

## KOMPARASI DEFLEKSI BANGUNAN TERHADAP NILAI PEAK GROUND ACCELERATION YANG TERMODIFIKASI DENGAN RESPON SPEKTRUM PADA JENIS LOW RISE BUILDING

Johan Budiarto Kromodiryo

Universitas Teknologi Yogyakarta  
email: johan.budiarto@staff.uty.ac.id

### Abstrak

Masyarakat Indonesia hidup berdampingan dengan gempa. Pertemuan lempengan plat tektonik mengakibatkan resiko terjadinya gempa semakin besar. Gempa yang tidak terduga mengakibatkan perlunya pembaharuan code. Dalam kurun waktu 20 tahun, peta gempa Indonesia sudah mengalami 3 kali revisi. Dari ketiga revisi tersebut, grafik respon spektrum juga mengalami perubahan. Penelitian ini menggunakan *accelerogram Bucharest* dengan lokasi bangunan terletak di Provinsi Yogyakarta. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh respon spektrum dari peta gempa terhadap *peak ground acceleration* (PGA). Berdasarkan respon spektrum tahun 2002, 2010 dan 2017 masing-masing menghasilkan PGA 0,25g; 0,41g dan 0,38g. Ujicoba analisa bangunan 3 lantai dengan diberi pembebanan *accelerogram Bucharest* yang termodifikasi dengan respon spektrum tahun 2002, 2010 dan 2017 masing-masing menghasilkan defleksi maksimum 3,2 cm; 4,8 cm dan 5,9 cm. Hasil penelitian yang diperoleh yaitu semakin besar nilai C pada respon spektrum, nilai PGA belum tentu semakin besar. Ketika nilai C pada respon spektrum semakin besar, simpangan bangunan akan semakin besar. Peningkatan nilai simpangan pada bangunan, tidak secara langsung diakibatkan nilai PGA yang tinggi.

**Kata kunci** : Gempa, defleksi, respon spektrum, PGA, Simpangan

### 1. PENDAHULUAN

Indonesia berada ditumbukan dua lempengan benua yaitu Indian-Australian Plate dan Eurasian Plate. Menurut Sunarto (2006), Tumbukan kedua lempengan tersebut apabila energi gesekan terakumulasi dan terlepas secara mendadak, dapat menimbulkan getaran yang sering kita sebut dengan Gempa.

Dalam kurun 20 tahun, peta gempa sudah mengalami revisi ketiga kali. Dari peta gempa tahun 2002, tahun 2010, dan tahun 2017. Gempa dan tsunami Aceh tahun 2004 dengan skala magnitude 9 skala richter, gempa Yogyakarta tahun 2006 dengan skala magnitude 5,9 skala richter telah melebihi dari gempa rencana yang sudah ditetapkan tahun 2002. Ditemukannya patahan/sesar lembang di Bandung belum terdeteksi pada peta gempa tahun 2002. Perubahan-perubahan ini perlu pembaharuan dalam peta gempa.

Pembaharuan peta gempa berpengaruh terhadap besarnya beban gempa yang akan ditanggung oleh suatu bangunan. Besarnya beban gempa berdasarkan dari peta gempa tahun 2002 tentu akan berbeda dengan besarnya beban gempa yang diakibatkan oleh peta gempa tahun 2010. Begitu juga dengan peta gempa tahun 2017. SNI 1726 tahun 2002 pasal 7.3.3 mengisyaratkan

bahwa dalam penggunaan rekaman gempa perlu diskala berdasarkan dari nilai peak ground acceleration. Sedangkan SNI 1726 tahun 2012 pasal 6.10.1.1 mengisyaratkan bahwa rekaman gempa perlu diskala berdasarkan dari pendekatan nilai respon spektrum.

Perbedaan cara skala rekaman gempa perlu menjadi perhatian khusus terutama pada bangunan yang dibangun sebelum keluarnya SNI 1726 tahun 2012.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh nilai C pada respon spektrum terhadap nilai *peak ground acceleration* (PGA), pengaruh nilai C pada respon spektrum terhadap nilai simpangan dan pengaruh nilai simpangan pada bangunan terhadap peak ground acceleration.

