

# DYNAMIC TIME HISTORY ANALYSES OF REINFORCED CONCRETE BUILDING DUE TO PRIMARY AND AFTERSHOCK EARTHQUAKES

## ANALISIS DINAMIK RIWAYAT WAKTU GEDUNG BETON BERTULANG AKIBAT GEMPA UTAMA DAN GEMPA SUSULAN

Nessa Valiantine Diredja<sup>1)</sup>, Yosafat Aji Pranata<sup>2)</sup>, dan Ronald Simatupang<sup>3)</sup>

<sup>1,2,3</sup> Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Kristen Maranatha

Jalan Prof. drg. Suria Sumantri, MPH., No. 65, Bandung 40164, E-mail: yosafat.ap@gmail.com

### ABSTRACT

One cause of the failure of structure building in areas that has a high risk of earthquakes are the horizontal (lateral) loads on the structure. Concrete structure can be damaged by a major earthquake and compounded by aftershock to the structure that the strength has reduced due to an inelastic state after major earthquake. The purpose of this research are to perform structural analysis of earthquake resistant reinforced building with static equivalent method and dynamic time history analysis and studying the behavior of the building as a result of primary earthquake and aftershocks by using time history analysis method. The discussions covers comparison of base shear forces, roof displacement, story drift, and performance of serviceability limit performance and ultimate limit performance. The results of the analysis showed that if the intensity of scale factor applied in accordance with SNI 1726-2002, the base shear force, roof displacements and story drift by dynamic time history analysis will be smaller than the static analysis, this happens because in the calculation of acceleration scaling factor used is the time history's maximum value of earthquake zone 4 in Indonesia with the condition  $T = 1,5058$ , the curve of response spectrum input will be smaller than the static. With time history analysis also obtained conclusion that the building can withstand acceleration of Chi-chi earthquake 2,4 times the original scale, El Centro earthquake 6,4 times the original scale, Friuli earthquake 6,8 times the original scale and Sakaria earthquake 2,8 times the original scale. Time history analysis can be used to determine the base shear force of building, roof displacement and story drift if applied by particular earthquake, also can be determine the ability of actual building when there is a magnitude of primary earthquake and aftershocks with smaller or larger scale by modifying the scale factor.

**Keywords :** Reinforced concrete building, primary earthquake, aftershocks earthquake, dynamic time history analysis, equivalent static analysis.

### ABSTRAK

Salah satu penyebab adanya kegagalan struktur bangunan gedung di daerah yang berisiko mengalami gempa adalah beban horizontal (lateral) pada struktur. Struktur bangunan gedung dapat mengalami kerusakan akibat gempa utama dan diperparah dengan adanya gempa susulan pada struktur yang berkurang kekuatannya akibat mengalami kondisi inelastik setelah gempa utama. Tujuan penulisan ini adalah untuk mempelajari analisis statik ekuivalen dan analisis dinamik riwayat waktu serta mempelajari perilaku gedung akibat adanya gempa utama dan susulan dengan menggunakan metode analisis dinamik riwayat waktu dan pembahasannya meliputi perbandingan gaya geser dasar, *roof displacement*, *story drift*, kinerja batas layanan dan ultimit. Hasil penelitian ini memperlihatkan bahwa apabila faktor skala intensitas gempa berdasarkan SNI 1726-2002 diterapkan, maka gaya geser dasar, perpindahan atap dan simpangan antar tingkat hasil analisis dinamik riwayat waktu akan lebih kecil dibandingkan analisis statik, hal ini terjadi karena dalam perhitungan faktor skala percepatan puncak riwayat waktu yang digunakan adalah nilai maksimumnya, sehingga apabila diskalakan terhadap wilayah gempa 4 tanah keras di Indonesia dengan kondisi  $T = 1,5058$ , kurva respon spektrum gempa masukan akan lebih kecil dibanding statik. Metode C lebih konservatif dikarenakan dalam rentang  $T = 0 - 0,5$  detik, respon spektrum percepatan gempa masukan dihitung berdasarkan model statistik (rata-rata). Dengan metode riwayat waktu juga didapatkan kesimpulan bahwa gedung yang dianalisis mampu menahan percepatan gempa Chi-chi sebesar 2,4 kali skala asli, gempa El Centro 6,4 kali skala asli, gempa Friuli 6,8 kali skala asli dan gempa Sakaria 2,8 kali skala asli. Analisis riwayat waktu dapat dimanfaatkan untuk mengetahui gaya geser dasar gedung, peralihan atap dan simpangan antar tingkat bila diterapkan tinjauan gempa tertentu, serta mampu mengetahui kemampuan gedung yang sebenarnya bila dikenai gempa utama maupun gempa susulan yang besarnya beberapa kali lipat lebih kecil maupun lebih besar dengan memodifikasi faktor skalanya.

**Kata-kata kunci:** Gedung beton bertulang, gempa utama, gempa susulan, analisis dinamik riwayat waktu, analisis statik ekuivalen.

### PENDAHULUAN

Indonesia termasuk kedalam wilayah rawan gempa. Secara geografis, kepulauan Indonesia berada di antara 6 LU dan 11 LS serta di antara 95 BT dan 141 BT dan terletak pada perbenturan tiga lempeng kerak bumi yaitu lempeng Eurasia, lempeng Pasifik, dan lempeng India Australia. Ditinjau secara geologis, kepulauan Indonesia berada pada pertemuan 2 jalur gempa utama, yaitu gempa Sirkum Pasifik dan jalur gempa Alpide Trans-asiatic, karena itu Indonesia termasuk dalam jalur cincin api Pasifik (*Ring of Fire*). Cincin api Pasifik merupakan jalur rangkaian gunung aktif dunia yang menyebabkan Indonesia mengalami frekuensi gempa yang cukup sering.

Gempa disertai tsunami yang terjadi di Aceh pada 26 Desember 2004 dan gempa di Yogyakarta pada tahun 2009 terma-

suk kedalam gempa terbesar yang terjadi di Indonesia. Namun gempa yang terjadi saat ini bukan hanya gempa utama tetapi juga biasanya disertai dengan gempa susulan yang tidak dapat diprediksi besarnya, baik lebih kecil, sama ataupun lebih besar dari gempa utama yang terjadi. Untuk mengetahui perilaku elemen struktur akibat gempa dapat digunakan analisis dinamik riwayat waktu dan analisis statik ekuivalen. Dengan metode yang digunakan dapat diketahui perilaku gedung akibat gempa susulan yang terjadi.

