

# Kinerja Portal Struktur Gedung Tahan Gempa dengan Sistem Ganda Menggunakan Metode *Pushover Analysis*

N. Septian<sup>a</sup>, G. Turuallo<sup>b\*</sup> dan I.K. Sulendra<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Alumni Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Tadulako, Palu, Indonesia, 94112

<sup>b</sup>Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Tadulako, Palu, Indonesia, 94112

\* Corresponding author's e-mail: [turuallo@yahoo.co.uk](mailto:turuallo@yahoo.co.uk)

Received: 19 January 2022; revised: 15 February 2022; accepted: 20 February 2022

**Abstract:** Buildings damages due to earthquakes generally happen because designs of the buildings do not consider earthquake resistance aspects and do not fulfil the technical standards of earthquake resistant buildings. The structure designed in this work was a seven-storey office building, with a symmetrical design plan. The earthquake-resisting system used was dual system with special moment resisting frame (SMRF) and special shear wall for reinforced concrete. The materials used in this design were concrete with compressive strength of  $f'_c = 30$  MPa, Plain Steel Bars Grade 24 ( $f_y = 235$  MPa), and Deformed Steel Bars Grade 40 ( $f_y = 390$  MPa). The calculation structural elements results gave: the size of main beams of  $40 \times 60$  cm<sup>2</sup>, with reinforcement varying from 4D22 to 12D22 in the support area and from 3D22 to 5D22 in the midspan area; secondary beams with the size of  $25 \times 40$  cm<sup>2</sup>, with reinforcement of 2D22 both in the support area and midspan area; the size of columns were  $95 \times 95$  cm<sup>2</sup>, with reinforcement varying from 20D25 to 28D25; a 30 cm thick of shear walls reinforced with 2D22-175 mm (in x-axis) and 2D22-125 mm (in y-axis); 12 cm thick slabs reinforced with  $\emptyset 12$ -200 mm. For the tie beams with the size of  $40 \times 55$  cm<sup>2</sup>, had reinforcement varying from 2D22 to 4D22 in the support area and from 3D22 to 5D22 in the midspan area. Pushover analysis results in a maximum total drift of 0,00425 which means the performance level of the structure is Immediate Occupancy.

**Keywords:** dual system, SMRF, shear wall, pushover analysis

**Abstrak:** Kerusakan bangunan gedung yang terjadi akibat gempa bumi secara umum disebabkan perencanaan yang tidak memperhatikan aspek ketahanan gempa dan tidak memenuhi standar persyaratan teknis bangunan tahan gempa. Struktur yang direncanakan dalam tulisan ini berupa perkantoran berlantai 7 (tujuh), dengan denah yang didesain simetris. Sistem penahan gaya gempa yang digunakan adalah sistem ganda dengan rangka beton bertulang pemikul momen khusus (SRPMK) dan dinding geser beton bertulang khusus. Material struktur yang digunakan dalam perencanaan adalah beton dengan mutu  $f'_c = 30$  MPa, baja tulangan BjTP Grade 24 ( $f_y = 235$  MPa), dan baja tulangan BjTD Grade 40 ( $f_y = 390$  MPa). Dari proses perencanaan, dihasilkan elemen struktur yaitu balok induk  $40 \times 60$  cm<sup>2</sup> dengan tulangan bervariasi dari 4D22 sampai 12D22 untuk daerah tumpuan dan 3D22 sampai 5D22 untuk daerah lapangan; balok anak  $25 \times 40$  cm<sup>2</sup> dengan tulangan 2D22 untuk daerah tumpuan maupun daerah lapangan; kolom  $95 \times 95$  cm<sup>2</sup> dengan tulangan bervariasi dari 20D25 sampai 28D25; dinding geser dengan ketebalan 30 cm yang dipasang tulangan 2D22-175 untuk dinding arah X, sedangkan dinding arah Y dipasang tulangan 2D22-125; dan pelat dengan ketebalan 12 cm yang dipasang tulangan  $\emptyset 12$ -200. Untuk struktur bawah digunakan balok pengikat dengan dimensi  $40 \times 55$  cm<sup>2</sup> dengan tulangan bervariasi dari 2D22 sampai 4D22 untuk daerah tumpuan dan 3D22 sampai 5D22 untuk daerah lapangan. Hasil dari analisis *pushover* menunjukkan *maximum total drift* sebesar 0,00425 yang berarti kinerja struktur berada pada level *Immediate Occupancy*.

**Kata kunci:** sistem ganda, SRPMK, dinding geser, analisis pushover

## 1. Pendahuluan

Secara geografis, Indonesia terletak pada pertemuan tiga lempeng bumi yaitu lempeng Indo-Australia, lempeng Pasifik, dan lempeng Eurasia. Hal ini menjadikan Indonesia negara yang rawan akan gempa bumi, baik gempa dengan skala kecil, skala sedang, maupun skala besar [1]. Karena itu, bangunan-bangunan gedung ataupun non-gedung di Indonesia harus direncanakan sebagai bangunan tahan gempa sesuai dengan Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Gedung dan Non-Gedung (SNI 1726:2012) [2-5]. Dalam SNI 1726:2012, disebutkan ada 85 jenis sistem penahan gaya gempa. Salah satu di antaranya adalah sistem ganda dengan rangka pemikul momen khusus yang mampu menahan paling sedikit 25 persen gaya gempa yang ditetapkan dan dinding geser beton bertulang khusus [6-8].

Sistem ini terbilang unik karena adanya interaksi yang sangat baik antara sistem rangka pemikul momen dengan dinding geser. Hal ini terjadi karena kedua sistem tersebut mempunyai perilaku defleksi yang berbeda. Akibat beban lateral, dinding geser akan berdefleksi *flexural/bending mode*, sedangkan sistem rangka akan berdefleksi *shear mode*. Dengan demikian, gaya geser pada bagian bawah akan dipikul oleh dinding geser, dan gaya geser pada bagian atas akan dipikul oleh sistem rangka. Karena kelebihan tersebut, sistem ini sangat menguntungkan jika digunakan untuk bangunan tingkat tinggi [9].

