

## EVALUASI KINERJA STRUKTUR BANGUNAN GEDUNG PERKANTORAN 7 LANTAI DENGAN ANALISIS *PUSHOVER*

Kennard Evan Sungkana<sup>1</sup>, Andy Prabowo<sup>1\*</sup>, dan Daniel Christianto<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No. 1, Jakarta, Indonesia  
\*andy.prabowo@ft.untar.ac.id

Masuk: 03-11-2024, revisi: 31-03-2025, diterima untuk diterbitkan: 20-04-2025

### ABSTRACT

Earthquakes are natural events that cannot be predicted in terms of when and where they will occur. Seismic vibrations damage buildings on the surface and can cause structural failures, resulting not only material losses but also casualties. Therefore, the design of both building and non-building structures must adopt earthquake-resistant structures to prevent building collapse. SNI 1726:2019 provides values of structural ductility parameters, namely  $R$ ,  $\Omega_0$ , and  $C_d$ , for each seismic load-bearing structural system, such as special moment resisting frames (SRMF). The achievement of these three ductility parameter values in new and existing building structures can be evaluated for the achievement of ductility parameter values from the result capacity design. The analysis result shows that the structure in question, based on  $V_{design}$ , has values of  $R = 9.11$ ,  $\Omega_0 = 9.31$ , and  $C_d = 3.99$  for the X direction and  $R = 5.18$ ,  $\Omega_0 = 2.15$ , and  $C_d = 3.92$  for the Y direction. While the analysis results based on  $V_{yield}$  have values of  $R = 1.56$ ,  $\Omega_0 = 1.59$  and  $C_d = 2.867$  for the X direction, and  $R = 3.63$ ,  $\Omega_0 = 2.26$ , and  $C_d = 4.06$  for the Y direction. Based on the Capacity Spectrum Method (CSM) analysis, the performance level of the structure in the X direction is in the A – IO category, and in the Y direction is LS – CP. However, according to the Displacement Coefficient Method (DCM) analysis, the performance level of the structure in the X direction is in the A – IO category, and in the Y direction is IO – LS category.

Keywords: Pushover analysis; response modification factor; strength factor; deflection factor; structure capacity

### ABSTRAK

Gempa bumi merupakan peristiwa alam yang tidak dapat diperkirakan kapan dan dimana terjadinya. Getaran gempa merusak bangunan yang berada dipermukaan dan dapat mengakibatkan kegagalan struktur yang dapat merugikan tidak hanya materi, namun juga dapat menimbulkan korban jiwa. Oleh karena itu, perencanaan struktur gedung maupun non-gedung haruslah menerapkan struktur tahan gempa sehingga tidak menimbulkan keruntuhan bangunan. SNI 1726:2019 memberikan nilai-nilai parameter daktilitas struktur, yaitu  $R$ ,  $\Omega_0$ , dan  $C_d$  untuk setiap sistem struktur pemikul beban gempa, seperti pada sistem rangka pemikul momen khusus (SRPMK). Tercapainya ketiga nilai parameter daktilitas tersebut pada struktur bangunan gedung baru maupun eksisting, dapat dievaluasi menggunakan analisis *pushover*. Pada jurnal ini struktur gedung baru yang menggunakan SRPMK dievaluasi ketercapaian nilai parameter daktilitas dari hasil perancangan desain kapasitas. Hasil analisis menunjukkan bahwa struktur bangunan yang ditinjau berdasarkan  $V_{design}$  memiliki nilai  $R = 9,11$ ,  $\Omega_0 = 9,31$ , dan  $C_d = 3,99$  untuk arah X, dan  $R = 5,18$ ,  $\Omega_0 = 2,15$ , dan  $C_d = 3,92$  untuk arah Y. Sedangkan hasil analisis ditinjau berdasarkan  $V_{yield}$  memiliki nilai  $R = 1,56$ ,  $\Omega_0 = 1,59$ , dan  $C_d = 2,87$  untuk arah X, dan  $R = 3,63$ ,  $\Omega_0 = 2,26$ , dan  $C_d = 4,06$  untuk arah Y Berdasarkan analisis metode kapasitas spektrum (CSM), tingkat kinerja struktur arah X adalah dalam kategori A – IO, dan arah Y adalah LS-CP. Namun, menurut analisis metode koefisien perpindahan (DCM), tingkat kinerja struktur arah X adalah dalam kategori A-IO dan arah Y adalah IO-LS.

