

## **BAB V**

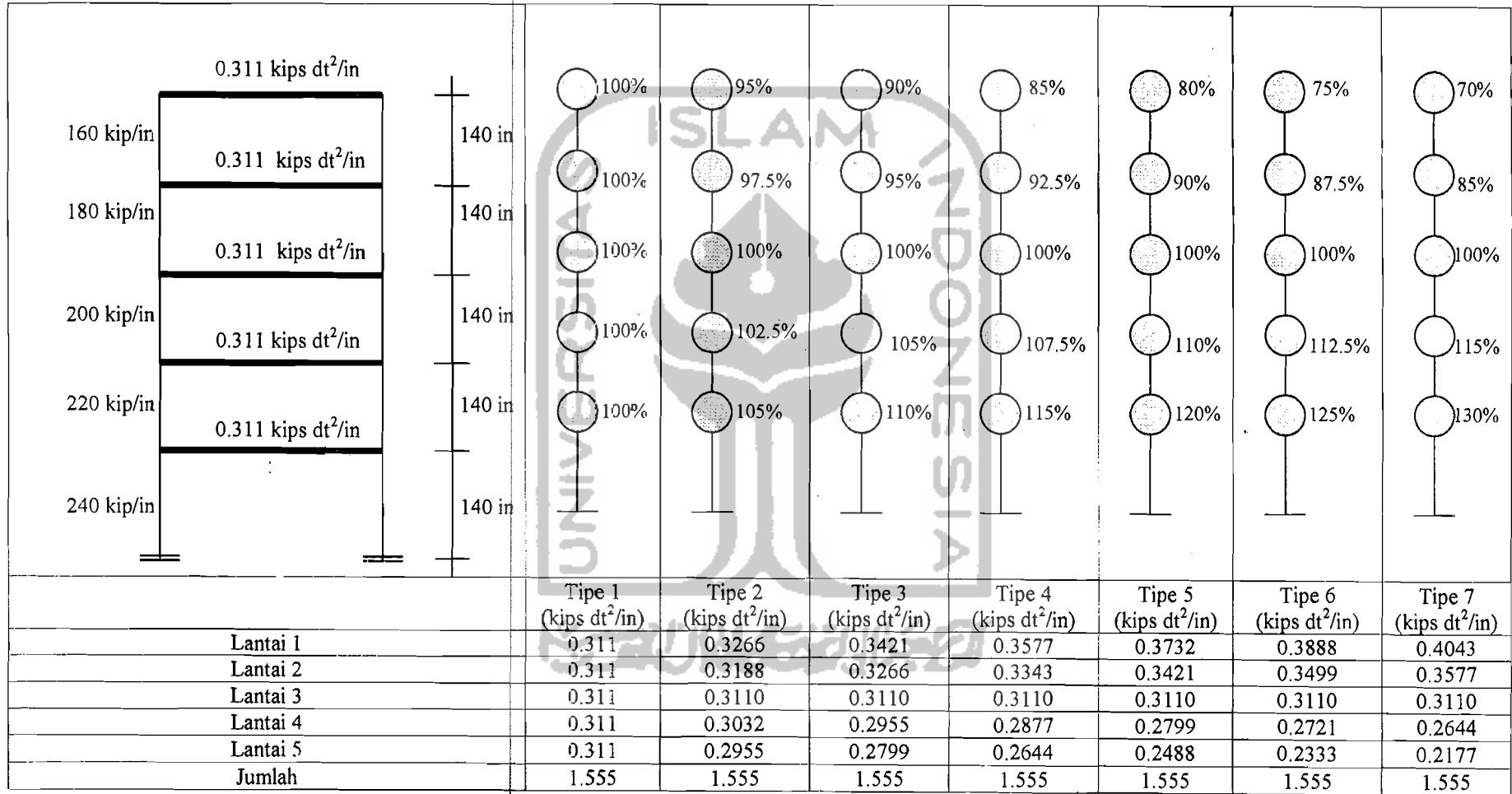
### **ANALISIS, HASIL DAN PEMBAHASAN**

Bab ini berisi tentang pembebanan struktur dan kekakuan tingkat, variasi massa tiap lantai untuk setiap tipe pembebanan, kekakuan tingkat, frekuensi struktur, kandungan frekuensi beban gempa, perhitungan simpangan struktur, simpangan relatif lantai, perhitungan simpangan antar tingkat, perhitungan gaya geser dasar dan perhitungan momen guling yang akan diuraikan berikut ini. Program Matlab versi 5.3 digunakan untuk mencari frekuensi sudut dan *mode shape*, sedangkan untuk integrasi numerik digunakan program Microsoft Excel 2000.

#### **5.1 Pembebanan struktur**

Enam struktur yang dipakai berupa modifikasi dari bangunan model pada buku *Elements of Structural Dynamics* (Berg, 1988), sehingga kekakuan tingkat dan beban yang berupa massa lantai sudah diketahui dengan elevasi tingkat ditentukan.

Detail pembebanan,kekakuan tingkat dan model pembebanan untuk semua tipe dapat dilihat pada Gambar 5.1.



Gambar 5.1 Struktur dan tipe pembebanannya

## 5.2 Perhitungan Variasi Distribusi Massa Lantai

Anggapan yang dipakai dalam analisa perhitungan adalah massa tiap lantai dianggap mengumpul ditengah bentang (*lumped mass*) dan perhitungan kekakuan digunakan prinsip bangunan geser (*shear building*). Struktur yang akan dianalisa berjumlah 7 tipe pembebanan struktur dimana tipe pembebanan 1 adalah struktur yang distribusi massa lantainya belum divariasi. Tipe pembebanan 2 sampai tipe pembebanan 7 merupakan variasi distribusi massa lantai dari tipe pembebanan 1. Massa total untuk ketujuh tipe pembebanan struktur adalah sama sebesar 0.311 kips  $dt^2/in$ . Massa tiap lantai untuk tipe pembebanan 2 sampai tipe pembebanan 7 tersebut divariasi sedemikian hingga pola pembebanannya semakin mengerucut (Gambar 5.1)

## 5.3 Frekuensi Struktur

Frekuensi struktur dihitung berdasarkan hasil dari persamaan *eigen problem*, dengan *input* matriks massa dan matrik kekakuan serta *output* berupa modal matrik struktur dan *eigenvalue* ( $\lambda$ ). Nilai frekuensi sudut selanjutnya sapat dihitung dengan menggunakan *eigenvalue*. Rumus yang dipakai adalah:

$$\lambda = \omega^2 \text{ sehingga}$$

$$\omega = \sqrt{\lambda} \quad (5.1)$$

dimana  $\omega$  adalah frekuensi sudut. Rumus untuk menghitung periode getar dan frekuensi getar struktur adalah:

$$T = 2\pi/\omega \text{ dan}$$

$$f = 1/T \quad (5.2)$$

dimana  $T$  dan  $f$  adalah periode getar dan frekuensi getar struktur. Contoh hasil perhitungan dapat dilihat pada Lampiran 5.

#### 5.4 Perhitungan Simpangan Relatif Lantai

Langkah pertama yang harus dikerjakan adalah menentukan matrik massa dan matrik kekakuan yang merupakan *input* persamaan *eigen problem*. Matrik massa dan matrik kekakuan untuk ketujuh tipe pembebanan adalah:

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_5 \end{bmatrix}$$

matrik massa untuk tipe 1 adalah  $[M] = \begin{bmatrix} 0.311 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.311 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.311 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.311 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.311 \end{bmatrix}$

matrik massa untuk tipe 2 adalah  $[M] = \begin{bmatrix} 0.3266 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.3188 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.311 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.3032 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.2955 \end{bmatrix}$

matrik massa untuk tipe 3 adalah  $[M] = \begin{bmatrix} 0.3421 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.3266 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.311 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.2955 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.2799 \end{bmatrix}$

matrik massa untuk tipe 4 adalah  $[M]=$

$$\begin{bmatrix} 0.3577 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.3343 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.311 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.2877 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.2644 \end{bmatrix}$$

matrik massa untuk tipe 5 adalah  $[M]=$

$$\begin{bmatrix} 0.3732 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.3421 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.311 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.2799 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.2488 \end{bmatrix}$$

matrik massa untuk tipe 6 adalah  $[M]=$

$$\begin{bmatrix} 0.3888 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.3499 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.311 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.2721 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.2333 \end{bmatrix}$$

matrik massa untuk tipe 7 adalah  $[M]=$

$$\begin{bmatrix} 0.4043 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.3577 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.311 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.2644 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.2177 \end{bmatrix}$$

matrik kekakuan struktur adalah:

$$[K]=\begin{bmatrix} k_1+k_2 & -k_2 & 0 & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2+k_3 & -k_3 & 0 & 0 \\ 0 & -k_3 & k_3+k_4 & -k_4 & 0 \\ 0 & 0 & -k_4 & k_4+k_5 & -k_5 \\ 0 & 0 & 0 & -k_5 & k_5 \end{bmatrix}$$

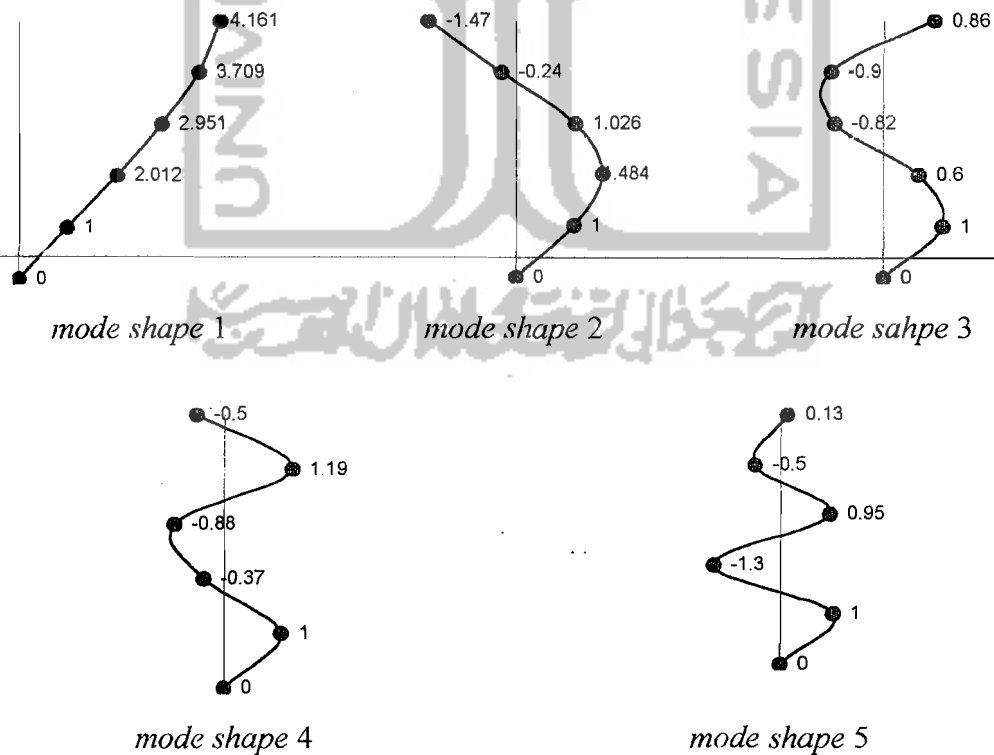
matrik kekakuan untuk ketiga struktur adalah:

$$[K] = \begin{bmatrix} 460 & -220 & 0 & 0 & 0 \\ -220 & 420 & -200 & 0 & 0 \\ 0 & -200 & 380 & -180 & 0 \\ 0 & 0 & -180 & 340 & -160 \\ 0 & 0 & 0 & -160 & 160 \end{bmatrix}$$

Penyelesaian selanjutnya digunakan aplikasi program *Matlab*. Hasilnya dapat diperoleh dari persamaan *eigen problem* yaitu berupa *mode shape* dan frekuensi sudut (Lampiran 5). Contoh hasil perhitungan untuk pembebanan struktur tipe1 adalah:

$$\{\phi_1\} = \begin{Bmatrix} 1.00 \\ 2.01 \\ 2.95 \\ 3.71 \\ 4.16 \end{Bmatrix} \quad \{\phi_2\} = \begin{Bmatrix} 1.00 \\ 1.48 \\ 1.03 \\ -0.24 \\ -1.47 \end{Bmatrix} \quad \{\phi_3\} = \begin{Bmatrix} 1.00 \\ 0.60 \\ -0.82 \\ -0.90 \\ 0.86 \end{Bmatrix} \quad \{\phi_4\} = \begin{Bmatrix} 1.00 \\ -0.37 \\ -0.88 \\ 1.19 \\ -0.50 \end{Bmatrix} \quad \{\phi_5\} = \begin{Bmatrix} 1.00 \\ -1.28 \\ 0.95 \\ -0.48 \\ 0.13 \end{Bmatrix}$$

Pola goyangan (*mode shape*) diatas kemudian digambarkan pada Gambar 5.2.



Gambar 5.2 Pola goyangan atau *mode shape*

Vektor frekuensi sudut ( $\omega$ ) pada pembebanan struktur tipe1 adalah:

$$\{\omega\} = \begin{Bmatrix} 7.4692 \\ 20.7167 \\ 32.4805 \\ 41.6845 \\ 48.8018 \end{Bmatrix}$$

Modal partisi faktor dihitung dengan persamaan,

$$\Gamma = \frac{P_j^*}{M_j^*} = \frac{\{\phi\}_j^T [M] \{1\}}{\{\phi\}_j^T [M] \{\phi\}_j}$$

Vektor modal partisi faktor dari persamaan diatas adalah:

$$\{\Gamma\} = \begin{Bmatrix} 0.3086 \\ 0.2778 \\ 0.2034 \\ 0.1242 \\ 0.0860 \end{Bmatrix}$$

Dari persamaan (3.51b), didapat hasil:

$$\{a\} = \begin{Bmatrix} 201.4938 \\ 204.1433 \\ 206.4961 \\ 208.3369 \\ 209.7604 \end{Bmatrix} \quad \{b\} = \begin{Bmatrix} 2 \\ 2 \\ 2 \\ 2 \\ 2 \end{Bmatrix} \quad \{\hat{k}\} = \begin{Bmatrix} 10130 \\ 10636 \\ 11380 \\ 12154 \\ 12870 \end{Bmatrix}$$

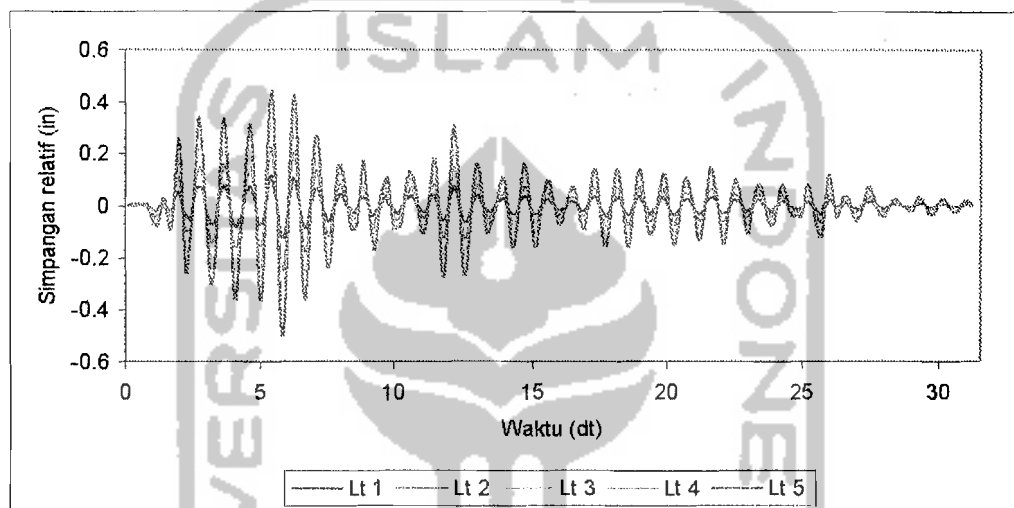
Setelah nilai vektor  $\{a\}$ ,  $\{b\}$  dan  $\{k\}$  diketahui, maka persamaan 3.51a dan 3.53a dapat diselesaikan yang disajikan pada Lampiran 8 (Tabel L.1). Modal amplitudo dihitung dengan mengalikan matrik  $[g]_{ij}$  dengan matrik vektor partisipasi mode  $\{\Gamma\}$ .

