

# Analisis Perbedaan Dimensi Bangunan Bertingkat Terhadap Beban Gempa Dengan Analisis Pushover Menggunakan Program Sap2000

Sigit Ardianto<sup>1\*</sup>, Lely Hendarti<sup>2</sup>, Briant Sabathino Harya Wibowo<sup>3</sup>, Sukoco<sup>4</sup>

<sup>1-4</sup> Universitas Surakarta, Surakarta, Indonesia

Corresponding Author's e-mail : sigitardianto022@gmail.com



e-ISSN: 2964-2981

ARMADA : Jurnal Penelitian Multidisiplin

<https://ejournal.45mataram.ac.id/index.php/armada>

Vol. 04, No. 01 January, 2026

Page: 62-77

DOI:

<https://doi.org/10.55681/armada.v4i1.1893>

## Article History:

Received: November 22, 2025

Revised: Desember 30, 2025

Accepted: January 16, 2026

**Abstract:** Boyolali, Central Java, is an earthquake-prone area, making structural resilience analysis crucial. This study aims to evaluate the seismic performance of the PKU Dr. Soemowidagdo Boyolali General Hospital building using the SAP2000 software-based pushover analysis method in accordance with ATC-40 standards. The study focuses on the structure's capacity to withstand earthquake loads, the formation pattern of plastic hinges, and determining the building's performance level. The analysis results indicate that the first plastic hinges appear at the third step in the X and Y directions. The maximum resisting capacity is 12,582.126 kN with a displacement of 0.181322 m for push X, and 10,870.354 kN with a displacement of 0.239292 m for push Y. Based on the ATC-40 drift ratio limits, the structure reaches the Damage Control (DC) level, meaning the building can still withstand earthquake forces with minor damage and reduced stiffness, while still maintaining an adequate safety margin.

**Keywords:** Earthquake, Pushover analysis, Structural performance

**Abstrak :** Boyolali, Jawa Tengah, merupakan wilayah rawan gempa sehingga analisis ketahanan struktur bangunan menjadi sangat penting. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kinerja seismik gedung RSUD PKU Dr. Soemowidagdo Boyolali dengan metode pushover analysis berbasis perangkat lunak SAP2000 sesuai standar ATC-40. Fokus kajian meliputi kapasitas struktur terhadap beban gempa, pola terbentuknya sendi plastis, serta penentuan level kinerja bangunan. Hasil analisis menunjukkan sendi plastis pertama muncul pada langkah ke-3 dari arah X dan Y. Kapasitas maksimum yang mampu ditahan adalah 12.582,126 kN dengan perpindahan 0,181322 m untuk push X, dan 10.870,354 kN dengan perpindahan 0,239292 m untuk push Y. Berdasarkan batasan rasio drift ATC-40, struktur mencapai level Damage Control (DC), artinya gedung masih dapat menahan gaya gempa dengan kerusakan ringan dan penurunan kekakuan, namun tetap memiliki margin keamanan yang memadai.

**Kata Kunci :** Gempa, Pushover analysis, Kinerja struktur

## PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu negara yang memiliki tingkat aktivitas seismik yang tinggi karena terletak pada pertemuan beberapa lempeng tektonik utama dunia, yaitu lempeng Indo-Australia, Eurasia, dan Pasifik. Interaksi subduksi dan sesar aktif di kawasan ini menyebabkan tingkat bahaya gempa yang kompleks dan signifikan (Widiyantoro *et al.*, 2020; Cummins, 2021). Kondisi tersebut menyebabkan sebagian besar wilayah Indonesia berpotensi mengalami gempa bumi dengan intensitas yang bervariasi, sehingga perencanaan struktur bangunan tahan gempa menjadi hal yang sangat penting dalam konteks mitigasi risiko bencana (Silva *et al.*, 2020; Tesfamariam & Goda, 2021). Bangunan gedung tidak hanya dituntut mampu menahan beban gravitasi, tetapi juga harus memiliki kinerja yang baik terhadap beban lateral akibat gempa agar tidak mengalami keruntuhan yang dapat menimbulkan korban jiwa maupun kerugian material (Mwafy *et al.*, 2020; Shrestha *et al.*, 2022). Oleh karena itu, analisis kinerja struktur terhadap beban gempa perlu dilakukan secara lebih mendalam, terutama untuk bangunan dengan fungsi vital seperti rumah sakit (Kazemi *et al.*, 2021).

Rumah sakit merupakan bangunan dengan kategori risiko tinggi karena harus tetap beroperasi setelah terjadi gempa. Penelitian menunjukkan bahwa kegagalan struktural maupun non-struktural pada fasilitas kesehatan dapat mengganggu layanan medis pascagempa secara signifikan (Zhong *et al.*, 2022; Ferreira *et al.*, 2021). Fungsi pelayanan kesehatan yang berlangsung secara terus-menerus menuntut struktur bangunan memiliki tingkat keandalan yang lebih tinggi dibandingkan dengan bangunan biasa (Cimellaro *et al.*, 2020; Aljawhari *et al.*, 2020). Kerusakan pada struktur rumah sakit tidak hanya berdampak pada kerugian fisik bangunan, tetapi juga dapat mengganggu pelayanan medis yang sangat dibutuhkan pada kondisi darurat pascagempa (Kazemi *et al.*, 2021; Shrestha *et al.*, 2022). Dengan demikian, evaluasi kinerja struktur bangunan rumah sakit terhadap beban gempa menjadi sangat penting untuk memastikan bahwa bangunan tersebut memenuhi kriteria keselamatan, kenyamanan, dan keberlanjutan fungsi.

Perkembangan teknologi analisis struktur saat ini memungkinkan dilakukan evaluasi perilaku struktur secara lebih akurat melalui analisis berbasis kinerja (*performance-based design*) (Zareian & Krawinkler, 2020; Rai & Singh, 2020). Salah satu metode yang banyak digunakan dalam mengevaluasi kinerja seismik struktur adalah analisis pushover (Kalkan & Chopra, 2021; Dya & Oreta, 2022). Analisis ini merupakan analisis statik nonlinier yang dilakukan dengan memberikan beban lateral secara bertahap hingga struktur mencapai kondisi plastis (Azimi & Peyghaleh, 2021; Hajirasouliha & Pilakoutas, 2020). Melalui analisis pushover, dapat diketahui kapasitas struktur, pola terbentuknya sendi plastis, hubungan antara gaya geser dasar dan perpindahan (*capacity curve*), serta tingkat kinerja struktur berdasarkan titik kinerja (*performance point*) (Nouri & Tavakoli, 2022; Ozturk & Turk, 2023). Metode ini memberikan gambaran yang lebih realistis mengenai perilaku struktur saat mengalami gempa kuat dibandingkan dengan analisis linier elastis (Chopra & Goel, 2020; Mwafy *et al.*, 2020).

Selain analisis pushover, analisis dinamik respons spektrum juga digunakan untuk mengetahui respons struktur terhadap pengaruh gempa berdasarkan karakteristik dinamik bangunan (Nguyen *et al.*, 2021; Pitilakis *et al.*, 2020). Analisis ini mempertimbangkan faktor periode getar alami struktur, redaman, serta kondisi tanah setempat yang sangat mempengaruhi besar kecilnya respons gempa yang diterima oleh struktur (Shrestha *et al.*, 2022; Silva *et al.*, 2020). Dengan menggunakan respons spektrum, gaya gempa rencana dapat dihitung secara lebih representatif sesuai dengan kondisi lokasi bangunan (Mwafy *et al.*, 2020). Hasil analisis respons spektrum kemudian digunakan sebagai dasar dalam mengevaluasi gaya dalam, simpangan antar lantai, serta partisipasi massa struktur pada setiap ragam getar (Kazemi *et al.*, 2021).

Pemodelan struktur merupakan tahapan penting dalam proses analisis karena akan sangat mempengaruhi hasil yang diperoleh (Dya & Oreta, 2022). Pemodelan struktur tiga dimensi memberikan representasi perilaku yang lebih mendekati kondisi sebenarnya karena mampu menggambarkan interaksi antar elemen struktur secara menyeluruh (Azimi & Peyghaleh, 2021; Ozturk & Turk, 2023). Balok dan kolom umumnya dimodelkan sebagai elemen frame yang mampu menerima gaya aksial, momen, dan geser, sedangkan pelat lantai dan pelat atap dimodelkan sebagai elemen shell yang berfungsi mendistribusikan beban secara dua arah serta memberikan kekakuan diafragma terhadap sistem struktur (Nouri & Tavakoli, 2022). Beban dinding dalam pemodelan sering kali disederhanakan sebagai beban merata yang bekerja pada balok untuk

mempermudah analisis tanpa mengurangi tingkat ketelitian hasil (Hajirasouliha & Pilakoutas, 2020).