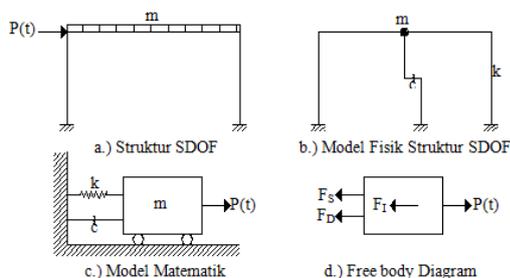
### 2. TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Persamaan Diferensial Dasar pada Getaran Struktur

Persamaan diferensial dasar adalah rumusan atau persamaan dasar yang akan dikembangkan berdasarkan tinjauan yang ada. Menurut Widodo (2001), untuk memudahkan pemahaman mengenai persamaan diferensial dasar, diambil pembahasan yang sederhana yaitu single degree of freedom (SDOF).

Menurut Widodo (2001), Beberapa contoh

untuk lebih mudah memahami mengenai persamaan diferensial getaran yaitu struktur dengan derajat kebebasan tunggal (SDOF) atau sering disebut dengan bangunan bertingkat 1 seperti menara (water tower). Sebelum menurunkan persamaan diferensial, bangunan diubah ke kepomodelan struktur seperti Gambar 1.



Gambar 1. Permodelan Struktur (Widodo,2001)

Gambar 1.a menjelaskan tentang  $P(t)$  sebagai beban dinamik yaitu beban yang intensitasnya merupakan fungsi dari waktu. Struktur seperti Gambar 1.a kemudian diubah menjadi model fisik dengan menambahkan keterangan  $m$ ,  $c$ ,  $k$  (Gambar 1.b). Gambar 1.c adalah permodelan matematik untuk struktur SDOF yang apabila beban dinamik  $P(t)$  bekerja kearah kanan, maka terdapat perlawanan pegas, damper, dan gaya inersia. Gambar 1.d adalah Gambar keseimbangan dinamik yang bekerja pada massa  $m$ . Gambar tersebut umumnya disebut free body diagram. Berdasarkan prinsip kesetimbangna dinamik pada free body diagram tersebut, maka dapat diperoleh hubungan menjadi:

$$F_I + F_D + F_S = P(t) \quad (1)$$

Dimana,

$$F_I = m \cdot \ddot{y} = \text{gaya inersia} \quad (2)$$

$$F_D = c \cdot \dot{y} = \text{gaya redaman} \quad (3)$$

$$F_S = k \cdot y = \text{gaya pegas} \quad (4)$$

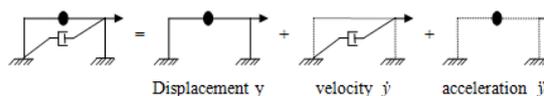
$\ddot{y}$  = percepatan

$\dot{y}$  = kecepatan

$y$  = simpangan

$P(t)$  = beban dinamik

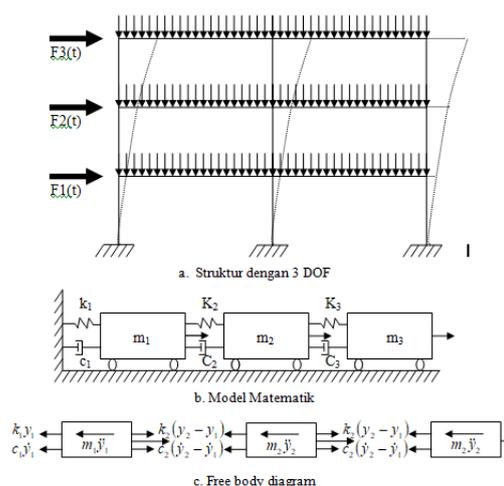
Secara visual, Chopra (1995) menyajikan keseimbangan antara gaya dinamis, gaya pegas, gaya redaman dan gaya inersia seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Keseimbangan gaya dinamik (Chopra,1995)

## 2.2 Persamaan diferensial struktur multi degree of freedom (MDOF)

Menurut Widodo, Untuk Menyatakan persamaan diferensial gerakan pada struktur dengan derajat kebebasan banyak maka digunakan anggapan dan pendekatan seperti pada struktur dengan derajat kebebasan tunggal/SDOF. Anggapan seperti prinsip shear building masih berlaku pada struktur dengan derajat kebebasan banyak (MDOF). Untuk memperoleh persamaan diferensial tersebut, maka menggunakan persip keseimbangan dinamik (dynamic equilibrium) pada suatu massa yang ditinjau. Untuk memperoleh persamaan tersebut maka diambil model struktur MDOF seperti Gambar 3.