$$[z]_j = [g]_{ij} \{\Gamma\}_j \quad (5.3)$$

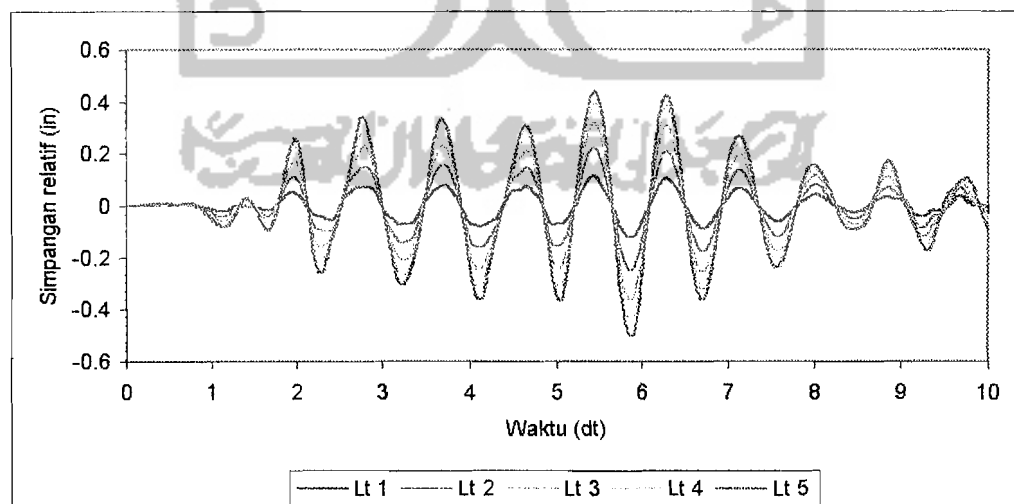
Contoh hasil perhitungan  $z$  dengan analisa dinamik disajikan pada Lampiran 9 (Tabel L.2) dan simpangan dihitung dengan persamaan,

$$y_i(t) = \sum \phi_{ij} z_j(t) \quad (5.4)$$

Contoh hasil perhitungan simpangan relatif disajikan pada lampiran 10 (Tabel L.3) kemudian dibuat grafik plot antara simpangan relatif terhadap waktu. Gambar plot antara simpangan relatif terhadap waktu untuk ketujuh tipe pembebanan struktur akibat gempa El Centro disajikan pada Gambar 5.3 sampai 5.9.



