

# ANALISIS KINERJA STRUKTUR DENGAN METODE PERFORMANCE BASED DESIGN TERHADAP GEDUNG KETIDAKBERATURAN VERTIKAL

Lilik Hendri Suryo Anom<sup>1)</sup>, Wibowo<sup>2)</sup>, Sunarmasto<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Mahasiswa Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Sebelas Maret Surakarta

<sup>2)</sup>, <sup>3)</sup> Pengajar Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Sebelas Maret Surakarta

Jln. Ir. Sutami 36A Surakarta 57126; Telp. 0271-634524. Email: lilikhsa@gmail.com

## Abstract

Indonesian archipelago has a great potential to the occurrence of earthquakes, because it is located on 3 major active tectonic plates (Indian-Australian plate, Pacific plate, and Eurasian plate). It is also located between Circum Pacific and Alpide Transasiatic seismic belt. The purpose of this research is to determine the building performance based on analysis of various response spectrum i.e. story displacement and inter-story drift, which refer to the serviceability limit and ultimate limits performance listed in SNI 03-1726-2002, and performance level of structure refers to Applied Technology Council (ATC-40). The analyst was using the analysis of response spectrum, which the earthquake load refers to R.SNI 1726-2010. Calculation of structure analysis was using SAP2000 software in a three-dimensional model. The results showed that the shear force pushover evaluation of 3.527,165 ton, base shear force is greater than the shear force plan 563,361 ton. Total drift maximum is 0,003 m, displacement value is 0,048 m so displacement on building does not exceed the maximum displacement and displacement roof in the Procedure SAP2000 is 0,048 m, Procedure A is 0,0021 m dan Procedure B is 0,0024 m, so the buildings included in the Life Safety performance level (IO) on column in floors 1, 2, 3 and 4 so that the buiding has been failed not daktil.

**Keywords:** capacity spectrum and pushover

## Abstrak

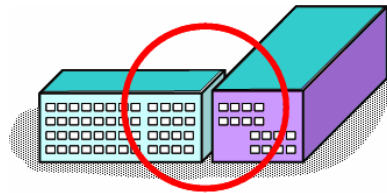
Indonesia berpotensi besar terhadap terjadinya gempa, karena berada pada pertemuan lempeng India Australia, lempeng Pasifik, dan lempeng Eurasia, serta pertemuan jalur gempa Sirkum Pasifik dan jalur gempa Alpide Transasiatic. Tujuan penelitian ini untuk mengetahui kinerja bangunan gedung berdasarkan analisis ragam spektrum respon, yang berupa perpindahan (displacement) tingkat dan selisih perpindahan antar tingkat (drift), sesuai dengan kinerja batas layanan dan kinerja batas ultimit yang tercantum dalam SNI 03-1726-2002, serta level kinerja struktur sesuai Applied Technology Council (ATC-40). Metode analisis ini menggunakan ragam spektrum respon dengan beban gempa mengacu pada R.SNI 1726-2010 dan perhitungan analisis struktur menggunakan perangkat lunak SAP2000 dalam model tiga dimensi. Hasil analisis menunjukkan bahwa gaya geser dasar dari analisis pushover sebesar 3.527,165 ton, gaya geser dasar tersebut lebih besar dari gaya geser dasar rencana sebesar 563,361 ton. Maksimum total drift sebesar 0,003 m, nilai displacement sebesar 0,048 m jadi displacement pada gedung tidak melampaui displacement maksimal dan simpangan atap pada Prosedur SAP2000 sebesar 0,048 m, Prosedur A sebesar 0,0021 m dan Prosedur B sebesar 0,0024 m, jadi struktur gedung tersebut dalam level kinerja Life Safety (LS), namun pada sebagian besar kolom lantai 1, 2 dan sebagian lantai 3 dan 4 terjadi sendi plastis sehingga gedung berpotensi mengalami keruntuhan tidak daktil.