Gambar 3. Struktur 3-DOF, Model matematik dan Free Body Diagram (Widodo,2001)

Menurut Widodo (2001), Struktur bangunan gedung bertingkat 3 seperti Gambar 3 tersebut akan mempunyai 3 derajat kebebasan.

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{y}_1 \\ \ddot{y}_2 \\ \ddot{y}_3 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1+c_2 & -c_2 & 0 \\ -c_2 & c_2+c_3 & -c_3 \\ 0 & -c_3 & c_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \\ \dot{y}_3 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1+k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & k_2+k_3 & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1(t) \\ F_2(t) \\ F_3(t) \end{Bmatrix} \quad (5)$$

Persamaan diferensial gerakan tersebut umumnya disusun berdasarkan atas goyangan struktur menurut First mode atau Mode pertama seperti yang tampak pada garis putus-putus pada

Gambar 3.a. Berdasarkan keseimbangan dinamik free body diagram, maka akan diperoleh persamaan 5

**2.3 Eigenproblem (Nilai karakteristik)**

Persamaan 6 disebut dengan persamaan *eigenproblem* atau karakteristik problem. Persamaan tersebut dapat diselesaikan dengan memakai dalil *Cramer* (1704-1752). Dalil tersebut menyatakan bahwa penyelesaian persamaan simultan yang homogen akan ada nilainya apabila determinan dari matrik yang merupakan koefisien dari vektor  $\{\phi\}_i$ .

$$([K] - \omega^2[M])\{\phi\}_i = \{0\} \tag{6}$$

**2.4 Redaman**

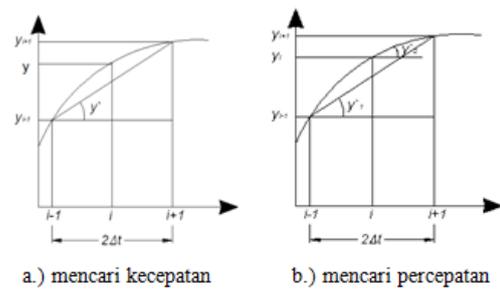
Menurut Widodo (2001), redaman adalah peristiwa pelepasan energi (energy dissipation) oleh struktur akibat adanya berbagai macam sebab. yaitu pelepasan energi oleh adanya gerakan antar molekul didalam material, pelepasan energi oleh gesekan alat penyambung maupun sistem dukungan, pelepasan energi akibat gesekan dengan udara dan pada respon inelastik pelepasan energi juga terjadi akibat adanya rotasi sendi plastis. Karena redaman berfungsi melepaskan energi, maka hal tersebut akan mengurangi respon struktur. Salah satu jenis redaman yang ada berupa redaman lemah. Redaman ini terjadi apabila nilai redaman lebih kecil dari redaman kritik *c<sub>cr</sub>*. Redaman lemah juga membahas tentang damping ratio yang dapat dirumuskan sebagai persamaan 7.

$$\xi = \frac{c}{c_{cr}} = \frac{c}{2m\omega} = \text{damping ratio (\%)} \tag{8}$$

Damping ratio yang sering digunakan sebesar 5%.

**2.5 Central Difference methods**

Menurut Widodo (2001), Metode ini berdasarkan pada pendekatan nilai derivative atas fungsi waktu, baik untuk parameter kecepatan maupun percepatan sebagaimana tampak pada Gambar 4.



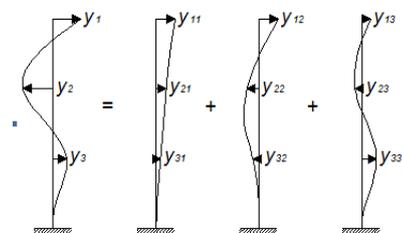
**Gambar 4.** Prinsip Metode *Central Difference* (Widodo, 2001)

Dari gambar diatas, maka akan diperoleh persamaan 9.

$$\ddot{y}_i = \frac{y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}}{(\Delta t)^2} \tag{9}$$