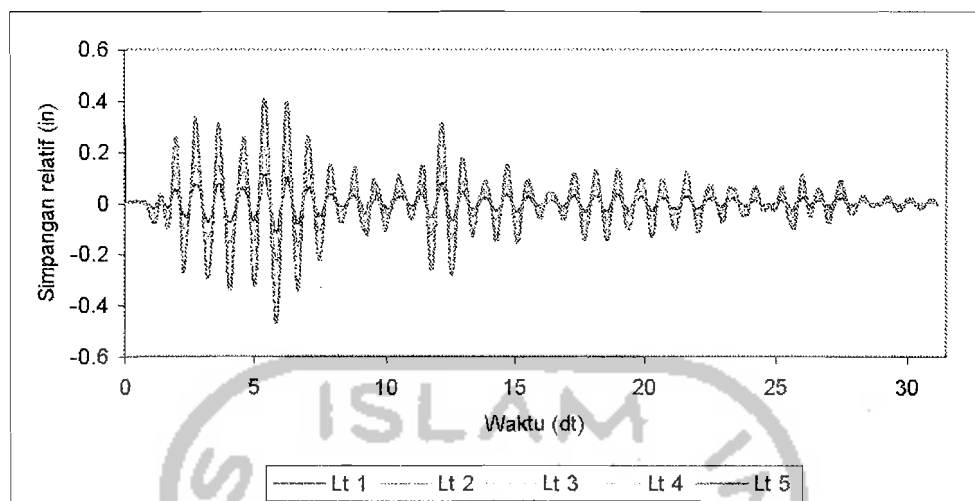
a) Interval waktu 0 dt s/d 31.5 dt



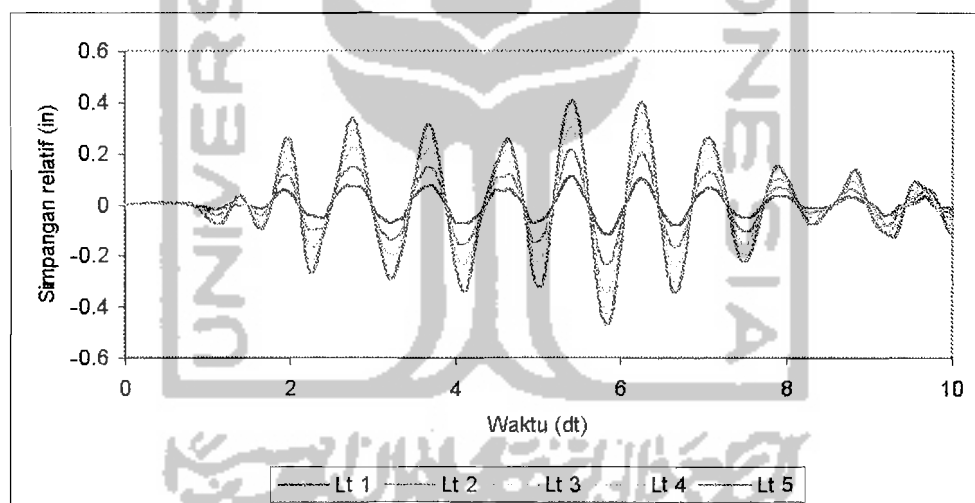
b) Interval waktu 0 dt s/d 10 dt

**Gambar 5.3** Simpangan relatif struktur tipe 1 (tanpa variasi)



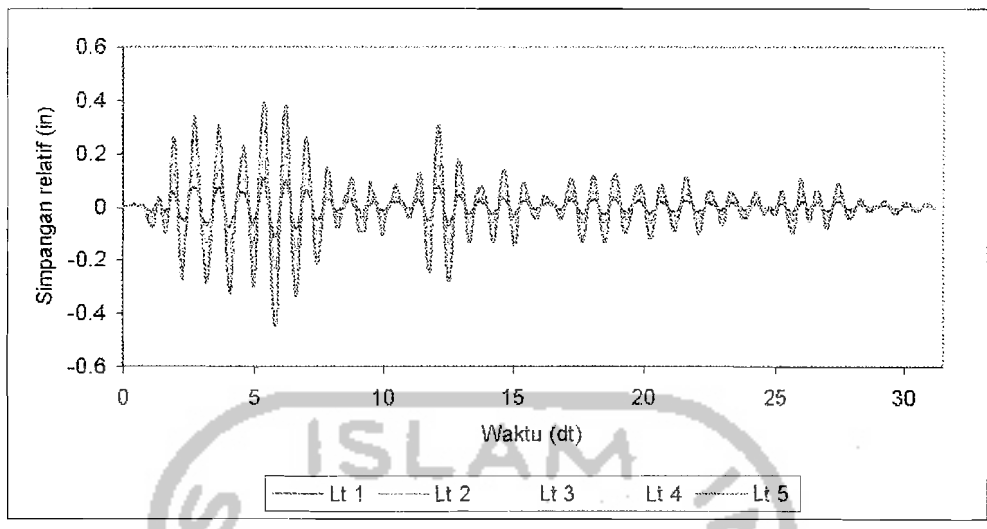


a) Interval waktu 0 dt s/d 31.5 dt

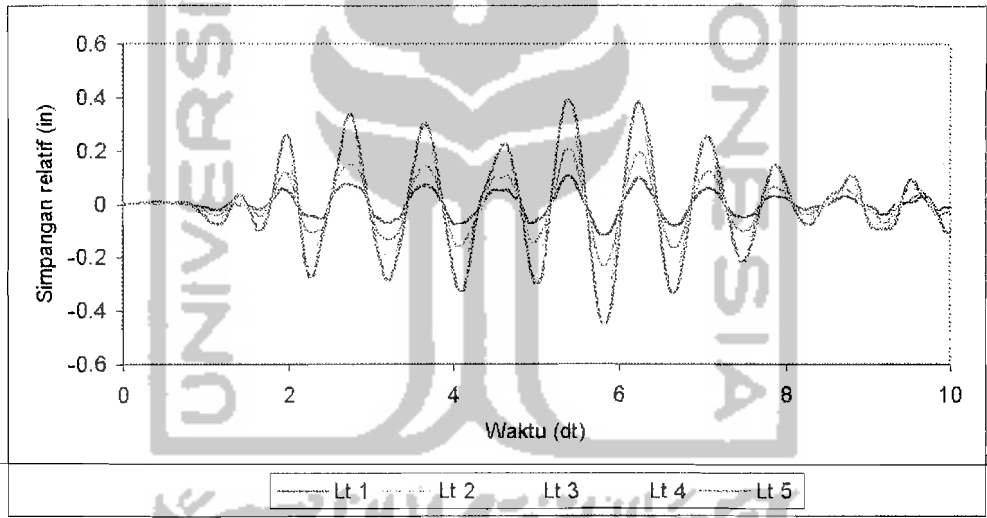


b) Interval waktu 0 dt s/d 10 dt

Gambar 5.4 Simpangan relatif struktur tipe 2

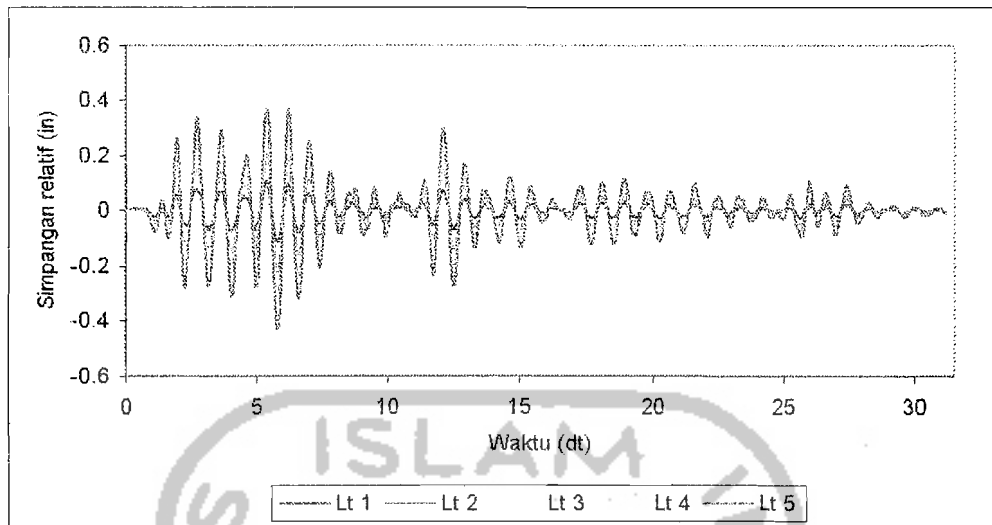


a) Interval waktu 0 dt s/d 31.5 dt

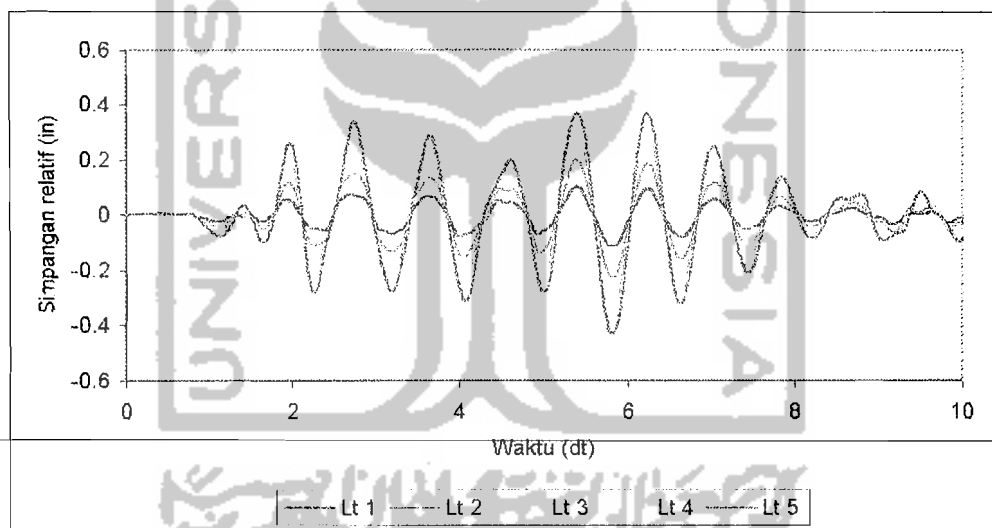


b) Interval waktu 0 dt s/d 10 dt

Gambar 5.5 Simpangan relatif struktur tipe 3

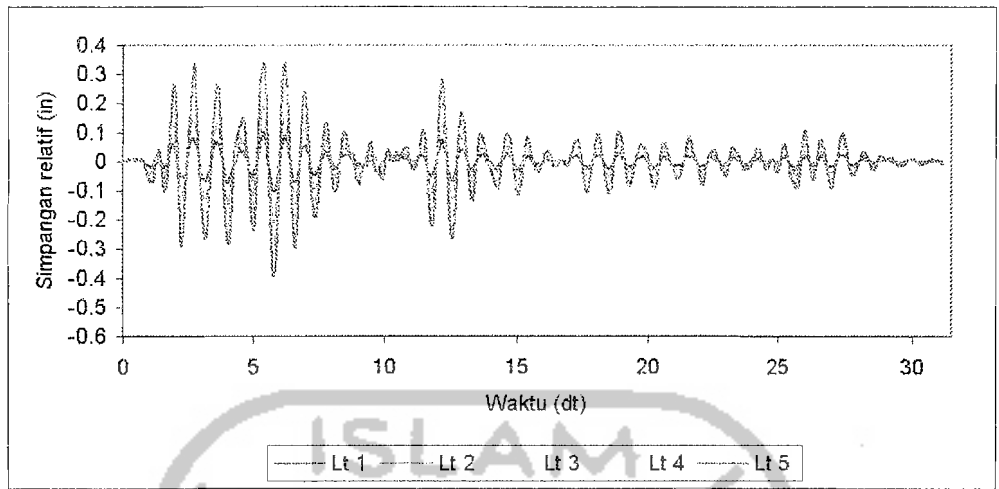


a) Interval waktu 0 dt s/d 31.5 dt

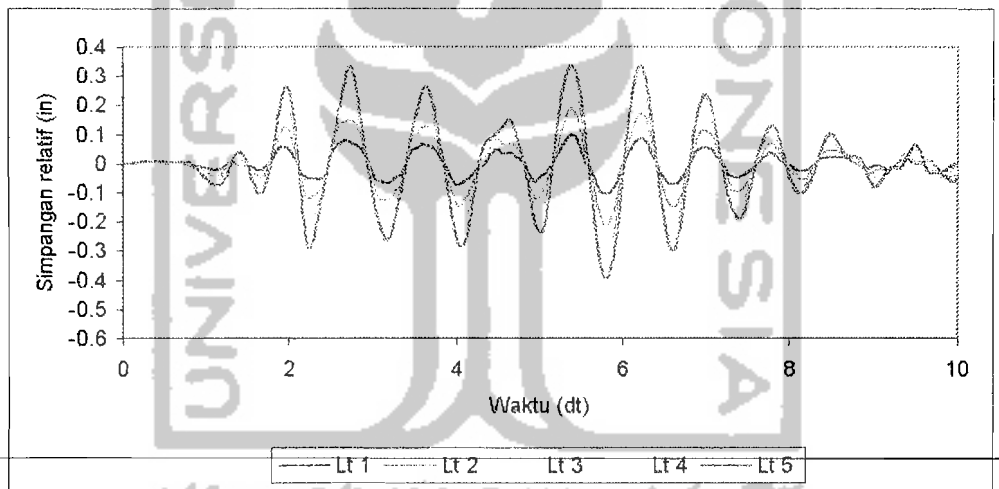


b) Interval waktu 0 dt s/d 10 dt

Gambar 5.6 Grafik simpangan relatif struktur tipe 4



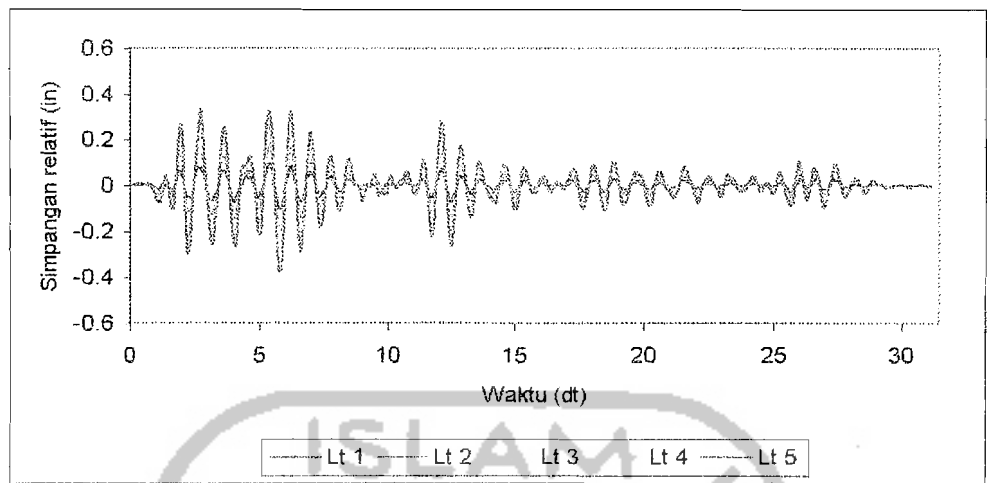
a) Interval waktu 0 dt s/d 31.5 dt



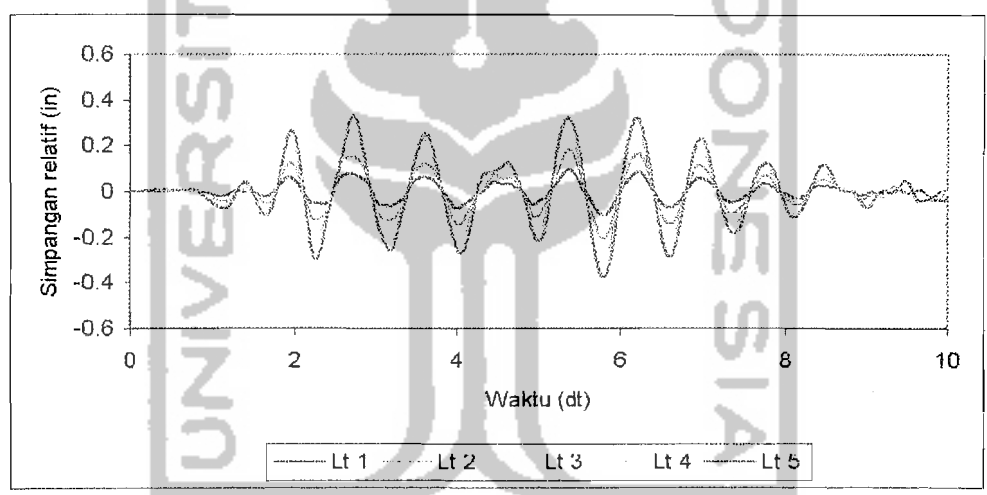
b) Interval waktu 0 dt s/d 10 dt

Gambar 5.7 Simpangan relatif struktur tipe 5



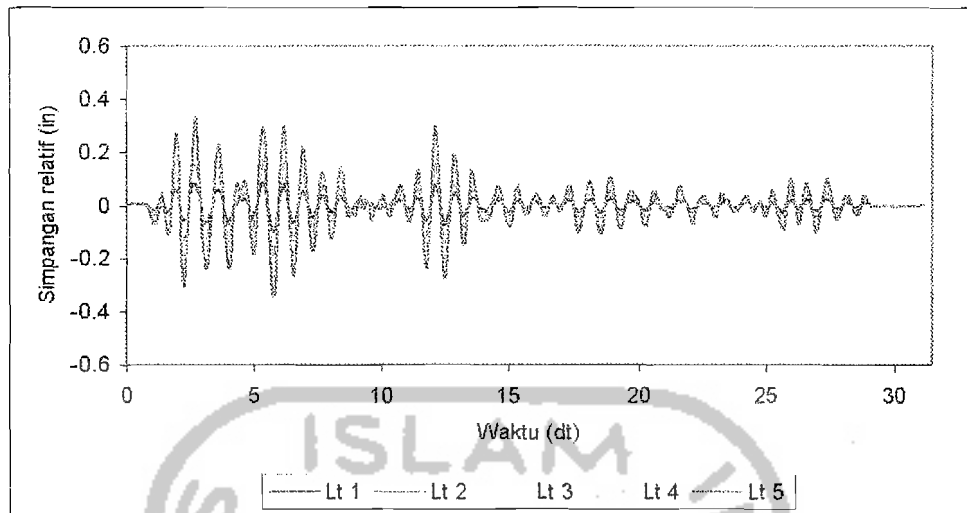


a) Interval waktu 0 dt s/d 31.5 dt

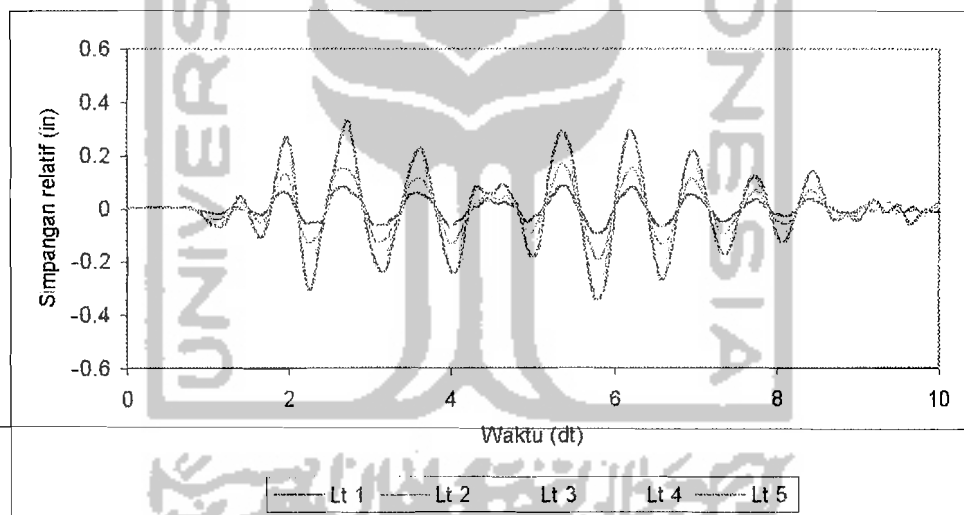


b) Interval waktu 0 dt s/d 10 dt

Gambar 5.8 Simpangan relatif struktur tipe 6



a) Interval waktu 0 dt s/d 31.5 dt



b) Interval waktu 0 dt s/d 10 dt

Gambar 5.9 Simpangan relatif struktur tipe 7

### 5.5 Perhitungan Simpangan Antar Tingkat (*Inter-story Drift*)

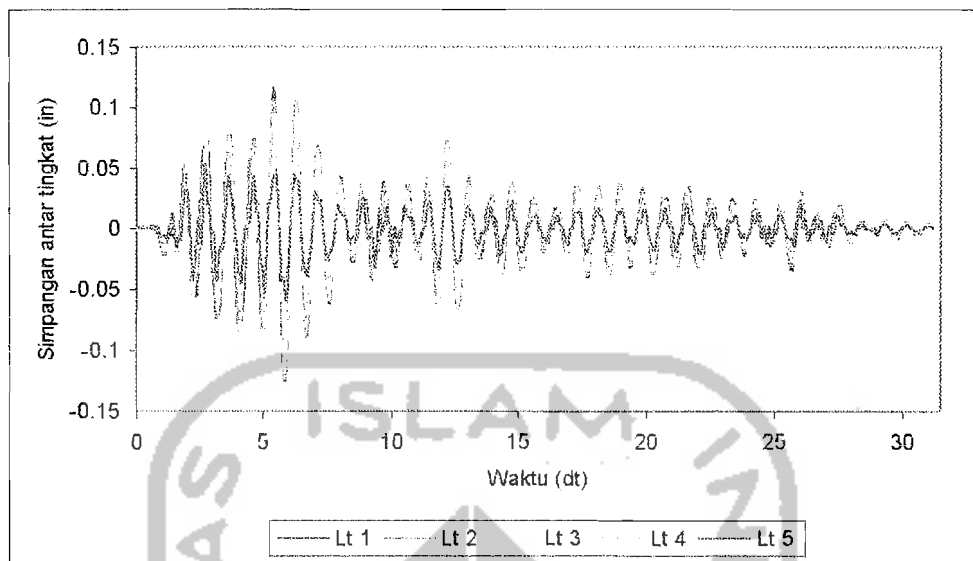
Simpangan antar tingkat merupakan selisih antara simpangan relatif suatu lantai dengan simpangan relatif lantai dibawahnya pada waktu yang bersamaan.

Besarnya nilai simpangan antar tingkat dapat dihitung dengan rumus:

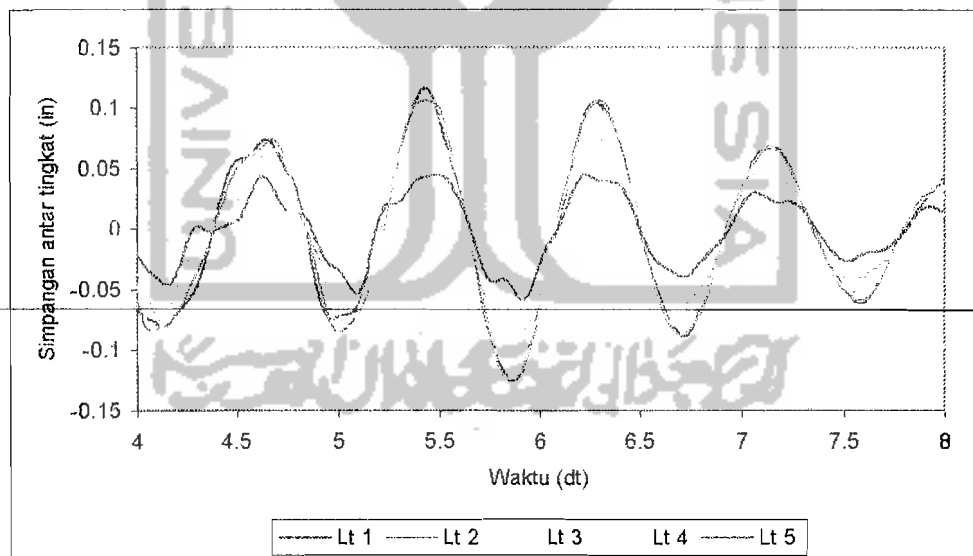
$$\Delta y_i(t) = y_i(t) - y_{i-1}(t) \quad (5.5)$$

dimana  $\Delta y_i(t)$  dan  $y_i(t)$  adalah simpangan antar tingkat dan simpangan relatif lantai yang terjadi pada waktu ke- $i$  yang merupakan fungsi dari waktu.

Contoh perhitungan simpangan antar tingkat disajikan pada Lampiran II (Tabel L.4) dan kemudian disajikan dalam bentuk plot grafik antara simpangan antar tingkat lawan waktu. Gambar plot grafik simpangan antar tingkat lawan waktu untuk ketujuh tipe pembebanan akibat gempa El Centro disajikan pada Gambar 5.10 sampai 5.16.



