geser dan deformasi peredam juga akan meningkat.

c. Respon reaksi dasar dari struktur



Gambar 4. 38. Gaya Geser Dasar X dalam Variasi Batasan Lendutan



Gambar 4. 39. Torsi Dasar Z dalam Variasi Pembatasan Lendutan



Berdasarkan gambar 4.38, gaya geser dasar x cenderung meningkat saat pembatasan perpindahan *strongroom* diperbesar. Nilai minimum gaya geser dasar x terjadi saat *strongroom* dibatasi perpindahannya sebesar 0,005 m, dan terbesar saat dibatasi sebesar 0,02 m. Selisih keduanya mencapai 111,8 kN atau sebesar 1%. Jika variasi ini dibandingkan dengan model 2, ternyata nilai gaya geser dasar x pada model 2 lebih kecil dengan selisih hingga 267,31 kN atau sebesar 2.4%. Jika variasi ini dibandingkan dengan model 3, maka nilai gaya geser x pada model 3 lebih besar, dengan selisih hingga 1021kN atau 9,12%.

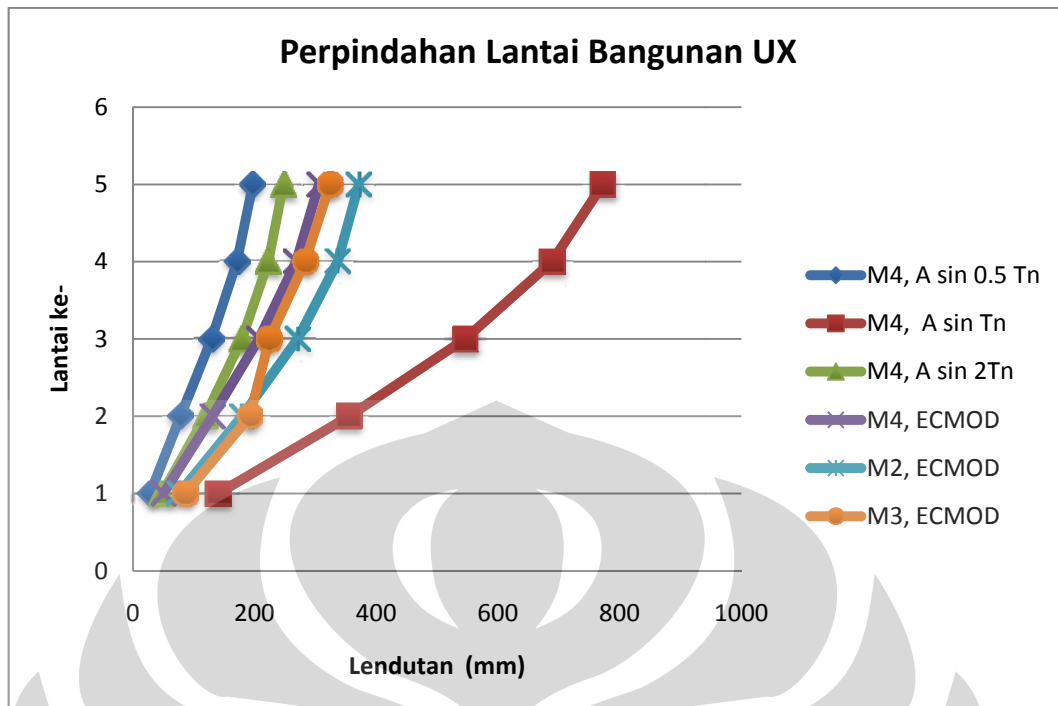
Berdasarkan gambar 4.39, nilai torsi dasar z berkurang saat pembatasan perpindahan *strongroom* diperbesar. Nilai minimum ada pada struktur dengan pembatasan perpindahan terbesar, dengan selisih mencapai 886 kNm atau sebesar 8,09%. Jika variasi ini dibandingkan dengan model 2, maka nilai torsi dasar z pada model 2 lebih besar dengan selisih mencapai 6090 kNm, dengan kata lain model 2 tereduksi sebesar 61,76%. Torsi dasar z pada variasi ini juga masih lebih kecil dibanding model 3 dengan selisih hingga 33900 kN.

Dapat disimpulkan, perubahan pembatasan perpindahan sedikit signifikan dalam respon reaksi dasar bangunan. Dibandingkan variasi kekakuan, variasi batasan pergerakan memberikan signifikansi yang lebih besar.

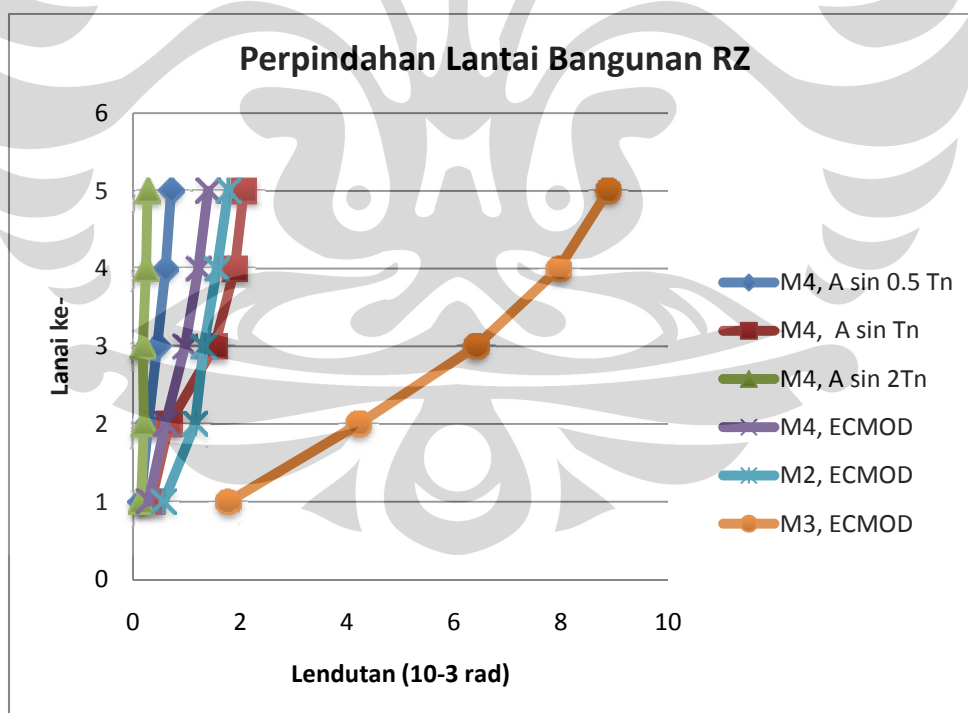
#### 4.1.4 Analisis Variasi Percepatan Gempa

Ada 4 macam variasi percepatan gempa, yaitu percepatan  $A \sin 0,5 T_n$ ,  $A \sin T_n$ ,  $A \sin 2T_n$ , dan ECMOD. Dalam analisis ini juga tidak diperlihatkan periode getar dan partisipasi massa, karena variabel yang diubah tidak ada sangkut pautnya dengan massa dan kekakuan struktur.

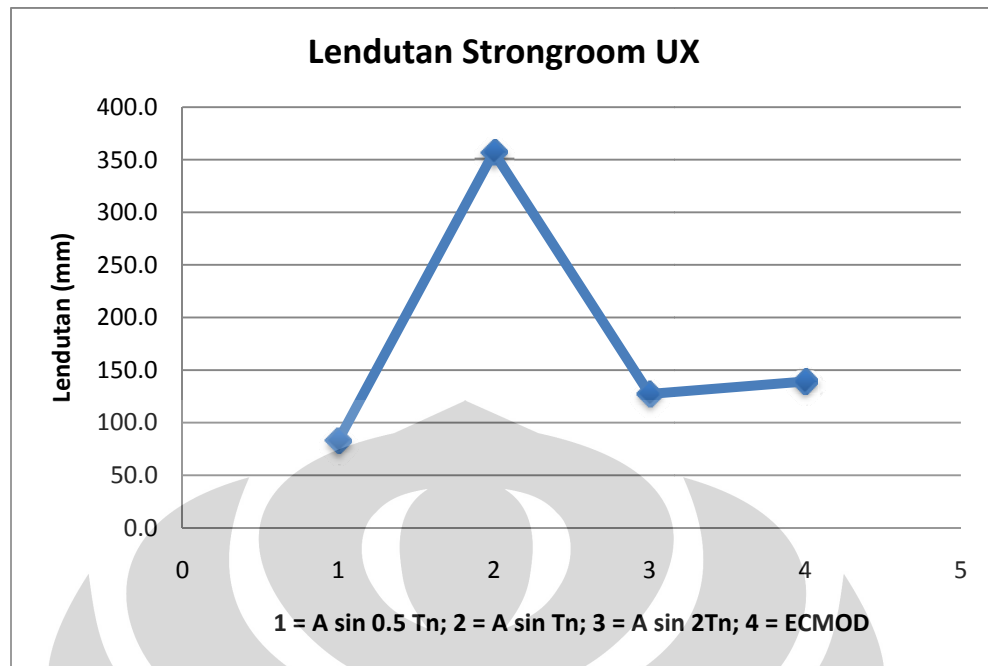
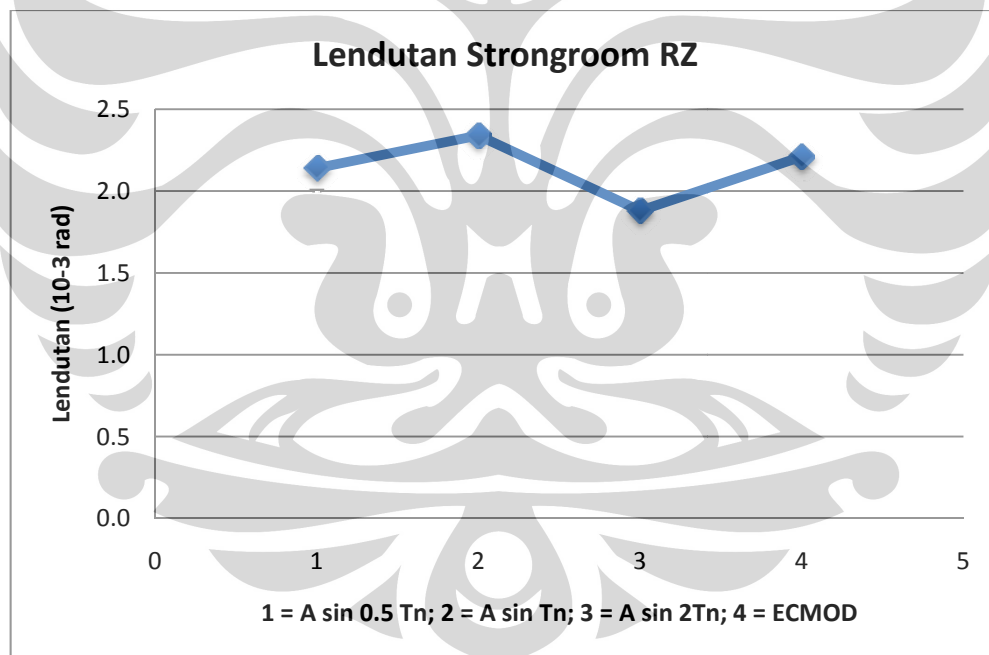
##### a. Perpindahan struktur dan *strongroom*