**Kata kunci:** spektrum kapasitas dan pushover

## PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara yang berada pada pertemuan lempeng-lempeng tektonik dunia dan jalur gunung berapi aktif. Hal ini menyebabkan Indonesia kerap kali mengalami gempa bumi akibat dari aktivitas lempeng maupun dari aktivitas gunung berapi. Gempa bumi yang diakibatkan oleh pergerakan lempeng bumi merupakan penyebab terbesar dari gempa yang menimbulkan kerusakan pada struktur gedung. Kebutuhan akan evaluasi kinerja struktur terutama struktur bangunan yang telah berdiri dimasa depan akan menjadi tuntutan seiring dengan hasil riset-riset terbaru terhadap potensial bahaya gempa yang dilakukan menunjukkan hasil perkiraan nilai percepatan muka tanah yang jauh berbeda, bahkan dengan peta wilayah gempa terbaru kita menurut SNI 2010. Trend terbaru perencanaan bangunan tahan gempa saat ini adalah perencanaan berbasis kinerja (*Performance Based Design/PBD*). Konsep perencanaan berbasis kinerja merupakan kombinasi dari aspek ketahanan dan aspek layanan. Perencanaan tahan gempa berbasis kinerja sebagai pengembangan dari konsep PBD merupakan proses yang dapat digunakan untuk perencanaan bangunan baru dengan pemahaman yang realistis terhadap resiko keselamatan (*life*), kesiapan pakai (*occupancy*) dan kerugian harta benda (*economic loss*) yang mungkin terjadi akibat gempa yang akan datang (Pranata, 2006). Bangunan dengan bentuk denah yang sederhana umumnya akan berperilaku lebih baik sewaktu ada gempa besar dibandingkan dengan bangunan yang mempunyai sudut-sudut tonjolan dari denah yang berbentuk U, V, H, L dan +. Ini dikarenakan bangunan dengan geometri yang sederhana memastikan alur beban gaya inersia yang langsung dan sependek mungkin kepondasi sewaktu menerima guncangan gempa. Salah satu cara untuk mengurangi ketidakberaturan adalah memisahkan bangunan keblok-blok yang sederhana dengan suatu celah biasa disebut juga "*separation joint*" atau yang biasa dikenal dengan

dilatasi bangunan. Desain seperti ini mengijinkan konfigurasi bangunan yang sederhana untuk bekerja sendiri-sendiri, sehingga dapat menghindari konsentrasi gaya yang besar pada daerah sudut tonjolan bangunan yang seringkali menyebabkan kerusakan. Sebagai contoh, suatu bangunan dengan denah berbentuk L dapat dibagi menjadi dua denah bangunan persegi empat mempergunakan sistem celah pada area pertemuannya. Tetapi konsekuensi dari pemisahan ini menyebabkan kedua bagian bangunan dapat beradu atau hancur pada saat terjadi gempa jika tidak dipisahkan dengan celah yang cukup.



Gambar 1. Celah Pemisah Pada Bangunan

Ketidakteraturan dalam arah horisontal dapat menyebabkan pengaruh yang jelek pada perilaku bangunan ketika terjadi gempa. Bangunan dengan loncatan bidang muka atau *vertical setbacks*, seperti bangunan hotel dengan podium dibagian dasar, menyebabkan adanya perubahan ketahanan terhadap gempa yang mendadak pada level yang tidak menerus.

**Spektrum Respon dan Spektrum Respon Rencana**

Spektrum respon adalah suatu *tool* yang penting dalam praktik dinamika struktur khususnya analisis dan desain struktur bangunan tahan gempa. Pembentukan plot respon spektrum memerlukan solusi sistem SDOF untuk harga-harga frekuensi natural dan rasio redaman (*damping ratio*) pada daerah yang ditinjau. Setiap solusi menghasilkan hanya satu titik dari nilai maksimum dari spektrum respons (Paz, 1985).

$$S_v = \frac{2\pi}{T} \cdot S_d = \omega \cdot S_d \dots\dots\dots [1]$$

dan,

$$S_a = \frac{2\pi}{T} \cdot S_v = \omega \cdot S_v = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cdot S_d = \omega^2 \cdot S_d \dots\dots\dots [2]$$

$S_a$  adalah percepatan absolut maksimum atau spektrum percepatan,  $S_d$  adalah perpindahan relatif maksimum atau spektrum perpindahan dan  $S_v$  adalah kecepatan palsu (*pseudo velocity*) relatif maksimum atau spektrum kecepatan.