Salah satu contoh gempa susulan yang terjadi di Indonesia baru-baru ini adalah gempa Aceh yang terjadi pada 11 April 2012 di Kabupaten Simeulue, yang diikuti dengan peringatan tsunami. Gempa utama terjadi pada kedalaman 10 km dengan besar 8,5 SR berdasarkan informasi dari BMKG dan disusul dengan gempa susulan sebanyak 25 kali dengan skala terbesar dari gempa su-

sulan tersebut adalah 8,3 SR. Dari skala gempa susulan yang terjadi diketahui bahwa pada kejadian ini, beberapa gempa susulan yang terjadi tersebut skalanya hampir menyerupai gempa utama sehingga kerusakan yang akan ditimbulkan lebih besar dibandingkan kerusakan hanya karena gempa utama.

### Tujuan dan Ruang Lingkup Penelitian

Tujuan dari penelitian ini yaitu untuk mempelajari analisis dinamik riwayat waktu dan analisis statik ekuivalen untuk perencanaan bangunan tahan gempa, mempelajari perilaku gedung akibat adanya gempa utama dan gempa susulan dengan menggunakan analisis dinamik riwayat dan analisis statik ekuivalen dan membandingkan hasil dari keduanya.

Adapun ruang lingkup penelitian adalah sebagai berikut:

1. Gedung yang ditinjau adalah gedung beton bertulang 10 lantai. Kategori gedung beraturan berdasarkan SNI 1726-2002 dan terletak di wilayah 4 tanah keras.
2. Peraturan gempa yang digunakan adalah SNI 1726-2002, peraturan pembebanan yang digunakan adalah PBI 1987 dan peraturan beton yang digunakan adalah SNI 2847-2002.
3. Parameter yang dibandingkan adalah gaya geser dasar yang diperoleh dari persamaan SNI 1726-2002 (analisis statik ekuivalen) dan analisis dinamik riwayat waktu dari 4 buah percepatan gempa [Seismosoft, 2011; Pranata dan Simanta, 2006].
4. Perilaku yang dipelajari adalah gaya geser dasar, *story drift*, dan *roof displacement*.

Perangkat lunak yang digunakan dalam penelitian ini adalah Seismosoft dengan sifat lisensi akademik dan ETABS dengan sifat lisensi atas nama Laboratorium Komputer Pusat Universitas Kristen Maranatha, Bandung.

### TINJAUAN LITERATUR

Indonesia merupakan daerah rawan gempa, untuk mengurangi risiko bencana maka diperlukan struktur bangunan tahan gempa. Pada umumnya bangunan di Indonesia dibangun dengan menggunakan konstruksi beton bertulang. Kekuatan struktur bangunan terhadap gempa harus didukung dengan perencanaan yang baik, sehingga dalam hal ini perlu dikaji kembali filosofi bangunan beton bertulang terhadap resiko gempa. Filosofi bangunan beton bertulang tahan gempa adalah sebagai berikut:

1. Bila terjadi gempa ringan, bangunan tidak boleh mengalami kerusakan baik pada komponen non-struktural (dinding retak, genteng dan langit-langit jatuh, kaca pecah) maupun pada komponen strukturalnya (kolom dan balok retak, pondasi amblas)
2. Bila terjadi gempa sedang, bangunan boleh mengalami kerusakan pada komponen non-strukturalnya akan tetapi komponen struktural tidak boleh rusak.
3. Bila terjadi gempa kuat, bangunan boleh mengalami kerusakan baik pada komponen non-struktural maupun komponen strukturalnya, akan tetapi jiwa penghuni bangunan tetap selamat, artinya:
  - a) Bangunan tidak boleh runtuh sebagian maupun seluruhnya dan apabila bangunan runtuh maka sebelum bangunan runtuh masih cukup waktu bagi penghuni untuk keluar/mengungsi ketempat aman.
  - b) Bangunan tersebut tidak boleh mengalami kerusakan dan harus dapat diperbaiki dengan cepat sehingga dapat berfungsi kembali, dengan kata lain bangunan tersebut tidak boleh dalam keadaan sangat rusak.

### Analisis Statik Ekuivalen

Analisis beban statik ekuivalen adalah salah satu cara analisis statik struktur, dimana pengaruh gempa pada struktur dianggap sebagai beban-beban statik horizontal untuk hanya boleh

dilakukan struktur-struktur gedung sederhana dan beraturan yang tidak menunjukkan perubahan yang mencolok dalam perbandingan antara berat dan kekakuan pada tingkat-tingkatnya, karena beban statik ekuivalen hanyalah pendekatan yang meniru pengaruh dinamik dari gempa yang sesungguhnya. Analisis beban gempa statik ekuivalen pada struktur gedung beraturan adalah suatu cara analisis statik 3 dimensi linier dengan meninjau beban-beban gempa statik ekuivalen, sehubungan dengan sifat struktur gedung beraturan yang praktis berperilaku sebagai struktur 2 dimensi, sehingga respons dinamikanya praktis hanya ditentukan oleh respons ragamnya yang pertama dan dapat ditampilkan sebagai akibat dari beban gempa statik ekuivalen.

Apabila kategori gedung memiliki Faktor Keutamaan  $I$  dan struktur untuk suatu arah sumbu utama denah struktur dan sekaligus arah pembebanan Gempa Rencana memiliki faktor reduksi gempa  $R$  dan waktu getar alami fundamental  $T_I$ , maka beban geser dasar nominal statik ekuivalen yang terjadi di tingkat dasar dapat dihitung berdasarkan persamaan:

$$V = \frac{C_1 I}{R} W_t \quad (1)$$

dimana  $C_1$  adalah nilai Faktor Respons Gempa yang didapat dari Spektrum Respons Gempa Rencana untuk waktu getar alami fundamental  $T_I$ , sedangkan  $W_t$  adalah berat total gedung, termasuk beban hidup yang sesuai.

Beban geser dasar nominal  $V$  harus dibagikan sepanjang tinggi struktur gedung menjadi beban-beban gempa nominal statik ekuivalen  $F_i$  yang menapak pada pusat massa lantai tingkat ke- $i$  menurut persamaan:

$$F_i = \frac{W_i z_i}{\sum_{i=1}^n W_i z_i} V \quad (2)$$

dimana  $W_i$  adalah berat lantai tingkat ke- $i$ , termasuk beban hidup yang sesuai,  $z_i$  adalah ketinggian lantai tingkat ke- $i$  yang diukur dari taraf penjepitan lateral menurut pasal 5.1.2 dan pasal 5.1.3, sedangkan  $n$  adalah nomor lantai tingkat paling atas.

### Analisis Dinamik Riwayat Waktu

Analisis dinamik riwayat waktu adalah analisis dinamik dimana pada model struktur diberikan catatan rekaman gempa dan respons struktur dihitung langkah demi langkah pada interval waktu tertentu. Pada analisa dinamik riwayat waktu, beban gempa yang dimasukkan dalam pembebanan struktur adalah rekaman gerakan tanah (*ground motion*) dari gempa-gempa yang telah terjadi.