**2.6 Modal Analisis (mode superposition methods)**

Menurut Widodo (2001), Modal analisis adalah salah satu metode yang dapat dipakai untuk menyelesaikan persamaan diferensial gerakan pada struktur bangunan berderajat kebebasan (MDOF). Metode ini dapat dipakai dengan syarat struktur masih elastis dan struktur mempunyai modes shapes. Tahap perhitungan pertama kali adalah menghitung koordinat mode shapes  $\Phi_{ij}$ . Dengan menggunakan prinsip hubungan orthogonal, maka persamaan deferensial coupling (dependent) dapat ditransfer menjadi persamaan diffrensial uncoupling (independent). Menurut Widodo (2001), Pada kondisi standar shear building, struktur yang mempunyai n-derajat kebebasan akan mempunyai n-modes atau n-pola/ragam goyangan. Pada prinsip ini, masing-masing mode akan memberikan kontribusi pada simpangan horizontal tiap-tiap massa. seperti **Gambar 5**.



**Gambar 5.** Prinsip Metode Superposisi Difference (Widodo, 2001)

Pada prinsip ini, simpangan massa ke-i atau *Y<sub>i</sub>*, dapat diperoleh dengan menjumlahkan pengaruh atau kontribusi tiap-tiap modes.

Kontribusi mode ke- $j$  terhadap simpangan horizontal massa ke- $i$  tersebut dinyatakan dalam produk antara  $\Phi_{ij}$ . Dengan suatu modal amplitudo  $Z_j$  atau seluruh kontribusi tersebut kemudian dinyatakan dalam persamaan 10,11,12,13

$$Y_1 = \phi_{11}Z_1 + \phi_{12}Z_2 + \phi_{13}Z_3 + \dots + \phi_{1n}Z_n \quad (10)$$

$$Y_2 = \phi_{21}Z_1 + \phi_{22}Z_2 + \phi_{23}Z_3 + \dots + \phi_{2n}Z_n \quad (11)$$

$$Y_3 = \phi_{31}Z_1 + \phi_{32}Z_2 + \phi_{33}Z_3 + \dots + \phi_{3n}Z_n \quad (12)$$

$$Y_n = \phi_{n1}Z_1 + \phi_{n2}Z_2 + \phi_{n3}Z_3 + \dots + \phi_{nn}Z_n \quad (13)$$

Persamaan diatas kemudian diubah menjadi suatu persamaan matrik yang akan menghasilkan persamaan 14.

$$[M][\phi]\{\ddot{Z}\} + [C][\phi]\{\dot{Z}\} + [K][\phi]\{Z\} = -[M]\ddot{y}_i \quad (14)$$

Persamaan 14 adalah persamaan differensial yang bebas/independent antar satu dengan yang lain. Persamaan tersebut diperoleh setelah diterapkannya hubungan orthogonal, baik untuk orthogonal untuk matrik massa, matrik redaman dan matrik kekakuan. Sekali lagi sama dengan nol, kecuali untuk  $i=j$ . Dengan demikian untuk  $n$ -derajat kebebasan dengan  $n$ -persamaan diferensial yang dahulunya bersifat coupling sekarang menjadi independent/uncoupling. Dengan sifat-sifat seperti itu maka penyelesaian persamaan diferensial dapat diselesaikan untuk setiap pengaruh mode.

$$\left[ \frac{1}{\Delta t^2} + \frac{2\xi\omega}{2\Delta t} \right] g_{j+1} = -\ddot{y}_g - \left[ \frac{1}{\Delta t^2} - \frac{2\xi\omega}{2\Delta t} \right] g_{j-1} - \left[ \omega^2 - \frac{2}{\Delta t^2} \right] g_j \quad (15)$$

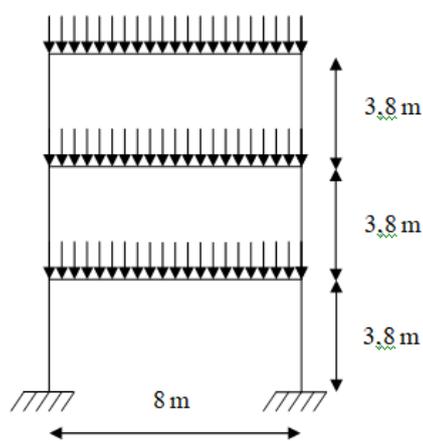
Persamaan 15 adalah persamaan diferensial yang independent karena persamaan tersebut hanya berhubungan dengan tiap mode-mode. Nilai partisipasi setiap mode akan dihitung dengan mudah setelah koordinat setiap mode

$\Phi_{ij}$  telah diperoleh. Nilai  $g_i, \dot{g}_i, \ddot{g}_i$  dapat dihitung dengan integrasi secara numerik. Apabila nilai tersebut telah diperoleh maka nilai  $Z_i$  dapat dihitung. Dengan demikian simpangan horizontal setiap tingkat dapat dihitung.