**Konversi Spektrum Demand**

Untuk mengkonversi spektrum dari format kurva tradisional ( $S_a$ - $T$ ) menjadi format spektrum ADRS/*Acceleration-Displacement Response Spectra* ( $S_a$ - $S_d$ ) maka perlu diketahui nilai *Spectral displacement* ( $S_{d_i}$ ) dari tiap titik pada kurva dengan rumus:

$$S_{d_i} = \frac{T_i^2}{4\pi^2} \cdot S_{a_i} \cdot g \dots\dots\dots [3]$$

$$T_i = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{S_{d_i}}{S_{a_i}}} \dots\dots\dots [4]$$

$S_{d_i}$  adalah spectral displacement,  $T_i$  adalah waktu getaar alami fundamental,  $S_a$  adalah spektrum percepatan,  $S_d$  adalah spektrum perpindahan dan  $g$  adalah percepatan gravitasi.

**Konversi Spektrum Kapasitas**

Kurva kapasitas dapat diubah menjadi spektrum kapasitas dengan konversi titik per titik kurva hasil *pushover*, kurva hubungan *base shear* ( $V_i$ ) dan *roof displacement* ( $\delta_i$ ), ke ordinat spektrum mode ke-1 ( $S_a$ - $S_d$ ) dengan persamaan:

$$\frac{S_a}{g} = \frac{Vb/w}{\alpha_1} \dots\dots\dots [5]$$

atau,

$$S_a^* = \frac{Vb/w}{\alpha_1} \dots\dots\dots [6]$$

$$Sd_1 = \frac{\delta_i}{(PF_1 \cdot \phi_{1,roof})} \dots\dots\dots [7]$$

Keterangan :

$\phi_{1,roof}$  = Amplitudo pada *roof level*, mode-1

$w_i$  = Berat pada level ke-i

**Kriteria Kerja Menurut ATC-40**

Berdasarkan ATC-40 kinerja struktur bangunan gedung dapat dibagi menjadi kategori sebagai berikut :

a. Immediate Occupancy (IO)

Kategori ini struktur bangunan aman. Resiko korban jiwa dari kegagalan struktur tidak terlalu berarti, gedung tidak mengalami kerusakan berarti, dan dapat segera difungsikan/beroperasi kembali.

b. Damage Control (DC)

Kategori ini struktur bangunan yang dalam pasca gempa, kerusakan yang terjadi bervariasi diantara kategori *Immediate Occupancy* dan *Life Safety*. Resiko korban jiwa sangat rendah. Struktur bangunan boleh rusak, namun tidak runtuh.

c. Life Safety (LS)

Kategori ini struktur bangunan terlalu daktail. Termasuk dalam kategori ini adalah struktur bangunan yang dalam pasca gempa tidak dapat mendesak sebagai fasilitas penyelamatan. Resiko korban jiwa sangat rendah.

d. Limited Safety

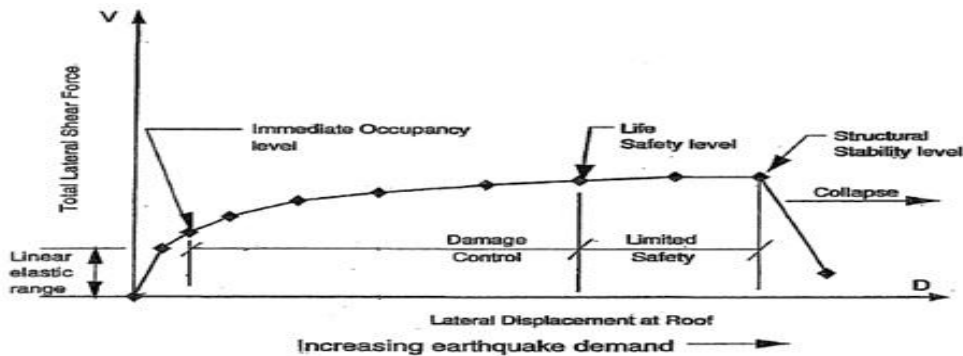
*Limited Safety* bukan merupakan level spesifik, tetapi merupakan jarak antara *Life Safety* dan *Structural Stability*.

e. Structural Stability

*Structural Stability* termasuk dalam kategori ini adalah struktur bangunan yang dalam pasca gempa, gedung diambang batas runtuh total.

f. Not Considered

*Not Considered* bukan merupakan tingkat kinerja, tetapi khusus untuk situasi-situasi dimana hanya untuk evaluasi seismik nonstruktural atau *retrofit*.