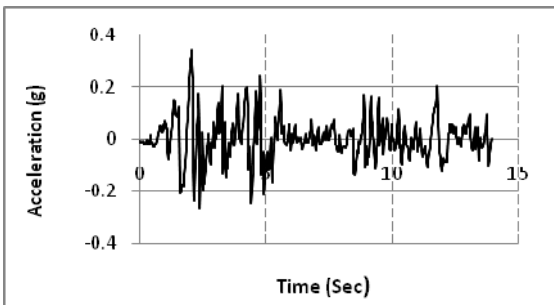
Perhitungan respons dinamik struktur terhadap pengaruh Gempa Rencana, dapat dilakukan dengan metoda analisis dinamik tiga dimensi berupa analisis respons dinamik linier dan non-linier riwayat waktu dengan suatu akselerogram gempa yang dianggakan sebagai gerakan tanah masukan. Respon dinamik dalam setiap interval waktu dihitung dengan metode integrasi langsung. Pada penelitian ini digunakan analisis riwayat waktu non-linier.

Berdasarkan SNI 1726-2002, analisis dinamik linier riwayat waktu terhadap pengaruh gempa rencana pada taraf pembebanan gempa nominal, percepatan muka tanah asli dari gempa masukan harus diskalakan ke taraf pembebanan gempa nominal tersebut, sehingga nilai percepatan puncaknya  $A$  menjadi sebagai berikut,

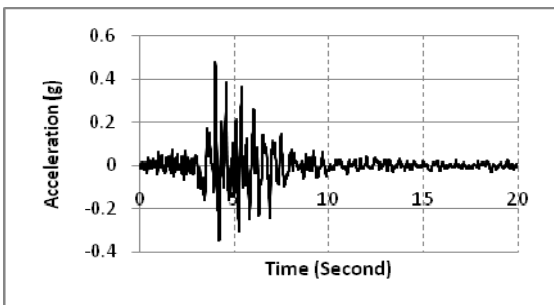
$$A = \frac{A_0 I}{R} \quad (3)$$

Beban gempa yang digunakan adalah rekaman percepatan tanah untuk gempa tertentu, dalam studi kasus ini diambil rekaman gempa El Centro 1940, Chi-chi, Sakaria dan gempa Friuli Dam 1971 (Pranata dan Wijaya, 2008; Seismosoft 2011; Pranata dan Simanta, 2006).

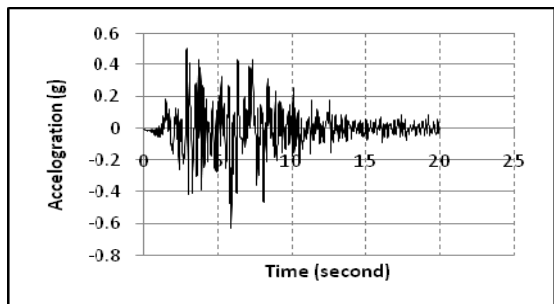
1. Gempa El Centro 1940 adalah salah satu rekaman gempa kuat dan berdurasi 13,98 detik. Dengan skala 6,4 Richter dan kedalaman 9 km dari pusat gempa. Percepatan puncak gempa El Centro terjadi pada detik ke 1,02 sebesar 0,342g. Percepatan gempa El Centro juga merupakan salah satu persyaratan untuk analisis dinamik riwayat waktu disamping digunakannya 4 (empat) buah percepatan gempa menurut SNI 1726-2002.
2. Gempa Friuli 1976, gempa ini berkekuatan 4,5 SR yang terpusat di kota Gemona de Friuli. Percepatan puncak gempa ini terjadi pada detik ke 4,20 sebesar 0,479g.
3. Gempa Sakaria, gempa ini berkekuatan 7,6 SR yang terjadi dengan kedalaman 17 km. Percepatan puncak terjadi pada detik ke 5,92 sebesar 0,628g.
4. Gempa Chi-chi, gempa ini berkekuatan 7,3 SR dengan kedalaman 8 km. Percepatan puncak gempa Chi-chi sebesar 0,808g pada detik ke 14,31.



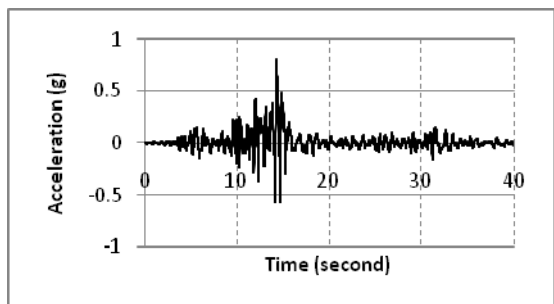
Gambar 1. Akselerogram gempa El Centro 1940



Gambar 2. Akselerogram gempa Friuli



Gambar 3. Akselerogram gempa Sakaria



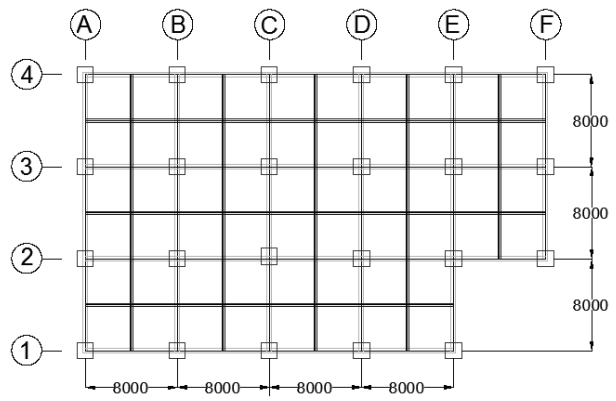
Gambar 4. Akselerogram gempa Chi-chi

## Gempa Susulan

Gempa susulan adalah gempa yang terjadi beberapa waktu setelah gempa utama. Percepatan gempa susulan dapat lebih kecil, lebih besar maupun sama dengan gempa utama yang terjadi. Pada struktur bangunan gempa susulan akan menimbulkan dampak yang lebih jelas dibandingkan gempa utama karena gedung yang mengalami perlemahan setelah gempa utama, kembali menerima beban lateral dari gempa susulan. Pada penelitian ini gempa susulan yang digunakan adalah hasil variasi dari empat buah gempa yang digunakan sebelumnya dengan mengkalikan lipatan gempa asli sampai dengan skala tertentu sampai struktur gedung tidak memenuhi syarat batas layan atau batas ultimit yang ditentukan pada SNI gempa.