Gambar 4. 40. Perpindahan Lantai Bangunan UX



Gambar 4. 41. Perpindahan Lantai Bangunan Arah RZ

Gambar 4. 42. Perpindahan *Strongroom* Arah UXGambar 4. 43. Perpindahan *Strongroom* RZ

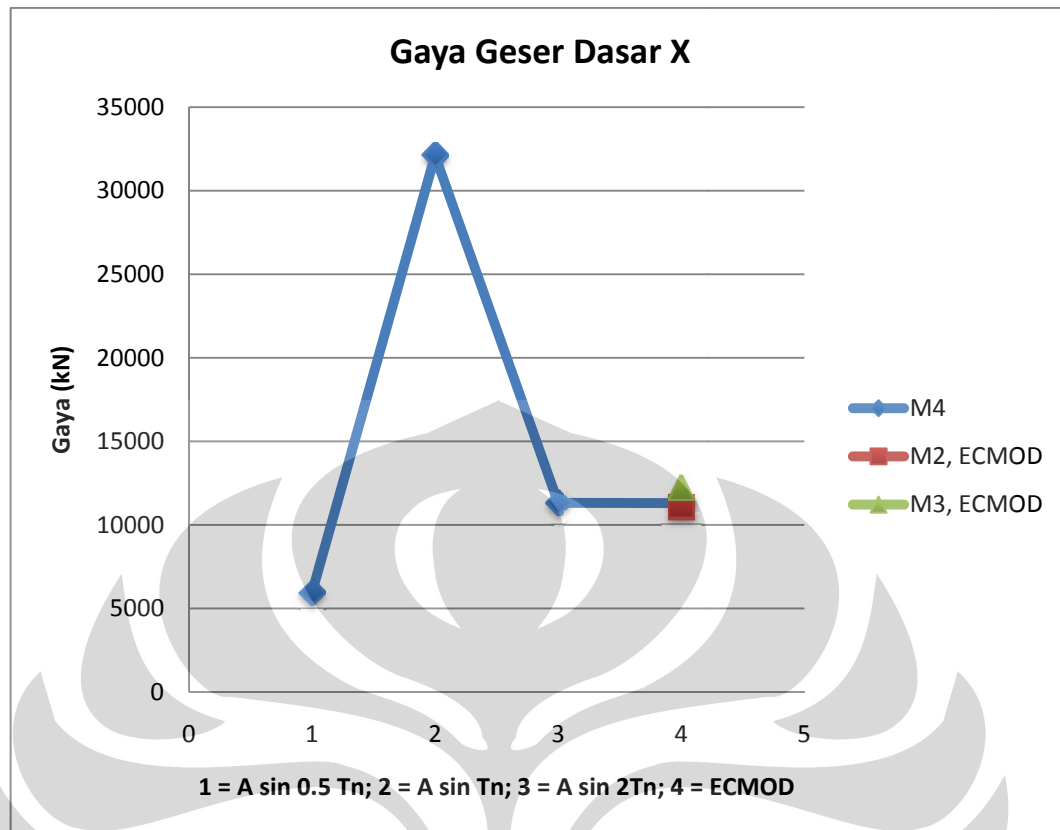
Tabel 4. 7. Perpindahan *Strongroom* Relatif Terhadap Lantai

Percepatan Gempa ( $kN/m$ )	Perpindahan Bangunan (m)	Perpindahan Strongroom (m)	Drift Relatif (m)	Drift Relatif (mm)
A sin $0,5T_n$	0.081355	0.08264	0.00129	1.285
A sin $T_n$	0.350099	0.35712	0.00702	7.021
A sin $2T_n$	0.101355	0.12731	0.02596	6.238
ECMOD	0.133486	0.13916	0.00567	5.674

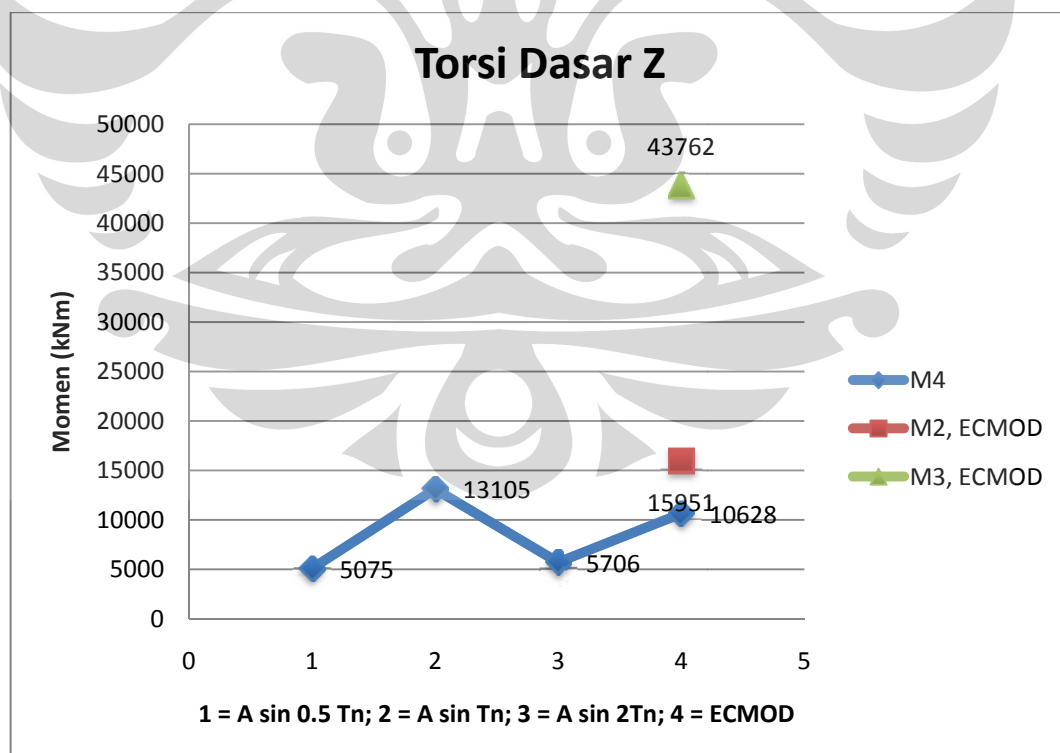
Dapat dilihat pada gambar 4.40 bahwa urutan perpindahan lantai  $u_x$  bangunan dari yang terkecil hingga yang terbesar adalah A sin  $0.5T_n$ , A sin  $2T_n$ , gempa sintetik El Centro, Model 3, Model 2, terakhir A sin  $T_n$ . Percepatan gempa sin  $T_n$  mengakibatkan perpindahan hingga dua kalinya dibanding percepatan gempa sintetik El centro. Selanjutnya, terlihat pada gambar 4.41, percepatan gempa sin  $T_n$  juga lebih besar nilai perpindahan lantai  $u_x$ -nya dibanding percepatan gempa lain, kecuali terhadap model 3 El centro.