Gambar 2. Kurva Kapasitas

ATC-40 memberi batasan rasio *drift* atap untuk berbagai macam tingkat kinerja struktur adalah sebagai berikut:

Tabel 1. Batasan Rasio Drift Atap Menurut ATC-40

Parameter	IO	Damage Control	LS	Structural Stability
Maksimum Total Drift	0,01	0,01 – 0,02	0,02	0,33(Vi/Pi)
Maksimum Inelastik Drift	0,005	0,005 – 0,015	No Limit	No Limit

**METODE**

Metode analisis yang digunakan untuk memperhitungkan pengaruh beban gempa terhadap struktur adalah metode analisis statis, yaitu analisis sederhana untuk menentukan pengaruh gempa tetapi hanya digunakan pada bangunan sederhana dan simetris, penyebaran kekakuan massa menerus dan ketinggian tingkat kurang dari 40 meter dan analisis statis prinsipnya menggantikan beban gempa dengan gaya-gaya statis ekuivalen. Metode analisis dinamis, yaitu analisis dinamis dilakukan untuk evaluasi yang akurat dan mengetahui perilaku struktur akibat pengaruh gempa yang sifatnya berulang.

Adapun tahap-tahap analisisnya adalah sebagai berikut:

1. Membuat model geometri struktur.
2. Menghitung dan mengumpulkan data yang mendukung analisis struktur.
3. Menghitung beban gravitasi dan lateral yang bekerja.

4. Memasukkan data yang telah dihitung ke dalam software analisis struktur.
5. Cek desain struktur.
6. Menghitung dan memasukkan tulangan kolom pada SAP2000.
7. Memasukkan data parameter pushover dengan desain SNI 2010 ke dalam program SAP2000.
8. Mendapatkan nilai performance point pada program SAP2000.
9. Menghitung ulang desain struktur dengan menggunakan Prosedur A dan B.
10. Membandingkan performance level SAP2000 dengan Prosedur A dan B.
11. Menjelaskan hasil performance point untuk mengetahui apakah struktur aman.
12. Mendiskripsikan terjadinya sendi plastis.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Perhitungan struktur dilakukan dengan menjumlahkan berat tiap lantai untuk mendapatkan nilai beban gempa yang nantinya akan dimasukkan kedalam program SAP2000 untuk mendapatkan nilai performance point.

Tabel 2. Distribusi Beban Lateral

Lantai	Tinggi (m)	Berat (ton)	H.W (ton.m)	Fx (ton)	Fy (ton)
Lantai 1	4	1.567,901	6.271,603	52,027	15,608
Lantai 2	8	717,264	5.738,112	47,601	14,280
Lantai 3	12	717,264	8.607,168	71,402	21,420
Lantai 4	16	524,736	8.395,776	69,648	20,894

### Prosedur SAP2000

$$V = 3.567,901 \text{ ton}$$

$$D_t = 0,048 \text{ m}$$

$$S_a = 0,402 \text{ g}$$

$$S_d = 0,03 \text{ m}$$

$$T_{\text{eff}} = 0,543 \text{ detik}$$

$$\beta_{\text{eff}} = 0,124$$

$$\text{Maksimal drift} = \frac{D_t}{H} = \frac{0,048}{16} = 0,003m$$

Sehingga level kinerja gedung adalah *Immediate Occupancy*.

$$\text{Maksimal in-elastik drift} = \frac{D_t - D_1}{H} = \frac{0,048 - (-1,63 \times 10^{-4})}{16} = 3,0102 \times 10^{-3} m$$