## STUDI KASUS DAN PEMBAHASAN

Gedung termasuk kategori beraturan, dan terletak pada wilayah 4 tanah keras dengan sistem struktur SRPMM, dimana faktor reduksi gempa ( $R$ ) = 5,5 dan faktor keutamaan ( $I$ ) = 1. Tinggi lantai dasar 4,5 m sedangkan lantai 2-10 memiliki ketinggian 4 m. Tebal pelat untuk lantai 1-9 sebesar 120 mm dan untuk lantai atap sebesar 100 mm. Ukuran balok induk adalah 450 x 600 mm, balok anak 250 x 400 mm dan balok anak tangga 150 x 300 mm, sedangkan untuk ukuran kolom yang digunakan yaitu 1,4 x 1,4 m untuk lantai 1-3, 850 x 850 mm untuk lantai 4-6 dan 550 x 550 mm untuk lantai 7-10. Mutu beton 25 MPa, dan mutu baja tulangan BJ-41.



Gambar 5. Denah struktur

## Analisis Statik Ekuivalen

Melalui perangkat lunak *ETABS* didapatkan hasil waktu getar ragam 1 sebesar 1,5058 yang menunjukkan bahwa struktur gedung cukup kaku dan diprediksi akan berperilaku baik terhadap beban lateral, melalui waktu getar tersebut diperoleh nilai  $C$  sebesar 0,2064 untuk arah  $x$  dan 0,1992 untuk arah  $y$  sesuai dengan persamaan yang ada dalam SNI 1726-2002 dengan kategori tanah keras wilayah 4. Gaya geser dasar dihitung berdasarkan persamaan (1), sehingga didapatkan hasil sebagai berikut.

Gaya geser arah  $x$  :

$$V_x = \frac{0,2064 \times 1 \times 6053374,78}{5,5} = 227213,914 \text{ kg}$$

Gaya geser arah  $y$  :

$$V_y = \frac{0,1992 \times 1 \times 6053374,78}{5,5} = 219269,759 \text{ kg}$$

Setelah mendapatkan gaya geser dapat diperoleh nilai gaya gempa sesuai dengan persamaan (2) yang ditampilkan pada Tabel 1 (untuk arah  $y$ ). Hasil perhitungan selengkapnya dapat dilihat pada laporan hasil penelitian [Diredja, 2012].

Tabel 1 Gaya gempa arah y

Lantai	$W_i$ (kg)	$z_i$ (m)	$W_i z_i$	$F_{iy}$ (Kg)
Lantai 10	466361,88	40,5	18887656,4	33905
Lantai 9	501635,67	36,5	18309702,1	32868
Lantai 8	501635,67	32,5	16303159,4	29266
Lantai 7	501635,67	28,5	14296616,7	25664
Lantai 6	538815,67	24,5	1320098,0	23697
Lantai 5	582332,45	20,5	11937815,3	21430
Lantai 4	582332,45	16,5	9608485,5	17248
Lantai 3	698934,11	12,5	8736676,4	15683
Lantai 2	827153,19	8,5	7030802,15	12621
Lantai 1	852537,98	4,5	3836420,92	6887
Total	6053374.78		122148319	

Hasil dari gaya gempa untuk arah x dan y selanjutnya di input pada perangkat lunak ETABS untuk didapatkan hasil *displacement* dan *story drift* sehingga dapat diperhitungkan nilai batas layan dan batas ultimit, melalui hasil perhitungan dapat disimpulkan bahwa kinerja batas layan dan kinerja batas ultimit memenuhi persyaratan yang ada pada SNI 1726-2002.

### Analisis Riwayat Waktu

Analisis dinamik riwayat waktu pada penelitian ini menggunakan 4 macam percepatan gempa, yang tidak diskalakan (selanjutnya dalam tulisan ilmiah ini disebut metode A), diskalakan intensitasnya sesuai dengan SNI 1726-2002 (selanjutnya dalam tulisan ilmiah ini disebut metode B) dan tinjauan literatur [Fahjan, 2007] (selanjutnya dalam tulisan ilmiah ini disebut metode C).

- Metode A (faktor skala asli)  
 $faktor\ skala = 1,0$
- Metode B (faktor skala SNI)  
Analisis menggunakan gempa yang diskalakan intensitasnya terhadap amplitudo maksimum percepatan tanah  $A_o$  ada kurva respons spektrum SNI 1726-2002. Dari output *ETABS* didapatkan waktu getar ( $T$ ) = 1,5058, kemudian dengan menggunakan *SeismoSignal* didapatkan *maximum acceleration* untuk percepatan gempa El Centro = 0,3420.

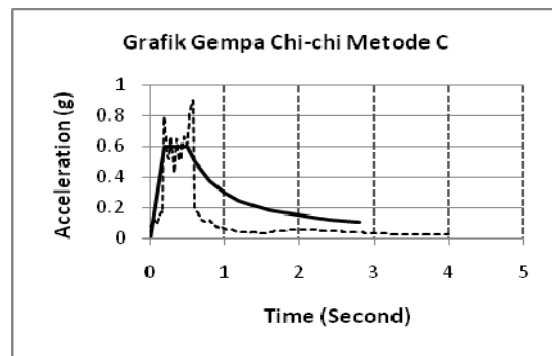
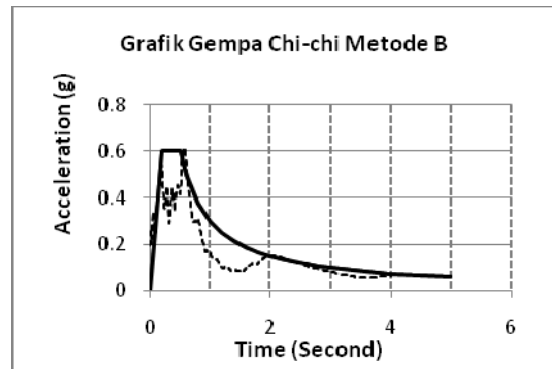
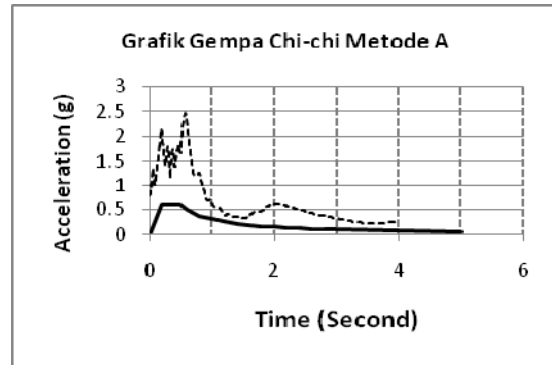
$$C = \frac{0,3}{T_{ETABS}} = \frac{0,3}{1,5058} = 0,1992$$

$$faktor\ skala\ SNI = \frac{0,3420}{0,1992} = 0,5825$$

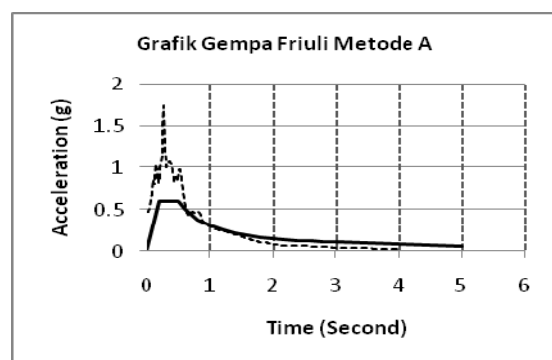
Hasil selengkapnya ditampilkan pada Tabel 2.