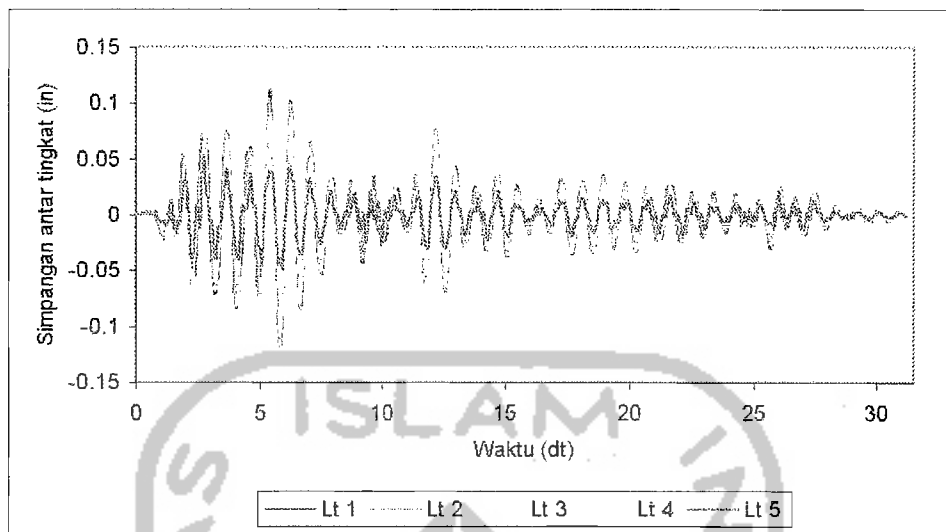
a) Interval waktu 0 dt s/d 31.5 dt



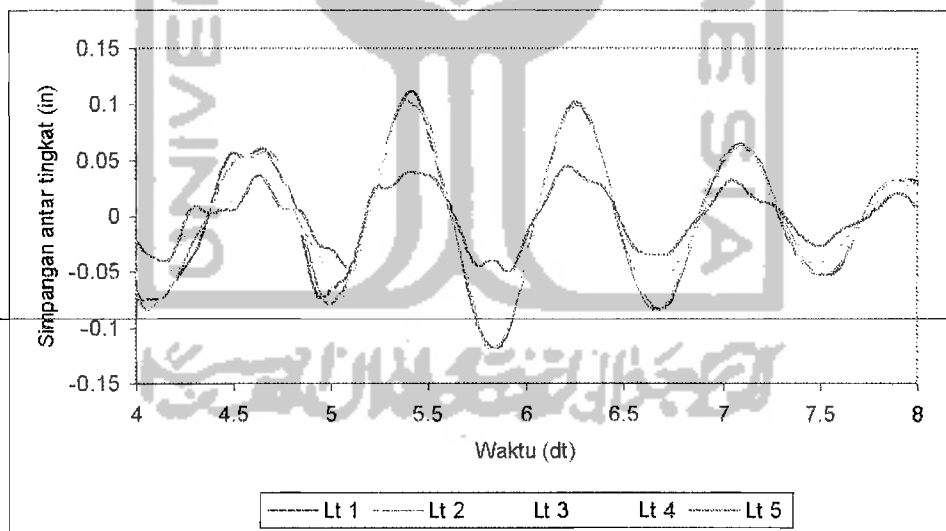
b) Interval waktu 4 dt s/d 8 dt

**Gambar 5.10** Simpangan antar tingkat struktur tipe 1 (tanpa variasi)



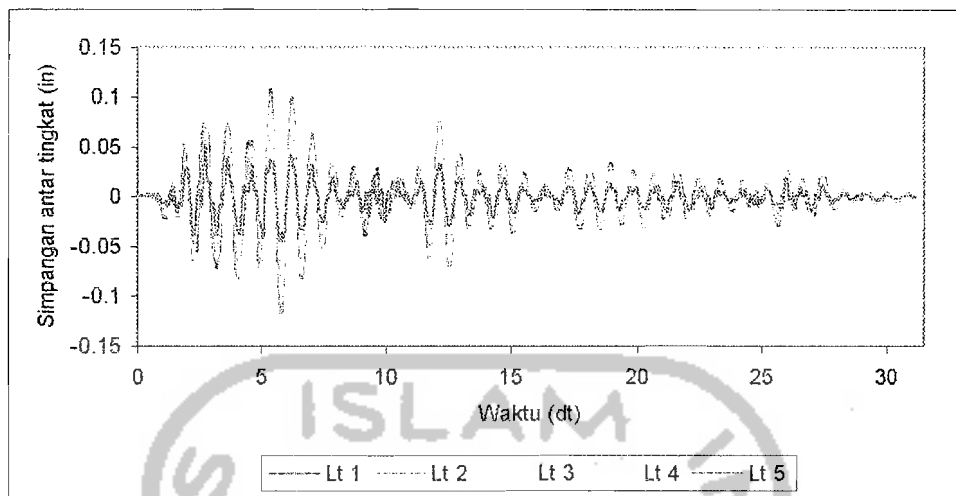


a) Interval waktu 0 dt s/d 31.5 dt

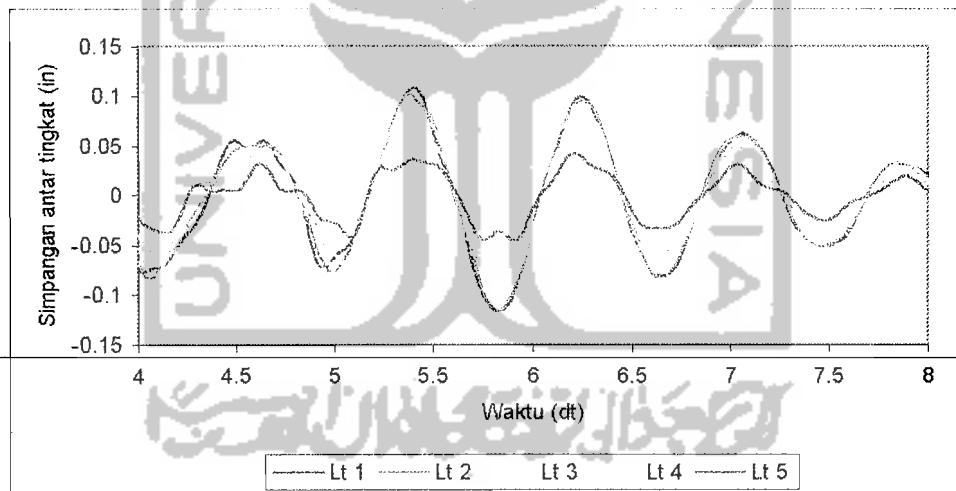


b) Interval waktu 4 dt s/d 8 dt

**Gambar 5.11** Simpangan antar tingkat struktur tipe 2

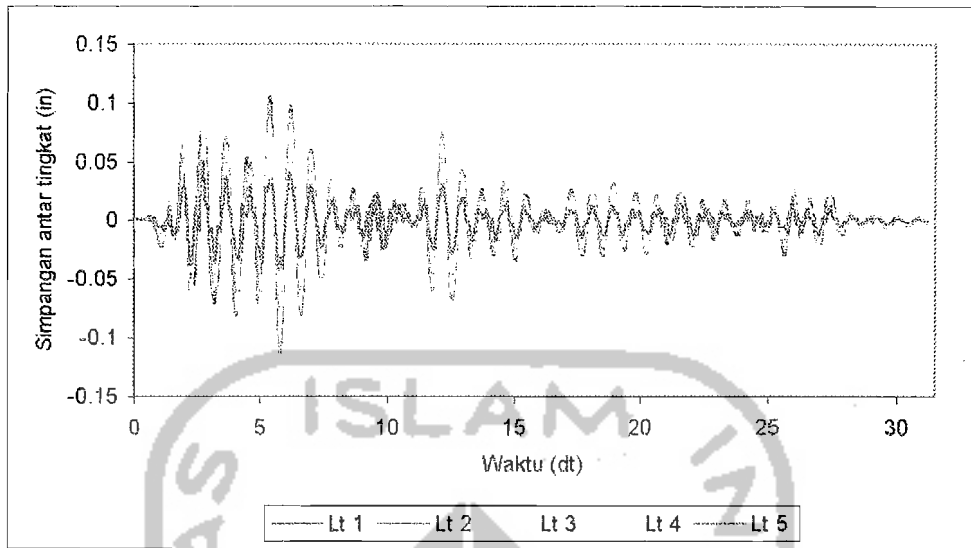


a) Interval waktu 0 dt s/d 31.5 dt

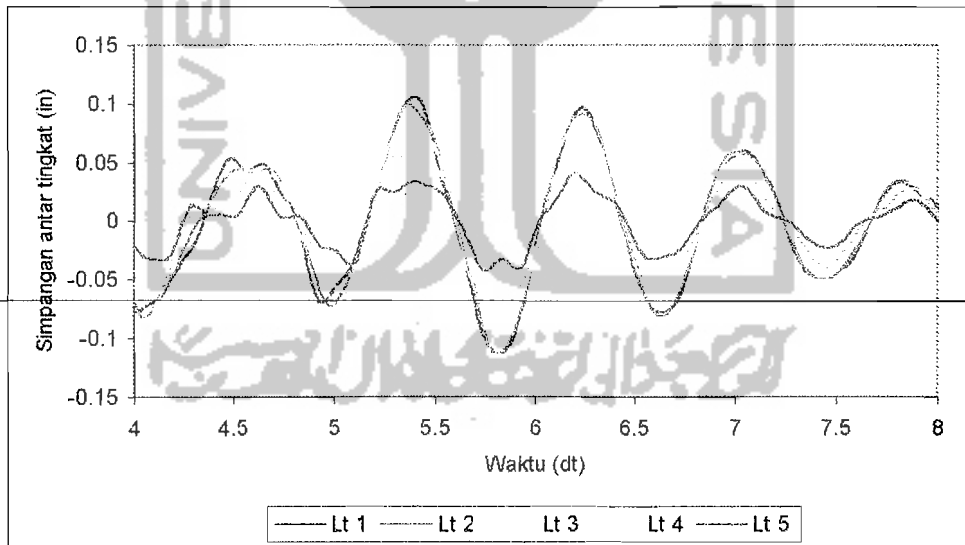


b) Interval waktu 4 dt s/d 8 dt

Gambar 5.12 Simpangan antar tingkat struktur tipe 3

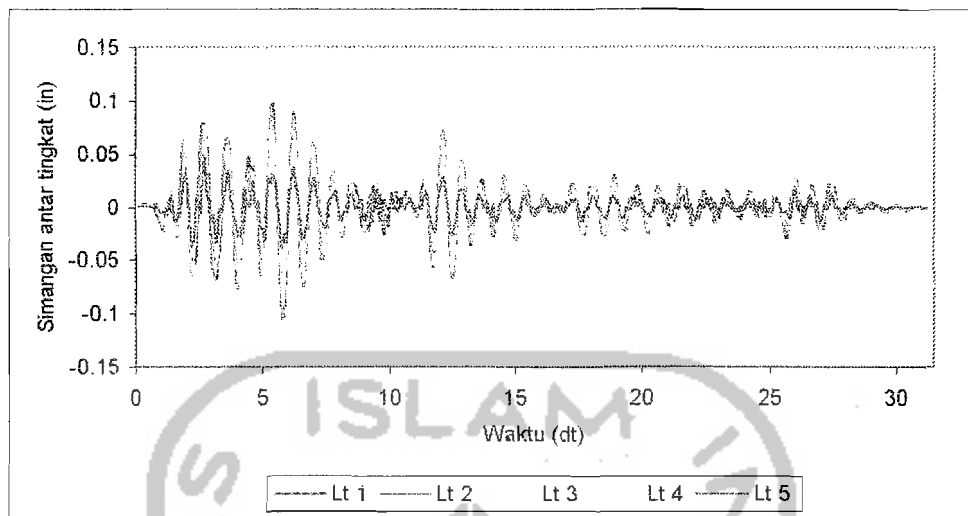


a) Interval waktu 0 dt s/d 31.5 dt

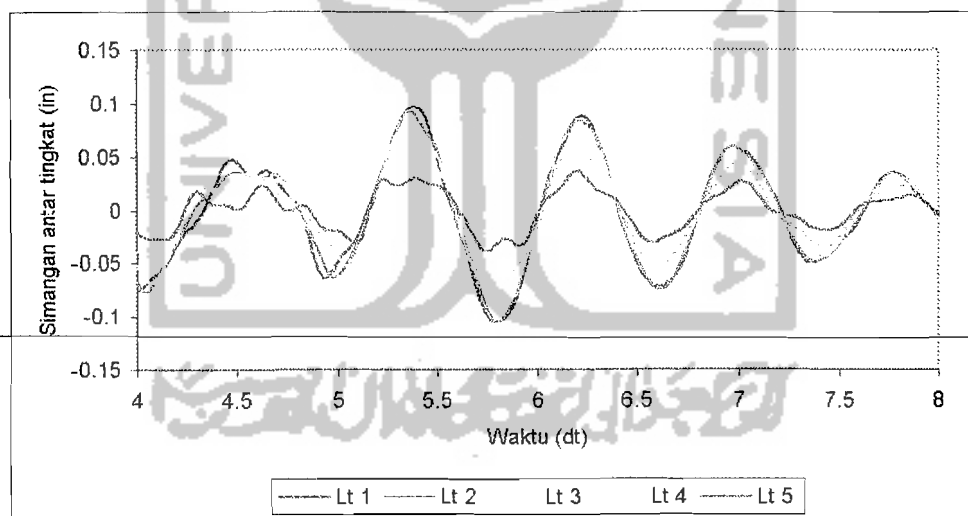


b) Interval waktu 4 dt s/d 8 dt

**Gambar 5.13** Simpangan antar tingkat struktur tipe 4

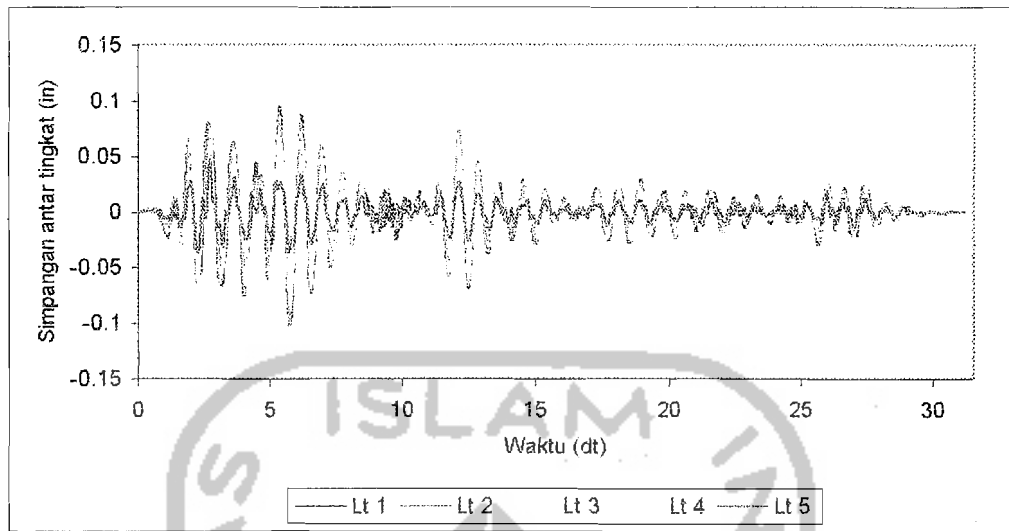


a) Interval waktu 0 dt s/d 31.5 dt

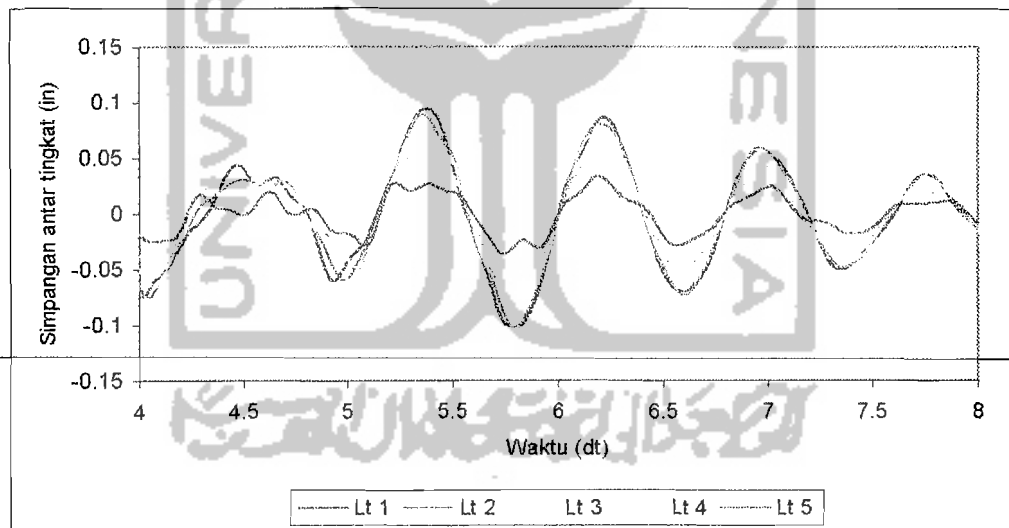


c) Interval waktu 4 dt s/d 8 dt

**Gambar 5.13** Simpangan antar tingkat struktur tipe 5

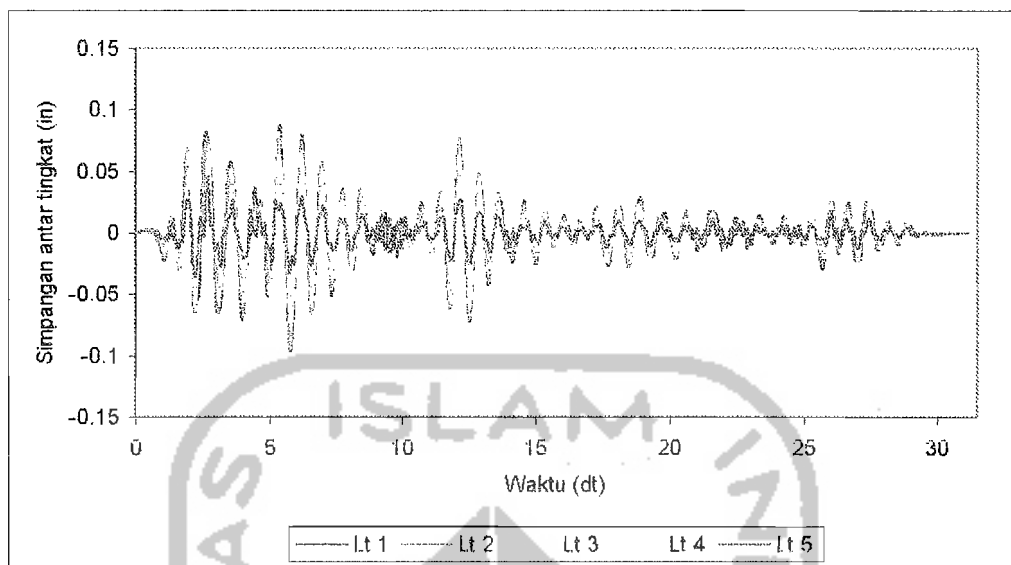


a) Interval waktu 0 dt s/d 31.5 dt

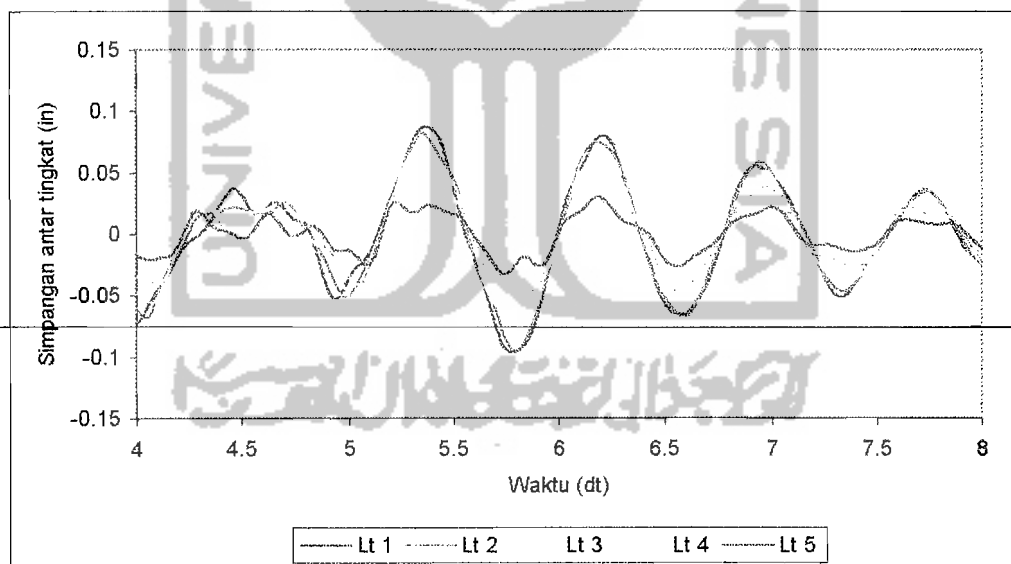


b) Interval waktu 4 dt s/d 8 dt

**Gambar 5.14** Simpangan antar tingkat struktur tipe 6



a) Interval waktu 0 dt s/d 31.5 dt



b) Interval waktu 4 dt s/d 8 dt

**Gambar 5.15** Simpangan antar tingkat struktur tipe 7

### 5.6 Perhitungan Gaya Geser Dasar

Gaya geser dasar adalah penjumlahan dari gaya lantai teratas sampai terbawah tetapi arahnya berlawanan dengan gaya lantai. Gaya lantai ( $F$ ) merupakan perkalian antara simpangan tingkat lantai ( $y$ ) dengan kekakuan ( $k$ ) tiap tingkatnya.