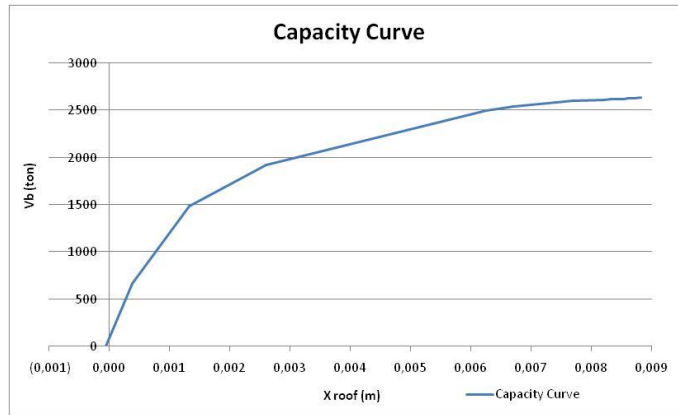
Sehingga level kinerja gedung nonlinier adalah *Immediate Occupancy*.

### Prosedur A

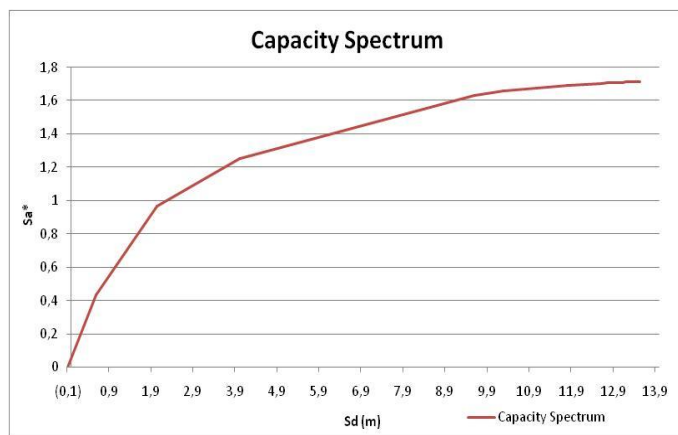
Tabel 3. Capacity Curve dan Capacity Spectrum

Step	Displacement (m)	Base Force (ton)	$\alpha$	$W_{\text{tot}}$ (ton)	$S_a^*$	$S_d$ (m)
1	-0,000168	0	0,6628	3.527,165	0	-0,08904
2	0,018743	706,65044	0,6628	3.527,165	0,3023	1,5314
3	0,030990	1.048,5430	0,6628	3.527,165	0,4485	2,5320
4	0,052873	1.297,9023	0,6628	3.527,165	0,5552	4,3200
5	0,075739	1.419,1569	0,6628	3.527,165	0,6071	6,1882
6	0,096858	1.519,7420	0,6628	3.527,165	0,6501	7,9137
7	0,119522	1.616,0489	0,6628	3.527,165	0,6913	9,7655
8	0,141615	1.683,5793	0,6628	3.527,165	0,7202	11,5706
9	0,163430	1.747,2730	0,6628	3.527,165	0,7474	13,3529
10	0,188538	1.817,0703	0,6628	3.527,165	0,7773	15,4044
11	0,209837	1.871,2082	0,6628	3.527,165	0,8005	17,1400

Lalu dari tabel di atas dapat dijadikan gambar Capacity Curve dan Capacity Spectrum yang artinya untuk memperoleh titik potong dari performance point yang dibutuhkan untuk analisis prosedur A dan juga dapat dijadikan Demand Curve dan Demand Spectrum. Dari gambar Capacity Spectrum dan Demand Spectrum didapatkan Performance Point dari hasil hitungan.