- Metode C [Fahjan, 2007]  
Faktor skala didapatkan dengan cara merata-ratakan percepatan gempa secara statistik untuk rentang  $T$  tertentu.

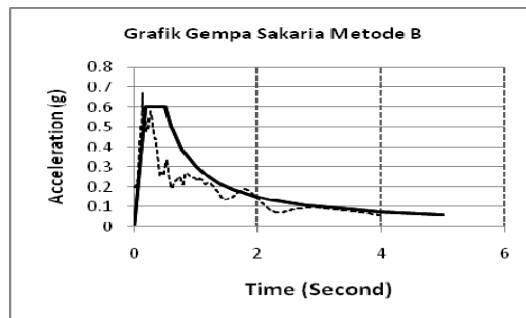
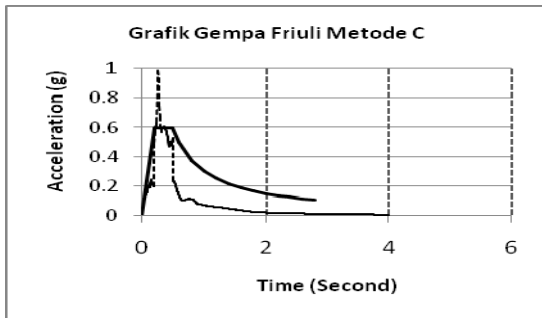
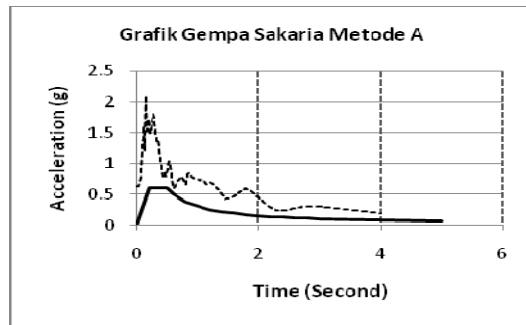
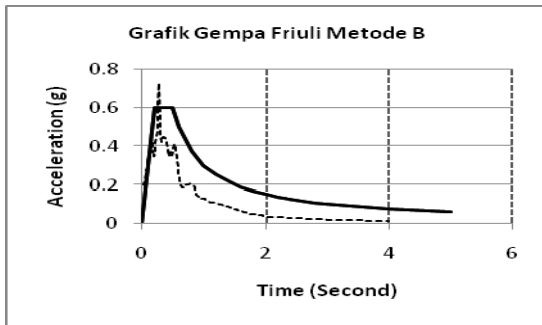
Dari setiap faktor skala yang digunakan didapatkan hasil akselerogram setiap percepatan gempa sebagai berikut,



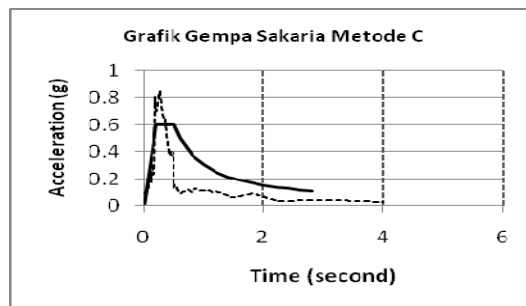
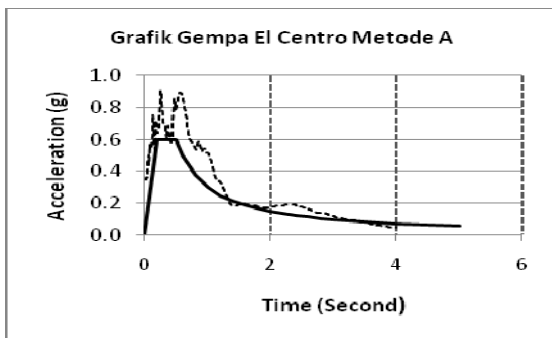
Gambar 6. Akselerogram gempa Chi-chi sesuai masing-masing skala



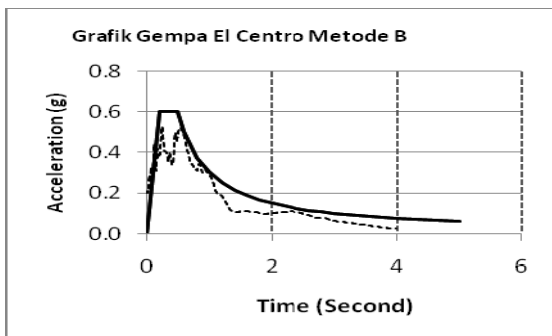
Gambar 7. Akselerogram gempa Friuli sesuai masing-masing skala



Gambar 7. Akselerogram gempa Friuli sesuai masing-masing skala (lanjutan)

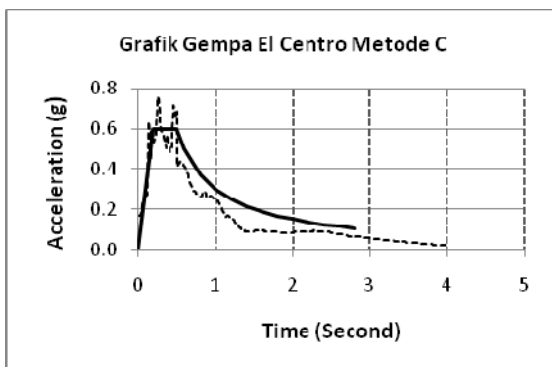


Gambar 9. Akselerogram gempa Sakaria sesuai masing-masing skala gempa



Tabel 2. Percepatan puncak akselerogram gempa

Keterangan	Chi-chi	El Centro	Friuli	Sakaria
Percepatan puncak tanah asli	0,81	0,34	0,48	0,63
Faktor Skala				
Model A	1	1	1	1
Model B	0,25	0,58	0,42	0,32
Model C	0,37	0,84	0,57	0,47