Dalam perencanaan struktur tahan gempa, terdapat beberapa parameter penting yang harus diperhatikan, antara lain kategori risiko bangunan, faktor keutamaan gempa, jenis tanah, serta parameter percepatan spektral (Tsfamariam & Goda, 2021; Pitilakis et al., 2020). Bangunan rumah sakit termasuk dalam kategori bangunan penting yang memiliki faktor keutamaan gempa lebih besar dari satu, sehingga gaya gempa rencana yang bekerja menjadi lebih besar dibandingkan dengan bangunan biasa (Kazemi et al., 2021). Jenis tanah juga sangat berpengaruh terhadap respons struktur karena tanah lunak cenderung memperbesar amplitudo getaran akibat gempa (Nguyen et al., 2021). Oleh karena itu, penggunaan data parameter gempa yang sesuai dengan kondisi lokasi menjadi hal yang sangat penting dalam menghasilkan analisis yang akurat.

Evaluasi kinerja struktur tidak hanya dilihat dari kekuatan struktur dalam menahan gaya gempa, tetapi juga dari kemampuan struktur dalam mengontrol deformasi. Simpangan antar lantai (interstory drift) merupakan salah satu parameter yang digunakan untuk menilai tingkat kenyamanan dan keamanan bangunan saat terjadi gempa (Shrestha et al., 2022; Mwafy et al., 2020). Nilai drift yang terlalu besar dapat menyebabkan kerusakan pada elemen non-struktural seperti dinding, plafon, dan instalasi mekanikal elektrik, meskipun struktur utama belum mengalami keruntuhan (Zhong et al., 2022). Oleh karena itu, kontrol terhadap simpangan menjadi bagian penting dalam perencanaan struktur tahan gempa.

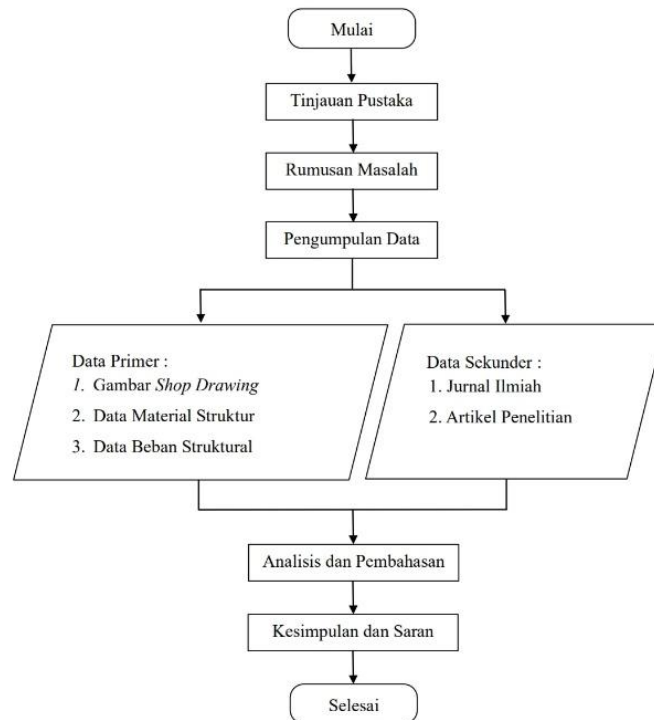
Penelitian mengenai evaluasi kinerja struktur gedung rumah sakit melalui analisis respons spektrum dan analisis pushover menjadi sangat relevan untuk dilakukan. Dengan mengetahui tingkat kinerja struktur, dapat dievaluasi apakah bangunan telah memenuhi kriteria Immediate Occupancy (IO), Life Safety (LS), atau Collapse Prevention (CP) (Zareian & Krawinkler, 2020; Rai & Singh, 2020). Hasil evaluasi ini dapat digunakan sebagai dasar dalam menentukan apakah struktur masih aman, memerlukan perkuatan, atau perlu dilakukan perencanaan ulang agar memenuhi standar keselamatan yang berlaku (Ozturk & Turk, 2023).

Berdasarkan uraian tersebut, maka dilakukan analisis kinerja struktur gedung RSUD Dr. Soemowidagdo dengan menggunakan metode analisis dinamik respons spektrum dan analisis statik nonlinier pushover. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik dinamik struktur, kapasitas struktur dalam menahan beban gempa, pola terbentuknya sendi plastis, serta tingkat kinerja struktur berdasarkan titik kinerja yang diperoleh. Dengan adanya penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai tingkat keandalan struktur gedung rumah sakit terhadap beban gempa serta menjadi referensi dalam perencanaan dan evaluasi bangunan tahan gempa, khususnya untuk bangunan dengan fungsi vital.

Selain itu, hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan ilmu teknik sipil, khususnya dalam bidang rekayasa struktur tahan gempa berbasis kinerja. Pendekatan analisis yang digunakan dapat menjadi acuan dalam melakukan evaluasi terhadap bangunan eksisting maupun dalam perencanaan bangunan baru agar memiliki tingkat keselamatan yang lebih baik. Dengan demikian, upaya mitigasi risiko bencana gempa melalui perencanaan struktur yang tepat dapat diwujudkan secara lebih optimal.

## METODE

Penelitian menggunakan metode deskriptif kuantitatif dengan pendekatan analisis pushover berbantuan perangkat lunak SAP2000 V.22. Data yang dikumpulkan terdiri dari data primer berupa gambar kerja (shop drawing), data material struktur, dan data beban bangunan, serta data sekunder berupa jurnal, artikel, dan literatur terkait. Alat yang digunakan meliputi komputer/laptop, SAP2000, dan Microsoft Word untuk pengolahan serta penyusunan laporan. Tahapan penelitian mencakup survei lokasi, pengumpulan data, pengolahan data, dan analisis struktur. Analisis dilakukan dengan membuat model struktur 3D, menghitung pembebanan, menganalisis respons pushover, serta mengevaluasi titik kinerja dan rasio drift untuk menentukan tingkat keamanan struktur. Hasil analisis digunakan sebagai dasar penarikan kesimpulan mengenai kinerja seismik bangunan rumah sakit tersebut.



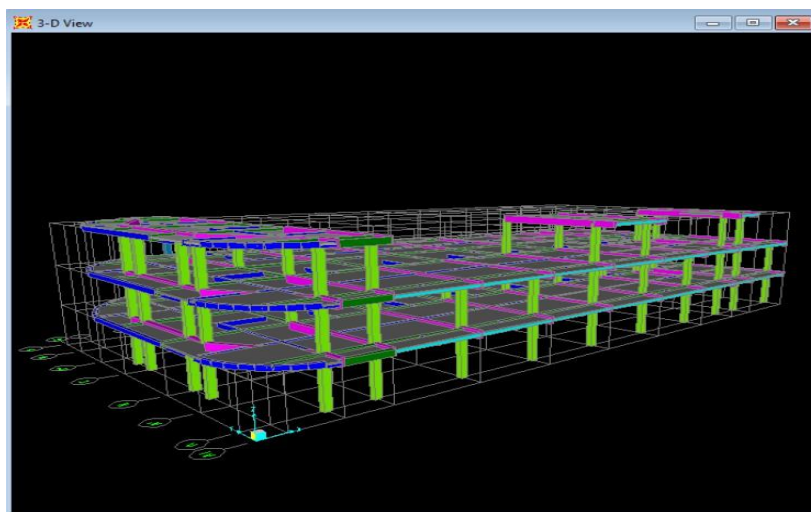
Gambar 1. Bagan alir penelitian

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Hasil

#### 1. Pemodelan Struktur Gedung Pada SAP2000

Pemodelan struktur bangunan gedung dalam program SAP 2000 pada prinsipnya hasil yang disajikan bukanlah hasil mutlak seperti kondisi riil di lapangan, melainkan masih berupa pendekatan yang mana intuisi seorang *Engineer* memiliki peran besar dalam menghasilkan output yang lebih valid. Secara garis besar pengguna dituntut melakukan pemodelan yang cukup mempresentasikan kondisi riil di lapangan agar hasil yang diperoleh dapat dijadikan tolak ukur. Pemodelan struktur gedung RSUD. PKU Dr. Soemowidagdo Boyolali dapat dilihat pada gambar 4.1 sebagai berikut.