Perencanaan-perencanaan terkini cenderung mengarah ke desain bangunan tahan gempa berbasis kinerja (*performance based seismic design*) yang memanfaatkan teknik analisis nonlinier untuk mengetahui respon inelastis struktur terhadap gempa yang terjadi, sehingga dapat

diketahui level kinerja struktur tersebut. Salah satu metode analisis yang termasuk ke dalam konsep desain berbasis kinerja adalah analisis *pushover* yang merupakan metode analisis statis nonlinier yang dapat digunakan untuk meramalkan kinerja struktur terhadap beban lateral [10-13].

### 1.1. Struktur Gedung Tahan Gempa

Suatu gedung dikatakan tahan gempa bukan berarti gedung tersebut tidak akan rusak atau roboh jika terjadi gempa. Gempa merupakan suatu peristiwa pelepasan energi dari bumi yang kekuatannya tidak terduga sehingga tidak rasional untuk membangun suatu gedung yang dapat benar-benar tahan terhadap gempa sebesar apapun intensitasnya (ditinjau dari aspek ekonomi). Budiono dan Supriatna (2011) memberikan filosofi dasar dalam merencanakan bangunan tahan gempa [14]:

- Bila terjadi gempa ringan ( $< 4$  SR), bangunan tidak boleh rusak.
- Bila terjadi gempa sedang ( $4 - 6$  SR), bagian non-struktural dari bangunan boleh rusak, tetapi bagian struktural dari bangunan tidak boleh rusak.
- Bila terjadi gempa kuat ( $> 6$  SR), bangunan boleh rusak tetapi tidak langsung roboh, sehingga penghuni bangunan masih mempunyai waktu untuk menyelamatkan diri.

Berdasarkan konsep tersebut dapat dilihat bahwa tujuan perencanaan bangunan tahan gempa adalah untuk memberikan perlindungan terhadap jiwa manusia dengan cara menyediakan waktu yang cukup untuk penghuni bangunan menyelamatkan diri jika terjadi gempa yang ekstrim. Dalam hal ini bangunan boleh mengalami tingkat kerusakan tertentu pada tingkat gempa tertentu, tetapi diharuskan mempunyai suatu mekanisme yang menghindari terjadinya keruntuhan bangunan secara mendadak. Dengan demikian, baik aspek ekonomi maupun aspek keselamatan manusia, keduanya dapat diperoleh secara optimal [9].

Ada beberapa hal yang harus diperhatikan dalam merencanakan struktur tahan gempa khususnya bangunan gedung, berkaitan dengan pengaruhnya terhadap kinerja struktur saat menerima beban gempa. Disebutkan dalam SNI 1726:2012, secara garis besar ada tiga hal penting yang harus diperhatikan dalam perencanaan gedung tahan gempa yaitu [4]:

#### 1). Beban Gempa Rencana

Beban gempa rencana adalah beban yang merepresentasikan gaya gempa, yang didesain bekerja pada suatu struktur gedung. Besarnya beban gempa rencana ditentukan oleh peruntukan bangunan, jumlah tingkat, berat total bangunan, dan lokasi bangunan tersebut didirikan (berkaitan dengan zona gempa). Selain itu, kondisi tanah di lokasi pembangunan gedung juga berpengaruh terhadap besaran beban gempa rencana.

#### 2). Konfigurasi Gedung

Konfigurasi gedung mempunyai pengaruh yang cukup signifikan terhadap perilaku struktur dalam menerima beban gempa. Bagian dari konfigurasi gedung yang paling berpengaruh adalah sifat geometrisnya, di mana sifat geometris inilah yang menentukan suatu struktur diklasifikasikan sebagai struktur beraturan atau tidak beraturan. Menurut SNI 03-1726-2002, syarat geometris

dari suatu struktur gedung untuk diklasifikasikan sebagai struktur beraturan adalah memiliki denah yang simetris dalam arah horizontal dan vertikal.

#### 3). Daktilitas Struktur

Daktilitas struktur adalah kemampuan suatu struktur untuk terus berdeformasi plastis saat menerima beban yang melampaui batas elastisnya. Daktilitas ini memungkinkan perencanaan gedung yang ekonomis, tapi tetap tidak runtuh mendadak saat terjadi gempa kuat. Daktilitas struktur sangat bergantung kepada tipe sistem penahan gempa yang digunakan pada struktur tersebut. Karena setiap sistem penahan gempa memiliki tingkat deformasi yang beragam sesuai dengan prinsip kerjanya dan karakteristik material yang digunakan.

### 1.2. Analisis Pushover

Analisa *pushover* atau dikenal juga sebagai analisis beban dorong statik merupakan prosedur analisa yang dapat digunakan untuk mengetahui perilaku keruntuhan suatu bangunan terhadap gempa. Selain untuk struktur sederhana, analisa ini memerlukan program komputer untuk dapat digunakan. Salah satu program komputer yang memiliki fitur analisa *pushover built-in* di dalamnya adalah *SAP2000*.

Analisa dilakukan dengan memberikan suatu pola beban lateral statik pada struktur, yang kemudian secara bertahap ditingkatkan dengan faktor pengali sampai satu target perpindahan lateral dari suatu titik acuan tercapai. Biasanya titik acuan tersebut adalah suatu titik pada atap, atau lebih tepat lagi adalah pusat massa atap. Analisa *pushover* menghasilkan kurva *pushover*, kurva yang menggambarkan hubungan antara gaya geser dasar ( $V$ ) vs perpindahan titik acuan pada atap ( $D$ ). Pada proses *pushover*, struktur didorong sampai mengalami leleh di satu atau lebih lokasi pada struktur tersebut.

Tujuan analisa *pushover* adalah untuk memperkirakan gaya maksimum dan deformasi yang terjadi serta untuk memperoleh informasi bagian mana saja yang kritis. Selanjutnya dapat diidentifikasi bagian-bagian yang memerlukan perhatian khusus untuk pendetailan atau stabilitasnya. Analisa *pushover* dapat digunakan sebagai alat bantu perencanaan bangunan tahan gempa, tetapi dengan memperhatikan keterbatasan yang ada, yaitu:

- a) Hasil analisa beban dorong statik masih berupa suatu pendekatan. Karena bagaimanapun, perilaku gempa yang sebenarnya adalah bersifat bolak-balik melalui suatu siklus tertentu, sedangkan sifat pembebanan pada analisa beban dorong statik adalah statik monotonik.
- b) Pemilihan pola beban lateral yang digunakan dalam analisa sangatlah penting.
- c) Membuat model analisa nonlinier akan lebih rumit dibanding model analisa linier.