Gambar 8. Akselerogram gempa El Centro sesuai masing-masing skala

### Pembahasan untuk Gempa Utama

Dari hasil analisis statik ekuivalen dan analisis dinamik riwayat waktu diperoleh nilai gaya geser dasar maksimum untuk masing-masing percepatan gempa yang nilainya ditampilkan pada Tabel 3 dan Tabel 4. Untuk metode A (tanpa skala), %-relatif beda antara gaya geser gedung yang dianalisis dengan analisis riwayat waktu terhadap gaya geser statik untuk arah x berkisar antara -60,94% sampai dengan +2,95%, sedangkan untuk arah y berkisar antara -55,21% sampai dengan +38,02%,

Sedangkan untuk metode B (kurva respons spektrum yang diskalakan berdasarkan metode SNI), %-relatif perbedaan hasil gaya geser riwayat waktu terhadap gaya geser statik untuk arah x berkisar antara -65,99% sampai dengan -77,16% dan untuk arah y berkisar antara -65,84% sampai dengan -78,23%,

Sedangkan untuk metode C (faktor skala rata-rata), %-relatif perbedaan hasil gaya geser riwayat waktu terhadap gaya geser statik untuk arah x berkisar antara -35,99% sampai dengan

+103,45%, sedangkan untuk arah y berkisar antara -27,98% sampai dengan +104,33%.

Tabel 3. Gaya geser dasar maksimum arah x

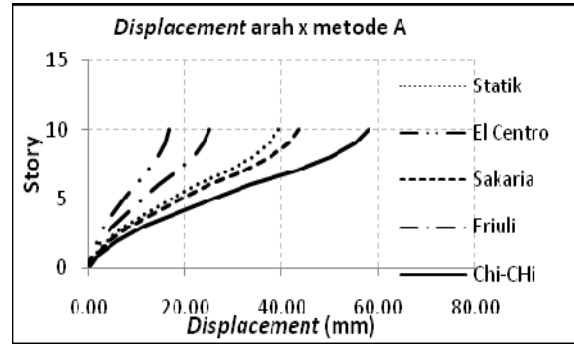
Gempa		$V_x$	%beda
Statik		227213,91	-
Chi-chi	Faktor skala SNI 1726-2002	77280,73	-65,9877
	Faktor skala tanpa skala	312245,38	37,4235
	Faktor skala [Fahjan, 2007]	462275,54	103,4539
El Centro	Faktor skala SNI 1726-2002	51899,65	-77,1582
	Faktor skala tanpa skala	88747,68	-60,9409
	Faktor skala [Fahjan, 2007]	145437,54	-35,9909
Friuli	Faktor skala SNI 1726-2002	56132,9	-75,2951
	Faktor skala tanpa skala	134450,07	-40,8267
	Faktor skala [Fahjan, 2007]	185683,57	-18,2781
Sakaria	Faktor skala SNI 1726-2002	74505,86	-67,2089
	Faktor skala tanpa skala	233927,34	2,9547
	Faktor skala [Fahjan, 2007]	264564,83	16,4387

Tabel 4 Gaya geser dasar maksimum arah y

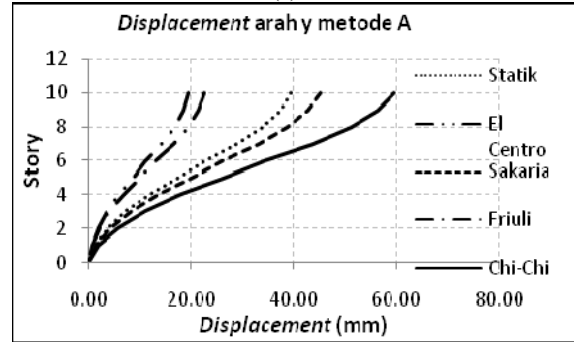
Gempa		$V_y$	%beda
Statik		227213,91	-
Chi-chi	Faktor skala SNI 1726-2002	77614,65	-65,8407
	Faktor skala tanpa skala	313594,54	38,0173
	Faktor skala [Fahjan, 2007]	464272,95	104,3330
El Centro	Faktor skala SNI 1726-2002	59520,98	-73,8040
	Faktor skala tanpa skala	101780,05	-55,2052
	Faktor skala [Fahjan, 2007]	166794,67	-26,5913
Friuli	Faktor skala SNI 1726-2002	49470,22	-78,2275
	Faktor skala tanpa skala	118,492	-47,8502
	Faktor skala [Fahjan, 2007]	163643,9	-27,9780
Sakaria	Faktor skala SNI 1726-2002	75609,99	-66,7230
	Faktor skala tanpa skala	237394,01	4,4804
	Faktor skala [Fahjan, 2007]	268485,53	18,1642

Melalui hasil gaya geser dasar diperoleh nilai *displacement* dan *story drift* dari tiap-tiap metode faktor skala. Hasil dari *displacement* dari setiap faktor skala ditampilkan pada Gambar 10, Gambar 11, dan Gambar 12.

Melalui Gambar 10 dapat dilihat bahwa *displacement* akibat percepatan gempa metode A untuk arah x dan y terbesar adalah akibat gempa Chi-chi dan yang terkecil adalah gempa El Centro, sedangkan pada Gambar 11 dapat dilihat bahwa *displacement* akibat percepatan gempa metode B terbesar adalah akibat gempa Statik untuk arah x dan y, dan *displacement* yang terkecil adalah gempa El Centro untuk arah x serta gempa Friuli untuk arah y, dan untuk Gambar 12 dapat dilihat bahwa *displacement* akibat percepatan gempa metode C terbesar adalah akibat gempa Statik untuk arah x dan y, dan *displacement* yang terkecil adalah gempa El Centro untuk arah x dan y.

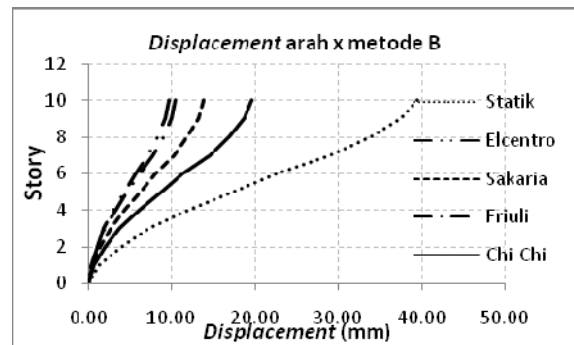


(a). Arah x.