Gambar 2. Pemodelan Struktur Pada Program SAP 2000

## 2. Klasifikasi Bangunan

### a. Konfigurasi Gedung

Konfigurasi gedung pada proyek ini terdiri atas tiga lantai dengan tinggi masing-masing lantai sebesar 4 meter. Lantai pertama memiliki elevasi setinggi 4 meter dari permukaan dasar, lantai kedua mencapai ketinggian 8 meter, dan lantai ketiga mencapai ketinggian total bangunan sebesar 12 meter. Dengan demikian, total tinggi bangunan adalah 12 meter yang dihitung secara kumulatif dari setiap lantai. Data konfigurasi gedung ini diperoleh berdasarkan data teknis proyek yang digunakan sebagai acuan dalam perencanaan struktur.

**Tabel 1.** Konfigurasi Gedung

| No. | Lantai   | Tinggi Lantai (m) | Tinggi Bangunan (m) |
|-----|----------|-------------------|---------------------|
| 1   | Lantai 1 | 4                 | 4                   |
| 2   | Lantai 2 | 4                 | 8                   |
| 3   | Lantai 3 | 4                 | 12                  |

(Sumber: Data teknis proyek)

### b. Mutu dan Bahan

Mutu material yang digunakan pada struktur bangunan ini meliputi mutu beton dan mutu baja tulangan. Mutu beton yang digunakan adalah sebesar  $f'_c = 21,7$  MPa yang setara dengan beton K-250. Sementara itu, mutu baja tulangan yang digunakan terdiri atas dua jenis, yaitu baja tulangan ulir dengan mutu  $f'_y = 320$  MPa dan baja tulangan polos dengan mutu  $f'_y = 240$  MPa. Pemilihan mutu material tersebut disesuaikan dengan kebutuhan kekuatan struktur agar mampu menahan beban yang bekerja pada bangunan secara aman dan memenuhi standar perencanaan.

### c. Data Elemen Struktur

#### 1) Pelat

Rencana tebal pelat lantai bangunan adalah sebesar 150 mm, sedangkan tebal pelat atap direncanakan sebesar 100 mm. Perbedaan tebal pelat ini disesuaikan dengan besarnya beban yang bekerja, di mana pelat lantai menerima beban yang lebih besar dibandingkan pelat atap.

#### 2) Balok

Balok yang digunakan dalam struktur bangunan terdiri atas beberapa tipe dengan dimensi dan penulangan yang berbeda-beda. Variasi dimensi dan jumlah tulangan pada balok disesuaikan dengan fungsi serta besar beban yang dipikul oleh masing-masing balok.

**Tabel 2.** Tipe Balok

| Tipe | Dimensi (cm) | Tul. Atas | Tul. Bawah | Torsi | Sengkang  |
|------|--------------|-----------|------------|-------|-----------|
| B1   | 35 X 65      | 7 D16     | 6 D16      | 2 D13 | Ø10 - 100 |
| B2   | 30 X 80      | 6 D16     | 4 D16      | 2 D13 | Ø10 - 100 |
| B3   | 20 X 40      | 3 D16     | 3 D16      | 2 D13 | Ø10 - 100 |
| B4   | 15 X 25      | 2 D13     | 2 D13      | -     | Ø8 - 150  |

(Sumber: Data teknis proyek)

#### 3) Kolom

Kolom yang digunakan terdiri atas beberapa tipe dengan variasi dimensi dan jumlah tulangan utama. Perbedaan tipe kolom ini menunjukkan adanya perbedaan beban aksial yang diterima oleh masing-masing kolom pada struktur bangunan.

**Tabel 3.** Tipe Kolom

| Tipe | Dimensi (cm) | Tul. Utama | Sengkang  |
|------|--------------|------------|-----------|
| K1   | 40 × 50      | 20 D16     | Ø10 - 100 |
| K2   | 40 × 40      | 16 D16     | Ø10 - 100 |
| KP   | 15 × 15      | 4 D12      | Ø6 - 150  |

(Sumber: Data teknis proyek)

## 3. Analisis Pembebanan Pada Gedung

Analisis pembebanan pada gedung ini meliputi beban mati, beban mati tambahan, beban hidup, dan beban angin yang mengacu pada ketentuan peraturan pembebanan yang berlaku di

Indonesia. Beban mati merupakan berat sendiri seluruh elemen struktur yang dihitung berdasarkan berat jenis material penyusunnya. Dalam penelitian ini digunakan berat jenis beton sebesar  $2200 \text{ kg/m}^3$  dan beton bertulang sebesar  $2400 \text{ kg/m}^3$  sesuai dengan ketentuan SNI 03-1727-1989. Beban ini bersifat tetap dan bekerja sepanjang umur layan bangunan sehingga menjadi komponen utama dalam perencanaan struktur.

Selain beban mati, terdapat beban mati tambahan yang berasal dari elemen non-struktural yang melekat secara permanen pada bangunan. Beban mati tambahan tersebut meliputi berat spesi, pasir, plafon, penggantung langit-langit, penutup lantai, dinding partisi, pasangan batako, instalasi mekanikal elektrik, serta penutup atap dak. Besarnya beban mati tambahan yang digunakan dalam analisis mengacu pada Peraturan Pembebanan Indonesia untuk Gedung 1987. Jenis dan besarnya beban yang bekerja pada gedung disajikan pada Tabel 4.

**Tabel 4.** Jenis Beban yang Bekerja pada Gedung

| No  | Jenis Beban               | Beban | Satuan          |
|-----|---------------------------|-------|-----------------|
| 1.  | Beton                     | 2200  | $\text{kg/m}^2$ |
| 2.  | Beton bertulang           | 2400  | $\text{kg/m}^2$ |
| 3.  | Semen, spesi              | 22    | $\text{kg/m}^2$ |
| 4.  | Pasir                     | 1800  | $\text{kg/m}^2$ |
| 5.  | Eternit / Plafond         | 11    | $\text{kg/m}^2$ |
| 6.  | Penggantung langit-langit | 7     | $\text{kg/m}^2$ |
| 7.  | Penutup lantai (keramik)  | 24    | $\text{kg/m}^2$ |
| 8.  | Dinding partisi (kaca)    | 10    | $\text{kg/m}^2$ |
| 9.  | Pasangan batako           | 200   | $\text{kg/m}^2$ |
| 10. | Instalasi ME              | 25    | $\text{kg/m}^2$ |
| 11. | Penutup atap dak          | 100   | $\text{kg/m}^2$ |
| 12. | Pasangan batako           | 300   | $\text{kg/m}^2$ |

(Sumber: Peraturan Pembebanan Indonesia untuk Gedung, 1987)

Berdasarkan komponen beban mati tambahan tersebut, maka beban mati tambahan pada pelat atap terdiri atas beban plafon dan penggantung sebesar  $18 \text{ kg/m}^2$  serta beban instalasi mekanikal elektrik sebesar  $25 \text{ kg/m}^2$ , sehingga totalnya menjadi  $43 \text{ kg/m}^2$ . Untuk pelat lantai 1 sampai lantai 2, beban mati tambahan berasal dari spesi setebal  $0,03 \text{ m}$  sebesar  $22 \text{ kg/m}^2$ , beban plafon dan penggantung sebesar  $18 \text{ kg/m}^2$ , serta penutup lantai keramik sebesar  $24 \text{ kg/m}^2$ , sehingga total beban mati tambahan pelat lantai adalah  $64 \text{ kg/m}^2$ . Sementara itu, beban mati tambahan pada balok berasal dari beban dinding pasangan batako setinggi  $3,5 \text{ m}$  sebesar  $300 \text{ kg/m}^2$  yang bekerja merata sepanjang balok.

Beban hidup ditentukan berdasarkan fungsi bangunan sebagai rumah sakit dengan mengacu pada Pedoman Peraturan Pembebanan Indonesia untuk Rumah dan Gedung (PPURG 1987). Koefisien reduksi beban hidup yang digunakan adalah sebesar  $0,30$ . Beban hidup pelat lantai diperoleh sebesar  $75 \text{ kg/m}^2$  yang merupakan hasil perkalian antara  $250 \text{ kg/m}^2$  dengan koefisien reduksi, sedangkan beban hidup pelat atap sebesar  $30 \text{ kg/m}^2$  yang berasal dari  $100 \text{ kg/m}^2 \times 0,30$ . Untuk ruang toilet digunakan beban hidup sebesar  $90 \text{ kg/m}^2$  yang diperoleh dari  $300 \text{ kg/m}^2 \times 0,30$ , sehingga total beban hidup yang bekerja pada bangunan adalah sebesar  $195 \text{ kg/m}^2$ .