Hasil dari analisa *pushover* yang difokuskan dalam kajian ini adalah kurva *pushover* gaya geser dasar  $V$  vs perpindahan  $\delta$ , dan kurva kapasitas spektrum ATC-40.

#### 1). Gaya Geser Dasar, $V_T$

Gaya geser dasar  $V_T$  merupakan gaya geser dasar yang mengakibatkan terjadinya perpindahan sebesar perpindahan target. Gaya geser dasar  $V_T$  dapat digunakan untuk mengetahui kondisi struktur saat terjadi gempa rencana. Apabila gaya geser dasar akibat beban gempa rencana lebih kecil dari gaya geser dasar

$V_T (V_i > V_T)$ , berarti struktur telah mengalami kondisi inelastis saat terjadi gempa rencana. Sebaliknya jika gaya geser dasar akibat beban gempa rencana lebih besar dari gaya geser dasar  $V_T (V_i > V_T)$ , berarti struktur masih dalam kondisi elastis saat terjadi gempa rencana.

- 2). Sendi Plastis Yang Terbentuk  
Salah satu cara untuk mengetahui level kinerja struktur adalah melihat kinerja elemen-elemennya pada *step* di mana target perpindahan telah terlewati. Program *SAP2000* memiliki fitur ini secara *built-in*, pengguna bisa langsung mengetahui level kinerja hanya dengan mengamati sendi plastis yang terbentuk di tiap elemen.
- 3). Target perpindahan,  $\delta_T$   
Target perpindahan  $\delta_T$  dapat digunakan untuk menghitung *maximum total drift* yang kemudian bisa digunakan untuk menentukan level kinerja struktur secara keseluruhan. Batasan-batasan level kinerja struktur, mulai dari *Immediate Occupancy (IO)*, *Damage Control (DC)*, *Life Safety (LS)*, *Structural Stability (SS)*, berdasarkan *drift ratio* yang diberikan ATC-40 dapat dilihat pada Tabel 1 [15-17].

Tabel 1. Batasan *drift ratio*

Parameter	Performance Level			
	IO	DC	LS	SS
Maximum total drift	0,01	0,01 – 0,02	0,02	0,33
Maximum total inelastic drift	0,0005	0,005 – 0,015	No Limit	No Limit

- 4). Evaluasi kinerja struktur  
Kinerja struktur dapat dievaluasi berdasarkan syarat perpindahan ijin yang diberikan oleh SNI 1726:2012 Pasal 12.6.4.4, yaitu sebesar 2% dari tinggi total struktur. Target perpindahan hasil analisis *pushover* harus lebih kecil dari perpindahan ijin [18-20].

## 2. Metode Perencanaan

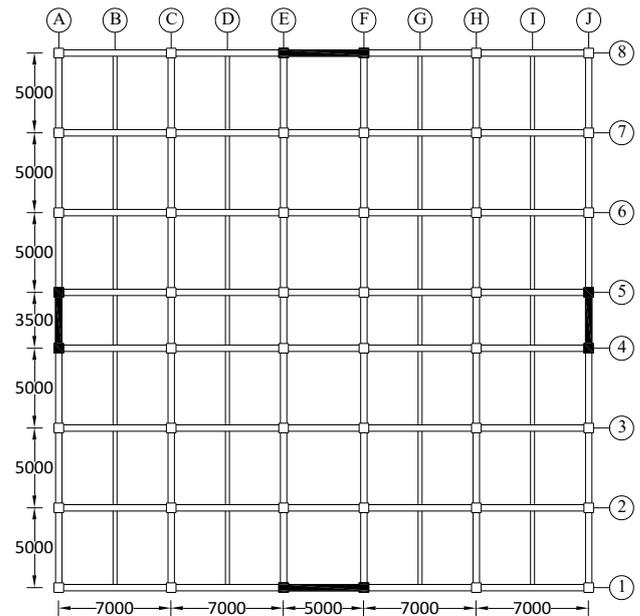
### 2.1. Data Perencanaan

Gedung yang direncanakan merupakan perkantoran berlantai 7 (tujuh) dengan tinggi lantai 4,0 meter. Sistem struktur atas yang digunakan adalah sistem ganda rangka beton bertulang pemikul momen khusus dan dinding geser beton bertulang khusus. Tipe kolom yang digunakan adalah kolom persegi dengan sengkang ikat, sedangkan untuk struktur bawah digunakan pondasi tiang bor (*bored pile*).

Material struktur yang digunakan terdiri dari beton dengan kuat tekan  $f'_c = 35$  MPa, baja tulangan polos *Grade 24* (BjTP 24,  $f_y = 235$  MPa), dan baja tulangan ulir *Grade 40* (BjTS 40,  $f_y = 390$  MPa). Denah dibuat sederhana dan simetris untuk menambah ketahanan terhadap gempa dengan mengurangi efek torsi. Denah gedung rencana dapat dilihat pada Gambar 1.

### 2.2. Metode Perencanaan

Langkah awal adalah perencanaan awal dan pemodelan struktur yang dilanjutkan dengan perhitungan beban gravitasi dan beban gempa.



Gambar 1. Denah Gedung

Kemudian dilakukan Analisa struktur dengan bantuan *SAP2000*. Hasil Analisa struktur dengan dengan perencanaan awal kemudian dikontrol ke ratio partisipasi massa, waktu getar alami, nilai respons spektrum, simpangan dan control sistim ganda. Apabila hasil disain struktur tidak memenuhi maka kembali ke langka perencanaan awal dan jika memenuhi maka dilanjutkan ke disain elemen struktur. Setelah proses disain elemen struktur selesai, maka lanjut ke evaluasi kinerja struktur dengan *pushover analysis*. Jika kinerja struktur tidak memenuhi maka perlu disain ulang elemen struktur, namun jika sudah memenuhi maka dilanjutkan ke gambar kerja.