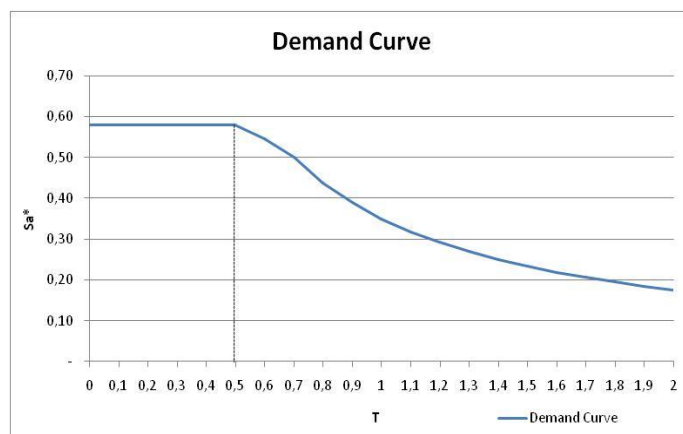


Gambar 3. Capacity Curve

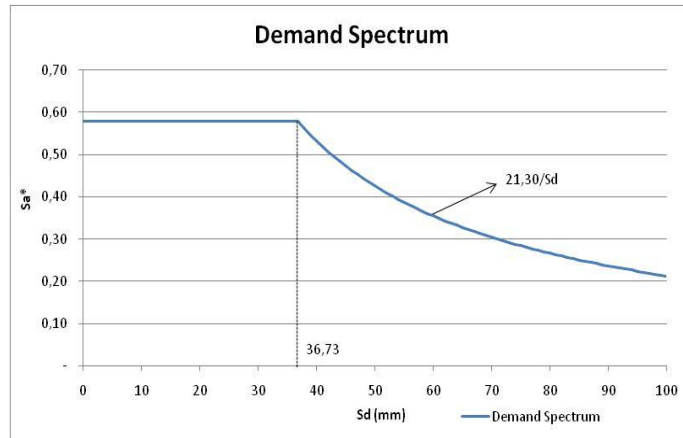


Gambar 4. Capacity Spectrum

Dari gambar 3 di atas adalah Capacity Curve dari hasil program SAP2000 yang didapatkan dari tabel 3 antara displacement dan base force sampai step 13 sedangkan gambar 4 adalah Capacity Spectrum didapatkan dari tabel yang sama antara Sd dan Sa\*.



Gambar 5. Demand Curve



Gambar 6. Demand Spectrum

Dari gambar 5 di atas adalah Demand Curve didapatkan dari perhitungan gempa rencana dan gambar 6 adalah Demand Spectrum didapatkan dari perhitungan konversi demand curve ke demand spectrum.

$$\beta_{eff} = \frac{63,7.k.(ay.dpi - dy.api)}{dpi.api} + 5 = 5,42\%$$

$$SR_A = \frac{3,21 - 0,68 \cdot \ln \beta_{eff}}{2,12} = 0,97999$$

$$SR_V = \frac{2,31 - 0,41 \cdot \ln \beta_{eff}}{1,65} = 0,98619$$

$$(0,00541 \cdot S_d) + 0,07047 = \frac{21,0058}{S_d}$$

$$S_d = 56,13846 \text{ mm}$$

$$S_a/g = (0,00541 \cdot S_d) + 0,07047 = 3,37418 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} X_{roof} &= S_d \times MPF \times \Phi_{roof} \\ &= 56,13846 \times 0,0004278 \times 1,4 \\ &= 0,0336 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{X_{roof}}{H} &= \frac{X_{roof}}{H} \\ &= 0,0021 \end{aligned}$$

Sehingga performance level pada kondisi *Immmediate Occupancy*.