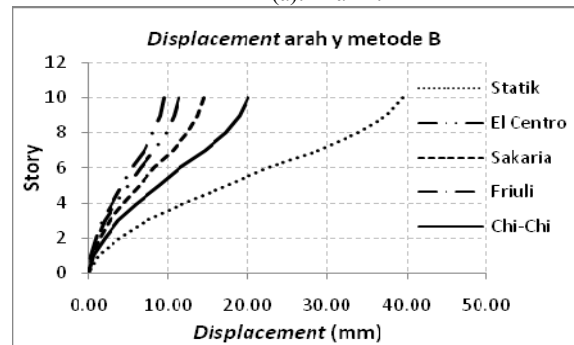


(b). Arah y.

Gambar 10. *Displacement* akibat percepatan gempa metode A

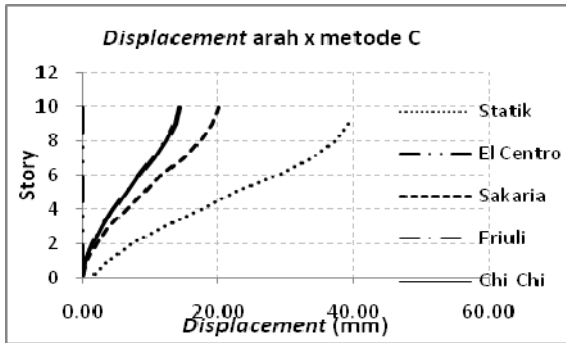


(a). Arah x.

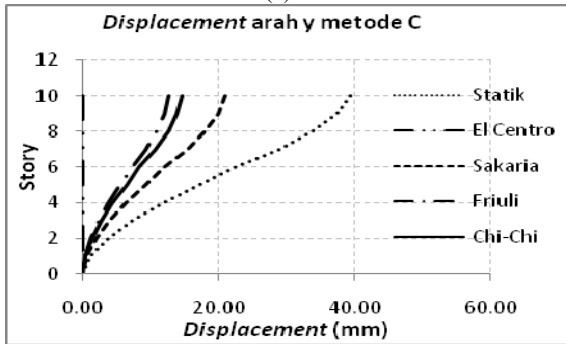


(b). Arah y.

Gambar 11. *Displacement* akibat percepatan gempa metode B



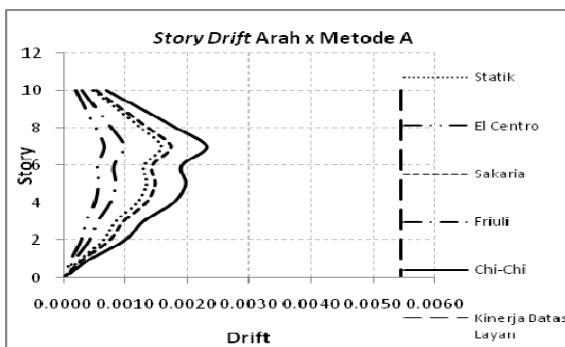
(a). Arah x.



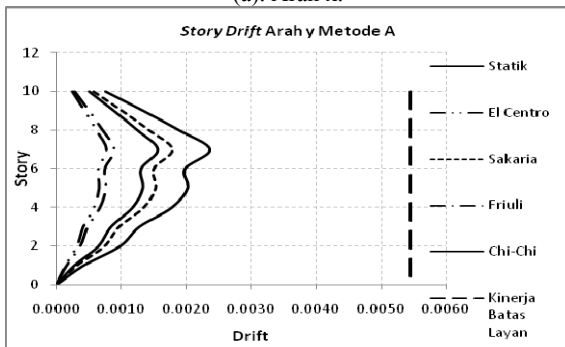
(b). Arah y.

Gambar 12. Displacement akibat percepatan gempa Metode C

Sedangkan untuk *story drift* sebagai parameter batas layan dan batas ultimit ditampilkan dalam bentuk grafik yang ditampilkan pada Gambar 13 untuk Metode A. Secara umum baik pada Metode B dan Metode C, *story drift* yang terjadi masih memenuhi kriteria kinerja batas layan dan kinerja batas ultimit.



(a). Arah x.



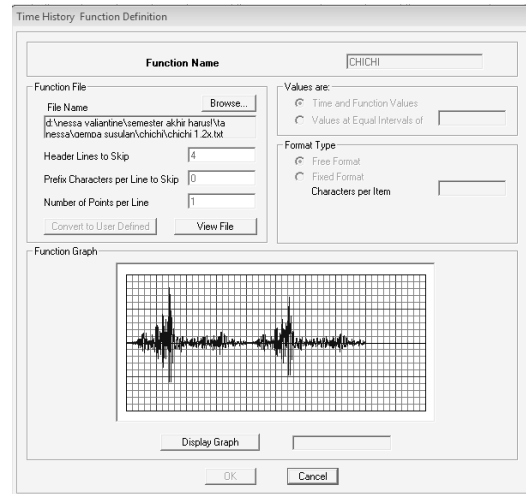
(b). Arah y.

Gambar 13. Drift akibat percepatan gempa Metode A.

### Pembahasan untuk Gempa Susulan

Gempa susulan untuk 4 (empat) percepatan gempa yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dengan menambah percepatan gempa setelah gempa asli dan mengalikannya pertambahan

percepatan gempa tersebut sesuai dengan skala yang dibutuhkan sehingga diperoleh *displacement* dan *story drift* (antar tingkat) dari masing-masing skala akibat gempa susulan sampai struktur gedung mengalami perlemahan pada batas layan atau batas ultimit. Hasil simulasi selengkapnya untuk masing-masing tiap percepatan gempa ditampilkan pada Tabel 5, Tabel 6, Tabel 7, dan Tabel 8.



Gambar 14. Percepatan gempa utama dan susulan (skala 1,2 kali lipat) Chi-chi

Tabel 5. Kinerja batas ultimit Gempa Susulan Chi-chi

Arah	$h_i$ (mm)	2,4 kali		Syarat $\Delta m$ (mm)
		Drift $\Delta s$ (mm)	Drift $\Delta m$ (mm)	
x	4000	18,38	70,763	80
y	4000	20,884	80,403	80

Tabel 6. Kinerja batas ultimit Gempa Susulan Friuli

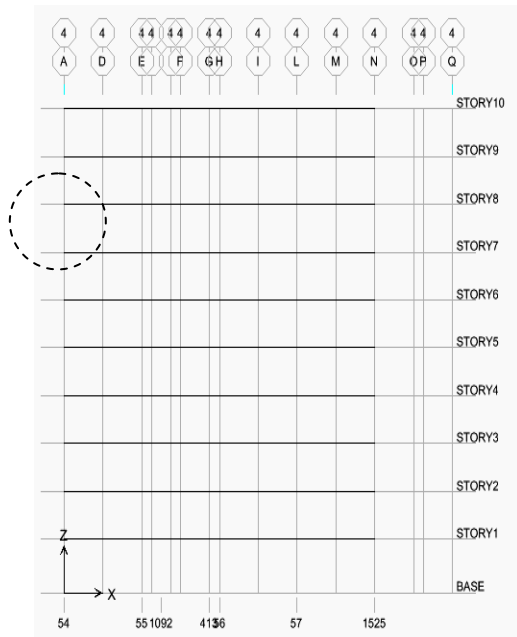
	$h_i$ (mm)	6,8 kali		Syarat $\Delta m$ (mm)
		Drift $\Delta s$ (mm)	Drift $\Delta m$ (mm)	
x	4000	21,028	80,958	80
y	4000	20,836	80,219	80