Terlihat juga pada gambar 4.42 dan 4.43, perpindahan *strongroom* terbesar terjadi akibat percepatan gempa A sin  $T_n$ . Perbedaannya, pada perpindahan arah  $u_x$ , nilainya mencapai 4 kalinya, sedangkan pada perpindahan  $u_z$ , selisih hanya mencapai 24,4%. Ini kemungkinan disebabkan pengaruh arah percepatan gempa, yaitu arah  $u_x$ , sehingga respon arah  $u_x$  akan lebih ekstrim dibanding arah lainnya. Tabel 4.7 juga memperlihatkan respon gempa A sin  $T_n$  paling besar di antara percepatan gempa lainnya.

Dapat disimpulkan, bahwa ketika percepatan gempa divariasikan, perpindahan lantai bangunan maupun perpindahan *strongroom* terbesar terjadi saat percepatan gempanya ada dalam periode getar alami struktur (akibat resonansi).



Gambar 4. 44. Gaya Geser Dasar X



Gambar 4. 45. Torsi Dasar Z

Perhatikan gambar 4.44. Gaya geser arah  $x$  maksimum ada pada percepatan gempa  $\sin T_n$ . Sedangkan nilai minimumnya terjadi pada percepatan gempa  $\sin 0,5T_n$ , dengan selisih mencapai  $26000 \text{ kN}$ . Berdasarkan gambar 4.43 untuk gaya dalam torsinya, nilai maksimum juga ada pada percepatan gempa  $\sin T_n$ . Bedanya, selisih nilainya tidak sebesar pada gaya geser dasar  $x$ , yaitu sebesar  $8030 \text{ kNm}$  atau 1,6 kali gaya geser terkecilnya.

Bisa disimpulkan, pada variasi percepatan gempa ini, nilai maksimum respon gaya ada pada percepatan gempa  $\sin T_n$ , dan hasil ini membuktikan teori resonansi.

#### 4.2 Rangkuman Hasil Analisis

Untuk memudahkan intepertasi grafik dan data yang sudah disampaikan pada sebelumnya, maka dibuat tabel dengan keterangan sebagai berikut,

Keterangan:

- = min dalam variasi yang ditinjau
- = max dalam variasi yang ditinjau
- + = min secara keseluruhan
- ++ = max secara keseluruhan

Catatan:

*Signifikansi perbedaan dalam variasi kekakuan* hanya mengakomodir nilai-nilai ekstrim dalam variasi yang ditinjau saja, sedangkan *signifikansi perbedaan secara keseluruhan* membandingkan nilai ekstrim dari variasi yang ditinjau dengan nilai ekstrim keseluruhan, yang termasuk model 2 (*strongroom* sebagai beban merata) dan model 3 (*strongroom* sebagai dinding beton tanpa peredam).

Tabel 4. 8. Variasi Posisi

Secara Horizontal								
	M4, A	M4, B	M4, C	M4, D	M2	M3	Signifikansi Selisih	
							Dalam var posisi	Secara keseluruhan
Perpindahan Lantai								
UX	•			••			K	
RZ	••			•			E	
Perpindahan Strongroom								
UX		••	•				K	
Fungsi Dasar								
Gaya Geser X		•	••		+	++	K	K
Torsi Z		•	••		+	++	K	K

Secara Vertikal								
	M4, Lt. 1	M4, Lt. 2	M4, Lt. 3	M4, Lt. 4	M2	M3	Signifikansi Selisih	
							Dalam var posisi	Secara keseluruhan
Perpindahan Lantai								
UX	•			••			K	
RZ	•			••			E	
Perpindahan Strongroom								
UX	•			••			E	
Fungsi Dasar								
Gaya Geser X		••		•	+	++	K	K
Torsi Z		••		•	+	++	K	K

Tabel 4. 9. Variasi Kekakuan

	M4, 4000 kN/m	M4, 6000 kN/m	M4, 8000 kN/m	M4, 10000 kN/m	M4, 12000 kN/m	M2	M3	Signifikansi Selisih	
								Dalam var kekakuan	Secara keseluruhan
Perpindahan Lantai									
UX	+, •				••		++	K	SB
RZ	+, •				••		++	K	E
Perpindahan Strongroom									
UX	••				•				
RZ	••				•				
Fungsi Dasar									
Gaya Geser X	••				•	+	++	K	K
Torsi Z	•, +				••		++	K	E

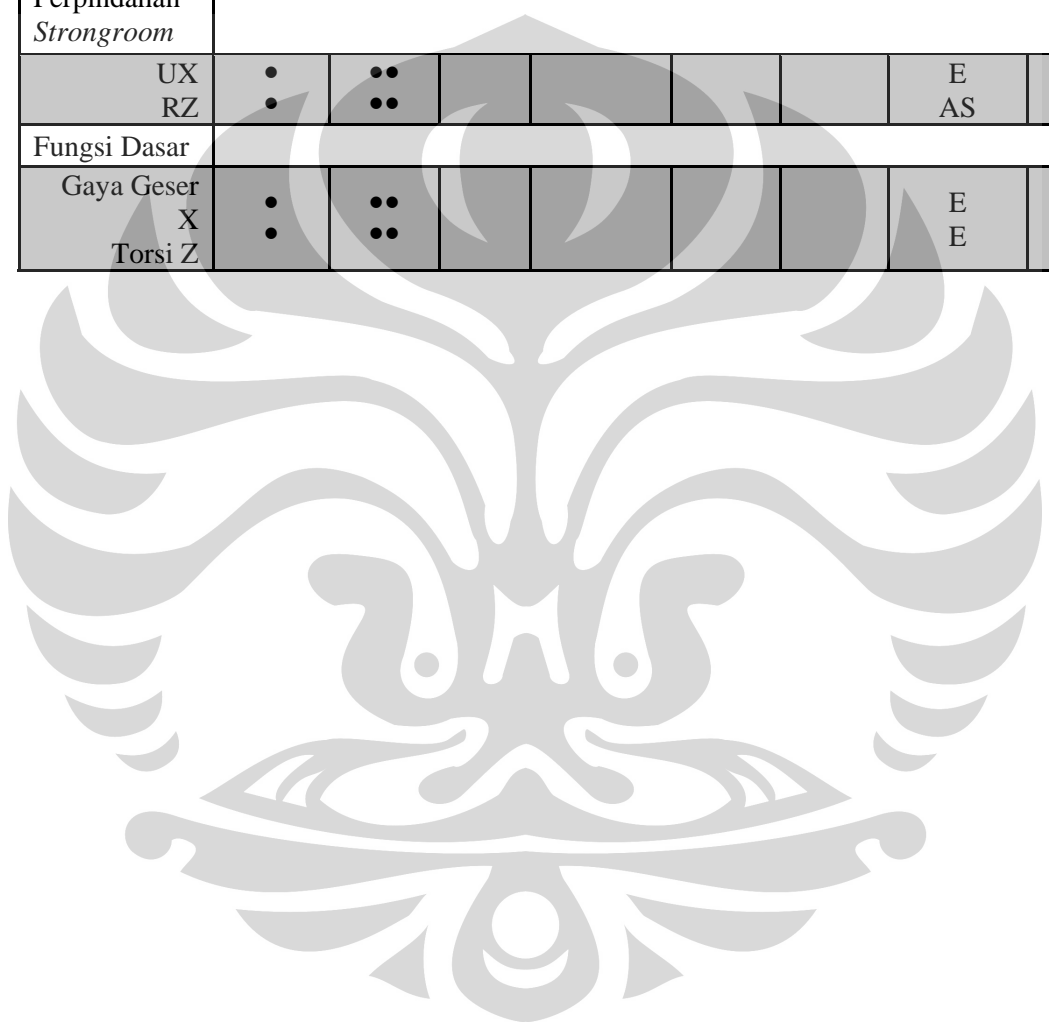
Tabel 4. 10. Variasi Pembatasan Lendutan Strongroom

	M4, 0,005 m	M4, 0,01 m	M4, 0,015 m	M4, 0,02 m	M4, 0,025 m	Signifikansi Selisih Dalam var
UX					•	K
RZ	••					
Perpindahan Strongroom						
UX	•			••		K
RZ	•			••		E
Fungsi Dasar						
Gaya Geser X	•			••		K
Torsi Z	••			•		K



Tabel 4. 11. Variasi Percepatan Gempa

	M4, ASin 0.5 T <sub>n</sub>	M4, ASin T <sub>n</sub>	M4, ASin 2T <sub>n</sub>	M4, ECMOD	M2	M3	Signifikansi Selisih	
							Dalam var	Secara keseluruhan
Perpindahan Lantai								
UX	•	••						
RZ	•	••				++		E
Perpindahan <i>Strongroom</i>								
UX	•	••					E	
RZ	•	••					AS	
Fungsi Dasar								
Gaya Geser	•	••					E	
X	•	••					E	
Torsi Z								



## BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

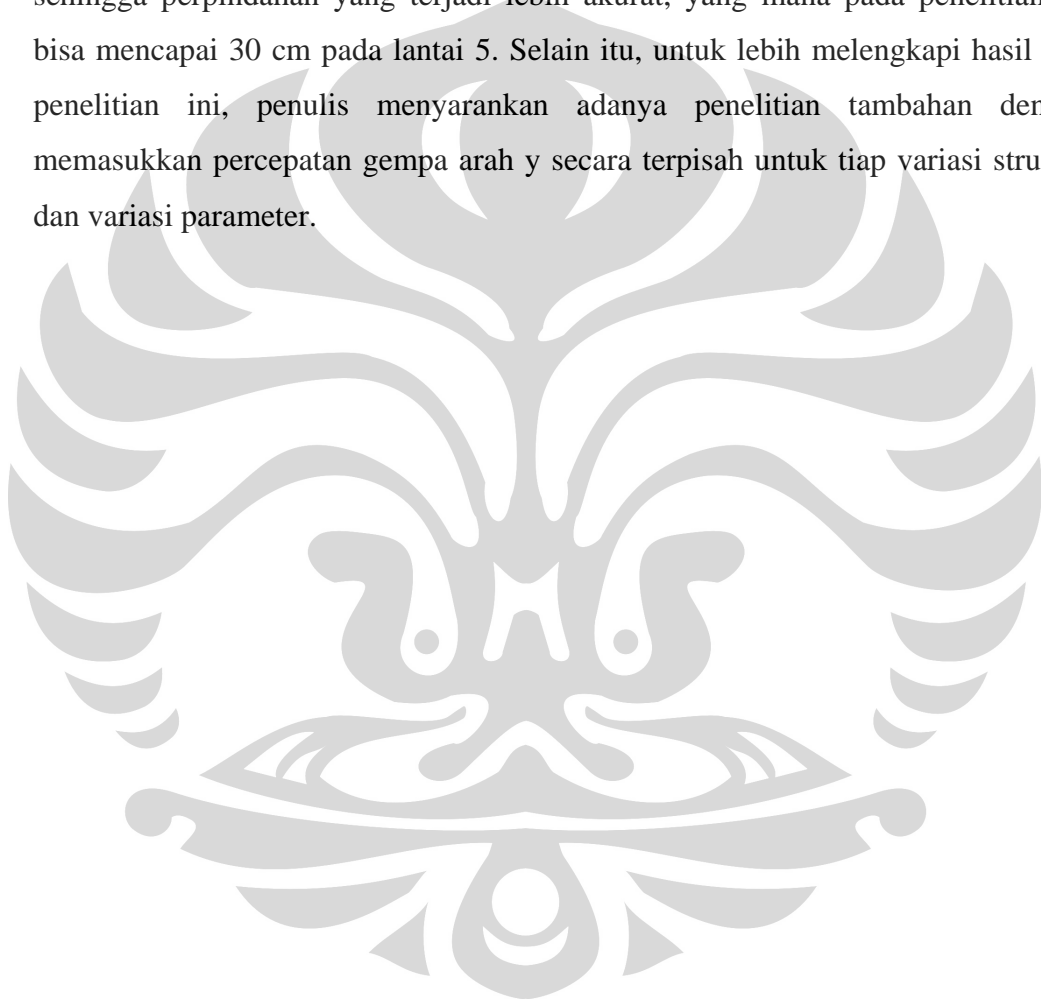
Dari hasil penelitian dalam penelitian ini, didapatkan kesimpulan-kesimpulan sebagai berikut:

1. Dengan adanya *strongroom*, akan timbul eksentrisitas (massa atau kekakuan atau keduanya), yang menyebabkan bertambahnya reaksi dasar struktur.
2. Nilai reaksi dasar pada model *strongroom* sebagai dinding beton jauh lebih besar dibandingkan dengan model *strongroom* sebagai beban merata, mencapai hampir 3 kali lipatnya pada reaksi torsi. Padahal, pada praktik sehari-hari, kebanyakan perencana memodelkan *strongroom* ini sebagai beban merata. Ini merupakan kondisi yang *under-estimate*. Oleh karena itu, permodelan *strongroom* yang lebih tepat adalah model dinding beton yang tidak hanya memperhitungkan pengaruh massa tapi juga kekakuan.
3. Agar mendapatkan hasil reaksi dasar yang lebih kecil namun tetap dalam garis permodelan yang benar, dapat digunakan peredam viskoelastik pada *strongroom*. Keuntungannya, peredam ini dapat mereduksi torsi hingga 76,2% dan gaya geser X hingga 8%.
4. Di dalam permodelan *strongroom* dengan menggunakan peredam ini sendiri, ada parameter tertentu yang memberikan respon-respon minimum.
  - Agar perpindahan struktur maupun perpindahan *strongroom*nya paling kecil, *strongroom* dapat diletakkan pada posisi D (sentris) pada lantai 1. Karena respon perpindahan terbesar jika *strongroom* diletakkan pada posisi A (eksentris terhadap denah bangunan).
  - Jika ingin strukturnya paling efisien menerima reaksi dasar bangunan, dapat digunakan posisi B pada lantai 4.
  - Dapat digunakan kekakuan peredam viskoelastik sebesar 4000  $kN/m$  untuk mendapatkan perpindahan paling kecil dan torsi dasar paling kecil.

- Dapat digunakan pembatasan gerak 5 mm untuk mendapatkan keuntungan akibat nilai perpindahan dan reaksi dasar yang kecil.

## 5.2 Saran

Percepatan gempa yang dipakai dalam penelitian ini termasuk dalam kategori gempa besar. Untuk penelitian yang menggunakan gempa besar, alangkah lebih baik lagi jika struktur dimodelkan dalam kondisi yang inelastis, sehingga perpindahan yang terjadi lebih akurat, yang mana pada penelitian ini bisa mencapai 30 cm pada lantai 5. Selain itu, untuk lebih melengkapi hasil dari penelitian ini, penulis menyarankan adanya penelitian tambahan dengan memasukkan percepatan gempa arah y secara terpisah untuk tiap variasi struktur dan variasi parameter.



## DAFTAR REFERENSI

- Chang, K.C., Lin, Y.Y., Lai, M.L.. (1998). Seismic Analysis and Design of Structure with Viscoelastic Dampers. *ISET Journal of Earthquake Technology*, Paper No.380, Vol 35, No.4, pp 143-166
- Chang, Tsu-sheng. (2002). *Seismic Response of Structures with Added Viscoelastic Dampers*. September 19, 2002. Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University. <http://proquest.umi.com/pqdweb?index=1&did=1748791361&SrchMode=1&sid=2&Fmt=3&VInst=PROD&VTy pe=PQD&RQT=309&VName=PQD&TS=1277797955&clientId=45625>
- Chopra, Anil K. (1995). *Dynamics of Structure, Theory and Applications to Earthquake Engineering*. New Jersey: Prentice-Hall, Inc
- Computer and Structures, Inc. (2007). *CSI Analysis Reference Manual for SAP2000<sup>®</sup>, ETABS<sup>®</sup>, and SAFE<sup>™</sup>*. Berkeley: Author
- Departemen Pemukiman dan Prasarana Wilayah. (2002). *Standar Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung (SNI-1726-2002)*. Jakarta: Author
- Computers and Structures, Inc. (1995). *SAP2000 Advanced 11.0.0* [Computer Software]. Berkeley, CA: Computers and Structures, Inc
- ILT Learning. (2009). *11 Aplikasi Rekayasa Konstruksi 3D dengan SAP2000*. Jakarta: PT Elex Media Komputindo
- Liut, Daniel Armando. (1999). *Neural-Network and Fuzzy-Logic Learning and Control of Linear and Nonlinear Dynamic Systems*. August 18, 1999. Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University. <http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-100199-072001/>
- Lukito, Martin A. (1995). *RESMAT* [Computer Software]. Surabaya: Fakultas Teknik Jurusan Teknik Sipil Universitas Kristen Petra
- US Bank Equipment. *Night Depositories, Receiving Chests & Safes, Deal Drawers*. 2009. <http://www.usbankequipment.com/>
- Vibrationdata El Centro Earthquake. *Time History Data Files from El Centro Site Imperial Valley Irrigation District*. November, 2009. [http://www.vibrationdata.com/elcentro\\_EW.dat](http://www.vibrationdata.com/elcentro_EW.dat)

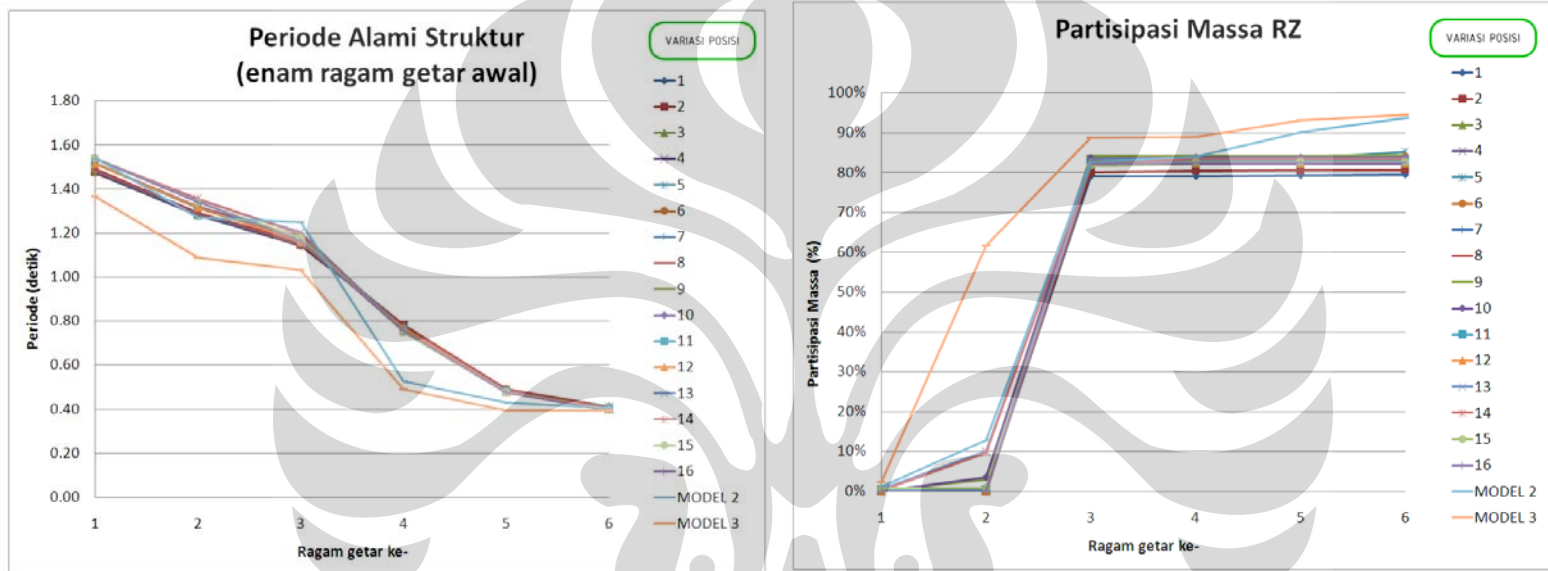
Lampiran 1. Periode Getar dan Partisipasi Massa dalam Variasi Posisi