### Prosedur B

$$\beta_{eff} = \frac{63,7.k.(ay.dpi - dy.api)}{dpi.api} + 5 = 5,92\%$$

$$SR_A = \frac{3,21 - 0,68 \cdot \ln \beta_{eff}}{2,12} = 0,94356$$

$$SR_V = \frac{2,31 - 0,41 \cdot \ln \beta_{eff}}{1,65} = 0,95797$$

$$(0,00541 \cdot S_d) + 0,07047 = \frac{20,0046}{S_d}$$

$$S_d = 57,13846 \text{ mm}$$

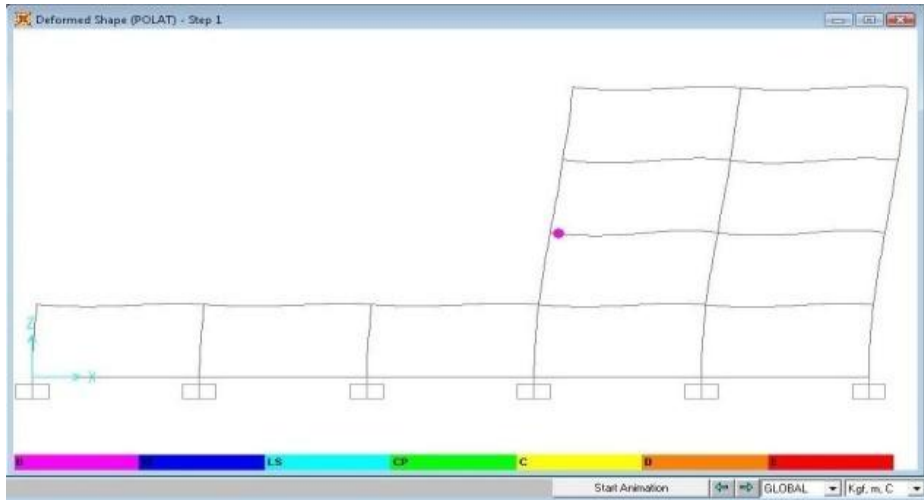
$$S_a/g = (0,00541 \cdot S_d) + 0,07047 = 3,99571 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} X_{roof} &= S_d \times MPF \times \Phi_{roof} \\ &= 56,13846 \times 0,0006514 \times 1,4 \\ &= 0,0365 \end{aligned}$$

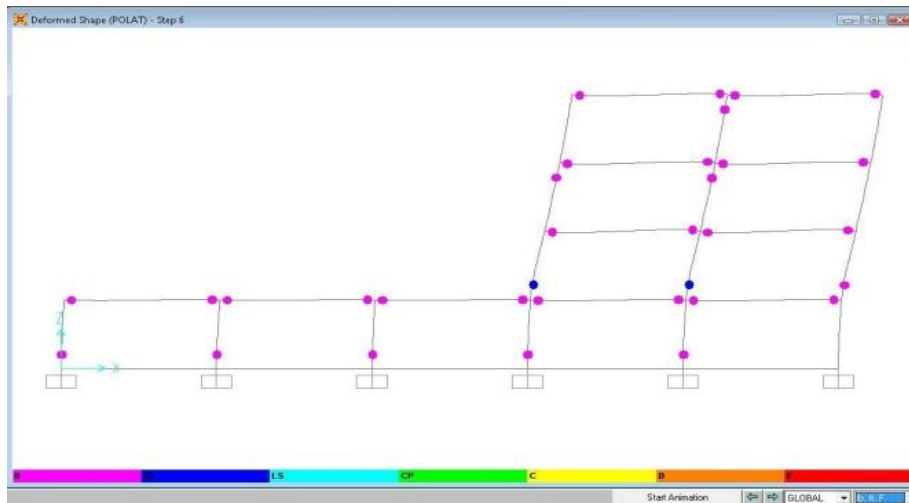
$$\begin{aligned} \frac{X_{roof}}{H} &= \frac{X_{roof}}{H} \end{aligned}$$

$$= 0,0024$$

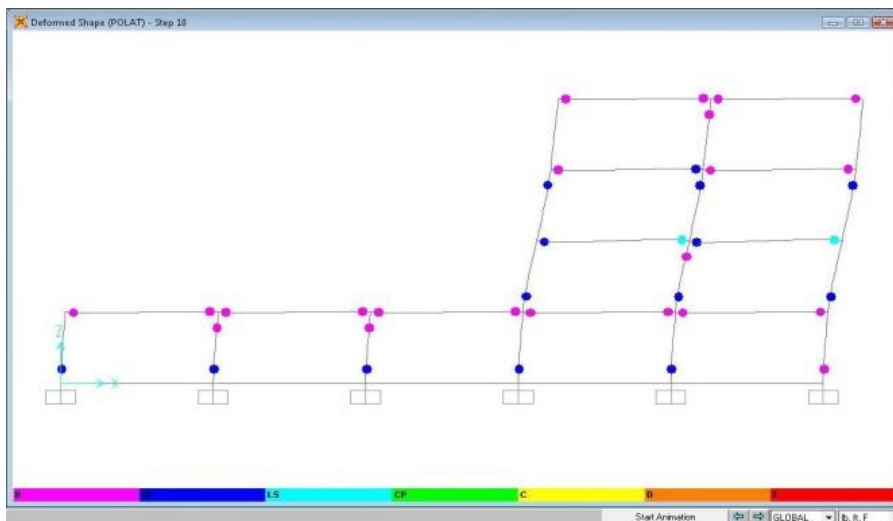
Sehingga performance level pada kondisi *Immediate Occupancy*.