## 3. Hasil dan Pembahasan

### 3.1. Estimasi Dimensi Elemen Struktur

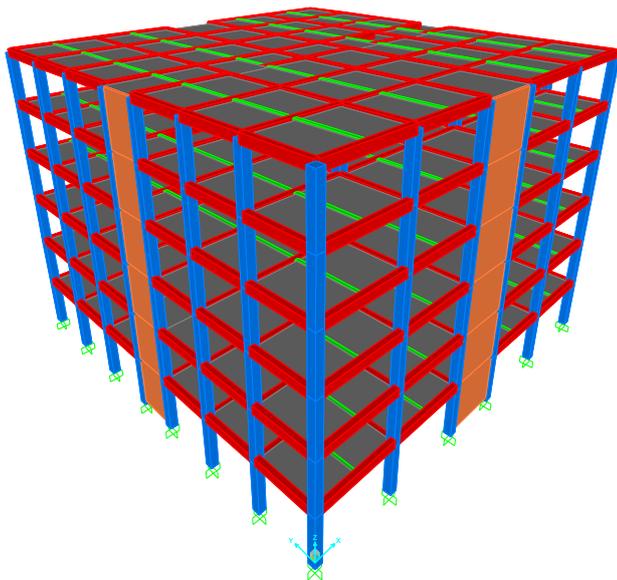
Estimasi dimensi elemen struktur yang akan dipakai dalam perencanaan, didasarkan pada hasil analisis terhadap dimensi minimumnya. Adapun dimensi elemen struktur tersebut adalah seperti yang diperlihatkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Dimensi elemen struktur

Elemen Struktur	Dimensi (mm)	Ket.
Balok	400 x 600	Balok Induk
	250 x 400	Balok Anak
Kolom	950 x 950	Seragam
Pelat	120 (Tebal)	Seragam
Dinding Geser	300 (Tebal)	Seragam

### 3.2. Pemodelan Struktur Tiga Dimensi

Pemodelan tiga dimensi struktur gedung berdasarkan dimensi elemen yang telah dihitung sebelumnya dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Tampilan 3D struktur gedung

3.3. Pembebanan Struktur

Beban-beban yang bekerja pada struktur meliputi beban gravitasi dan beban gempa. Beban gravitasi terdiri dari beban mati dan beban hidup, diuraikan seperti berikut:

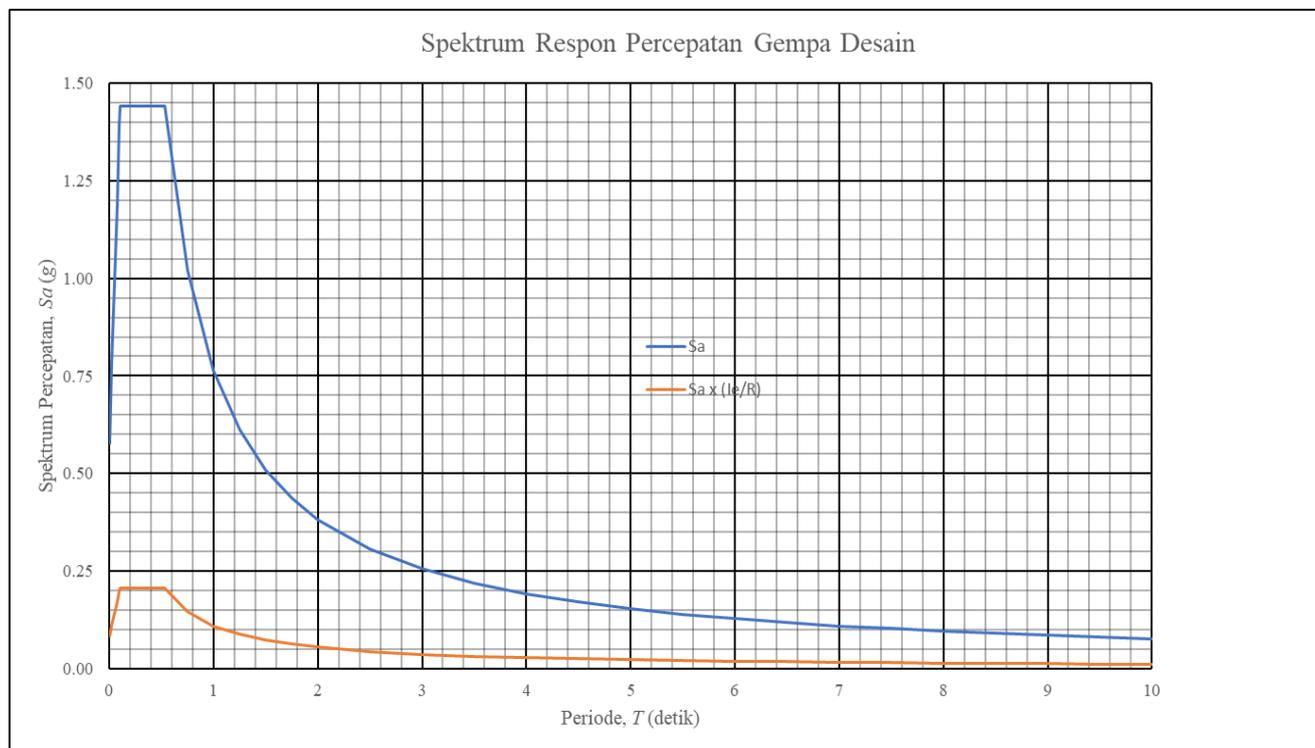
- 1). Beban mati (D)
  - Berat sendiri elemen struktural (dihitung secara otomatis oleh *SAP2000*).
  - Beban finishing pelat atap,  $Q = 1,93 \text{ kN/m}^2$
  - Beban finishing pelat lantai,  $Q = 1,41 \text{ kN/m}^2$
  - Beban dinding partisi,  $Q = 8,704 \text{ kN/m}$

- 2). Beban hidup (L)
  - Beban hidup pada atap,  $Q = 0,96 \text{ kN/m}^2$
  - Beban hidup pada lantai dasar,  $Q = 4,79 \text{ kN/m}^2$
  - Beban hidup pada lantai di atas lantai dasar,  $Q = 3,83 \text{ kN/m}^2$