### 2.7 Properties bangunan.

Pada penelitian ini, analisa yang akan digunakan adalah bangunan dua dimensi dengan ketentuan sebagai berikut:

- Massa Lantai 1 dan lantai 2 adalah 20,4 Kg.dt2/cm
- Massa Lantai 1 dan lantai 2 adalah 16.3 Kg.dt2/cm
- Rekaman gempa menggunakan Bucharest
- Kekakuan tiap kolom lantai 1, 2, dan 3 adalah 19928,2 Kg/cm
- Bentang balok 8 m
- Tinggi tiap lantai 3,8 m.
- Bentuk bangunan dapat dilihat pada gambar 6 dibawah ini:



Gambar 6. Struktur Bangunan

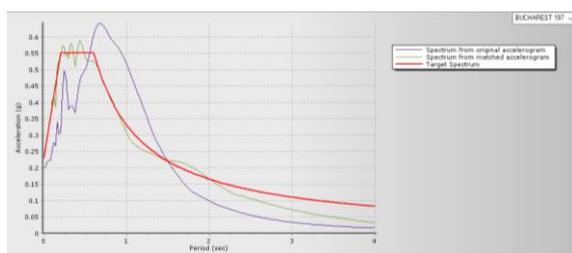
### 3. METODOLOGI

Alur penelitian dalam pelaksanaan proses kali ini dapat dilihat pada diagram Gambar 7.



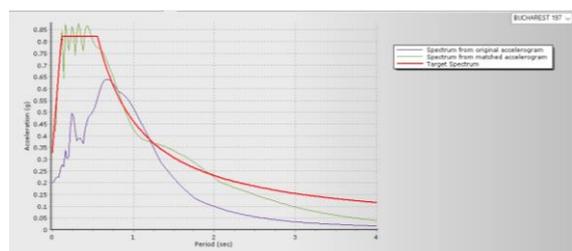
**Gambar 7. Diagram Alir**  
**4. HASIL DAN PEMBAHASAN**

**4.1. Peak Ground Acceleration modifikasi**  
 Proses PGA modifikasi dibantu menggunakan program seismomatch 2016 released. Pencocokan (*matching*) rekaman gempa diperlukan data berupa grafik respon spektrum dari peta gempa. Program seismomatch mengolah data dari rekaman gempa (times history) Bucharest akan menghasilkan grafik respon spektrum. Respon spektrum dari peta gempa dan respon spektrum dari time history, Seismomatch akan mengkalibrasi grafik tersebut menjadi sama. Untuk respon spektrum tahun 2002, dapat dilihat pada Gambar 8 dibawah ini:

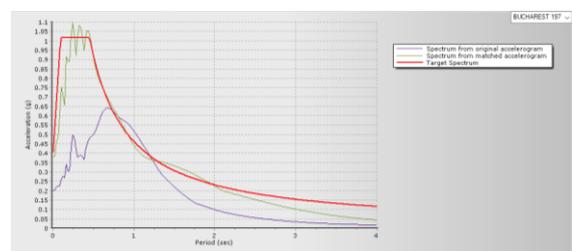


**Gambar 8. Matching respon spektrum tahun 2002**

Untuk respon spektrum tahun 2010 dan 2017, dapat dilihat pada Gambar (9) dan (10) dibawah ini:



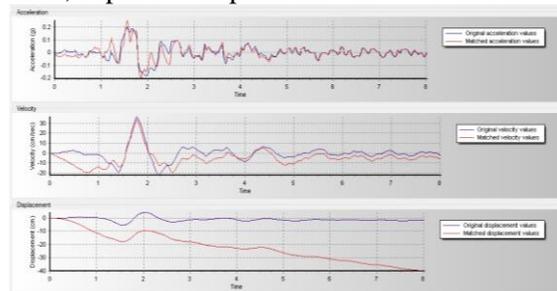
**Gambar 9. Matching respon spektrum tahun 2010**