Gambar 7. Sendi Plastis Step 1



Gambar 8. Sendi Plastis Step 6



### Gambar 9. Sendi Plastis Step 10

Didapatkan dari hasil gambaran sendi plastis bahwa pada step pertama belum terjadi kerusakan akibat beban lateral, lalu pada step selanjutnya terjadi sendi plastis didaerah kolom lantai 1 dengan warna merah muda pada potongan A-4 dan juga beberapa balok yang lain. Pada step 6 mulai terjadi sendi plastis warna biru atau dengan level Immediate Occupancy dibagian kolom lantai 1 akibat penambahan beban lateral secara bertahap oleh SAP2000. Lalu dilanjutkan sampai step 10 atau step terakhir dari hasil analisis pushover terjadi kegagalan struktur dibanyak kolom lantai 1 dengan warna biru muda atau level Life Safety pada potongan A-5 dan A-6, disamping itu pada balok juga terjadi sendi plastis dengan level B disejumlah lantai. Maka dari itu hasil analisis pushover struktur gedung dengan ketidakberaturan vertikal terjadi kegagalan struktur yang cukup besar dibandingkan dengan struktur gedung beraturan, diterapkan dengan konsep desain *strong colom weak beam* tidak berpengaruh secara dominan karena terdapat coakan sudut yang cukup besar lebih dari 15% yang dapat mengakibatkan torsi atau puntiran.

### SIMPULAN

Performance point gedung adalah sebagai berikut:

Tabel 4. Perbandingan Prosedur SAP2000 dengan A dan B

Analisis	$\beta_{eff}$ (%)	Sd (m)	Sa/g	Xroof/H (m)	Performance Level
Prosedur SAP2000	12,4	0,03015	0,402	0,0480	Immediate Occupancy
Prosedur A	5,42	0,05613	0,374	0,0021	Immediate Occupancy
Prosedur B	5,92	0,05716	0,399	0,0024	Immediate Occupancy

Dari kurva kapasitas memberikan gambaran perilaku struktur mulai dari tahap kondisi elastis gedung dengan ketidakberaturan horisontal maksimal pada level kinerja menurut Prosedur SAP2000, A dan B adalah *Immediate Occupancy* (IO) yakni tidak ada kerusakan berarti pada struktur dimana kekuatan dan kekakuannya hampir sama dengan kondisi sebelum gempa. Terjadi sendi plastis pada beberapa kolom sehingga kemungkinan dapat terjadi kegagalan struktur yang cukup fatal. Pada beberapa kolom terlihat software SAP2000 terjadi sendi plastis sebagai akibat ketidakberaturan vertikal.

### UCAPAN TERIMAKASIH

Saya ucapkan terimakasih kepada bapak Wibowo dan juga bapak Sunarmasto atas diskusi dan saran hingga selesai skripsi ini.

### REFERENSI

- Applied Technology Council, ATC-40 Report. 1996, *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Building, Volume 1 and 2*, California
- Computer and Structures, Inc. 2005, *SAP2000 v.14, Structure Analysis Program 2000 v.14*, California
- Paz M, 1996, *Dinamika Struktur*, Erlangga, Jakarta
- Standar Nasional Indonesia, 2002, *Standar Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Gedung SNI 03-1726-2002*, Bandung
- Standar Nasional Indonesia, 2010, *Standar Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Gedung RSNi 2010*, Bandung
- Yosafat AP, 2006, *Evaluasi Kinerja Gedung Beton Bertulang Taban Gempa dengan Pushover Analysis (Sesuai ATC40, FEMA 356 dan FEMA 440)*, Jurnal Media Teknik Sipil Volume 3 No 1 Januari 2006