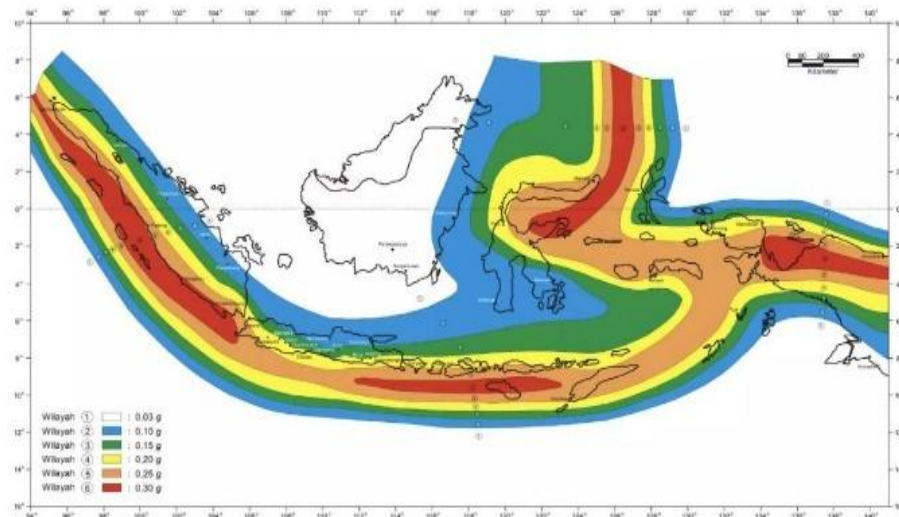
Beban angin dihitung berdasarkan Pasal 4.3 Peraturan Pembebanan Indonesia untuk Gedung 1987, dengan koefisien angin tekan sebesar  $0,30$  dan koefisien angin hisap sebesar  $0,40$ , serta tekanan tiup angin minimum sebesar  $25 \text{ kg/m}^2$ . Dari perhitungan tersebut diperoleh tekanan angin tekan sebesar  $7,5 \text{ kg/m}^2$  dan tekanan angin hisap sebesar  $10 \text{ kg/m}^2$ , sehingga total tekanan angin yang bekerja pada bangunan adalah sebesar  $17,5 \text{ kg/m}^2$ . Beban angin ini berperan sebagai beban lateral yang mempengaruhi kestabilan struktur secara keseluruhan.

#### 4. Analisis Beban Gempa

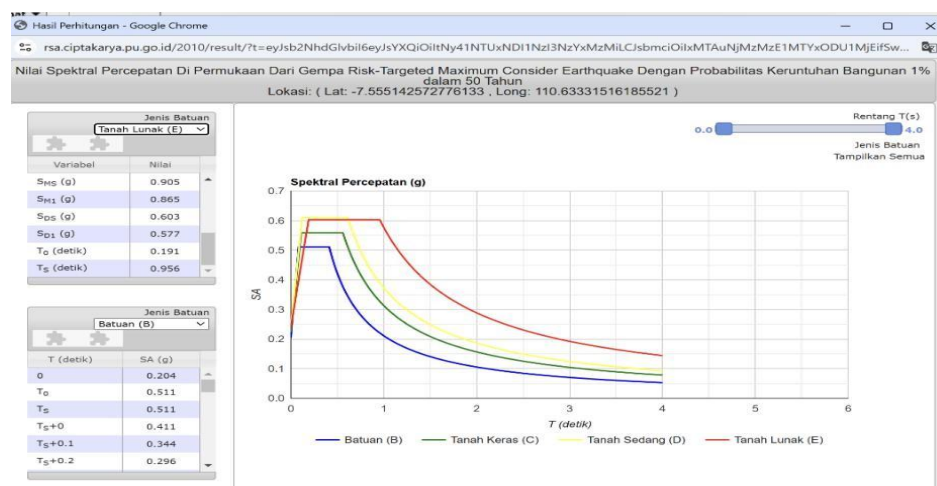
Beban gempa yang direncanakan adalah berdasarkan kriteria yang diberikan bahwa bangunan ini berada pada wilayah gempa zona 2 sesuai dengan ketentuan SNI 03-1726-2002, beban gempa adalah semua beban statik ekuivalen yang bekerja pada gedung yang menirukan pengaruh dari Gerakan tanah akibat gempa tersebut. Beban gempa yang dimaksud adalah gaya-

gaya didalam struktur yang terjadi oleh Gerakan tanah akibat gempa tersebut. Berikut adalah peta wilayah gempa di Indonesia dan grafik respons spektrum wilayah gempa zona 2. Peta wilayah gempa di Indonesia dan grafik respons spektrum wilayah gempa zona 2 dapat dilihat pada gambar 2 dan gambar 3 sebagai berikut.

SNI-1726-2002



**Gambar 2.** Peta wilayah gempa di Indonesia 2019 (Sumber:PUPR 2020)



**Gambar 3.** Grafik respon spektrum wilayah gempa zona 2 (Sumber : Puskim.pu.go.id 2019)

Kriteria perencanaan gempa yang digunakan pada bangunan ini mengacu pada parameter respons spektrum dan kondisi lokasi struktur. Bangunan direncanakan termasuk dalam kategori risiko beban gempa zona II, yang menunjukkan bahwa tingkat risiko kegagalan struktur terhadap gempa berada pada kategori menengah sehingga memerlukan persyaratan perencanaan ketahanan gempa yang cukup ketat. Berdasarkan hasil penyelidikan tanah, jenis tanah di lokasi termasuk dalam tanah lunak (kelas situs E) yang memiliki karakteristik daya dukung rendah dan kemampuan amplifikasi gelombang gempa yang tinggi, sehingga berpengaruh terhadap peningkatan respons spektrum percepatan gempa pada permukaan tanah.

Nilai percepatan spektral gempa untuk periode pendek diperoleh sebesar  $S_s = 0,851$ , sedangkan nilai percepatan spektral untuk periode 1 detik adalah  $S_1 = 0,407$ . Berdasarkan nilai tersebut dan dengan mempertimbangkan faktor kondisi tanah, diperoleh nilai percepatan spektral maksimum yang telah disesuaikan terhadap pengaruh tanah, yaitu  $S_{Ms} = 0,905$  untuk periode pendek dan  $S_{M1} = 0,865$  untuk periode 1 detik. Nilai-nilai ini menunjukkan besarnya respons

percepatan gempa rencana yang akan digunakan dalam analisis struktur.

Selain itu, dalam perencanaan ini digunakan faktor keutamaan gempa ( $I_e$ ) sebesar 1,25, yang menandakan bahwa bangunan memiliki tingkat kepentingan yang lebih tinggi dibandingkan bangunan biasa, sehingga harus direncanakan dengan tingkat keamanan yang lebih besar terhadap beban gempa. Penerapan faktor keutamaan ini akan memperbesar gaya gempa rencana yang bekerja pada struktur, dengan tujuan untuk meminimalkan risiko kerusakan dan menjamin kinerja struktur tetap aman saat terjadi gempa.

### **Beban Gempa Statik Ekiivalen (EQ)**

Beban gempa statik ekiivalen (EQ) pada penelitian ini menggunakan pola beban seismik IBC 2009 menggunakan alat bantu program SAP2000, sehingga hanya cukup diinput nilai beban gravitasi dan data gempa. Untuk input pada pola beban seismik IBC 2009, dapat dilihat pada gambar 4 dan gambar 5.

The screenshot shows the 'IBC 2009 Seismic Load Pattern' dialog box with the 'Global X Direction' selected. The 'Ecc. Ratio (All Diaph.)' is set to 0.05. Under 'Time Period', 'Program Calc' is selected with 'Ct (ft), x = 0.016; 0.9'. Under 'Lateral Load Elevation Range', 'Program Calculated' is selected. In the 'Factors' section, 'Response Modification, R' is 8, 'System Overstrength, Omega' is 3, 'Deflection Amplification, Cd' is 5.5, and 'Occupancy Importance, I' is 1. The 'Seismic Coefficients' section has 'Ss and S1 User Specified' selected, with '0.2 Sec Spectral Accel, Ss' at 0.851, '1 Sec Spectral Accel, S1' at 0.407, and 'Long-Period Transition Period' at 4. 'Site Class' is 'E', 'Site Coefficient, Fa' is 1.0788, and 'Site Coefficient, Fv' is 2.4. 'Calculated Coefficients' show 'SDS = (2/3) \* Fa \* Ss' as 0.612 and 'SD1 = (2/3) \* Fv \* S1' as 0.6512. 'Update Data', 'OK', and 'Cancel' buttons are at the bottom.