Sementara itu, beban gempa rencana yang digunakan untuk mendesain dianalisis menggunakan metode analisis ragam spektrum respon. Parameter yang digunakan adalah sebagai berikut:

- Peruntukan gedung: Gedung Perkantoran
- Kategori resiko: II
- Faktor keutamaan gempa,  $I_e = 1,0$
- Klasifikasi situs: Tanah lunak, SE
- Nilai  $S_S = 2,164(g)$
- Nilai  $S_1 = 0,765(g)$
- Faktor  $F_a = 1,0$
- Faktor  $F_v = 1,5$
- Respon percepatan SMS =  $2,164(g)$
- Respon percepatan SM1 =  $1,148(g)$
- Respon percepatan SDS =  $1,443(g)$
- Respon percepatan SD1 =  $0,765(g)$
- Periode TS =  $0,530$  detik
- Periode T0 =  $0,106$  detik
- Kategori Desain Seismik: E
- Faktor daktilitas struktur,  $R = 7$

Grafik spektrum respon percepatan gempa yang dibuat sesuai dengan variabel-variabel di atas, dapat dilihat pada Gambar 3. Untuk mensimulasi kondisi ultimit pada struktur gedung yang direncanakan, digunakan kombinasi beban terfaktor, sebagaimana yang diperlihatkan dalam Tabel 3.



Gambar 3. Spektrum respon percepatan gempa desain

**Tabel 3.** Kombinasi Pembebanan

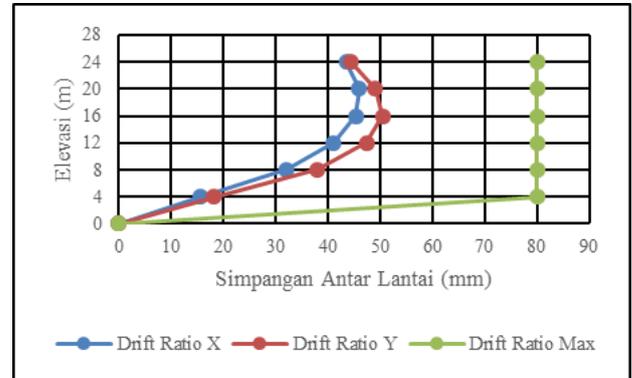
Kombinasi Beban
1,4D
1,2D + 1,6L
1,49D + 1,3Qx + 0,39Qy + 0,5L
1,49D + 0,39Qx + 1,3Qy + 0,5L
0,61D + 1,3Qx + 0,39Qy
0,61D + 0,39Qx + 1,3Qy

Keterangan:  
 D: Beban mati  
 L: Beban hidup  
 Qx: Beban gempa arah x  
 Qy: Beban gempa arah y

3.4. Hasil Analisis Struktur

Dari hasil analisis struktur menggunakan bantuan program *SAP2000* diperoleh bahwa ragam getar (*mode shape*) pertama dan kedua struktur saat dilakukan vibrasi bebas ialah didominasi oleh gerak translasi. Sementara itu, nilai rasio partisipasi massa yang diperoleh dari 18 ragam getar yang diikutsertakan dalam analisis mencapai 90% pada *mode shape* ke-4. Waktu getar alami fundamental yang dimiliki struktur adalah sebesar  $T = 0,494656$  detik.

Simpangan antar lantai terbesar yang terjadi pada struktur adalah pada sumbu Y, yaitu di lantai 4 sebesar 50,464 mm. Simpangan yang terjadi ini masih lebih kecil daripada simpangan antar lantai ijin sebesar 80 mm. Gambar 4 berikut memperlihatkan grafik simpangan antar lantai yang terjadi pada struktur.



**Gambar 4.** Simpangan antar lantai

Persentase antara reaksi dari perletakan dinding geser maupun dari perletakan kolom (perletakan sistem rangka pemikul momen) untuk semua kombinasi pembebanan yang mengandung beban gempa dapat dilihat pada Tabel 4.

**Tabel 4.** Persentase reaksi SRPMK dan dinding geser

Kombinasi	Persentase			
	Arah X		Arah Y	
	SRPMK	Dinding Geser	SRPMK	Dinding Geser
3	55,827	44,173	62,578	37,422
4	54,442	45,558	63,499	36,501
5	55,827	44,173	62,578	37,422
6	54,442	45,558	63,499	36,501

Berdasarkan Tabel 4 dapat dilihat bahwa untuk semua kombinasi pembebanan yang mengandung beban gempa, persentase dari sistem rangka pemikul momen khusus (SRPMK) nilainya lebih besar dari 25%. Hal ini berarti konfigurasi struktur gedung telah memenuhi syarat sebagai struktur sistem ganda sesuai dengan SNI 1726:2012 Pasal 7.2.5.1.

3.5. Hasil Desain Elemen Struktur

Berikut adalah hasil desain elemen struktur untuk struktur gedung yang direncanakan:

- 1). Penulangan pelat  
 Penulangan pelat yang diperoleh dari hasil desain adalah digunakan tulangan lentur Ø12-200 untuk arah memanjang dan memendek pelat.
- 2). Penulangan balok  
 Tulangan balok ditinjau untuk daerah tumpuan positif dan negatif, serta untuk daerah lapangan. Jumlah tulangan terbanyak diperoleh pada balok lantai 3, dengan 12D22 untuk daerah tumpuan negatif, 10D22 untuk daerah tumpuan positif, dan 5D22 untuk daerah lapangan. Penulangan geser balok yang terbesar juga ada pada balok di lantai 3, yaitu Ø14-45 pada daerah sendi plastis.