Output			1	2	3	4	5	6	7
Periode Getar	Mode 1		1.47292	1.472305	1.47662	1.477218	1.487585	1.48846	1.49027
	Mode 2		1.28063	1.284207	1.27920	1.281756	1.288665	1.29050	1.288238
	Mode 3		1.13978	1.146786	1.15578	1.157137	1.154671	1.15747	1.160255
	Mode 4		0.78227	0.783068	0.78271	0.782052	0.780687	0.77979	0.780166
	Mode 5		0.47989	0.479774	0.48054	0.480682	0.491526	0.49069	0.490341
	Mode 6		0.39880	0.399756	0.39885	0.399451	0.411907	0.40935	0.407276
Persentase Partisipasi Massa (Akumulatif)	UX	1	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.01%	0.01%
		2	79.06%	79.60%	79.97%	80.06%	82.27%	82.41%	82.48%
		3	79.95%	80.09%	79.97%	80.06%	82.53%	82.51%	82.48%
		4	80.85%	81.00%	80.87%	80.96%	82.61%	82.59%	82.57%
		5	80.92%	81.07%	80.93%	81.03%	82.79%	82.75%	82.73%
		6	92.31%	92.33%	92.25%	92.28%	91.38%	92.22%	92.93%
	UY	1	82.56%	82.60%	82.67%	82.72%	84.93%	84.93%	84.90%
		2	82.56%	82.60%	82.67%	82.72%	84.93%	84.93%	84.91%
		3	82.60%	82.60%	82.70%	82.72%	84.95%	84.94%	84.91%
		4	83.37%	83.36%	83.47%	83.49%	85.11%	85.10%	85.07%
		5	93.88%	93.87%	93.88%	93.88%	94.20%	94.29%	94.29%
		6	93.89%	93.87%	93.88%	93.88%	94.36%	94.38%	94.36%
	RZ	1	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.01%	0.04%
		2	0.61%	0.25%	0.00%	0.00%	0.01%	0.04%	0.05%
		3	79.03%	79.98%	81.78%	82.17%	83.11%	83.10%	82.65%
		4	79.13%	80.50%	82.19%	82.22%	83.11%	83.10%	82.65%
		5	79.25%	80.54%	82.20%	82.23%	83.32%	83.16%	82.66%
		6	79.45%	80.65%	82.26%	82.23%	85.17%	84.06%	82.85%

(Lanjutan)

8	9	10	11	12	13	14	15	16
1.490687	1.514223	1.514313	1.51570	1.515579	1.537986	1.53719	1.538843	1.53745
1.290366	1.315619	1.318843	1.31388	1.314929	1.353341	1.354154	1.339884	1.33982
1.157763	1.183225	1.181054	1.16890	1.159864	1.202458	1.195352	1.176338	1.16195
0.780727	0.766912	0.762382	0.76332	0.767347	0.755991	0.749088	0.749243	0.75602
0.490308	0.479981	0.480224	0.48063	0.480783	0.474064	0.474174	0.47498	0.47510
0.406812	0.401259	0.400949	0.40076	0.401008	0.394798	0.395236	0.394099	0.39466
0.01%	0.02%	0.03%	0.03%	0.03%	0.01%	0.08%	0.06%	0.06%
82.47%	81.68%	81.01%	82.83%	82.84%	75.14%	74.78%	81.80%	81.87%
82.47%	82.91%	82.85%	82.89%	82.85%	81.94%	82.02%	81.91%	81.88%
82.56%	83.06%	82.98%	83.03%	82.98%	82.70%	82.68%	82.70%	82.69%
82.71%	83.07%	82.99%	83.04%	83.00%	82.70%	82.68%	82.70%	82.69%
93.01%	91.96%	92.33%	92.39%	92.44%	92.74%	92.74%	92.88%	92.87%
84.90%	85.23%	85.21%	85.12%	85.19%	84.34%	84.41%	84.12%	84.46%
84.90%	85.25%	85.25%	85.15%	85.22%	84.34%	84.55%	84.22%	84.54%
84.90%	85.27%	85.26%	85.23%	85.22%	84.56%	84.57%	84.59%	84.54%
85.07%	85.30%	85.29%	85.25%	85.24%	84.97%	84.96%	84.94%	84.93%
94.30%	93.76%	93.79%	93.81%	93.81%	94.29%	94.29%	94.27%	94.27%
94.36%	93.82%	93.83%	93.84%	93.84%	94.29%	94.29%	94.27%	94.27%
0.00%	0.17%	0.02%	0.29%	0.00%	0.46%	0.04%	0.64%	0.00%
0.00%	2.94%	3.55%	0.33%	0.00%	9.94%	9.70%	0.70%	0.01%
82.37%	84.18%	83.51%	82.48%	82.39%	83.33%	82.59%	81.85%	82.26%
82.37%	84.24%	83.81%	82.73%	82.42%	83.45%	83.32%	82.64%	82.39%
82.38%	84.24%	83.81%	82.73%	82.42%	83.45%	83.32%	82.65%	82.39%
82.41%	84.29%	83.82%	82.77%	82.43%	83.59%	83.45%	82.65%	82.39%

(Lanjutan)



Lampiran 2. Perpindahan Bangunan pada Variasi Posisi

Perpindahan Lantai Bangunan Arah UX (satuan *m*)

Posisi	Lantai 5	Lantai 4	Lantai 3	Lantai 2	Lantai 1
1	0.30803	0.26877	0.20562	0.12617	0.04675
2	0.30701	0.26813	0.20542	0.12651	0.04700
3	0.30964	0.27010	0.20660	0.12666	0.04698
4	0.30844	0.26926	0.20618	0.12672	0.04709
5	0.30598	0.26849	0.20731	0.13089	0.05025
6	0.30545	0.26811	0.20718	0.13072	0.04999
7	0.30651	0.26892	0.20745	0.13101	0.05038
8	0.30578	0.26841	0.20721	0.13073	0.05009
9	0.30045	0.26433	0.20710	0.13122	0.04939
10	0.30120	0.26510	0.20735	0.13089	0.04917
11	0.30143	0.26497	0.20758	0.13136	0.04938
12	0.30175	0.26534	0.20766	0.13117	0.04930
13	0.31256	0.27572	0.21319	0.13182	0.04866
14	0.31156	0.27482	0.21240	0.13125	0.04844
15	0.30863	0.27235	0.21040	0.13001	0.04800
16	0.30880	0.27242	0.21032	0.12998	0.04799
M2	0.37154	0.33672	0.27094	0.17934	0.07618
M3	0.32436	0.28314	0.22463	0.19242	0.08665

Perpindahan Lantai Bangunan Arah UY (satuan *m*)

Posisi	Lantai 5	Lantai 4	Lantai 3	Lantai 2	Lantai 1
1	0.00136	0.00091	0.00099	0.00107	0.00082
2	0.00101	0.00044	0.00069	0.00104	0.00080
3	0.00103	0.00051	0.00075	0.00105	0.00078
4	0.00102	0.00049	0.00076	0.00104	0.00078
5	0.00143	0.00087	0.00104	0.00156	0.00101
6	0.00154	0.00112	0.00136	0.00177	0.00114
7	0.00161	0.00113	0.00138	0.00181	0.00118
8	0.00169	0.00111	0.00136	0.00176	0.00115
9	0.00173	0.00155	0.00136	0.00105	0.00074
10	0.00221	0.00201	0.00189	0.00142	0.00078
11	0.00200	0.00181	0.00178	0.00133	0.00073
12	0.00203	0.00183	0.00178	0.00132	0.00073



(Lanjutan)

13	0.00838	0.00705	0.00575	0.00398	0.00182
14	0.00306	0.00265	0.00215	0.00161	0.00079
15	0.00285	0.00247	0.00200	0.00150	0.00073
16	0.00284	0.00246	0.00199	0.00150	0.00074
M2	0.00094	0.00073	0.00078	0.00077	0.00039
M3	0.05024	0.04425	0.03472	0.02394	0.00944