Tabel 7. Kinerja batas ultimit Gempa Susulan El Centro

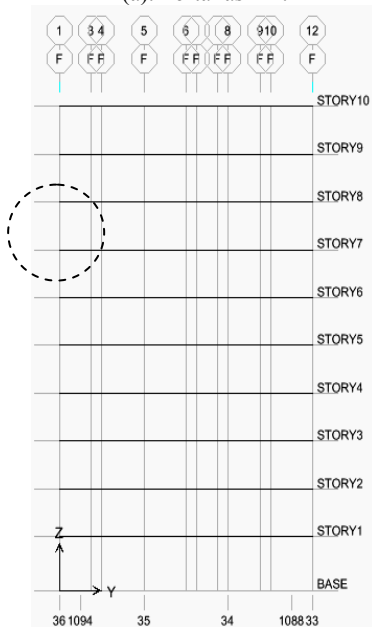
Arah	$h_i$ (mm)	6,4 kali		Syarat $\Delta m$ (mm)
		Drift $\Delta s$ (mm)	Drift $\Delta m$ (mm)	
x	4000	19,98	76,923	80
y	4000	21,336	82,144	80

Tabel 8. Kinerja batas ultimit Gempa Susulan Sakaria

Arah	$h_i$ (mm)	2,8 kali		Syarat $\Delta m$ (mm)
		Drift $\Delta s$ (mm)	Drift $\Delta m$ (mm)	
x	4000	19,644	75,629	80
y	4000	21,62	83,237	80



(a). Portal as 4-4.



(b). Tampak portal as F-F.

Gambar 15. Story drift maksimum akibat gempa susulan Chi-chi 2,4 kali lipat.

## KESIMPULAN

Kesimpulan yang diperoleh dari hasil penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Apabila faktor skala intensitas gempa berdasarkan SNI 1726-2002 diterapkan, maka gaya geser dasar, perpindahan atap dan simpangan antar tingkat hasil analisis dinamik riwayat waktu akan lebih kecil dibandingkan analisis statik, hal ini terjadi karena dalam perhitungan faktor skala percepatan puncak riwayat waktu yang digunakan adalah nilai maksimumnya, sehingga apabila diskalakan terhadap wilayah gempa 4 tanah keras di Indonesia dengan kondisi  $T = 1,5058$ , kurva respon spektrum gempa masukan akan lebih kecil dibanding statik.
2. Metode C lebih konservatif dikarenakan dalam rentang  $T$  0,0-0,5 detik, respon spektrum percepatan gempa masukan dihitung berdasarkan model statistik (rata-rata).

3. Dengan metode riwayat waktu juga didapatkan kesimpulan bahwa gedung yang dianalisis mampu menahan percepatan gempa Chi-chi sebesar 2,4 kali skala asli, gempa El Centro 6,4 kali skala asli, gempa Friuli 6,8 kali skala asli dan gempa Sakaria 2,8 kali skala asli.
4. Analisis riwayat waktu dapat dimanfaatkan untuk mengetahui gaya geser dasar gedung, peralihan atap dan simpangan antar tingkat bila diterapkan tinjauan gempa tertentu, serta mampu mengetahui kemampuan gedung yang sebenarnya bila dikenai gempa utama maupun gempa susulan yang besarnya beberapa kali lipat lebih kecil maupun lebih besar dengan memodifikasi faktor skalanya.

## DAFTAR PUSTAKA

- Amelia, R. (2011). *Perbandingan Analisis Statik dan Analisis Dinamik Pada Portal Bertingkat Banyak Sesuai SNI 03-1726-2002*, Universitas Sumatera Utara.
- Bunardy, K. (2010) *Studi Pengaruh Gempa Susulan Terhadap Struktur Rangka Beton Bertulang Bertingkat Tinggi Dengan Desain SRPMK*, Universitas Katolik Parahyangan, Bandung, Indonesia.
- Computer and Structures, Inc. (2011). *ETABS Manual, Version 9.5*, Integrated Building Design Software, California, Berkeley.
- Diredja, N.V. (2012). *Analisis Dinamik Riwayat Waktu Akibat Gempa Utama dan Gempa Susulan Pada Gedung Beton Bertulang*, Tugas Akhir (tidak dipublikasikan), Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Kristen Maranatha, Bandung.
- Erista, D. (2011). *Kajian Efek Parameter Base Isolator Terhadap Respon Bangunan Akibat Gaya Gempa dengan Metode Analisis Riwayat Waktu*, Universitas Sumatera Utara. Sumatera Utara.
- Fahjan, Y.M., Ozdemir, Z., Keypour, H. (2011). *Procedures for Real Earthquake Time History Scaling and Application to Fit Iranian Design Spectra*, International Institute Earthquake Engineering and Seismology.
- Imran, I., Hendrik, F. (2010). *Perencanaan Struktur Gedung Beton Bertulang Tahan Gempa*, ITB, Bandung, Indonesia.
- MacGregor, J.G., Weight, J.K. (2005). *Reinforced Concrete Mechanics and Design*, Prentice Hall, New Jersey.
- Nasution, A. (2009). *Analisis dan Desain Struktur Beton Bertulang*, ITB, Bandung, Indonesia.
- Pranata, Y.A., Simanta, D. (2006). *Studi Analisis Beban Dorong Untuk Gedung Beton Bertulang*, Jurnal Teknik Sipil Universitas Kristen Maranatha, Volume 2 Nomor 1, April 2006.
- Pranata, Y.A., Wijaya, P.K. (2008). *Kajian Daktilitas Struktur Gedung Beton Bertulang Dengan Analisis Riwayat Waktu dan Analisis Beban Dorong*, Jurnal Teknik Sipil, Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Volume 8 Nomor 3, Juni 2008.
- SN1 1726-2002 (2002). *Standar Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung*, Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah.
- SN1 2847-2002 (2002). *Tata Cara Perhitungan Struktur Beton Untuk Bangunan Gedung*.  
 url: <http://peer.berkeley.edu> diakses tanggal 28 Juni 2011.  
 url: <http://www.wikipedia.com>, diakses tanggal 25 November 2011.