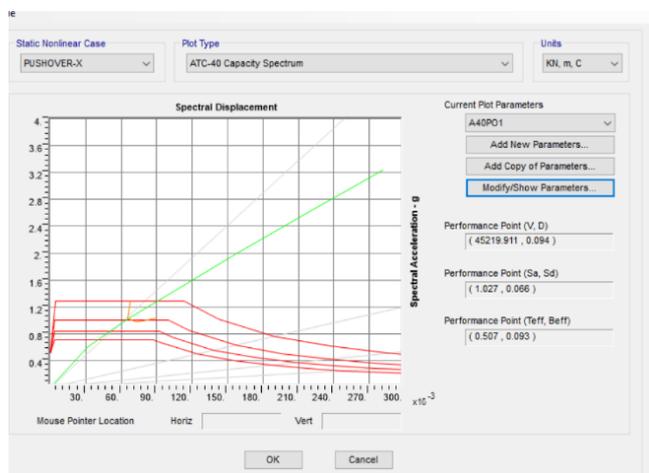
- 3). Penulangan kolom  
 Dari hasil desain, tulangan longitudinal kolom terbanyak terdapat pada salah satu kolom di lantai 1, yaitu 28D25. Sedangkan untuk tulangan geser kolom digunakan 4Ø14-50 untuk daerah  $l_o$  dan 3Ø14-150 untuk daerah di luar  $l_o$ .
- 4). Penulangan *joint*  
 Untuk *joint*, dipasang tulangan transversal yang sama dengan tulangan transversal kolom pada daerah  $l_o$  yaitu 4Ø14-50.
- 5). Penulangan dinding geser  
 Untuk dinding geser arah x, digunakan tulangan 20D25 pada komponen batas dan 2D22-175 pada bagian badan dinding geser. Sedangkan untuk dinding geser arah y, digunakan tulangan 20D25 pada komponen batas dan 2D22-125 pada bagian badan dinding geser.
- 6). Struktur bawah  
 Tipe struktur bawah (pondasi) yang digunakan ialah pondasi *bored pile* berdiameter 500 mm, dengan 6 buah *bored pile* untuk masing-masing ujung kolom di lantai dasar, 12 buah *bored pile* untuk masing-masing ujung dinding geser arah x, dan 10 buah *bored pile* untuk masing-masing ujung dinding geser arah y. Jumlah tulangan longitudinal *bored pile* yang diperoleh dari

hasil perencanaan ialah 7D19. *Bored pile* disatukan oleh sebuah *pile cap* dengan ketebalan 500 mm dan dimensi 3000 mm × 2000 mm untuk *pile cap* di ujung kolom, 7000 mm × 2000 mm untuk *pile cap* di ujung dinding geser arah x, dan 5500 mm × 2000 mm untuk *pile cap* di ujung dinding geser arah y. Sementara itu, untuk menghubungkan semua *pile cap*, digunakan balok pengikat (*tie beam*) dengan dimensi 40/55.

3.6. Hasil Analisis Pushover

1). Pushover Arah X

Hasil analisis *pushover* arah x mengindikasikan target perpindahan  $\delta_T = 0,094\text{m}$  dan gaya geser dasar  $V_T = 45219,111\text{ kN}$  (Gambar 5). Tabel 5 memperlihatkan parameter-parameter hasil analisis *pushover* arah x program SAP2000.

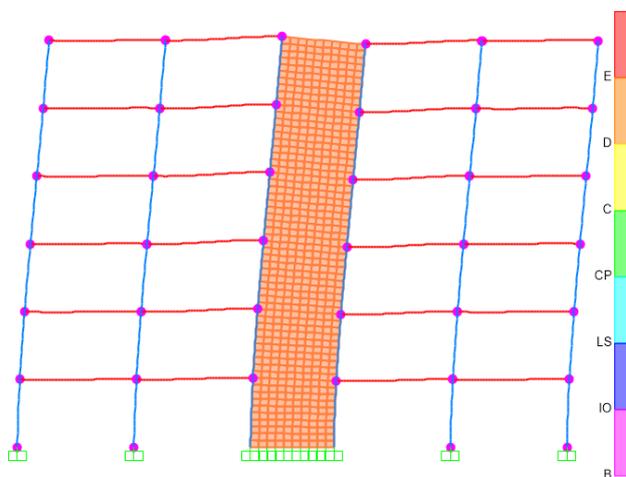


Gambar 5. Kurva spektrum kapasitas Pushover arah x

Berdasarkan Gambar 5 diperoleh target perpindahan untuk *pushover* arah x,  $\delta_T = 0,094\text{ m}$ . Dari Tabel 5 dapat dilihat bahwa pada step 2 di mana  $\delta = 0,095\text{ m} > \delta_T$ , kinerja yang diperlihatkan elemen struktur paling kritis berada pada level *Immediate Occupancy (IO)*, tidak ada yang melewati batas *Life Safety (LS)*. Sedangkan *maximum total drift* dari struktur gedung adalah:

$$\text{Maximum total drift} = \frac{\delta_T}{H_{total}} = \frac{0,094}{24,0} = 0,00392$$

Berdasarkan batasan *drift ratio* yang diberikan oleh ATC-40 (dapat dilihat di Tabel 1), kinerja gedung termasuk dalam level *Immediate Occupancy (IO)*. Kinerja struktur arah x pada step 2 dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Kinerja struktur arah x pada Step 2

Tabel 5. Parameter hasil analisis Pushover arah x

Step	$\delta$ m	Base Force kN	A-B	B-IO	IO-LS	LS-CP	CP-C	C-D	D-E	>E	Total
0	0,000	0	1848	0	0	0	0	0	0	0	1848
1	0,045	26920,447	1830	18	0	0	0	0	0	0	1848
2	0,095	45573,677	1344	504	0	0	0	0	0	0	1848
3	0,167	68443,672	1272	576	0	0	0	0	0	0	1848
4	0,227	86981,769	1218	592	38	0	0	0	0	0	1848
5	0,275	101589,282	1196	378	274	0	0	0	0	0	1848
6	0,323	116122,430	1160	330	358	0	0	0	0	0	1848
7	0,371	130477,577	1132	296	420	0	0	0	0	0	1848
8	0,406	141016,954	1118	302	424	0	0	0	0	0	1848

2). Pushover Arah Y

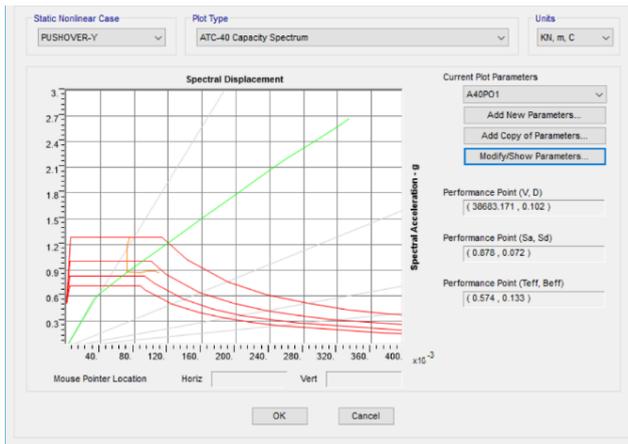
Dari hasil analisis *pushover* arah y didapatkan target perpindahan  $\delta_T = 0,102\text{m}$  dan gaya geser dasar  $V_T = 38683,171\text{ kN}$ . Tabel 6 memperlihatkan parameter-parameter hasil analisis *pushover* arah y program SAP2000.