Perpindahan Lantai Bangunan Arah RZ (satuan *rad*)

Posisi	Lantai 5	Lantai 4	Lantai 3	Lantai 2	Lantai 1
1	0.00256	0.00234	0.00192	0.00131	0.00055
2	0.00184	0.00169	0.00140	0.00096	0.00040
3	0.00013	0.00011	0.00009	0.00008	0.00005
4	0.00013	0.00011	0.00009	0.00006	0.00004
5	0.00140	0.00122	0.00097	0.00060	0.00028
6	0.00104	0.00089	0.00071	0.00044	0.00027
7	0.00012	0.00008	0.00008	0.00008	0.00004
8	0.00011	0.00010	0.00008	0.00007	0.00003
9	0.00277	0.00251	0.00216	0.00152	0.00063
10	0.00315	0.00286	0.00241	0.00165	0.00067
11	0.00011	0.00008	0.00008	0.00006	0.00003
12	0.00009	0.00008	0.00007	0.00005	0.00002
13	0.00722	0.00661	0.00530	0.00340	0.00136
14	0.00717	0.00656	0.00527	0.00339	0.00135
15	0.00009	0.00009	0.00007	0.00006	0.00003
16	0.00008	0.00009	0.00006	0.00004	0.00002
M2	0.00178	0.00157	0.00132	0.00116	0.00057
M3	0.00888	0.00796	0.00641	0.00422	0.00178

Lampiran 3. Perpindahan *Strongroom* pada Variasi Posisi

Posisi	RZ (rad)	UY (m)	UX (m)
1	0.00056	0.00507	0.04390
2	0.00212	0.00546	0.04964
3	0.00206	0.00548	0.05114
4	0.00209	0.00544	0.05108
5	0.00221	0.00750	0.13916
6	0.00210	0.00551	0.13957
7	0.00202	0.00505	0.13660
8	0.00204	0.00543	0.13620
9	0.00225	0.00953	0.22244
10	0.00238	0.00532	0.22210
11	0.00205	0.00511	0.21356
12	0.00207	0.00524	0.21356
13	0.00508	0.03044	0.29407
14	0.00495	0.00500	0.29568
15	0.00204	0.00505	0.27882
16	0.00205	0.00500	0.27879

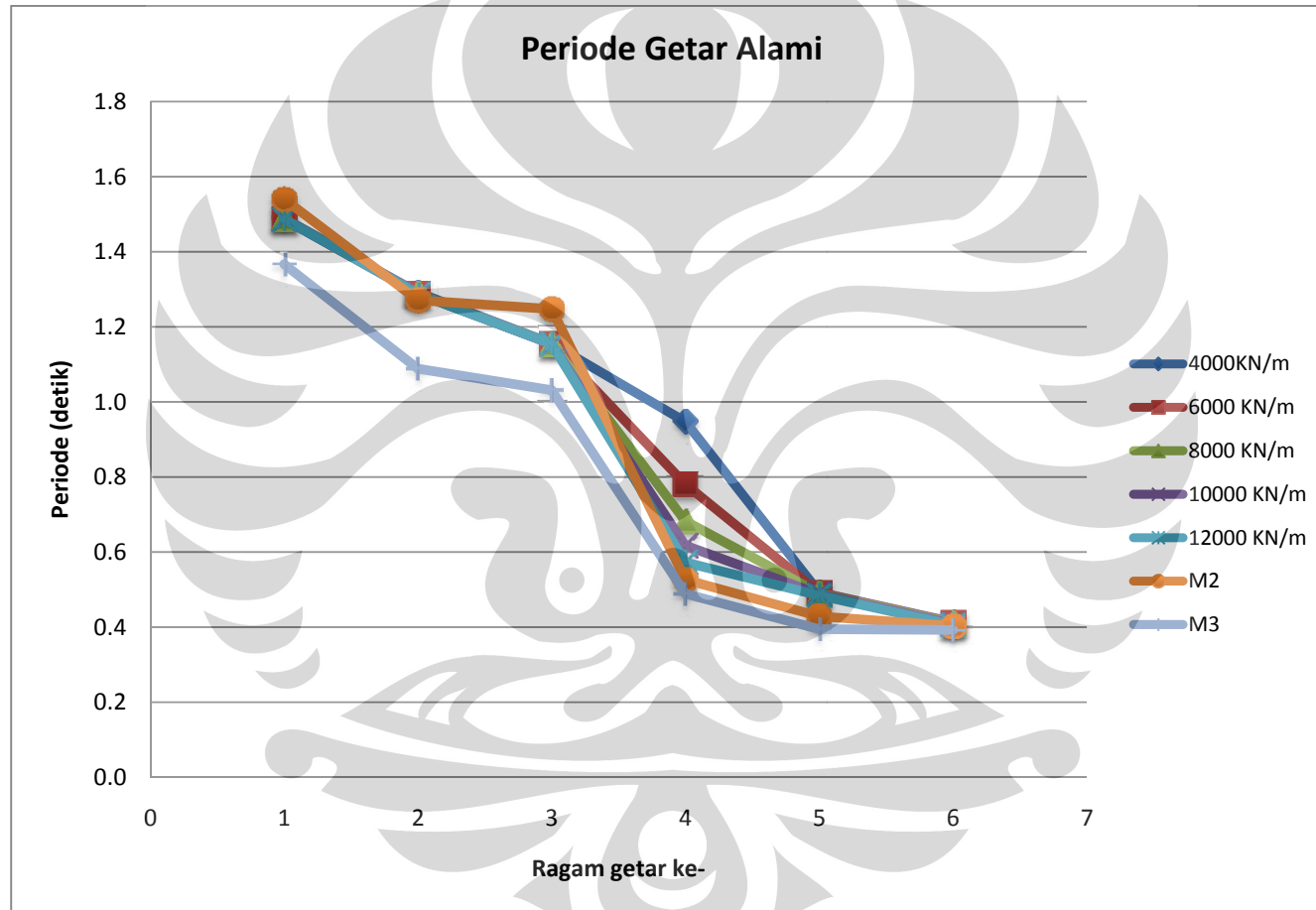
Lampiran 4. Reaksi Dasar pada Variasi Posisi

Posisi	GAYA GESER X (kN)	GAYA GESER Y (kN)	MOMEN X (kNm)	MOMEN Y (kNm)	TORSI Z (kNm)
1	10798.829	198.411	1178.784	169314.520	13505.473
2	10708.279	184.162	1267.504	167861.370	9531.398
3	10863.376	180.357	1096.089	170335.360	2453.613
4	10791.100	179.983	1231.799	169094.380	1073.737
5	11304.409	185.364	1174.085	170473.850	10627.915
6	11224.825	203.579	1155.842	169615.020	10251.837
7	11314.363	213.404	887.867	170651.340	1798.153
8	11239.526	204.959	860.800	169617.360	743.541
9	10895.288	133.353	1225.819	167639.810	18632.796
10	10824.755	140.332	1404.117	166962.920	19587.687
11	10899.542	130.674	1265.874	167570.760	1117.741
12	10879.088	131.345	1341.281	167301.200	562.258
13	10650.269	275.894	3337.462	171490.090	39628.306
14	10661.101	132.355	1765.971	170435.800	39404.245
15	10802.658	120.575	1320.371	169337.600	916.331
16	10796.206	121.318	1352.247	169208.650	511.755
M2	11046.550	107.450	556.159	150508.200	15950.911
M 3	12223.915	2182.069	30852.180	171363.610	43761.778