**Gambar 10. Matching respon spektrum tahun 2017**

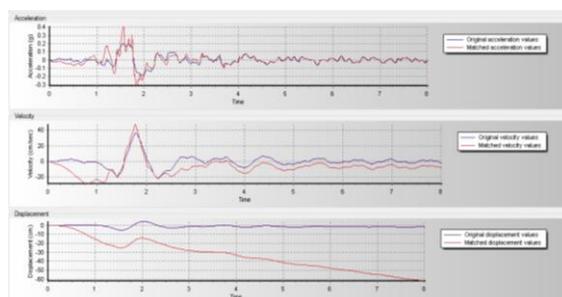
Setelah mencocokkan (*matching*) kedua grafik respon spektrum, seismomatch juga akan memodifikasi times history. Untuk times history modification berdasarkan respon spektrum tahun

2002, dapat dilihat pada Gambar 11 dibawah ini:



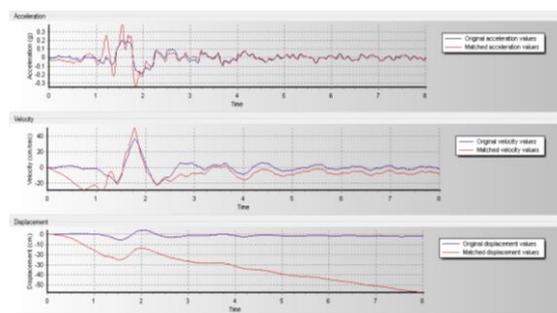
**Gambar 11. Accelerogram 2002**

Untuk times history modification berdasarkan respon spektrum tahun 2010, dapat dilihat pada Gambar 12 dibawah ini:



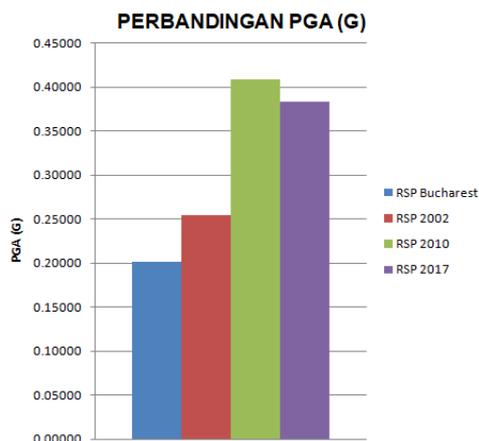
**Gambar 12. Accelerogram 2010**

Untuk times history modification berdasarkan respon spektrum tahun 2017, dapat dilihat pada Gambar 13 dibawah ini:



**Gambar 13. Accelerogram 2017**

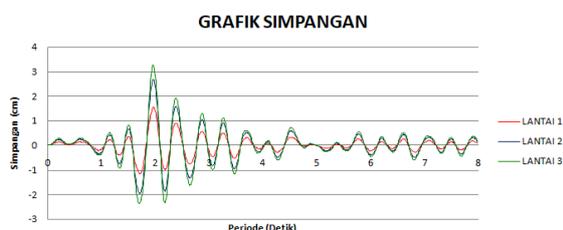
Dari ketiga data times history (RSP 2002, RSP 2010, RSP 2017), maka akan didapatkan nilai *peak ground acceleration* (PGA). Perbandingan nilai dari ketiga data tersebut disajikan pada Gambar 14 dengan kesimpulan bahwa semakin besar nilai C pada respon spektrum tidak secara keseluruhan bersifat linear terhadap kenaikan nilai PGA.



Gambar 14. Perbandingan PGA

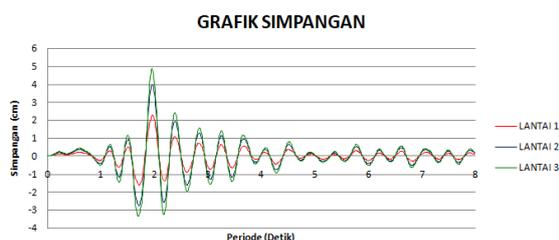
#### 4.2. Respon Dinamik Struktur Elastik

Hasil dari defleksi bangunan akibat dari accelerogram yang termodifikasi dengan respon spektrum tahun 2002 adalah sebagai berikut:



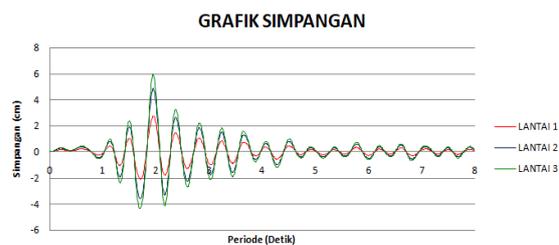
Gambar 15. Grafik simpangan respon spektrum tahun 2002