Berdasarkan Gambar 7 diperoleh target perpindahan untuk *pushover* arah y,  $\delta_T = 0,102\text{ m}$ . Dari Tabel 6 dapat dilihat bahwa pada step 4 di mana  $\delta = 0,181\text{ m} > \delta_T$ , kinerja yang diperlihatkan elemen struktur paling kritis berada pada level *life safety*, tidak ada yang melewati

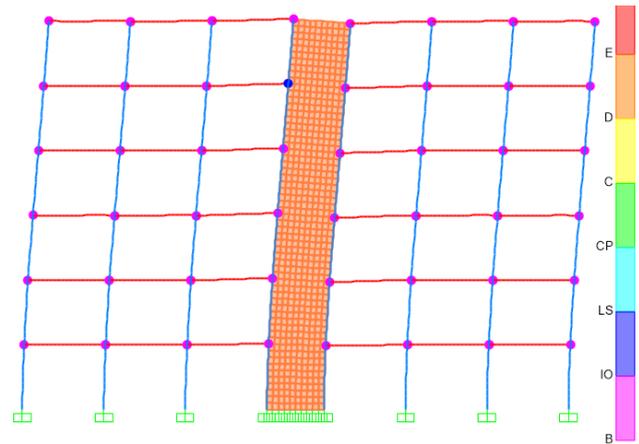
batas *Life Safety (LS)*. Sedangkan *maximum total drift* dari struktur gedung adalah:

$$\text{Maximum total drift} = \frac{\delta_T}{H_{total}} = \frac{0,102}{24,0} = 0,00425$$

Berdasarkan batasan *drift ratio* yang diberikan oleh ATC-40 (dapat dilihat di Tabel 1), kinerja gedung termasuk dalam level *Immediate Occupancy (IO)*. Kinerja struktur arah y pada *step 4* dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 7. Kurva spektrum kapasitas *Pushover* arah y



Gambar 8. Kinerja struktur arah y pada step 4

Tabel 6. Parameter hasil analisis *pushover* arah y

Step	$\delta$ m	Base Force kN	A-B	B-IO	IO-LS	LS-CP	CP-C	C-D	D-E	>E	Total
0	0,000	0	1848	0	0	0	0	0	0	0	1848
1	0,045	25644,007	1838	10	10	0	0	0	0	0	1848
2	0,051	27881,584	1432	416	416	0	0	0	0	0	1848
3	0,101	38354,617	1156	692	692	0	0	0	0	0	1848
4	0,181	54843,388	1054	792	792	0	0	0	0	0	1848
5	0,229	64674,726	1030	746	746	0	0	0	0	0	1848
6	0,277	74472,633	1006	514	514	0	0	0	0	0	1848
7	0,326	84260,538	992	452	452	0	0	0	0	0	1848
8	0,373	94046,088	990	406	406	0	0	0	0	0	1848

3). Evaluasi kinerja struktur

Berdasarkan SNI 1726:2012 Pasal 12.6.4.4, ditentukan batasan perpindahan yang diijinkan:

- $2\% H_{total} = 2\% \cdot 24,0 = 0,48 \text{ m}$
- Cek target perpindahan *pushover* arah X dan Y terhadap  $2\% H_{total}$ :
- Arah X  $\Rightarrow \delta_T = 0,094 \text{ m} < 0,48 \text{ m}$  (memenuhi)
- Arah Y  $\Rightarrow \delta_T = 0,102 \text{ m} < 0,48 \text{ m}$  (memenuhi)

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis struktur dan desain yang telah dilakukan sebelumnya, penulis dapat mengambil kesimpulan sebagai berikut:

- 1) Rasio partisipasi massa struktur gedung pada ragam pertama dan kedua yang terbesar adalah gerak translasi sumbu Y, sebesar 74%.
- 2) Jumlah ragam yang digunakan dalam analisis ragam getar sudah mencapai persyaratan partisipasi massa ragam terkombinasi minimal 90%, pada ragam ke-5 untuk sumbu X dan ragam ke-4 untuk sumbu Y.
- 3) Simpangan antar lantai terbesar yang terjadi pada struktur gedung adalah pada pada lantai 4, yaitu sebesar 50,464 mm yang masih kurang dari simpangan antar lantai ijin sebesar 100 mm.
- 4) Model struktur dengan sistem ganda: sistem rangka pemikul momen khusus (SRPMK) dan dinding struktural. Untuk semua kombinasi pembebanan dengan beban gempa, persentase reaksi dari sistem rangka

pemikul momen khusus (SRPMK) nilainya lebih besar dari 25%. Hal ini berarti konfigurasi struktur gedung telah memenuhi syarat sebagai struktur sistem ganda.

5) Hasil dari desain elemen-elemen struktur atas adalah sebagai berikut:

- a) Pelat dengan tebal 120 mm baik pada atap maupun pada lantai, yang dipasang tulangan lentur  $\varnothing 12-200$ .
- b) Dimensi balok yang digunakan adalah 40/60 untuk balok induk, dan 25/40 untuk balok anak. Penulangan lentur balok yang terbesar ada pada balok di lantai 3, dengan 12D22 untuk daerah tumpuan negatif, 10D22 untuk tumpuan positif dan 5D22 untuk daerah lapangan. Penulangan geser balok yang terbesar juga ada pada balok di lantai 3, yaitu  $\varnothing 14-45$  pada daerah sendi plastis.
- c) Dimensi kolom yang digunakan seragam, yaitu 95/95. Tulangan longitudinal terbesar kolom adalah 28D25, pada salah satu tipe kolom di lantai dasar. Tulangan geser seragam untuk semua kolom, yaitu  $\varnothing 14-50$  pada daerah sendi plastis. Hasil desain ini telah memenuhi persyaratan *strong column - weak beam* berdasarkan hasil pemeriksaan.
- d) Titik pertemuan balok – kolom (*joint*) memiliki kekuatan nominal yang lebih besar dibandingkan balok dan kolom yang dihubungkannya. Tulangan geser yang digunakan untuk *joint* sama dengan pada daerah sendi plastis kolom, yaitu  $\varnothing 14-50$ .
- e) Tebal dinding geser yang digunakan untuk dinding geser arah X dan Y sama, yaitu 300 mm. Penulangan

dinding geser yang terbesar adalah pada dinding geser arah Y, dengan 20D25 pada komponen batas dan 2D22-125 pada bagian badan dinding geser.