**Gambar 4.** Input beban seismik IBC 2009 arah X (Sumber : SAP2000 V.22)

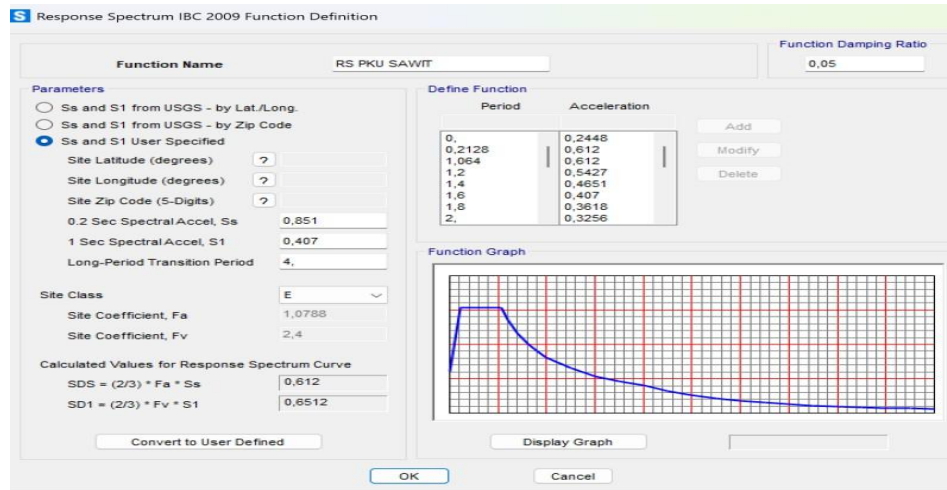
This screenshot is identical to the previous one, but with 'Global Y Direction' selected in the 'Load Direction and Diaphragm Eccentricity' section. All other parameters and calculated values remain the same.

**Gambar 5.** Input beban seismik IBC 2009 arah Y (Sumber : SAP2000 V.22)

Pembebanan gempa statik ekiivalen (EQ) setelah itu sudah dianalisis secara otomatis oleh program SAP2000, baik perhitungan koefisien respon seismik ( $C_s$ ), perhitungan gaya geser dasar seismik ( $V$ ), perhitungan distribusi vertikal gaya gempa ( $F_x$ ), dan perhitungan distribusi horizontal gaya gempa ( $V_x$ ).

### **Beban gempa respon spektrum (RS)**

Kurva respons spektrum yang didapatkan dari redaman gempa diinput pada program SAP2000 seperti pada Gambar 6 dibawah ini.

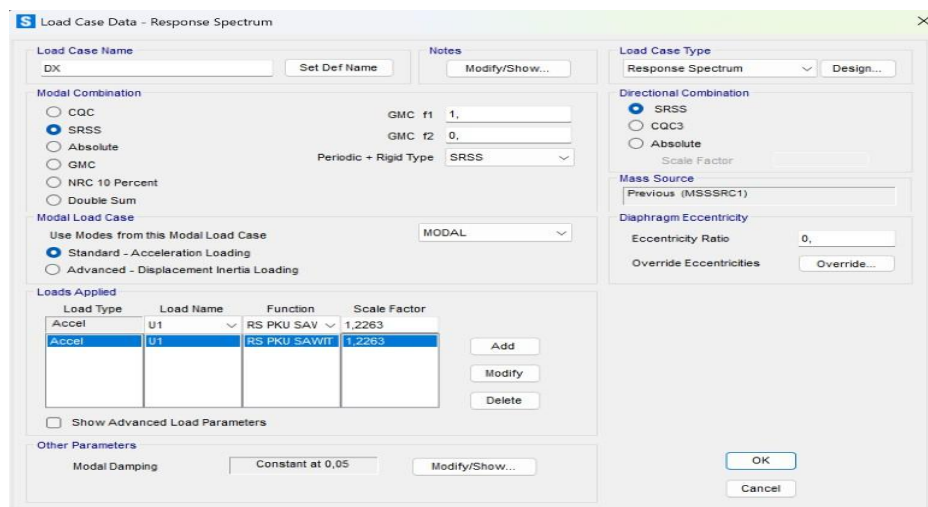


**Gambar 6.** Kurva respons spektrum (Sumber : SAP2000 V.22)

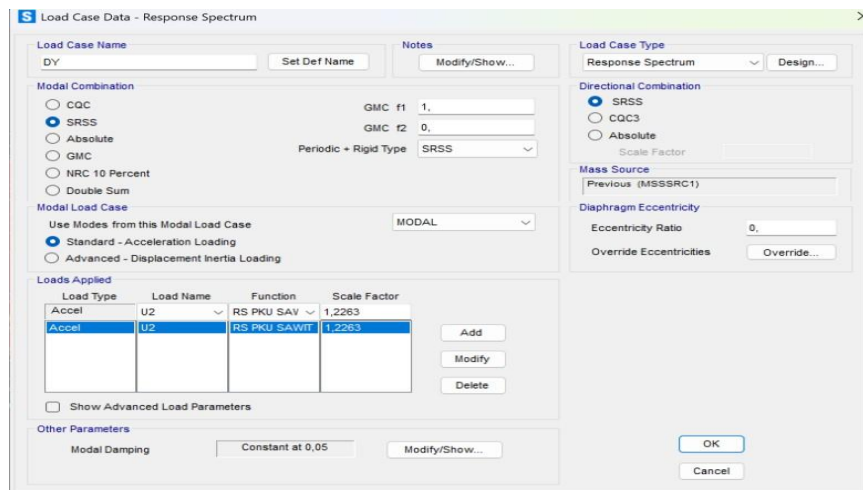
Setelah kurva respons spektrum diperoleh, tahap selanjutnya adalah memasukkan data kasus pembebanan dinamik ke dalam program analisis struktur sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 7 dan Gambar 8. Pada tahap ini digunakan nilai redaman struktur beton (damping) sebesar 0,05 atau 5%, yang merupakan nilai umum untuk struktur beton bertulang dalam analisis respons spektrum. Nilai redaman ini menggambarkan kemampuan struktur dalam mereduksi energi getaran akibat beban gempa, sehingga berpengaruh terhadap besarnya ordinat spektrum respons yang digunakan dalam perhitungan.

Metode modal combination yang digunakan adalah SRSS (Square Root of the Sum of Squares). Pemilihan metode SRSS didasarkan pada perbedaan periode fundamental antar mode getar struktur ( $\Delta T$ ) yang lebih besar dari 15%, sehingga antar mode tidak saling berdekatan dan dapat dianggap tidak memiliki korelasi yang signifikan. Dengan kondisi tersebut, metode SRSS dinilai lebih tepat karena mampu mengombinasikan respons masing-masing mode secara statistik untuk memperoleh respons total struktur.

Selanjutnya, nilai scale factor ditentukan berdasarkan data pada tabel yang telah dihitung sebelumnya. Scale factor ini digunakan untuk menskalakan hasil analisis respons spektrum agar memenuhi ketentuan gaya geser dasar minimum yang dipersyaratkan oleh peraturan. Dengan demikian, hasil analisis dinamik yang diperoleh tetap konsisten terhadap gaya gempa rencana yang dihitung melalui metode statik ekuivalen. Proses penentuan scale factor ini sangat penting untuk memastikan bahwa respons struktur yang dihasilkan dari analisis modal respons spektrum berada pada tingkat keamanan yang disyaratkan dalam perencanaan tahan gempa.

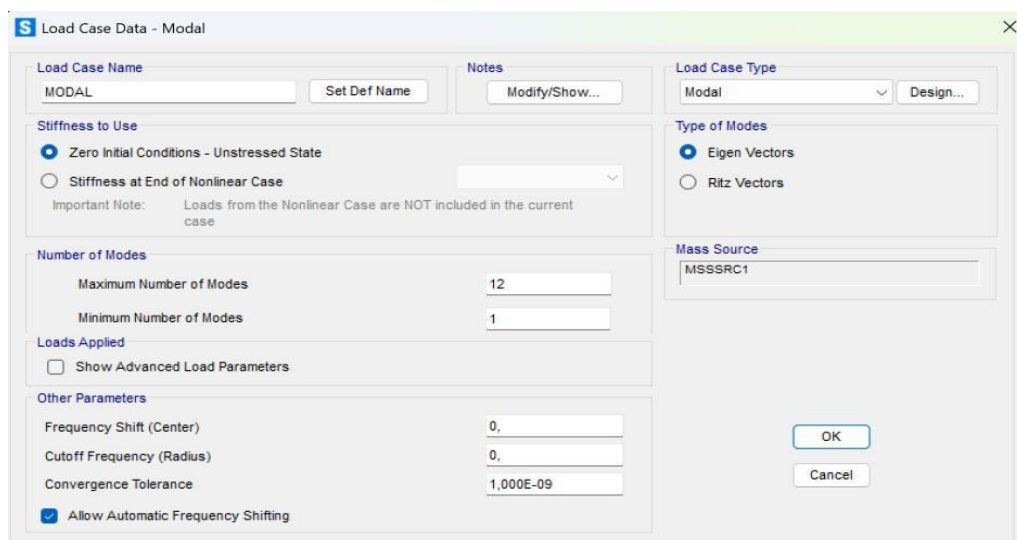


**Gambar 7.** Load case data respons spektrum arah X (Sumber : SAP2000 V.22)



**Gambar 8.** Load case data respons spektrum arah Y  
(Sumber : SAP2000 V.22)

Setelah data kasus respons spektrum dimasukkan ke dalam model analisis, tahap berikutnya adalah memuat data kasus modal sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 9. Pendefinisian kasus modal ini bertujuan untuk memperoleh karakteristik dinamik struktur yang meliputi bentuk ragam getar (mode shape), periode getar alami, serta partisipasi massa pada masing-masing mode. Parameter-parameter tersebut sangat penting karena akan menentukan besarnya respons struktur terhadap beban gempa yang bekerja. Pada tahap ini juga ditentukan jumlah mode yang dianalisis sehingga mampu mewakili minimal 90% partisipasi massa struktur, baik pada arah translasi maupun rotasi. Selain itu, pengaturan tipe analisis modal yang digunakan disesuaikan dengan kebutuhan analisis respons spektrum, sehingga hasil yang diperoleh dapat menggambarkan perilaku dinamik struktur secara lebih akurat dan memenuhi ketentuan perencanaan tahan gempa yang berlaku.