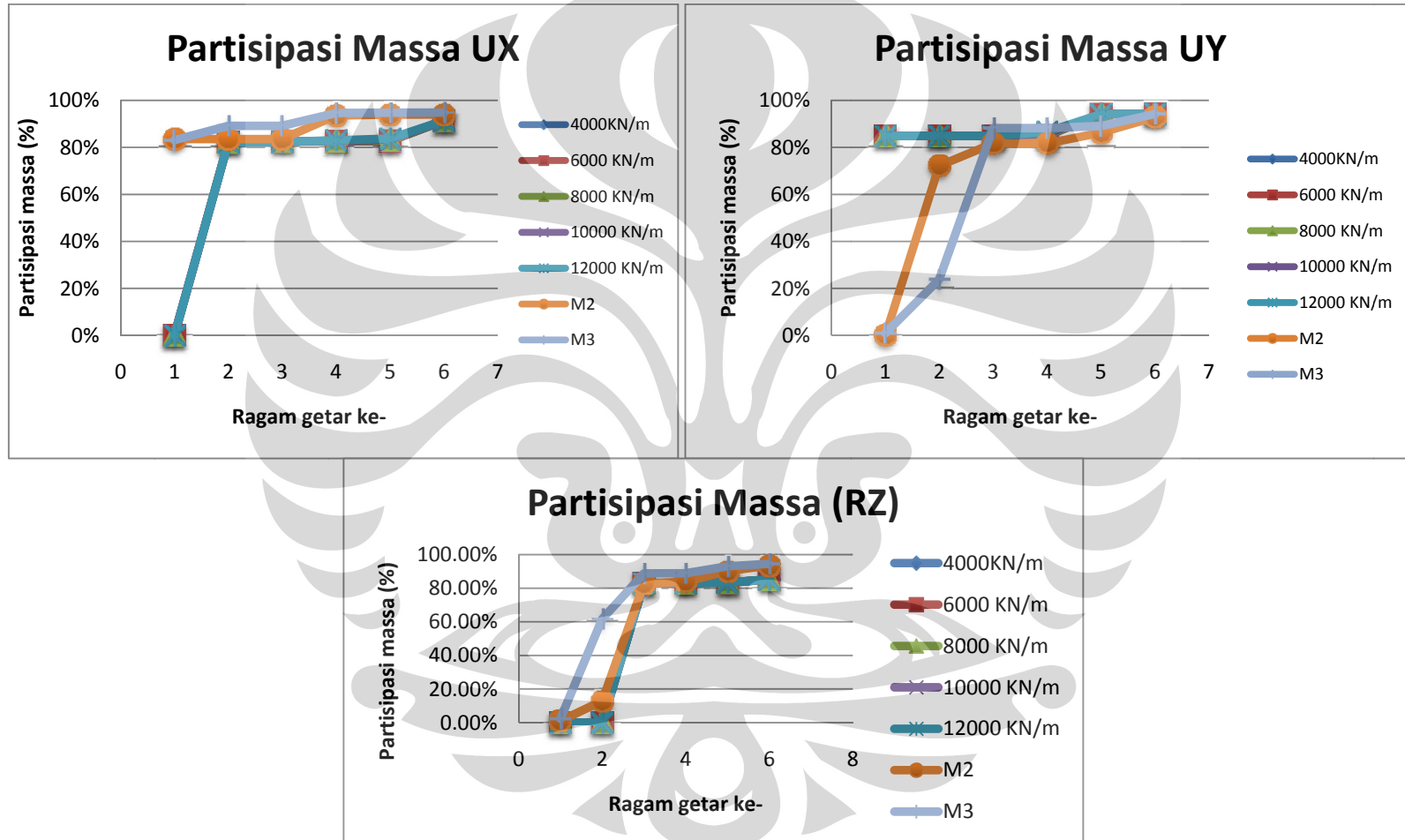
Lampiran 5. Partisipasi Massa dan Periode Getar pada Variasi Kekakuan

Output			4000KN/m	6000 KN/m	8000 KN/m	10000 KN/m	12000 KN/m	M2	M3
Periode Getar	Mode 1		1.48882	1.487585	1.487128	1.486889	1.486742	1.540324	1.366503
	Mode 2		1.29108	1.288665	1.287894	1.287515	1.287289	1.270566	1.088288
	Mode 3		1.15545	1.154671	1.154467	1.154372	1.154317	1.247243	1.031202
	Mode 4		0.94697	0.780687	0.682274	0.617222	0.572434	0.526029	0.488618
	Mode 5		0.49258	0.491526	0.490021	0.487735	0.484049	0.428832	0.394552
	Mode 6		0.41307	0.411907	0.410409	0.408436	0.405771	0.403294	0.39252
Persentase Partisipasi Massa (Akumulatif)	UX	1	0.03%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	83.51%	83.10%
		2	82.29%	82.27%	82.18%	82.12%	82.08%	83.52%	89.13%
		3	82.46%	82.53%	82.47%	82.42%	82.39%	83.56%	89.20%
		4	82.51%	82.61%	82.73%	82.88%	83.03%	93.57%	94.66%
		5	82.65%	82.79%	83.00%	83.31%	83.77%	93.91%	94.76%
		6	91.39%	91.38%	91.37%	91.35%	91.33%	94.02%	94.80%
	UY	1	84.94%	84.93%	84.90%	84.88%	84.86%	0.00%	0.96%
		2	84.95%	84.93%	84.90%	84.88%	84.86%	72.20%	23.80%
		3	84.98%	84.95%	84.91%	84.89%	84.88%	81.64%	88.20%
		4	84.99%	85.11%	85.34%	85.77%	86.65%	81.65%	88.22%
		5	94.22%	94.20%	94.17%	94.14%	94.10%	86.30%	89.07%
		6	94.36%	94.36%	94.35%	94.35%	94.35%	92.91%	94.21%
	RZ	1	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	1.04%	2.26%
		2	0.01%	0.01%	0.01%	0.02%	0.02%	12.85%	61.72%
		3	82.94%	83.11%	83.11%	83.11%	83.10%	82.66%	88.79%
		4	83.10%	83.11%	83.12%	83.13%	83.14%	83.89%	88.93%
		5	83.29%	83.32%	83.36%	83.42%	83.51%	90.19%	93.10%
		6	85.16%	85.17%	85.18%	85.19%	85.22%	93.59%	94.55%

(Lanjutan)



(Lanjutan)



Lampiran 6. Perpindahan Lantai Bangunan dan *Strongroom* pada Variasi Kekakuan

Perpindahan Lantai UX (satuan *m*)

Kekakuan	Lantai 5	Lantai 4	Lantai 3	Lantai 2	Lantai 1
M4, 4000KN/m	0.30585	0.26842	0.20731	0.13094	0.05028
M4, 6000 KN/m	0.30598	0.26849	0.20731	0.13089	0.05025
M4, 8000 KN/m	0.30625	0.26859	0.20728	0.13077	0.05014
M4, 10000 KN/m	0.30643	0.26867	0.20727	0.13071	0.05009
M4, 12000 KN/m	0.30649	0.26869	0.20725	0.13069	0.05006
M2	0.37154	0.33672	0.27094	0.17934	0.07618
M3	0.32436	0.28314	0.22463	0.19242	0.08665

Perpindahan Lantai UY (satuan *m*)

Kekakuan	Lantai 5	Lantai 4	Lantai 3	Lantai 2	Lantai 1
M4, 4000KN/m	0.00153	0.00103	0.00104	0.00158	0.00099
M4, 6000 KN/m	0.00143	0.00087	0.00104	0.00156	0.00101
M4, 8000 KN/m	0.00123	0.00076	0.00098	0.00147	0.00098
M4, 10000 KN/m	0.00120	0.00067	0.00093	0.00143	0.00095
M4, 12000 KN/m	0.00122	0.00060	0.00089	0.00139	0.00092
M2	0.00094	0.00073	0.00078	0.00077	0.00039
M3	0.05024	0.04425	0.03472	0.02394	0.00944

Perpindahan Lantai RZ (satuan *rad*)

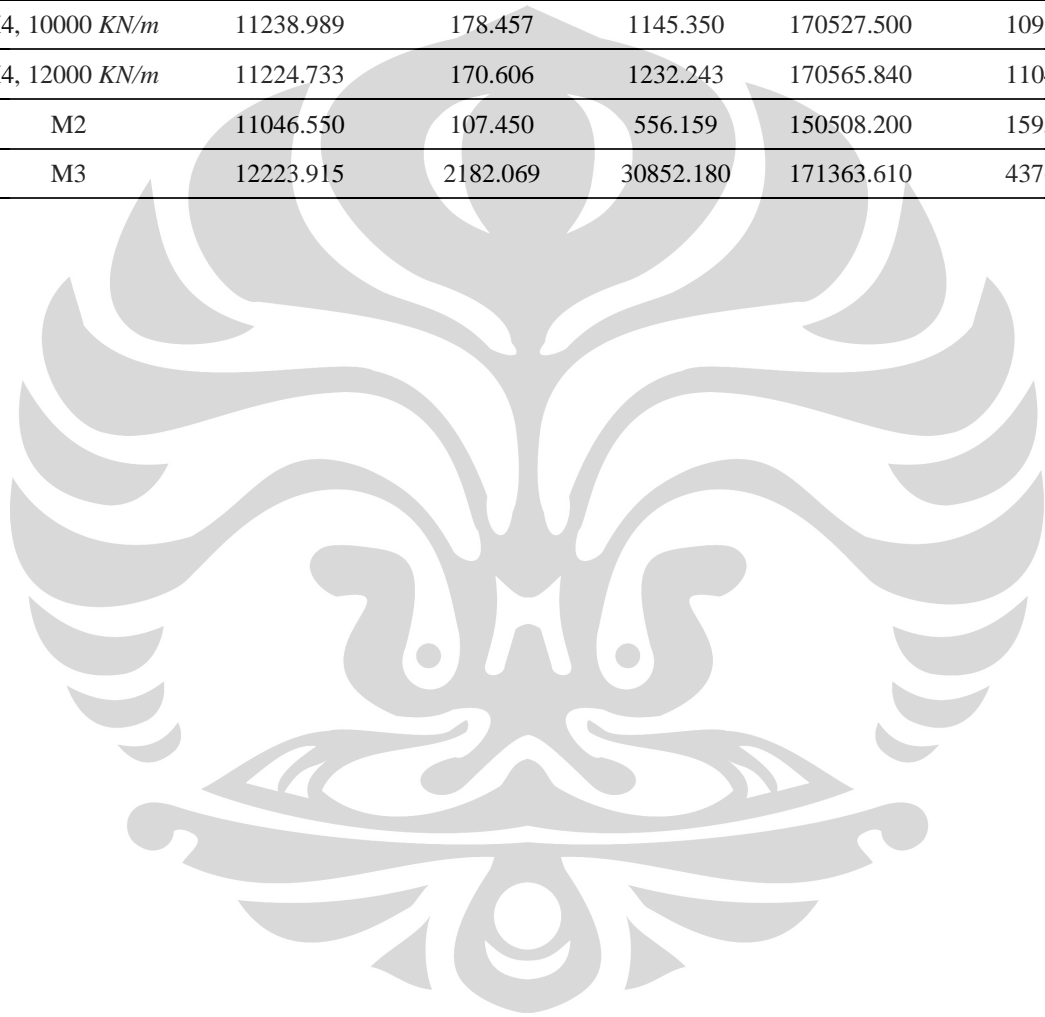
Kekakuan	Lantai 5	Lantai 4	Lantai 3	Lantai 2	Lantai 1
M4, 4000KN/m	0.00139	0.00121	0.00097	0.00060	0.00028
M4, 6000 KN/m	0.00140	0.00122	0.00097	0.00060	0.00028
M4, 8000 KN/m	0.00140	0.00122	0.00097	0.00060	0.00029
M4, 10000 KN/m	0.00141	0.00122	0.00097	0.00060	0.00029
M4, 12000 KN/m	0.00141	0.00122	0.00097	0.00060	0.00029
M2	0.00178	0.00157	0.00132	0.00116	0.00057
M3	0.00888	0.00796	0.00641	0.00422	0.00178