- 6) Hasil analisis *pushover* pada struktur gedung menggunakan program *SAP2000* adalah sebagai berikut:
- Untuk *pushover* arah X didapatkan target perpindahan  $\delta_T = 0,094$  m dan gaya geser dasar VT = 45219,111 kN.
  - Untuk *pushover* arah Y didapatkan target perpindahan  $\delta_T = 0,102$  m dan gaya geser dasar VT = 38683,171 kN.
  - Untuk *pushover* arah X, dari hasil pemeriksaan kinerja elemen struktur didapatkan yang paling kritis adalah pada level *Immediate Occupancy (IO)*. Sedangkan kinerja struktur secara keseluruhan berdasarkan *maximum total drift* = 0,00392 < 0,01 juga berada pada level *Immediate Occupancy (IO)*.
  - Untuk *pushover* arah Y, dari hasil pemeriksaan kinerja elemen struktur didapatkan yang paling kritis adalah pada level *Life Safety (LS)*. Sedangkan kinerja struktur secara keseluruhan berdasarkan *maximum total drift* = 0,00425 < 0,01 berada pada level *Immediate Occupancy (IO)*.
  - Perpindahan yang diijinkan berdasarkan SNI 1726:2012 adalah 0,48 m. Target perpindahan *pushover* arah X dan arah Y memenuhi syarat kurang dari perpindahan yang diijinkan.

#### Daftar Pustaka

- M.A. Sultan, "Evaluasi Struktur Beton Bertulang Tahan Gempa Dengan Analisa Pushover", *Jurnal Sipil Sains*, vol. 6, no. 11, p.1, 2016.
- Y. Christian, *Desain Gedung dengan Sistem Ganda Rangka Pemikul Momen Khusus dan Dinding Geser Berdasarkan SNI-03-1726-2012 dengan Metode Pushover Analysis*, Palu: Universitas Tadulako, 2016.
- R. Purwono, *Perencanaan Struktur Beton Bertulang Tahan Gempa: Sesuai SNI-1726 dan SNI-2847 Terbaru (Edisi Keempat)*, Surabaya: ITS Press. Surabaya, 2010.
- SNI 03-1726-2002, *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Bangunan Gedung*, Jakarta: Badan Standardisasi Nasional, 2002.
- SNI 1726:2012, *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung*, Jakarta: Badan Standardisasi Nasional, 2012.
- S. Setiawan, *Perancangan Struktur Beton Bertulang: Berdasarkan SNI 2847:2013*, Jakarta: Penerbit Erlangga, 2016.
- SNI 03-1727-1989, *Pedoman Perencanaan Pembebanan Untuk Rumah dan Gedung*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional, 1989.
- SNI 03-6816-2002, *Tata Cara Pendetailan Penulangan Beton*, Jakarta: Badan Standardisasi Nasional, 2002.
- A. Nasution, *Analisis dan Desain Struktur Beton Bertulang*, Bandung: ITB Press, 2009.
- M. Zachari and G. Turuallo, "Analisis Struktur Baja Tahan Gempa dengan Sistem SRPMK (Struktur Rangka Pemikul Momen Khusus) Berdasarkan SNI 1729:2015 dan SNI 1726:2012", *RTCEJRD*, vol. 1, no. 2, p. 9, 2020.
- W. Dewobroto, "Evaluasi Kinerja Struktur Baja Tahan Gempa dengan Analisa Pushover" *Prosiding Civil Engineering National Conference: Sustainability Construction & Structural Engineering Based on Professionalism*, p. 1, 2005.
- M.H. Fadli and R. Andayani, R., "Analisis Karakteristik Dinamik Ragam Fundamental Struktur Tower Kembar Berpodium Terhadap Gempa" *Prosiding PESAT*, vol. 6, p. 1, 2015.
- F. Ardianto, *Perencanaan Struktur Bangunan Gedung Tahan Gempa (Analisis Beban Gempa Menggunakan Metode Analisis Riwayat Waktu)*, Palu: Universitas Tadulako, 2015.
- B. Budiono and L. Supriatna, *Studi Komparasi Desain Bangunan Tahan Gempa Dengan Menggunakan SNI 03-1726-2002 dan RSNI 03-1726-201x*, Bandung: Institut Teknologi Bandung, 2011
- FEMA-273, *NEHRP Guidelines for The Seismic Rehabilitation of Buildings*. Washington: Federal Emergency Management Agency, 1997.
- FEMA-274, *NEHRP Commentary on The Guidelines for The Seismic Rehabilitation of Buildings*, Washington, Federal Emergency Management Agency. 1997.
- FEMA-356, *Prestandard and Commentary for The Seismic Rehabilitation of Buildings*. Washington, Federal Emergency Management Agency, 2000.
- N.R. Afandi, *Evaluasi Kinerja Seismik Struktur Beton dengan Analisis Pushover Menggunakan Program SAP2000*, Surakarta: Universitas Sebelas Maret, 2010
- Tavio and B. Kusuma, *Desain Sistem Rangka Pemikul Momen dan Dinding Struktur Beton Bertulang Tahan Gempa*, Surabaya: ITS Press, 2009.
- Z. Arifin, Suyadi, and S. Sebayang, "Analisis Struktur Gedung POP Hotel Terhadap Beban Gempa dengan Metode Pushover Analysis", *JRSDD*, vol. 3, no. 3, p. 427, 2015.