**Gambar 9.** Load case data MODAL  
(Sumber : SAP2000 V.22)

## 5. Kontrol Struktur Gedung

Berdasarkan hasil modifikasi peningkatan jumlah mode, telah didapatkan jumlah partisipasi massa minimum lebih dari 90%, hal ini telah sesuai dengan SNI Gempa 03-1726-2019. Jumlah partisipasi massa pada 12 mode dapat dilihat pada gambar 10 sebagai berikut

| OutputCase | StepType | StepNum  | Period   | UX        | UY        | UZ        | SumUX    | SumUY    | SumUZ     | RX       | Un       |
|------------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
|            | Text     | Unitless | Sec      | Unitless  | Unitless  | Unitless  | Unitless | Unitless | Unitless  | Unitless | Unitless |
| MODAL      | Mode     | 1        | 0,847797 | 0,0011    | 0,8868    | 1,599E-07 | 0,0011   | 0,8868   | 1,599E-07 | 0,01298  |          |
| MODAL      | Mode     | 2        | 0,811328 | 0,5304    | 0,0001    | 3,638E-06 | 0,53051  | 0,8869   | 3,798E-06 | 0,00058  |          |
| MODAL      | Mode     | 3        | 0,747192 | 0,33186   | 0,001     | 1,408E-06 | 0,86237  | 0,8879   | 5,204E-06 | 0,0009   |          |
| MODAL      | Mode     | 4        | 0,316899 | 0,00202   | 0,07022   | 1,431E-05 | 0,86439  | 0,95812  | 1,952E-05 | 0,06107  |          |
| MODAL      | Mode     | 5        | 0,30014  | 0,07148   | 0,00362   | 4,249E-05 | 0,93587  | 0,98174  | 6,201E-05 | 0,00374  |          |
| MODAL      | Mode     | 6        | 0,283674 | 0,00772   | 0,00388   | 3,186E-05 | 0,94359  | 0,96562  | 9,387E-05 | 0,00517  |          |
| MODAL      | Mode     | 7        | 0,239159 | 3,16E-07  | 0,03155   | 8,334E-06 | 0,94359  | 0,99717  | 0,0001    | 0,01008  |          |
| MODAL      | Mode     | 8        | 0,213441 | 2,739E-05 | 0,00022   | 0,01648   | 0,94362  | 0,99739  | 0,01656   | 0,00429  |          |
| MODAL      | Mode     | 9        | 0,205766 | 0,04645   | 0,00016   | 0,00182   | 0,99007  | 0,99755  | 0,01838   | 9,37E-05 |          |
| MODAL      | Mode     | 10       | 0,204538 | 0,0004    | 8,798E-05 | 0,00427   | 0,99048  | 0,99764  | 0,02265   | 0,00087  |          |
| MODAL      | Mode     | 11       | 0,201999 | 0,00622   | 0,00151   | 0,00011   | 0,9967   | 0,99915  | 0,02276   | 0,00037  |          |
| MODAL      | Mode     | 12       | 0,197824 | 0,0017    | 1,44E-05  | 0,00493   | 0,9964   | 0,99917  | 0,02769   | 0,00352  |          |

Gambar 10 Jumlah partisipasi massa pada 12 mode (Sumber : SAP2000 V.22)

## 6. Analisis *Pushover*

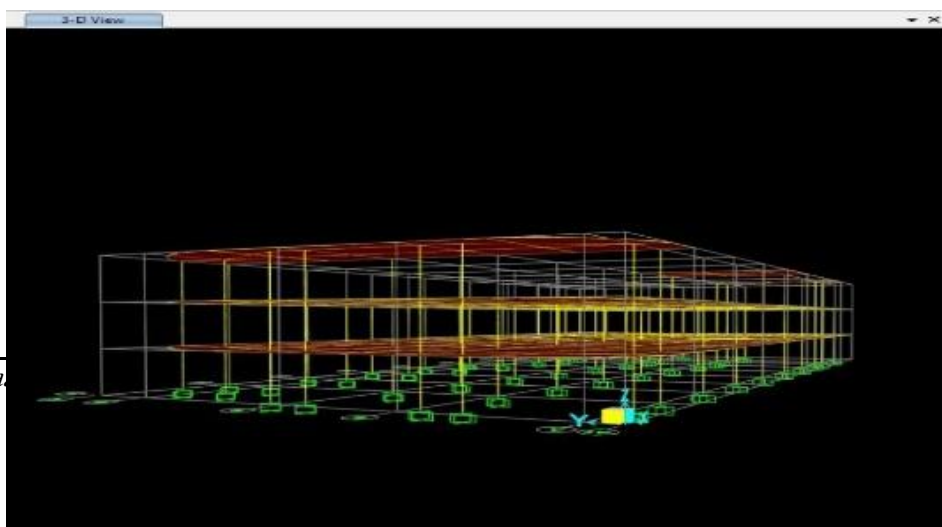
Metode *pushover* merupakan suatu analisis statik non-linier dimana pengaruh gempa rencana terhadap struktur bangunan dianggap sebagai beban-beban statik yang ada pada pusat massa masing-masing lantai, yang nilainya ditingkatkan secara berangsur-angsur sampai melampaui pembebanan yang menyebabkan terjadinya pelelehan (sendi plastis) pertama didalam struktur bangunan gedung dengan peningkatan beban lebih lanjut mengalami perubahan bentuk pasca-elastik yang besar sampai mencapai kondisi plastis.

### *Pemodelan Struktur Penerapannya Terhadap Analisis Pushover*

Pemodelan struktur gedung RSUD Dr. Soemowidagdo dilakukan dalam bentuk portal open frame tiga dimensi (3D), sehingga interaksi antar elemen struktur dapat direpresentasikan secara menyeluruh terhadap pembebanan yang bekerja. Pada pemodelan ini, beban dinding tidak dimodelkan sebagai elemen tersendiri, tetapi didistribusikan sebagai beban merata (uniform load) yang bekerja pada sisi atas balok. Pendekatan ini dilakukan untuk menyederhanakan model tanpa mengurangi ketelitian dalam menggambarkan pengaruh beban dinding terhadap kinerja balok dan kolom.

Asumsi yang digunakan dalam pemodelan numerik antara lain balok dan kolom dimodelkan sebagai elemen frame, sehingga mampu merepresentasikan perilaku struktur dalam menerima gaya aksial, geser, momen lentur, serta interaksi di antara gaya-gaya tersebut. Sementara itu, pelat lantai dan pelat atap dimodelkan sebagai elemen shell yang berfungsi untuk mendistribusikan beban secara dua arah serta memberikan kekakuan diafragma terhadap sistem struktur secara keseluruhan. Pemodelan dengan elemen shell juga memungkinkan analisis deformasi pelat yang lebih realistis terhadap beban gravitasi maupun beban lateral.

Secara keseluruhan, detail pemodelan struktur gedung yang mengacu pada penerapan analisis *pushover* ditunjukkan pada Gambar 11. Pemodelan ini digunakan untuk mengevaluasi perilaku nonlinier struktur, khususnya dalam mengetahui pola terbentuknya sendi plastis, kapasitas struktur, serta tingkat kinerja bangunan terhadap beban gempa rencana.