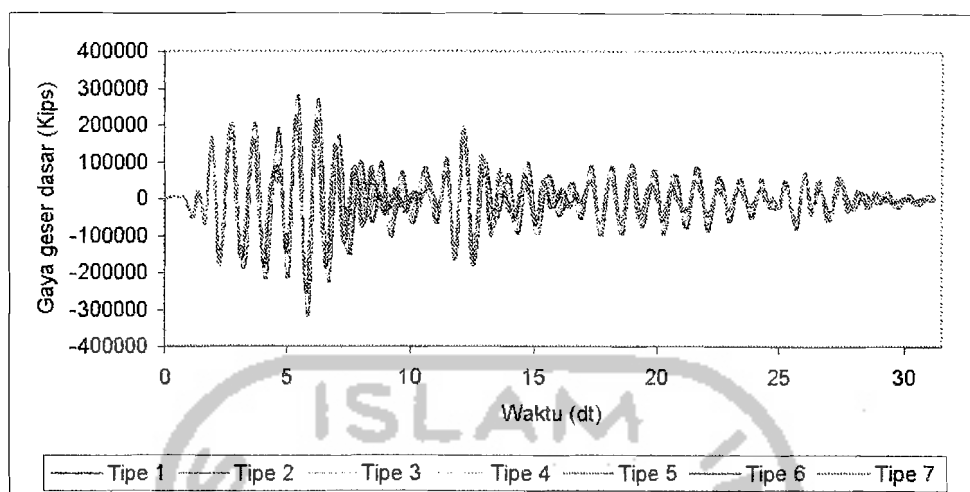
$$F_i(t) = y_i(t) k_i \quad (5.7)$$

Gaya geser dasar ( $V$ ) dapat dihitung dengan rumus:

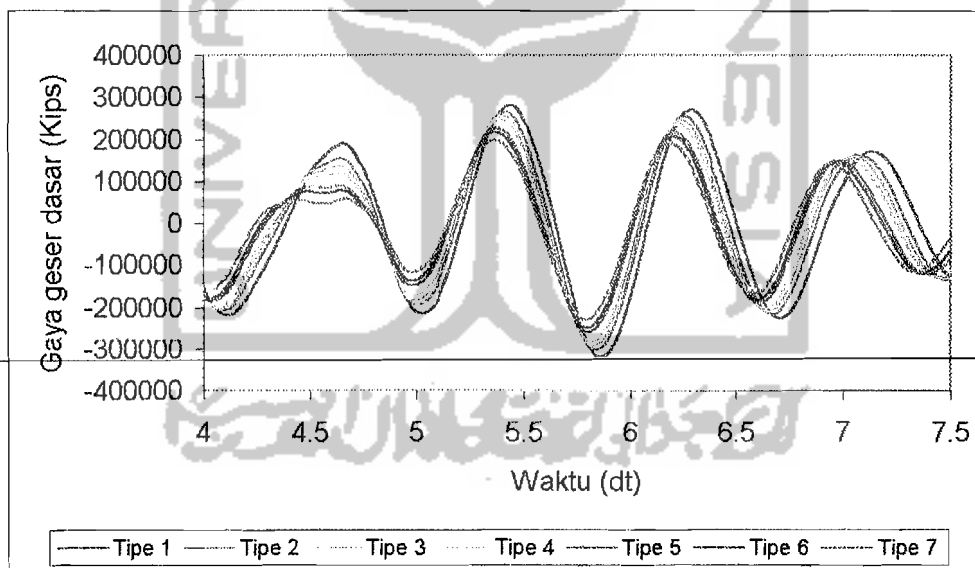
$$V(t) = - \sum_{i=1}^n F_i(t) \quad (5.8)$$

Contoh perhitungan gaya lantai dan gaya geser dasar disajikan pada Lampiran 12 (Tabel L.5). Hasil gaya geser dasar untuk ketujuh tipe pembebanan akibat gempa El Centro diplot kedalam Gambar 5.17.

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA



a) Interval waktu 0 dt s/d 31.5 dt



b) Interval waktu 4 dt s/d 7.5 dt

Gambar 5.17 Grafik gaya geser dasar

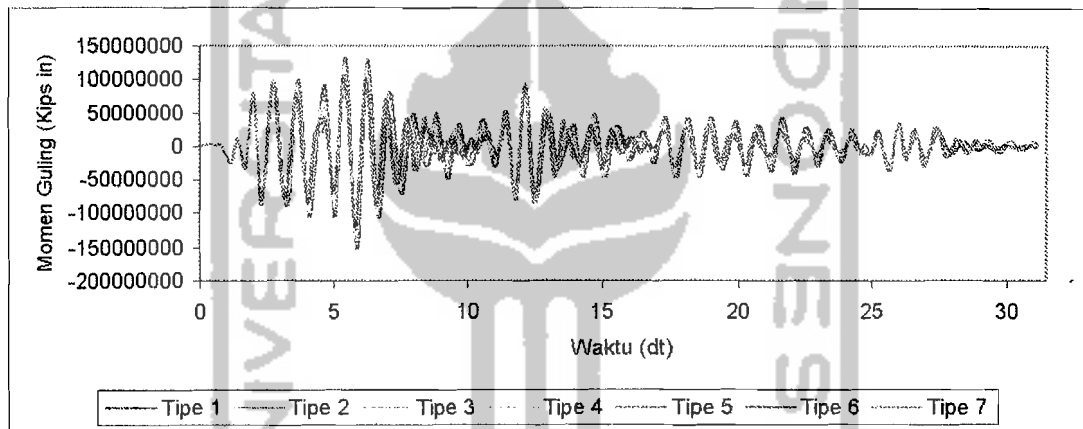


### 5.7 Perhitungan Momen Guling

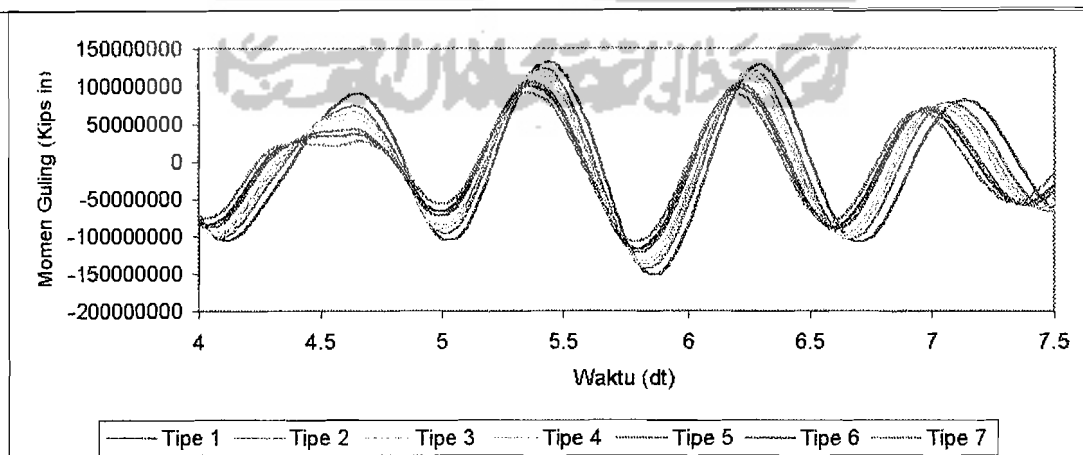
Momen guling ( $M_g$ ) merupakan penjumlahan dari perkalian antara gaya lantai ( $F$ ) dengan elevasi tingkat ( $h$ ) dengan rumus:

$$M_g(t) = \sum_{i=1}^n F_i(t)h_j \quad (5.9)$$

contoh perhitungan momen guling dapat dilihat pada Lampiran 13 (Tabel L.6). Hasil momen guling akibat gempa El Centro untuk ketujuh tipe pembebanan disajikan pada Gambar 5.18.



a) Interval waktu 0 dt s/d 31.5 dt



b) Interval waktu 4 dt s/d 7.5 dt

Gambar 5.18 Grafik momen guling

## 5.8 Pembahasan

Getaran gempa yang terjadi pada suatu struktur akan menyebabkan struktur bergoyang. Jumlah tingkat suatu struktur akan menentukan banyaknya pola goyangan (*mode shape*) yang terjadi akibat getaran gempa. Pola goyangan ini diurutkan dari yang paling besar kontribusinya sampai yang terkecil terhadap simpangan struktur.

Distribusi massa secara vertikal menjadi salah satu aspek yang menentukan perilaku struktur akibat getaran gempa. Suatu struktur bangunan gedung bertingkat yang mempunyai massa lantai tidak terdistribusi secara merata akan berbahaya bila mendapat getaran gempa. Secara sederhana dapat dibayangkan bahwa sebaiknya semakin keatas massa tingkat semakin kecil, hal ini agar gaya geser tingkat menjadi semakin kecil, sehingga momen guling terhadap dasar menjadi kecil dan jangan sebaliknya. Salah satu contoh yang baik adalah bangunan candi atau piramid.

Hasil-hasil yang diperoleh dari analisis numerik untuk setiap model pembebanan diambil nilai-nilai maksimum untuk setiap respon struktur yang kemudian dibandingkan dengan respon maksimum model pembebanan Tipe 1.

Prosentase penurunan respon maksimum yang terjadi kemudian dianalisis dalam bentuk regresi linier dengan persamaan  $y = a + bx$  dan regresi non linier dengan persamaan  $y = a + bx + x^2$  dengan koefisien korelasi  $r$ . Koefisien korelasi  $r$  menyatakan hubungan fungsional dari variabel-variabel yang dipakai, dalam hal ini  $x$  dan  $y$ . Bila  $r=0$  atau mendekati 0, maka hubungan antara kedua variabel sangat lemah atau tidak terdapat hubungan sama sekali. Bila  $r = +1$  atau mendekati 1, maka korelasi antara 2 variabel dikatakan positif (searah, dengan kata lain kenaikan/penurunan nilai-nilai  $y$  terjadi bersama-sama dengan kenaikan/penurunan

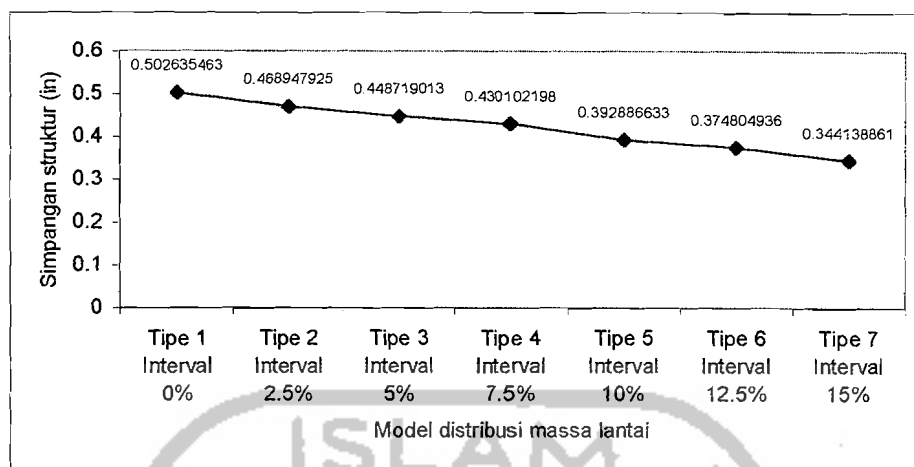
nilai  $x$ ) dan kuat sekali. Bila  $r = -1$  atau mendekati  $-1$ , maka korelasinya dikatakan sangat kuat dan negatif (kenaikkan nilai-nilai  $x$  terjadi bersama-sama dengan penurunan nilai  $y$  atau sebaliknya).

### 5.8.1 Simpangan Struktur

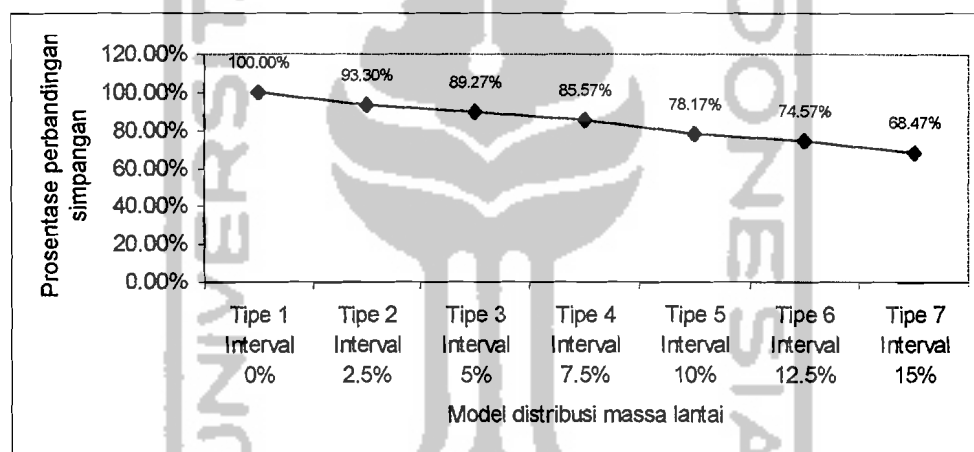
Simpangan struktur merupakan simpangan terjauh ketika struktur bergoyang yang biasanya dipengaruhi mode-1 goyangan. Besarnya simpangan struktur dipengaruhi oleh pola pembebanan struktur. Simpangan struktur maksimum yang didapat dari perhitungan numerik dan prosentase pengurangan simpangan maksimum model-model struktur terhadap Tipe 1 disajikan pada Tabel 5.1 dan diplotkan pada Gambar 5.19 dan Gambar 5.20. Dari prosentase penurunan simpangan maksimum model-model struktur terhadap Tipe 1 kemudian dianalisis kelinieritasannya dengan *regression formula* baik linier dan non linier yang disajikan pada Lampiran 50 (Tabel L.43 dan Gambar L.2) dan hasilnya disajikan pada Tabel 5.2 dan Gambar 5.21.