Berdasarkan Gambar 15, lantai 1 mengalami defleksi sebesar 1,54 cm, sedangkan lantai 2 sebesar 2,68 cm, dan lantai 3 sebesar 3,26 cm. Hasil dari defleksi bangunan akibat dari accelerogram yang termodifikasi dengan respon spektrum tahun 2010 adalah sebagai berikut:



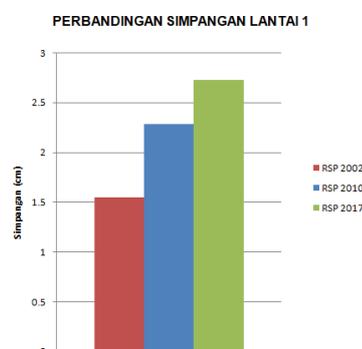
Gambar 16. Grafik simpangan respon spektrum tahun 2010

Berdasarkan Gambar 16, lantai 1 mengalami defleksi sebesar 2,28 cm, sedangkan lantai 2 sebesar 3,97 cm, dan lantai 3 sebesar 4,86 cm. Hasil dari defleksi bangunan akibat dari accelerogram yang termodifikasi dengan respon spektrum tahun 2017 adalah sebagai berikut:

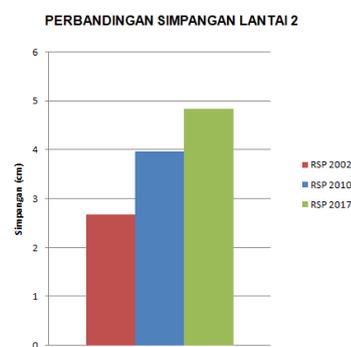


Gambar 17. Grafik simpangan respon spektrum tahun 2017

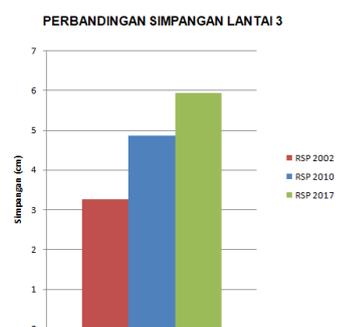
Berdasarkan Gambar 17, lantai 1 mengalami defleksi sebesar 2,73 cm, sedangkan lantai 2 sebesar 4,85 cm, dan lantai 3 sebesar 5,95 cm. Berdasarkan dari pengelompokan tiap lantai, maka akan didapatkan Gambar 18,19,dan 20.



Gambar 18. Grafik Perbandingan simpangan lantai 1



Gambar 19. Grafik Perbandingan simpangan lantai 2



Gambar 20. Grafik Perbandingan simpangan lantai 3

Berdasarkan Gambar 16,17, dan 18 dapat diambil kesimpulan bahwa, semakin tinggi nilai C pada respon spektrum, maka akan menghasilkan simpangan yang lebih besar.

## **5. KESIMPULAN**

Kesimpulan yang diperoleh dari penelitian ini adalah semakin besar nilai C pada respon spektrum, nilai PGA belum tentu semakin besar. Ketika nilai C pada respon spektrum semakin besar, simpangan bangunan akan semakin besar. Peningkatan nilai simpangan pada bangunan, tidak secara langsung diakibatkan nilai PGA yang tinggi.

## **6. DAFTAR PUSTAKA**

Budianto, Johan, Respon tumbukan bangunan Elastik, Magister Teknik Sipil Universitas Islam Indonesia : Yogyakarta, 2011

Chopra, A. K, Dynamic of Structures Theory and Applications to Earthquake Engineering, Pearson, 2011

SNI 1726:2002, Standar Perencanaan Ketahanan Gempa untuk struktur bangunan gedung, Badan Standarisasi Indonesia, Badan Standarisasi Indonesia : Jakarta. 2012

SNI 1726:2012, Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung, Badan Standarisasi Indonesia : Jakarta. 2012

SNI 1726:2019, Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung, Badan Standarisasi Indonesia : Jakarta. 2019

Widodo, Respons Dinamik Struktur Elastik. Yogyakarta: Penerbit UII press, 2001