**Gambar 11.** Model struktur sesuai Analisis Pushover  
(Sumber : SAP2000 V.22)

### ***Memodelkan Sendi Plastis pada Kolom dan Balok***

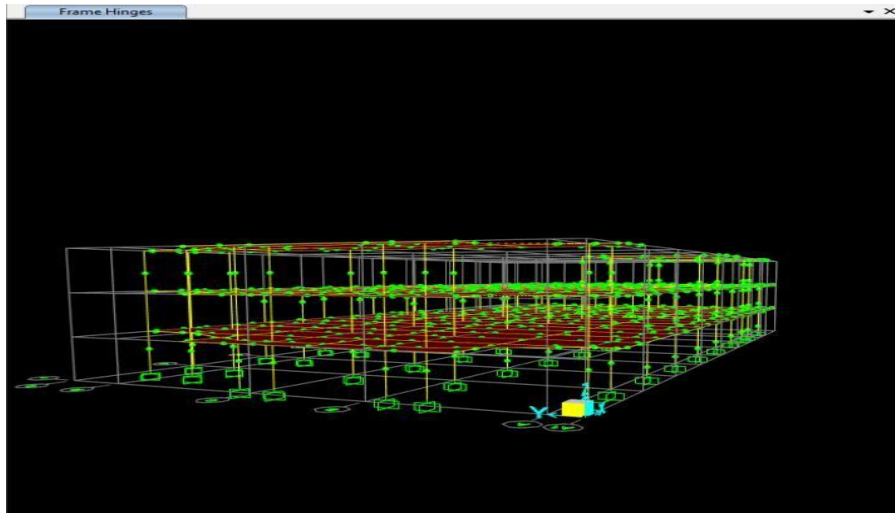
Sebelum menganalisis nonlinier statik (*pushover*), hal yang perlu diperhatikan sebelum memodelkan sendi plastis adalah pendefinisian *Plastic Hinges Properties* pada setiap elemen struktur. *Plastic Hinges Properties* dapat dihitung secara manual berdasarkan ASCE 41-13/17 yaitu untuk balok pada Tabel 10-7 dan kolom pada Tabel 10-8. Namun dalam kasus ini *Plastic Hinges Properties* dihitung secara otomatis oleh program SAP2000. Adapaun detail inputan *Plastic Hinges Properties* pada setiap elemen struktur dapat dilihat pada Gambar 12 dan Gambar 13 berikut ini.

**Gambar 12.** Input Hinges Properties pada elemen balok  
(Sumber : SAP2000 V.22)

**Gambar 13.** Input Hinges Properties pada elemen kolom  
(Sumber : SAP2000 V.22)

Setelah perhitungan *Plastic Hinges Properties* yang dihitung secara otomatis oleh program SAP2000 sudah selesai, maka bisa kita lihat model sendi plastis pada kolom dan balok seperti pada

Gambar 14 berikut.



**Gambar 14.** Model sendi plastis pada elemen kolom dan balok  
(Sumber : SAP2000 V.22)

### Pembahasan

Pemodelan struktur gedung menggunakan program SAP2000 merupakan pendekatan numerik yang bertujuan untuk merepresentasikan kondisi struktur secara mendekati keadaan sebenarnya di lapangan. Hasil analisis yang diperoleh bukan merupakan nilai mutlak, melainkan sangat bergantung pada ketepatan asumsi pemodelan, input material, pembebanan, serta interpretasi engineer dalam membaca perilaku struktur. Oleh karena itu, proses pemodelan harus mampu menggambarkan sistem struktur secara rasional agar respons yang dihasilkan dapat dijadikan dasar evaluasi kinerja seismik bangunan. Pada penelitian ini, pemodelan dilakukan dalam bentuk portal ruang tiga dimensi yang mampu memperhitungkan interaksi antar elemen struktur terhadap beban gravitasi maupun beban lateral akibat gempa.

Pembebanan yang bekerja pada struktur terdiri dari beban mati, beban mati tambahan, beban hidup, dan beban angin yang seluruhnya mengacu pada peraturan pembebanan Indonesia. Beban hidup ditentukan berdasarkan fungsi bangunan sebagai rumah sakit. Penggunaan koefisien reduksi sebesar 0,30 menunjukkan bahwa probabilitas beban hidup maksimum bekerja secara bersamaan pada seluruh lantai relatif kecil. Nilai beban hidup pelat lantai sebesar  $75 \text{ kg/m}^2$ , pelat atap sebesar  $30 \text{ kg/m}^2$ , dan ruang toilet sebesar  $90 \text{ kg/m}^2$  menghasilkan total beban hidup sebesar  $195 \text{ kg/m}^2$ . Besaran ini mencerminkan kondisi operasional bangunan rumah sakit yang memiliki tingkat aktivitas tinggi namun tetap mempertimbangkan faktor reduksi sesuai ketentuan peraturan.

Kriteria perencanaan gempa yang digunakan menunjukkan bahwa bangunan termasuk dalam kategori risiko zona II dengan jenis tanah lunak (kelas situs E). Kondisi tanah lunak memiliki karakteristik kemampuan amplifikasi gelombang gempa yang tinggi sehingga dapat meningkatkan percepatan respons spektrum di permukaan tanah. Hal ini menyebabkan gaya gempa yang bekerja pada struktur menjadi lebih besar dibandingkan dengan tanah keras atau tanah sedang. Dengan demikian, struktur harus direncanakan dengan tingkat daktilitas dan kekakuan yang memadai agar mampu meredam energi gempa tanpa mengalami keruntuhan mendadak.

Penentuan parameter respons spektrum seperti nilai  $S_s$ ,  $S_1$ ,  $S_Ms$ , dan  $SM1$  merupakan langkah penting dalam analisis dinamik. Nilai-nilai tersebut menggambarkan besarnya percepatan spektral pada periode pendek dan periode satu detik yang telah dimodifikasi berdasarkan kondisi tanah setempat. Selain itu, faktor keutamaan gempa sebesar 1,25 menunjukkan bahwa bangunan rumah sakit termasuk dalam kategori bangunan penting yang harus tetap berfungsi setelah terjadi gempa. Konsekuensinya, gaya gempa rencana yang digunakan dalam analisis menjadi lebih besar dibandingkan bangunan biasa.

Scale factor pada analisis respons spektrum berfungsi untuk menyesuaikan hasil analisis dinamik agar memenuhi gaya geser dasar minimum yang dipersyaratkan oleh peraturan. Tanpa proses penskalaan ini, gaya gempa hasil analisis modal respons spektrum berpotensi lebih kecil dari gaya gempa statik ekuivalen sehingga tidak konservatif dalam perencanaan. Dengan demikian, penggunaan scale factor memastikan bahwa respons struktur yang diperoleh berada pada tingkat keamanan yang sesuai dengan ketentuan perencanaan tahan gempa.

Analisis modal dilakukan untuk memperoleh karakteristik dinamik struktur yang meliputi periode alami, bentuk ragam getar, serta partisipasi massa. Hasil analisis menunjukkan bahwa partisipasi massa kumulatif telah melebihi 90% pada 12 mode getar. Hal ini menunjukkan bahwa jumlah mode yang digunakan sudah cukup untuk merepresentasikan perilaku dinamik struktur. Semakin besar partisipasi massa yang tercapai, semakin akurat respons struktur terhadap beban gempa yang dapat diprediksi melalui analisis.

Metode kombinasi ragam menggunakan SRSS (Square Root of the Sum of Squares) dipilih karena selisih periode antar mode lebih besar dari 15%. Metode ini sesuai digunakan untuk struktur yang memiliki perbedaan periode getar yang signifikan sehingga interaksi antar mode relatif kecil. Dengan demikian, hasil kombinasi respons menjadi lebih rasional dan tidak terlalu konservatif.

Setelah dilakukan analisis respons spektrum dan analisis modal, tahap selanjutnya adalah analisis pushover untuk mengetahui kinerja struktur secara nonlinier. Analisis pushover memberikan gambaran hubungan antara gaya geser dasar dan perpindahan (capacity curve) yang menunjukkan kapasitas struktur dalam menahan beban lateral secara bertahap hingga mencapai kondisi plastis. Melalui analisis ini dapat diketahui titik kinerja (performance point) yang merupakan perpotongan antara kurva kapasitas struktur dan kurva demand gempa.

Titik kinerja yang diperoleh menunjukkan level kinerja struktur terhadap gempa rencana. Apabila titik kinerja berada pada batas Immediate Occupancy (IO), maka bangunan masih dapat digunakan setelah gempa tanpa mengalami kerusakan struktural yang signifikan. Jika berada pada level Life Safety (LS), maka bangunan mengalami kerusakan struktural namun tidak mengalami keruntuhan sehingga masih memberikan kesempatan evakuasi bagi penghuni. Sementara itu, apabila berada pada level Collapse Prevention (CP), struktur berada pada kondisi mendekati runtuh dan memerlukan perbaikan besar sebelum dapat digunakan kembali.