**Tabel 5.1** Simpangan maksimum struktur

Model Pembebanan Struktur	Simpangan maksimum Struktur (in)	Prosentase perbandingan
Tipe 1 Interval 0%	0.5026355	100.00%
Tipe 2 Interval 2.5%	0.4689479	93.30%
Tipe 3 Interval 5%	0.448719	89.27%
Tipe 4 Interval 7.5%	0.4301022	85.57%
Tipe 5 Interval 10%	0.3928866	78.17%
Tipe 6 Interval 12.5%	0.3748049	74.57%
Tipe 7 Interval 15%	0.3441389	68.47%



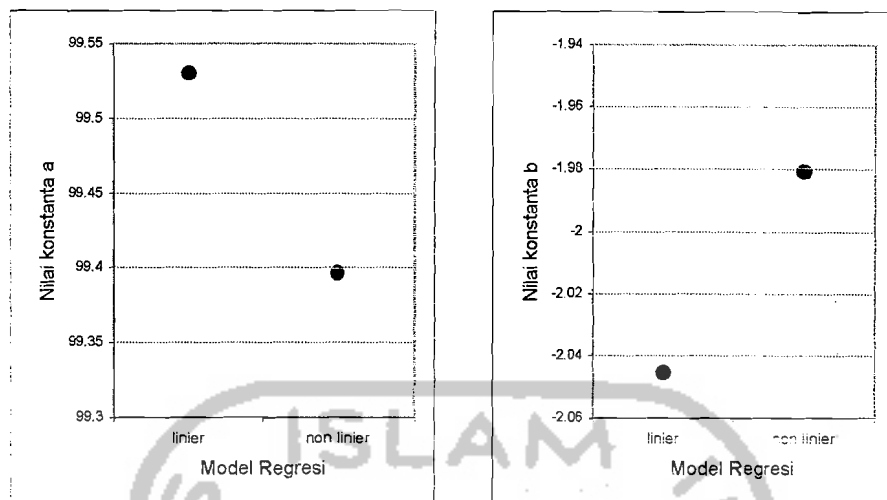
**Gambar 5.19** Grafik simpangan maksimum struktur



**Gambar 5.20** Grafik prosentase perbandingan besar simpangan model-model distribusi massa terhadap Tipe 1

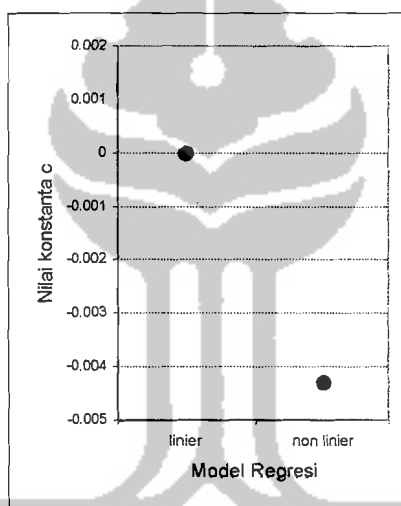
**Tabel 5.2** Konstanta regresi

	a	b	c
Linier	99.53084	-2.04524	0
Non linier	99.3964	-1.9807	-0.0043



a) Grafik nilai konstanta a

b) Grafik nilai koefisien regresi b

c) Grafik koefisien *linearity sensitivitas c*

**Gambar 5.21** Grafik nilai konstanta regresi linier dan non linier simpangan maksimum struktur

Simpangan maksimum struktur dapat dilihat pada Tabel 5.1 dan diplotkan dalam bentuk grafik pada Gambar 5.19 dan Gambar 5.20. Dari Gambar 5.19 dapat dilihat bahwa struktur dengan model distribusi massa yang semakin keatas semakin kecil akan menghasilkan simpangan maksimum yang cenderung semakin kecil. Dari nilai-nilai pada Tabel 5.1 dan Gambar 5.19 menunjukkan bahwa penurunan

simpangan struktur maksimum yang seiring dengan semakin mengecilnya distribusi massa lantai keatas adalah cenderung linier. Apabila grafik penurunan simpangan maksimum struktur pada Gambar 5.20 dirumuskan dalam *regression formula*, maka dari Gambar 5.21 terlihat bahwa konstanta  $a, b$  antara rumusan linier dan non linier besarnya hampir sama dan koefisien *linierity sensitivitas*  $c$  untuk regresi non linier nilainya mendekati nol (linier). Dengan hasil tersebut, penurunan simpangan maksimum struktur dapat ditulis dengan persamaan regresi linier dalam bentuk  $y = 99.53084 - 2.50424 x$  dengan koefisien korelasi  $r = -0.996782$ . Hasil ini sesuai dengan teori yang menyatakan bahwa semakin kecil massa teratas semakin kecil pula simpangan strukturnya dan rujuk dengan penelitian sebelumnya (Gunadi dan Gusmadi, 1999), bahwa simpangan struktur akan mengecil ketika massa lantai bawah lebih besar dari massa lantai-lantai diatasnya.

### 5.8.2 Simpangan Relatif Lantai

Simpangan relatif lantai seperti terlihat pada Gambar 5.3 sampai Gambar 5.9 menunjukkan bahwa simpangan relatif lantai masih bergerak dalam satu fase dan akan semakin membesar untuk lantai yang lebih tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa pola goyangan struktur didominasi oleh mode pertama goyangan. Simpangan relatif lantai diambil paling maksimum dari waktu pembebanan pada semua model pembebanan dan disajikan pada Tabel 5.3 serta diplotkan pada Gambar 5.22. Prosentase penurunan simpangan relatif lantai model-model struktur terhadap Tipe 1 disajikan pada Tabel 5.4. Prosentase penurunan simpangan relatif maksimum model-model struktur terhadap Tipe 1 kemudian dianalisis kelinieritasannya dengan *regresion formula* baik linier dan non linier yang disajikan pada Lampiran 53 dan

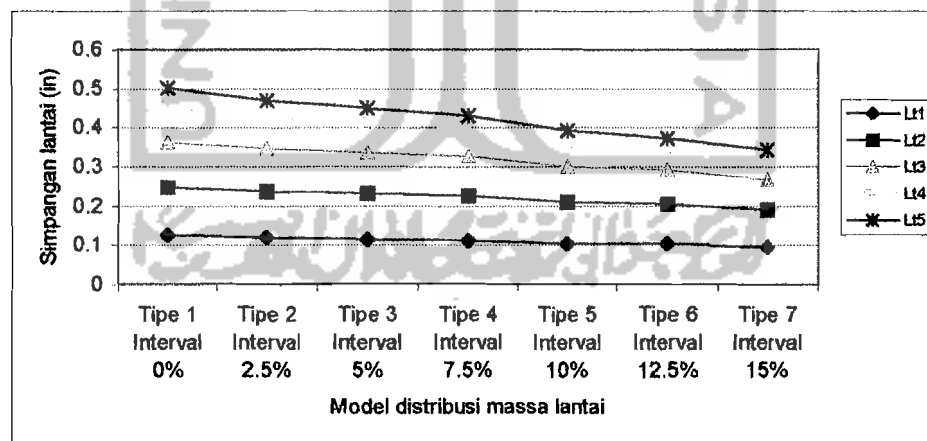
Lampiran 54. (Tabel L.46 sampai Tabel L.50) dan diplotkan pada Lampiran 59 dan Lampiran 60 (Gambar L.5 sampai Gambar L.9), kemudian hasilnya disajikan pada Tabel 5.5 dan Gambar 5.23.

**Tabel 5.3** Simpangan relatif lantai (in)

	Tipe 1 Interval 0%	Tipe 2 Interval 2.5%	Tipe 3 Interval 5%	Tipe 4 Interval 7.5%	Tipe 5 Interval 10%	Tipe 6 Interval 12.5%	Tipe 7 Interval 15%
Lt1	0.1250488	0.118669	0.115588	0.11244	0.104791	0.102356	0.096753
Lt2	0.2486691	0.237132	0.231229	0.225309	0.210221	0.204602	0.191082
Lt3	0.3631708	0.346483	0.336517	0.32622	0.300276	0.290483	0.268437
Lt4	0.4549508	0.430062	0.413225	0.397198	0.3614	0.346435	0.31796
Lt5	0.5026355	0.468948	0.448719	0.430102	0.392887	0.374805	0.344139

**Tabel 5.4** Prosentase penurunan simpangan relatif lantai model struktur terhadap Tipe 1 (%)

	Tipe 1 Interval 0%	Tipe 2 Interval 2.5%	Tipe 3 Interval 5%	Tipe 4 Interval 7.5%	Tipe 5 Interval 10%	Tipe 6 Interval 12.5%	Tipe 7 Interval 15%
Lt1	100	94.89826	92.43443	89.91675	83.80021	81.85313	77.37212
Lt2	100	95.36062	92.98674	90.60587	84.5384	82.27885	76.84186
Lt3	100	95.40486	92.66071	89.82557	82.68175	79.98516	73.91484
Lt4	100	94.52932	90.82846	87.30574	79.43725	76.14788	69.88881
Lt5	100	93.29782	89.27325	85.56941	78.16532	74.56795	68.46689



**Gambar 5.22** Grafik simpangan lantai

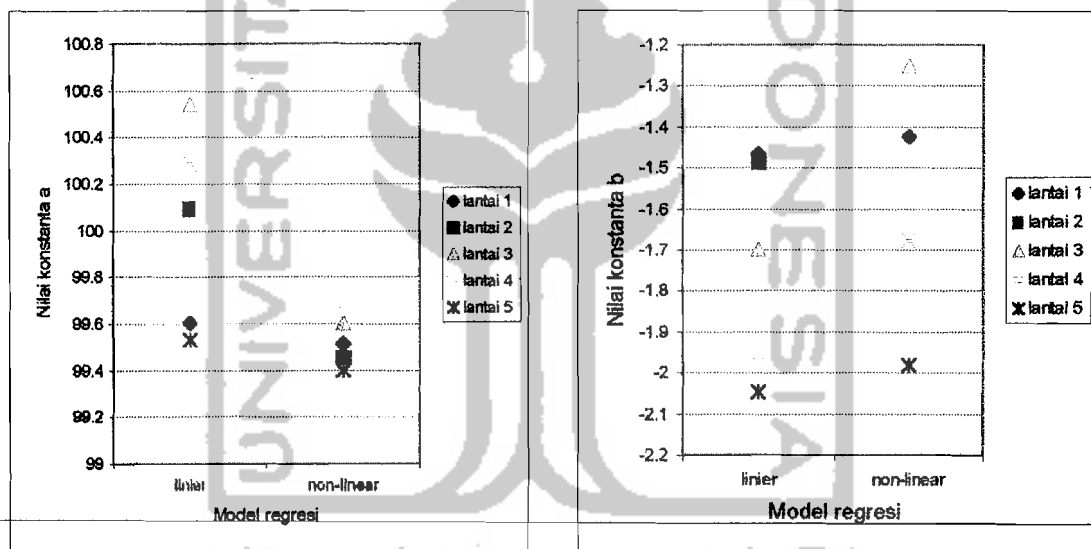
Berdasarkan Tabel 5.4 dan Gambar 5.22 dapat dibuat rumusan regresi linier dalam bentuk  $y = a + bx$  dan regresi non linier dalam bentuk  $y = a + bx + cx^2$  dimana

nilai-nilai konstanta  $a$ ,  $b$  dan  $c$  ditabelkan dalam Tabel 5.5 dan diplotkan pada Gambar

5.23

**Tabel 5.5** Konstanta regresi linier dan non linier simpangan relatif maksimum

	Linier		Non linier		
	a	b	a	b	c
Lantai 1	99.60443	-1.46583	99.5145	-1.4227	-0.0029
Lantai 2	100.0967	-1.48695	99.4545	-1.1787	-0.0206
Lantai 3	100.5398	-1.70105	99.6019	-1.2509	-0.03
Lantai 4	100.2862	-1.97839	99.6566	-1.6762	-0.0201
Lantai 5	99.53084	-2.04524	99.3964	-1.9807	-0.0043

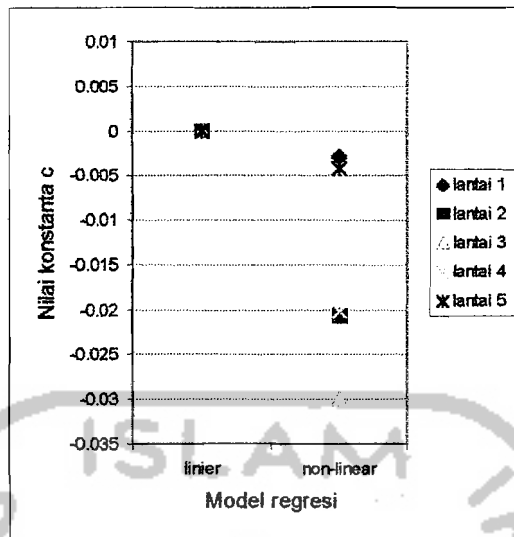


a) Grafik nilai konstanta  $a$

b) Grafik nilai koefisien regresi  $b$

**Gambar 5.23i** Grafik nilai konstanta regresi linier dan non linier simpangan relatif maksimum struktur





Grafik koefisien *linearity sensitivitas c*

**Gambar 5.23ii** Grafik nilai konstanta regresi linier dan non linier simpangan relatif maksimum struktur

Simpangan relatif lantai dari 7 model pembebanan struktur dapat dilihat pada Tabel 5.3 dan diplotkan dalam Gambar 5.22. Dari Gambar 5.22 dan Tabel 5.3 dapat dilihat bahwa simpangan lantai cenderung berkurang dengan distribusi massa keatas yang semakin kecil. Pada lantai 4 dan lantai 5 simpangan relatif berkurang tajam dengan semakin kecilnya massa lantai bersangkutan. Namun pada lantai 3 yang tidak mengalami perubahan massa ternyata simpangan lantai bersangkutan juga mengalami penurunan yang cukup tajam.

Berdasarkan Gambar 5.23 dan Tabel 5.5 terlihat bahwa *konstanta a* untuk semua lantai nilainya akan cenderung tetap baik untuk linier maupun non linier. Sedangkan koefisien regresi (koefisien penurunan *b*) untuk kondisi linier nilainya akan cenderung lebih besar dari perumusan non linier. Dari grafik nilai *linearity sensitivitas c* menunjukkan bahwa lantai yang letaknya semakin mendekati lantai 0.5 tinggi struktur nilai *c*-nya akan semakin membesar (semakin non linier) dengan arah

negatif (kebawah) meskipun nilai koefisiennya relatif kecil, sehingga penurunan simpangan maksimum lantai terhadap variasi interval distribusi massa lantai yang semakin keatas semakin kecil masih dapat dikatakan linier.

### 5.8.3 Simpangan Antar Tingkat

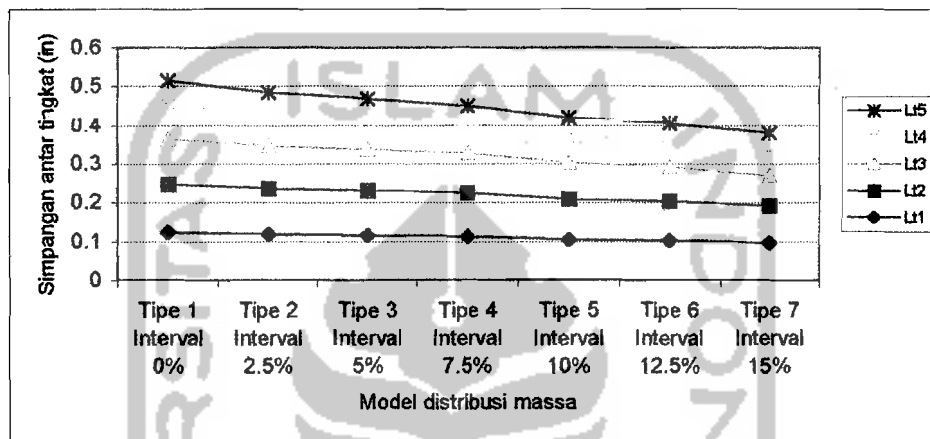
Simpangan antar tingkat merupakan selisih antara simpangan relatif suatu lantai dengan simpangan relatif lantai dibawahnya. Simpangan antar tingkat maksimum model struktur yang didapat dari perhitungan numerik disajikan pada Tabel 5.6 dan diplotkan pada Gambar 5.24. Perbandingan antara hasil maksimum simpangan antar tingkat model-model struktur terhadap Tipe 1 disajikan pada Tabel 5.7. Prosentase penurunan simpangan antar tingkat maksimum model-model struktur terhadap Tipe 1 kemudian dianalisis kelinieritasannya dengan *regresion formula* baik linier dan non linier yang disajikan pada Lampiran 55 dan Lampiran 56. (Tabel L.51 sampai Tabel L.55) dan diplotkan pada Lampiran 61 dan Lampiran 62 (Gambar L.10 sampai Gambar L.14), kemudian hasilnya disajikan pada Tabel 5.8 dan Gambar 5.25. Pembahasan tentang simpangan antar tingkat akibat variasi massa lantai dapat diuraikan sebagai berikut.