Perpindahan *Strongroom* pada Variasi Kekakuan

Kekakuan	RZ ( <i>rad</i> )	UY ( <i>m</i> )	UX ( <i>m</i> )
4000KN/m	0.00226	0.00758	0.13930
6000 KN/m	0.00221	0.00750	0.13916
8000 KN/m	0.00218	0.00732	0.13900
10000 KN/m	0.00214	0.00712	0.13882
12000 KN/m	0.00212	0.00701	0.13861

Lampiran 7. Reaksi Dasar pada Variasi Kekakuan

<b>Kekakuan</b>	<b>GAYA GESER X (kN)</b>	<b>GAYA GESER Y (kN)</b>	<b>MOMEN X (kNm)</b>	<b>MOMEN Y (kNm)</b>	<b>TORSI Z (kNm)</b>
M4, 4000KN/m	11317.047	170.980	1044.863	170442.660	10464.943
M4, 6000 KN/m	11304.409	185.364	1174.085	170473.850	10627.915
M4, 8000 KN/m	11258.637	184.425	1221.307	170517.650	10769.471
M4, 10000 KN/m	11238.989	178.457	1145.350	170527.500	10916.262
M4, 12000 KN/m	11224.733	170.606	1232.243	170565.840	11046.283
M2	11046.550	107.450	556.159	150508.200	15950.911
M3	12223.915	2182.069	30852.180	171363.610	43761.778





Lampiran 8. Perpindahan Lantai Bangunan dan *Strongroom*  
pada Variasi Pembatasan Lendutan

Perpindahan Lantai Bangunan UX (satuan *m*)

Percepatan Gempa	Lantai 5	Lantai 4	Lantai 3	Lantai 2	Lantai 1
M4, A sin 0.5 Tn	0.19723	0.17134	0.12940	0.07845	0.02844
M4, A sin Tn	0.77234	0.68897	0.54637	0.35555	0.14021
M4, A sin 2Tn	0.24762	0.22275	0.17933	0.11928	0.04826
M4, ECMOD	0.30598	0.26849	0.20731	0.13089	0.05025
M2, ECMOD	0.37154	0.33672	0.27094	0.17934	0.07618
M3, ECMOD	0.32436	0.28314	0.22463	0.19242	0.08665

Perpindahan Lantai Bangunan UY (satuan *m*)

Percepatan Gempa	Lantai 5	Lantai 4	Lantai 3	Lantai 2	Lantai 1
M4, A sin 0.5 Tn	0.00105	0.00069	0.00051	0.00065	0.00051
M4, A sin Tn	0.00163	0.00094	0.00111	0.00107	0.00064
M4, A sin 2Tn	0.00062	0.00033	0.00034	0.00039	0.00040
M4, ECMOD	0.00143	0.00087	0.00104	0.00156	0.00101
M2, ECMOD	0.00094	0.00073	0.00078	0.00077	0.00039
M3, ECMOD	0.05024	0.04425	0.03472	0.02394	0.00944

Perpindahan Lantai Bangunan RZ (satuan *rad*)

Percepatan Gempa	Lantai 5	Lantai 4	Lantai 3	Lantai 2	Lantai 1
M4, A sin 0.5 Tn	0.00071	0.00061	0.00045	0.00028	0.00014
M4, A sin Tn	0.00207	0.00190	0.00152	0.00067	0.00034
M4, A sin 2Tn	0.00027	0.00024	0.00018	0.00020	0.00015
M4, ECMOD	0.00140	0.00122	0.00097	0.00060	0.00028
M2, ECMOD	0.00178	0.00157	0.00132	0.00116	0.00057
M3, ECMOD	0.00888	0.00796	0.00641	0.00422	0.00178

Perpindahan *Strongroom*

Percepatan Gempa	RZ ( <i>rad</i> )	UY ( <i>m</i> )	UX ( <i>m</i> )
M4, A sin 0.5 Tn	0.00145	0.00544	0.13666
M4, A sin Tn	0.00221	0.00749	0.13916
M4, A sin 2Tn	0.00308	0.00920	0.14124
M4, ECMOD	0.00397	0.01100	0.14365

Lampiran 9. Reaksi Dasar pada Variasi Pembatasan Lendutan

Percepatan Gempa	GAYA GESER X (kN)	GAYA GESER Y (kN)	MOMEN X (kNm)	MOMEN Y (kNm)	TORSI Z (kNm)
M4, A sin 0.5 Tn	5953.606	100.675	617.872	107695.110	5074.666
M4, A sin Tn	32107.630	143.430	1583.520	438361.900	13105.313
M4, A sin 2Tn	11321.785	84.630	564.593	142580.058	5706.292
M4, ECMOD	11304.409	185.364	1174.085	170473.850	10627.915
M2, ECMOD	11046.550	107.450	556.159	150508.200	15950.911
M3, ECMOD	12223.915	2182.069	30852.180	171363.610	43761.778



Lampiran 10. Perpindahan Lantai Bangunan dan *Strongroom*  
pada Variasi Percepatan Gempa

Perpindahan Lantai Bangunan UX (satuan *m*)

Percepatan Gempa	Lantai 5	Lantai 4	Lantai 3	Lantai 2	Lantai 1
M4, A sin 0.5 Tn	0.19723	0.17134	0.12940	0.07845	0.02844
M4, A sin Tn	0.77234	0.68897	0.54637	0.35555	0.14021
M4, A sin 2Tn	0.24762	0.22275	0.17933	0.11928	0.04826
M4, ECMOD	0.30598	0.26849	0.20731	0.13089	0.05025
M2, ECMOD	0.37154	0.33672	0.27094	0.17934	0.07618
M3, ECMOD	0.32436	0.28314	0.22463	0.19242	0.08665

Perpindahan Lantai Bangunan UY (satuan *m*)

Percepatan Gempa	Lantai 5	Lantai 4	Lantai 3	Lantai 2	Lantai 1
M4, A sin 0.5 Tn	0.00105	0.00069	0.00051	0.00065	0.00051
M4, A sin Tn	0.00163	0.00094	0.00111	0.00107	0.00064
M4, A sin 2Tn	0.00062	0.00033	0.00034	0.00039	0.00040
M4, ECMOD	0.00143	0.00087	0.00104	0.00156	0.00101
M2, ECMOD	0.00094	0.00073	0.00078	0.00077	0.00039
M3, ECMOD	0.05024	0.04425	0.03472	0.02394	0.00944

Perpindahan Lantai Bangunan RZ (satuan *rad*)

Percepatan Gempa	Lantai 5	Lantai 4	Lantai 3	Lantai 2	Lantai 1
M4, A sin 0.5 Tn	0.00071	0.00061	0.00045	0.00028	0.00014
M4, A sin Tn	0.00207	0.00190	0.00152	0.00067	0.00034
M4, A sin 2Tn	0.00027	0.00024	0.00018	0.00020	0.00015
M4, ECMOD	0.00140	0.00122	0.00097	0.00060	0.00028
M2, ECMOD	0.00178	0.00157	0.00132	0.00116	0.00057
M3, ECMOD	0.00888	0.00796	0.00641	0.00422	0.00178

Perpindahan *Strongroom*

Percepatan Gempa	RZ ( <i>rad</i> )	UY ( <i>m</i> )	UX ( <i>m</i> )
M4, A sin 0.5 Tn	0.00214	0.00663	0.08264
M4, A sin Tn	0.00234	0.00768	0.35712
M4, A sin 2Tn	0.00188	0.00488	0.12731
M4, ECMOD	0.00221	0.00750	0.13916

Lampiran 11. Reaksi Dasar pada Variasi Percepatan Gempa

Percepatan Gempa	GAYA GESER X (kN)	GAYA GESER Y (kN)	MOMEN X (kNm)	MOMEN Y (kNm)	TORSI Z (kNm)
M4, A sin 0.5 Tn	5953.606	100.675	617.872	107695.110	5074.666
M4, A sin Tn	32107.630	143.430	1583.520	438361.900	13105.313
M4, A sin 2Tn	11321.785	84.630	564.593	142580.058	5706.292
M4, ECMOD	11304.409	185.364	1174.085	170473.850	10627.915
M2, ECMOD	11046.550	107.450	556.159	150508.200	15950.911
M3, ECMOD	12223.915	2182.069	30852.180	171363.610	43761.778