Selain titik kinerja, evaluasi juga dilakukan terhadap rasio drift antar lantai. Rasio drift merupakan parameter penting dalam menilai tingkat deformasi struktur akibat gempa. Nilai drift yang memenuhi batasan peraturan menunjukkan bahwa struktur memiliki kekakuan yang cukup untuk mengontrol deformasi lateral sehingga kerusakan nonstruktural dapat diminimalkan. Pada bangunan rumah sakit, kontrol terhadap drift sangat penting karena berkaitan dengan fungsi peralatan medis dan kenyamanan pasien.

Secara keseluruhan, hasil analisis menunjukkan bahwa pemodelan struktur, pembebanan, parameter respons spektrum, serta analisis modal telah memenuhi ketentuan peraturan gempa yang berlaku. Hal ini ditunjukkan oleh terpenuhinya partisipasi massa minimum, penggunaan scale factor yang sesuai, serta respons struktur yang berada dalam batas kinerja yang diharapkan. Dengan demikian, struktur bangunan memiliki tingkat keamanan yang memadai terhadap beban gempa rencana.

Namun demikian, perlu dipahami bahwa hasil analisis berbasis pemodelan numerik tetap memiliki keterbatasan. Ketidakpastian dapat berasal dari variasi kualitas material di lapangan, perubahan fungsi ruang, maupun ketidaksempurnaan pelaksanaan konstruksi. Oleh karena itu, hasil analisis ini sebaiknya digunakan sebagai dasar evaluasi awal yang dapat dikombinasikan dengan inspeksi lapangan dan pengujian material untuk memperoleh gambaran kinerja struktur yang lebih komprehensif.

Dari sudut pandang perencanaan berbasis kinerja (performance-based design), analisis pushover memberikan informasi yang sangat penting dalam menilai kemampuan struktur untuk tetap berfungsi setelah gempa. Untuk bangunan rumah sakit yang termasuk dalam kategori bangunan vital, pencapaian level kinerja yang baik menjadi syarat utama agar pelayanan kesehatan tetap dapat berjalan pada kondisi pascabencana. Oleh karena itu, penerapan metode

analisis nonlinier seperti pushover merupakan langkah yang tepat dalam mengevaluasi kinerja seismik bangunan.

## KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pemodelan dan analisis struktur yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa pemodelan portal ruang tiga dimensi mampu merepresentasikan perilaku struktur secara menyeluruh terhadap beban gravitasi maupun beban gempa. Elemen balok dan kolom dimodelkan sebagai frame, sedangkan pelat lantai dan pelat atap dimodelkan sebagai shell sehingga interaksi antar elemen struktur dapat dianalisis dengan baik. Beban dinding yang didistribusikan sebagai beban merata pada balok juga memberikan pendekatan yang rasional terhadap kondisi aktual struktur.

Parameter gempa yang digunakan menunjukkan bahwa bangunan berada pada kategori risiko tinggi dengan jenis tanah lunak, sehingga menghasilkan respons spektrum yang relatif besar. Penggunaan faktor keutamaan gempa sebesar 1,25 menunjukkan bahwa bangunan rumah sakit termasuk dalam kategori bangunan penting yang harus tetap berfungsi setelah gempa. Hasil analisis respons spektrum yang telah diskalakan memenuhi persyaratan gaya geser dasar minimum sesuai ketentuan peraturan, sehingga hasil analisis dinamik dapat digunakan dalam evaluasi kinerja struktur.

Analisis modal menunjukkan bahwa partisipasi massa kumulatif telah melebihi 90%, yang berarti jumlah ragam getar yang digunakan sudah cukup untuk merepresentasikan karakteristik dinamik struktur. Metode kombinasi ragam SRSS yang digunakan sesuai dengan kondisi selisih periode antar mode yang lebih besar dari 15%, sehingga menghasilkan respons struktur yang rasional.

Hasil analisis pushover menunjukkan bahwa struktur memiliki kapasitas yang memadai dalam menahan beban lateral secara bertahap hingga mencapai kondisi plastis. Titik kinerja struktur berada pada tingkat kinerja yang masih memenuhi batas keamanan, sehingga struktur mampu menahan beban gempa rencana tanpa mengalami keruntuhan. Selain itu, nilai drift antar lantai masih berada dalam batas yang diizinkan, yang menunjukkan bahwa kekakuan struktur cukup untuk mengontrol deformasi lateral.

## DAFTAR PUSTAKA

- Aljawhari, A., Mwafy, A., & Al-Mahaidi, R. (2020). Performance-based assessment of reinforced concrete buildings designed to different seismic codes. *Structures*, 28, 1612–1626. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.09.042>
- Azimi, M., & Peyghaleh, E. (2021). Nonlinear static pushover analysis of RC frames with different height configurations. *Structures*, 33, 3871–3884. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.07.032>
- Chopra, A. K., & Goel, R. K. (2020). Evaluation of nonlinear static procedures for estimating seismic deformation demands. *Earthquake Spectra*, 36(4), 1955–1978. <https://doi.org/10.1177/8755293020937668>
- Cimellaro, G. P., Malavisi, M., & Mahin, S. (2020). Seismic resilience of healthcare facilities. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 49(9), 919–937. <https://doi.org/10.1002/eqe.3260>
- Cummins, P. R. (2021). Subduction zone hazards in Southeast Asia. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2, 215–232. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00146-x>
- Dya, A. F. C., & Oreta, A. W. C. (2022). Seismic performance evaluation of reinforced concrete buildings using nonlinear static analysis. *Engineering Structures*, 252, 113676. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113676>
- Ferreira, T. M., Vicente, R., & Varum, H. (2021). Seismic vulnerability assessment of hospital buildings. *Engineering Structures*, 242, 112519. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112519>

- Hajirasouliha, I., & Pilakoutas, K. (2020). Seismic assessment of irregular multistory buildings using pushover analysis. *Engineering Structures*, 210, 110395. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110395>
- Kalkan, E., & Chopra, A. K. (2021). Modal pushover analysis for estimating seismic demands of buildings. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 50(5), 1358–1375. <https://doi.org/10.1002/eqe.3371>
- Kazemi, M., Behnamfar, F., & Zargar, M. (2021). Seismic performance levels of reinforced concrete buildings under near-fault ground motions. *Structures*, 30, 881–895. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.01.063>
- Mwafy, A., Al-Mahaidi, R., & Aljawhari, A. (2020). Seismic vulnerability assessment of multistory RC buildings. *Engineering Structures*, 224, 111219. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111219>
- Nguyen, D. D., Nguyen, P. C., & Tran, T. T. (2021). Seismic performance of RC buildings considering soil–structure interaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 145, 106709. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.106709>
- Nouri, G. R., & Tavakoli, H. R. (2022). Influence of building height on seismic response of RC moment frames using pushover analysis. *Structures*, 36, 253–267. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.12.021>
- Ozturk, B., & Turk, A. M. (2023). Performance-based seismic assessment of RC buildings with varying geometric dimensions. *Structures*, 47, 1135–1149. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.12.019>
- Pitilakis, K., Riga, E., & Fotopoulou, S. (2020). Seismic response of structures founded on soft soils. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 18, 5659–5683. <https://doi.org/10.1007/s10518-020-00873-4>
- Rai, D. C., & Singh, Y. (2020). Performance-based seismic design of reinforced concrete frame buildings. *Journal of Earthquake Engineering*, 24(9), 1503–1525. <https://doi.org/10.1080/13632469.2018.1511797>
- Shrestha, B., Hao, H., & Bi, K. (2022). Seismic fragility analysis of reinforced concrete buildings. *Engineering Structures*, 256, 113997. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.113997>
- Silva, V., Crowley, H., Pagani, M., Monelli, D., & Pinho, R. (2020). Development of a global seismic risk model. *Earthquake Spectra*, 36(1\_suppl), 372–394. <https://doi.org/10.1177/8755293020931862>
- Tesfamariam, S., & Goda, K. (2021). Seismic risk assessment of buildings considering structural uncertainties. *Reliability Engineering & System Safety*, 205, 107210. <https://doi.org/10.1016/j.res.2020.107210>
- Widiyantoro, S., Gunawan, E., & Rawlinson, N. (2020). Complex subduction zone structure beneath Indonesia. *Geophysical Research Letters*, 47(18), e2020GL089211. <https://doi.org/10.1029/2020GL089211>
- Zareian, F., & Krawinkler, H. (2020). Simplified performance-based earthquake engineering framework. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 49(10), 1005–1023. <https://doi.org/10.1002/eqe.3274>
- Zhong, S., Gardoni, P., & Rosowsky, D. (2022). Probabilistic seismic performance assessment of reinforced concrete buildings. *Structural Safety*, 96, 102192. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2021.102192>