**Tabel 5.6** Simpangan antar tingkat maksimum struktur (in)

	Tipe 1 Interval 0%	Tipe 2 Interval 2.5%	Tipe 3 Interval 5%	Tipe 4 Interval 7.5%	Tipe 5 Interval 10%	Tipe 6 Interval 12.5%	Tipe 7 Interval 15%
Lt1	0.125049	0.118669	0.115588	0.11244	0.104791	0.102356	0.096753
Lt2	0.12362	0.118556	0.11617	0.112869	0.10543	0.102246	0.09518
Lt3	0.114502	0.10935	0.105287	0.100911	0.091374	0.086065	0.078069
Lt4	0.09178	0.083947	0.078165	0.072307	0.067168	0.066158	0.065822
Lt5	0.058536	0.053182	0.052054	0.050748	0.049106	0.047269	0.044939

**Tabel 5.7** Prosentase penurunan simpangan antar tingkat maksimum model struktur terhadap Tipe 1 (%)

	Tipe 1 Interval 0%	Tipe 2 Interval 2.5%	Tipe 3 Interval 5%	Tipe 4 Interval 7.5%	Tipe 5 Interval 10%	Tipe 6 Interval 12.5%	Tipe 7 Interval 15%
Lt1	100	94.89826	92.43443	89.91675	83.80021	81.85313	77.37212
Lt2	100	95.90361	93.97284	91.30295	85.28513	82.70949	76.99376
Lt3	100	95.50096	91.95264	88.13097	79.80166	75.16501	68.18152
Lt4	100	91.4652	85.16552	78.78329	73.18403	72.0836	71.71753
Lt5	100	90.85308	88.92612	86.69517	83.88958	80.75148	76.77079

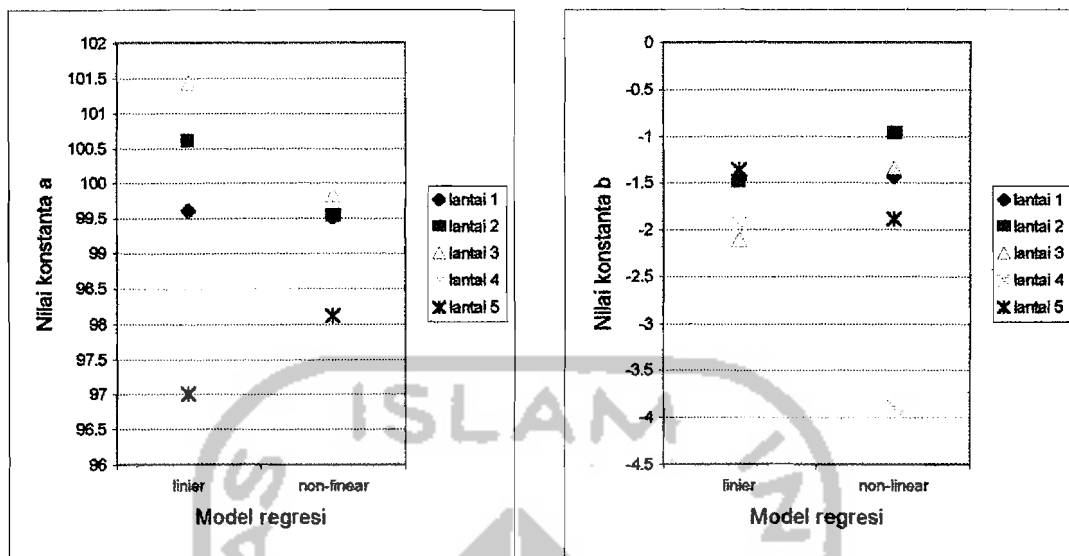


**Gambar 5.24** Grafik simpangan antar tingkat

Simpangan antar tingkat struktur akan semakin berkurang dengan semakin besarnya prosentase interval distribusi massa lantai sehingga semakin kecil massa lantai atas, simpangan antar tingkatnya juga akan semakin kecil. Berdasarkan Tabel 5.7 dan Gambar 5.22 dapat dibuat rumusan regresi linier dalam bentuk  $y = a + bx$  dan regresi non linier dalam bentuk  $y = a + bx + cx^2$  dimana nilai-nilai konstanta  $a, b$  dan  $c$  ditabelkan dalam Tabel 5.8 dan diplotkan pada Gambar 5.25.

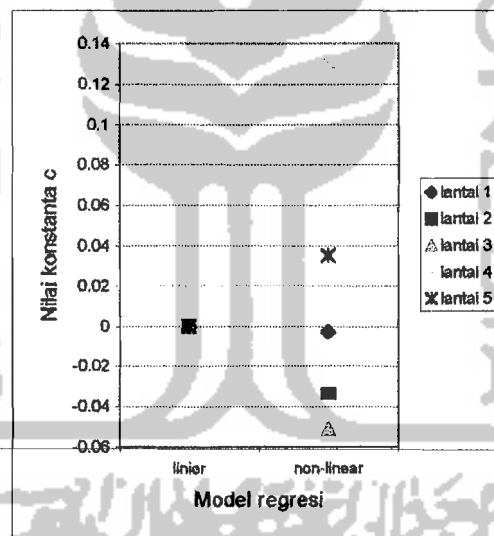
**Tabel 5.8** Konstanta regresi linier dan non linier simpangan antar tingkat

	Linier		Non linier		
	a	b	a	b	c
Lantai 1	99.60443	-1.46583	99.5145	-1.4227	-0.0029
Lantai 2	100.6055	-1.48707	99.5331	-0.9723	-0.0343
Lantai 3	101.4202	-2.11826	99.8203	-1.3503	-0.0512
Lantai 4	96.29904	-1.93703	100.3708	-3.8915	0.1303
Lantai 5	97.01168	-1.35611	98.1204	-1.8883	0.0355



a) Grafik nilai konstanta a

b) Grafik nilai koefisien regresi b

c) Grafik koefisien *linearity sensitivitas c*

**Gambar 5.25** Grafik nilai konstanta regresi linier dan non linier simpangan antar tingkat maksimum struktur

Berdasarkan Gambar 5.25 dan Tabel 5.8 terlihat bahwa *konstanta a* untuk semua lantai nilainya akan cenderung tetap baik untuk linier maupun non linier. Sedangkan koefisien regresi (koefisien penurunan *b*) untuk lantai 1,2,3 untuk perumusan regresi non linier nilainya akan cenderung lebih kecil dari perumusan

regresi linier namun untuk lantai 5 nilainya akan lebih besar dan akan semakin membesar pada lantai 4. Dari grafik nilai *linearity sensitivitas c* menunjukkan bahwa lantai 4 mempunyai nilai *c* terbesar yaitu 0.1303 yang menunjukkan bahwa prosentase penurunan lantai 4 cenderung non linier. Sedangkan pada lantai 1,2,3 dan 5 koefisien nilai *c*-nya cenderung mendekati nol hal ini membuktikan bahwa prosentase penurunan respon simpangan antar tingkat lantai 1 dan 2 adalah linier dan cenderung konstan.

#### 5.8.4 Gaya Horisontal Lantai

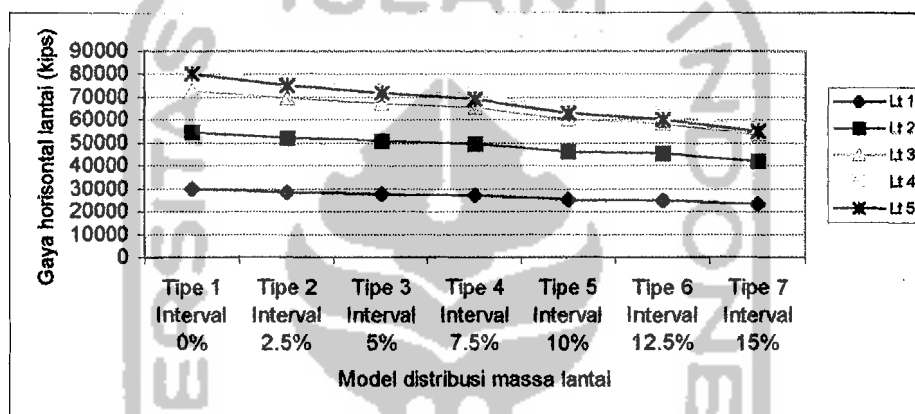
Gaya horisontal lantai adalah gaya geser yang terjadi pada lantai. Gaya horisontal lantai maksimum dari perhitungan numerik disajikan pada Tabel 5.9 dan diplotkan pada Gambar 5.26. Sedangkan perbandingan antara gaya horisontal lantai model-model struktur terhadap Tipe 1 disajikan pada Tabel 5.10. Prosentase penurunan simpangan relatif maksimum model-model struktur terhadap Tipe 1 kemudian dianalisis kelinieritasannya dengan *regression formula* baik linier dan non linier yang disajikan pada Lampiran 57 dan Lampiran 58. (Tabel L.56 sampai Tabel L.60) dan diplotkan pada Lampiran 63 dan Lampiran 64 (Gambar L.15 sampai Gambar L.19), kemudian hasilnya disajikan pada Tabel 5.11 dan Gambar 5.27. Pembahasan tentang gaya horisontal lantai adalah sebagai berikut.

**Tabel 5.9** Gaya horisontal lantai (kips)

	Tipe 1 Interval 0%	Tipe 2 Interval 2.5%	Tipe 3 Interval 5%	Tipe 4 Interval 7.5%	Tipe 5 Interval 10%	Tipe 6 Interval 12.5%	Tipe 7 Interval 15%
Lt 1	30011.714	28480.59	27741.16	26985.56	25149.88	24565.53	23220.7
Lt 2	54707.209	52169.13	50870.45	49567.94	46248.6	45012.46	42038.04
Lt 3	72634.165	69296.53	67303.33	65244.06	60055.2	58096.56	53687.43
Lt 4	81891.145	77411.14	74380.46	71495.67	65052.07	62358.38	57232.75
Lt 5	80421.674	75031.67	71795.04	68816.35	62861.86	59968.79	55062.22

**Tabel 5.10** Prosentase penurunan gaya horisontal lantai maksimum model struktur terhadap Tipe 1 (%)

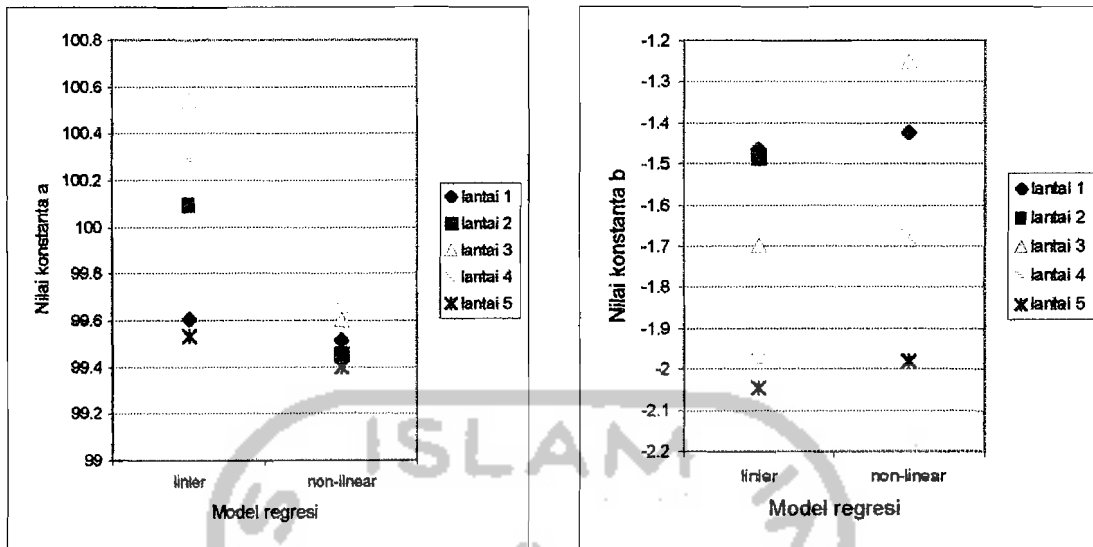
	Tipe 1 Interval 0%	Tipe 2 Interval 2.5%	Tipe 3 Interval 5%	Tipe 4 Interval 7.5%	Tipe 5 Interval 10%	Tipe 6 Interval 12.5%	Tipe 7 Interval 15%
Lt 1	100	94.89826	92.43443	89.91675	83.80021	81.85313	77.37212
Lt 2	100	95.36062	92.98674	90.60587	84.5384	82.27885	76.84186
Lt 3	100	95.40486	92.66071	89.82557	82.68175	79.98516	73.91484
Lt 4	100	94.52932	90.82846	87.30574	79.43725	76.14788	69.88881
Lt 5	100	93.29782	89.27325	85.56941	78.16532	74.56795	68.46689



**Gambar 5.26** Grafik gaya horisontal lantai

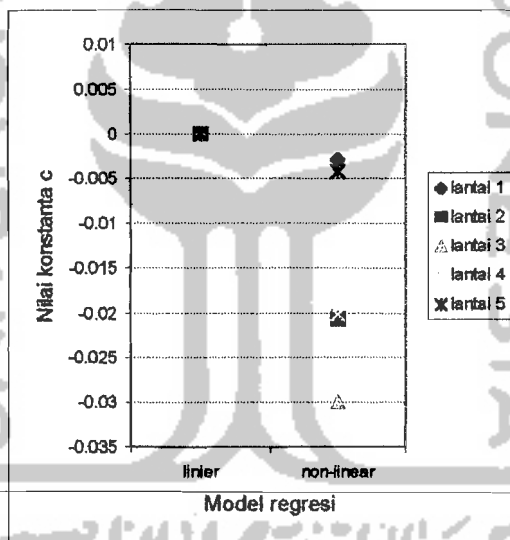
**Tabel 5.11** Konstanta regresi linier dan non linier gaya horisontal lantai maksimum

	Linier		Non linier		
	a	b	a	b	c
Lantai 1	99.60443	-1.46583	99.5145	-1.4227	-0.0029
Lantai 2	100.0967	-1.48695	99.4545	-1.1787	-0.0206
Lantai 3	100.5398	-1.70105	99.6019	-1.2509	-0.03
Lantai 4	100.2862	-1.97839	99.6566	-1.6762	-0.0201
Lantai 5	99.53084	-2.04524	99.3964	-1.9807	-0.0043



a) Grafik nilai konstanta a

b) Grafik nilai koefisien regresi b

c) Grafik koefisien *linearity sensitivitas* c

**Gambar 5.27** Grafik nilai konstanta regresi linier dan non linier gaya horisontal lantai maksimum struktur

Gambar 5.26 grafik gaya horisontal lantai menunjukkan bahwa gaya horisontal lantai akan semakin kecil dengan semakin kecilnya massa lantai bersangkutan. Gaya horisontal lantai 5 nilainya lebih kecil dari gaya horisontal lantai 4. Gaya horisontal lantai 3, 4 dan 5 berkurang cukup besar dengan distribusi massa

semakin keatas semakin kecil. Meskipun massa lantai 1 dan lantai 2 bertambah, tetapi gaya horisontal lantai pada lantai 1 dan lantai 2 juga mengalami penurunan walaupun tidak sebesar pada lantai-lantai di atasnya. Besarnya gaya horisontal lantai sangat mempengaruhi besarnya gaya geser dasar suatu struktur karena semakin besar gaya geser dasar yang ditahan akan semakin besar pula gaya horisontal lantai yang terjadi.

Penurunan gaya horisontal lantai maksimum paralel dengan penurunan simpangan lantai maksimum. Berdasarkan Gambar 5.27 dan Tabel 5.11 terlihat bahwa *konstanta a* untuk semua lantai nilainya akan cenderung tetap baik untuk linier maupun non linier. Sedangkan koefisien regresi (koefisien penurunan *b*) untuk kondisi linier nilainya akan cenderung lebih besar dari perumusan non linier. Dari grafik nilai *linearity sensitivitas c* menunjukkan bahwa lantai yang letaknya semakin mendekati 0.5 tinggi nilai *c*-nya akan semakin membesar (semakin non linier) dengan arah negatif (keawah) meskipun nilai koefisiennya relatif kecil, sehingga penurunan gaya horisontal lantai maksimum lantai terhadap variasi interval distribusi massa lantai yang semakin keatas semakin kecil masih dapat dikatakan linier.

#### 5.8.5 Gaya Geser Dasar

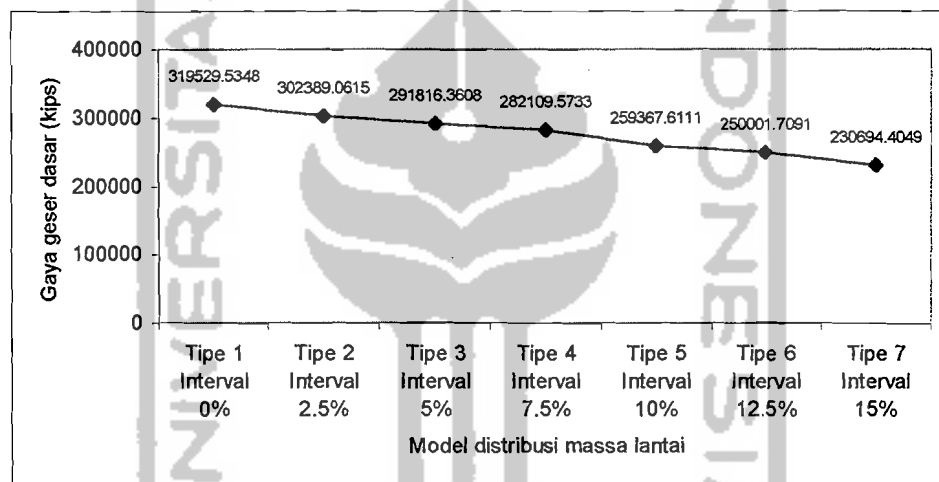
Besarnya gaya geser dasar merupakan penjumlahan dari gaya horisontal lantai akan tetapi arahnya berlawanan dengan gaya horisontal lantai. Gaya geser dasar maksimum dari perhitungan numerik disajikan pada Tabel 5.12 dan diplotkan pada Gambar 5.28 dan Gambar 5.29. Prosentase penurunan gaya geser maksimum model-model struktur terhadap Tipe 1 kemudian dianalisis kelinieritasannya dengan



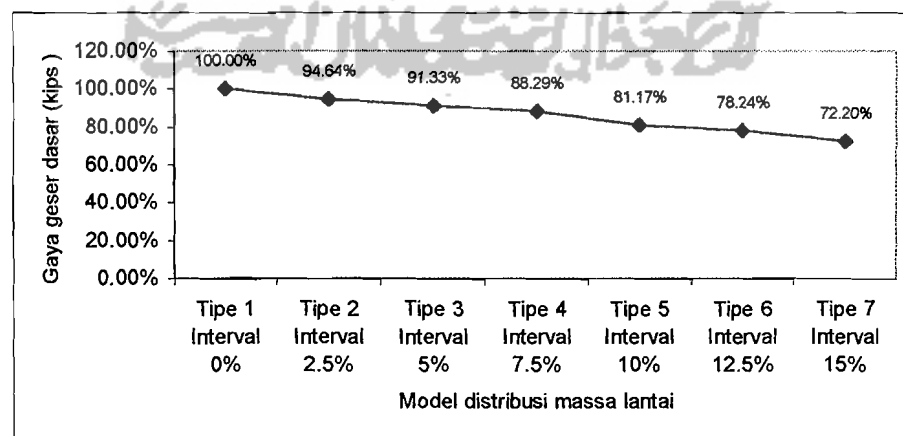
regresion formula baik linier dan non linier yang disajikan pada Lampiran 51 (Tabel L.44 dan Gambar L.3) dan hasilnya disajikan pada Tabel 5.13 dan Gambar 5.30.

**Tabel 5.12** Gaya geser dasar maksimum

Model Pembebanan Struktur	Gaya geser Dasar (kips)	Prosentase perbandingan
Tipe 1 Interval 0%	319529.53	100.00%
Tipe 2 Interval 2.5%	302389.06	94.64%
Tipe 3 Interval 5%	291816.36	91.33%
Tipe 4 Interval 7.5%	282109.57	88.29%
Tipe 5 Interval 10%	259367.61	81.17%
Tipe 6 Interval 12.5%	250001.71	78.24%
Tipe 7 Interval 15%	230694.4	72.20%



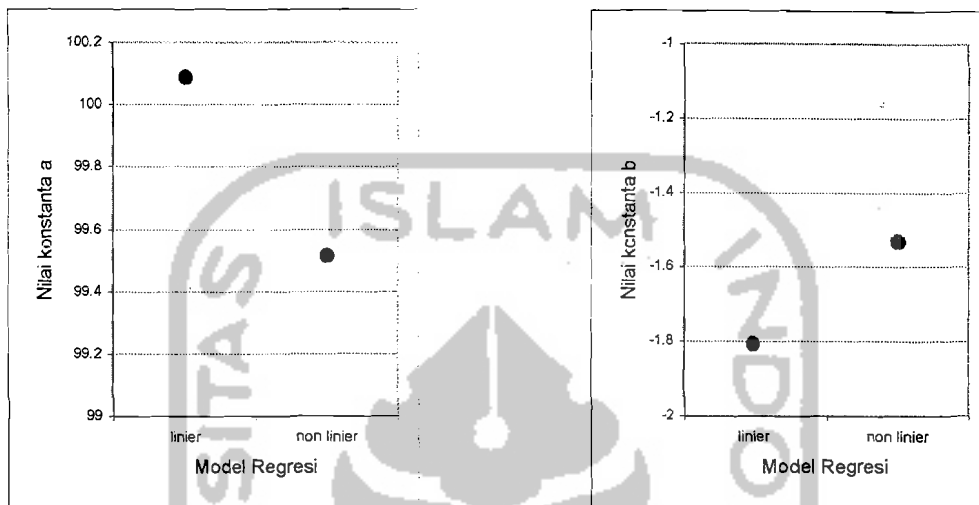
**Gambar 5.28** Grafik gaya geser dasar maksimum



**Gambar 5.29** Grafik prosentase perbandingan besar gaya geser dasar model-model distribusi massa lantai terhadap tipe 1

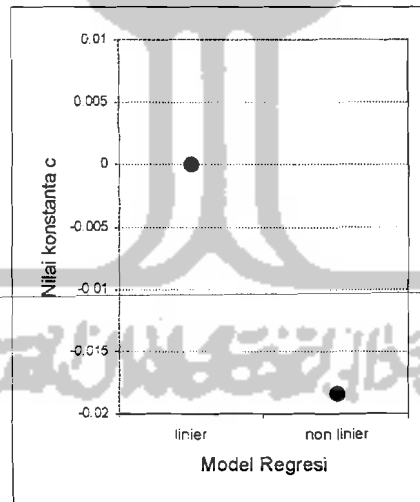
Tabel 5.13 Konstanta regesi gaya geser dasar maksimum

	a	b	c
Linier	100.0893	-1.80501	0
Non linier	99.5143	-1.529	-0.0184



a) Grfik nilai konstanta a

b) Grafik nilai koefisien regresi b

c) Grafik nilai *linearity sensitivitas c*

**Gambar 5.30** Grafik nilai konstanta regresi linier dan non linier gaya geser dasar maksimum

Dari Gambar 5.29 terlihat bahwa pengurangan gaya geser dasar terlihat tajam pada pembebanan Tipe 5. Gaya geser dasar akan semakin kecil seiring dengan

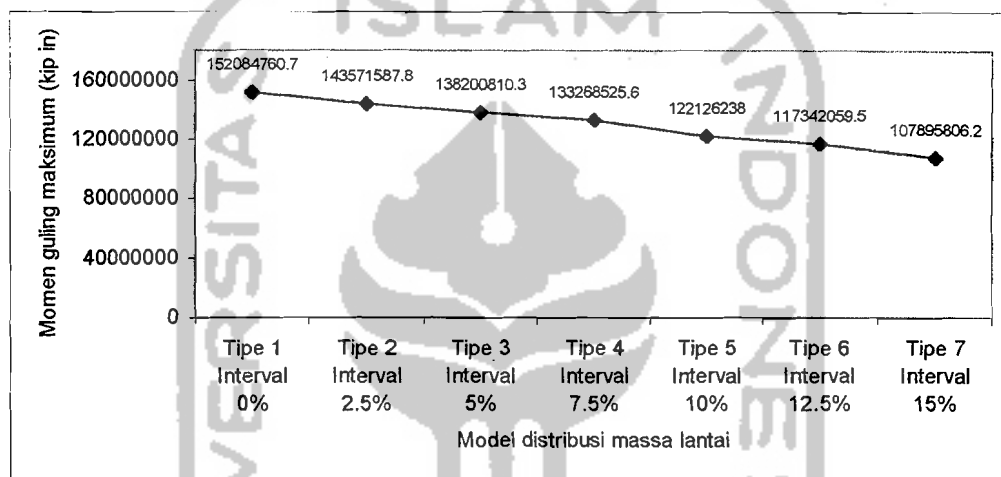
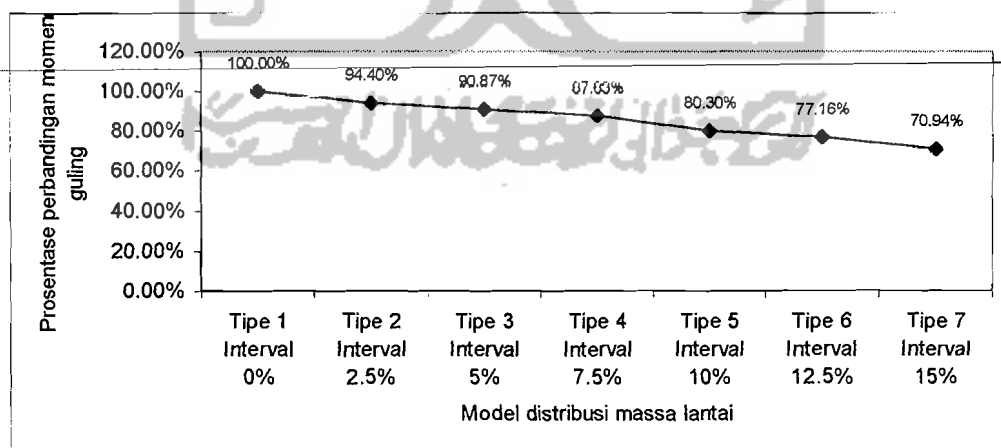
pembebanan lantai keatas yang semakin kecil. Dari Gambar 5.30 dan Tabel 5.13 dapat diketahui bahwa koefisien *linearity sensitivitas c* nilainya mendekati nol, sehingga pola penurunan gaya geser dasar tersebut adalah cenderung linier. Dari hasil tersebut apabila dirumuskan dengan *linear regression formula* didapatkan persamaan dalam bentuk hubungan  $y = 100.0893 - 1.80501x$  dengan koefisien korelasi  $r = -0.994858$  yang menunjukkan bahwa dengan bertambahnya nilai  $x$ , maka nilai  $y$  akan menurun. Dalam hal ini  $x =$  variasi interval distribusi massa lantai dan  $y =$  besarnya prosentase pengurangan gaya geser dasar maksimum model-model pembebanan terhadap Tipe 1. Besarnya gaya geser dasar ini dipengaruhi oleh besarnya simpangan, dimana semakin kecil simpangan maka semakin kecil gaya horisontal lantainya, sehingga gaya geser dasar yang harus ditahan juga akan semakin kecil. Perilaku ini sesuai dengan teori dimana semakin kecil massa lantai atas semakin kecil pula gaya geser dasarnya karena simpangannya juga semakin kecil.

#### 5.8.6 Momen Guling

Momen guling dipengaruhi oleh gaya lantai dan elevasi lantai, dimana besarnya momen guling merupakan penjumlahan dari hasil kali antara gaya horisontal setiap lantai dengan elevasi lantainya. Momen guling maksimum yang didapat dari perhitungan numerik disajikan pada Tabel 5.14 dan diplotkan pada Gambar 5.31 dan Gambar 5.32. Prosentase penurunan momen guling maksimum model-model struktur terhadap Tipe 1 kemudian dianalisis kelinieritasannya dengan *regresion formula* baik linier dan non linier yang disajikan pada Lampiran 52 (Tabel L.45 dan Gambar L.4) dan hasilnya disajikan pada Tabel 5.15 dan Gambar 5.33.

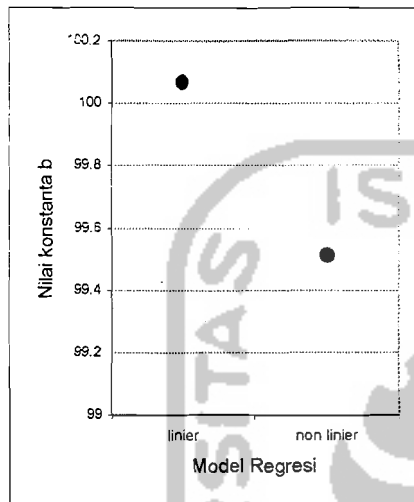
**Tabel 5.14** Momen guling maksimum

Model Pembebanan Struktur	Momen Guling (kips in)	Prosentase perbandingan
Tipe 1 Interval 0%	1.52E+08	100.00%
Tipe 2 Interval 2.5%	1.44E+08	94.40%
Tipe 3 Interval 5%	1.38E+08	90.87%
Tipe 4 Interval 7.5%	1.33E+08	87.63%
Tipe 5 Interval 10%	1.22E+08	80.30%
Tipe 6 Interval 12.5%	1.17E+08	77.16%
Tipe 7 Interval 15%	1.08E+08	70.94%

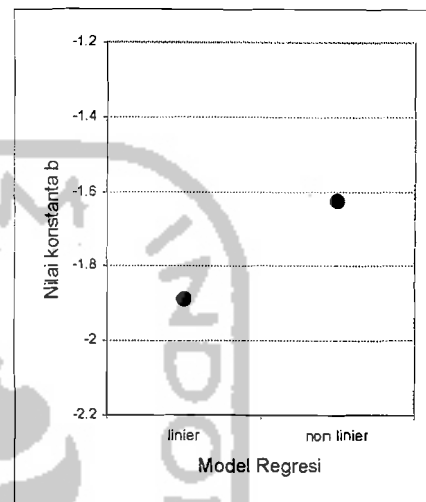
**Gambar 5.31** Grafik momen guling maksimum struktur**Gambar 5.32** Grafik prosentase perbandingan besar momen guling maksimum model-model distribusi massa terhadap tipe 1

Tabel 5.15 Konstanta regresi momen guling maksimum

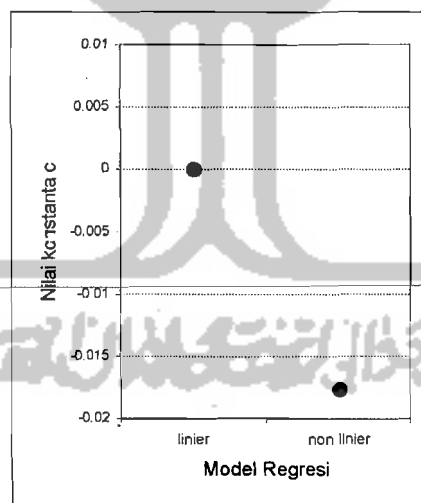
	a	b	c
Linier	100.0678	-1.88899	0
Non linier	99.5139	-1.6231	-0.0177



a) Grafik nilai konstanta a



b) Grafik nilai koefisien regresi b

c) Grafik nilai *linearity sensitivitas c*

Gambar 5.33 Grafik nilai konstanta regresi linier dan non linier momen guling maksimum

Gambar 5.31 menunjukkan bahwa momen guling maksimum akan semakin kecil dengan pembebanan massa lantai yang semakin keatas semakin kecil. Hal ini

disebabkan karena massa lantai yang semakin keatas semakin kecil akan mengakibatkan gaya horisontal lantai yang semakin kecil pula. Dengan gaya horisontal lantai yang semakin kecil, maka momen lantainya semakin kecil sehingga momen gulingnya juga semakin kecil. Pada penelitian ini terlihat pada Gambar 5.33 koefisien *linearity sensitivitas c* nilainya cenderung mendekati nol sehingga pola penurunan momen guling maksimum terhadap besarnya perubahan distribusi interval massa lantai cenderung linier. Apabila grafik pada Gambar 5.32 dirumuskan dalam *regression formula*, maka dapat diperoleh hubungan  $y = 100,0678 - 1,8889 x$  dengan koefisien korelasi  $r = -0,996441$ . Dari hubungan tersebut dapat dikatakan bahwa pola penurunan momen guling tersebut adalah linier negatif, dimana penambahan variabel  $x$  akan menghasilkan nilai  $y$  yang menurun. Dalam hal ini  $x =$  variasi interval distribusi massa lantai dan  $y =$  besarnya prosentase pengurangan momen guling maksimum model-model pembebanan terhadap Tipe 1. Pada penelitian sebelumnya (Gunadi dan Gusmadi, 1999) justru sebaliknya dimana semakin kecil gaya geser lantai, momen lantainya justru semakin besar. Hal ini dimungkinkan oleh pengaruh pemindahan massa lantai yang tidak memperhatikan prinsip bangunan tahan gempa.