Kata kunci: analisis *pushover*, faktor modifikasi respon, faktor kuat lebih, faktor pembesaran defleksi, kapasitas struktur

### 1. PENDAHULUAN

Gempa bumi merupakan peristiwa alam yang tidak dapat diperkirakan kapan dan dimana terjadinya. Lokasi Indonesia yang berada terletak di wilayah Cincin Api Pasifik (*Pacific Ring of Fire*) dan pertemuan lempeng tektonik (Pasifik, Eurasia, dan Indo-Australia) menyebabkan banyaknya ancaman gempa yang terjadi di Indonesia akibat aktivitas gunung berapi ataupun pergeseran lempeng. Getaran gempa merusak bangunan yang berada dipermukaan dan dapat mengakibatkan kegagalan struktur yang dapat merugikan tidak hanya materi, namun juga dapat menimbulkan korban jiwa.

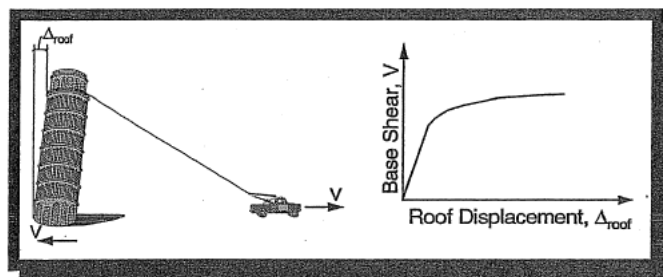
Oleh karena itu, perencanaan struktur gedung haruslah mengadopsi prinsip struktur tahan terhadap gempa, sehingga tidak menimbulkan kerugian materi dan korban jiwa apabila bangunan terkena gempa. SNI 1726:2019 mengenai Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan nongedung, memberikan pedoman perancangan struktur bangunan tahan gempa. Namun, prinsip perancangan yang dipakai didasarkan pada penyederhanaan perilaku bangunan secara elastik yang sesungguhnya perilaku bangunan terhadap gempa yaitu inelastik. Oleh karena itu, diperlakukan evaluasi dari sebuah struktur yang telah dirancang menggunakan prinsip perancangan secara elastik.

Salah satu metode yang digunakan dalam mengevaluasi kinerja struktur tahan gempa yaitu dengan mengadopsi metode *performance-based seismic design* (PBSD). PBSD memungkinkan perancangan dan pembangunan bangunan dengan pemahaman yang akurat dan terpercaya mengenai potensi resiko kerugian akibat gempa (Zameeruddin & Sangle, 2021). Prinsip PBSD menekankan pada kinerja struktur yang hendak dicapai. Kinerja tersebut dapat diperoleh melalui evaluasi menggunakan *capacity spectrum method* (CSM) atau *displacement coefficient method* (DCM). Kedua metode tersebut digunakan setelah melakukan analisis *pushover* (analisis nonlinear statik).

Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kinerja struktur dari bangunan perkantoran 7 lantai menggunakan analisis *pushover*. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui tingkat kinerja struktur apakah berada pada level *immediate occupancy* (IO), *life safety* (LS), dan *collapse prevention* (CP) berdasarkan beban gempa dengan periode ulang 500 tahunan (BSE-1N) dan 2500 tahunan (BSE-2N). Selain itu penelitian ini juga akan mengevaluasi parameter daktilitas struktur. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi perkuatan bangunan yang sudah ada ataupun rekomendasi desain yang lebih baik untuk bangunan bertingkat di masa mendatang.

### Analisis *pushover*

Analisis *pushover* merupakan analisis statik dengan memberikan beban horizontal, dengan pola pembebanan tertentu, secara bertahap, hingga struktur mencapai batasannya (ATC 40, 1996). Analisis *pushover* dapat dianalogikan seperti pada Gambar 1, dimana beban horizontal diberikan secara bertahap untuk mendorong (menarik) bagunan hingga mencapai kondisi batasnya (*limit state*).



Gambar 1. Analogi *pushover analysis* (ATC 40, 1996)

Tujuan utama dari analisis *pushover* adalah untuk memperkirakan kekuatan lateral global, daktilitas dari perpindahan global, serta mekanisme kegagalan struktur saat terkena gaya lateral akibat getaran tanah selama gempa (Sutanto & Christianto, 2022). Analisis *pushover* digunakan untuk mencari/mengevaluasi kinerja struktur yg dicapai dari hasil perancangan sebelumnya. Kinerja struktur meliputi:

- 1) kinerja IO/LS/CP dihubungkan dengan beban gempa yg dipakai utk evaluasi.
- 2) Nilai parameter daktilitas, yg meliputi:  $R$ ,  $\Omega_0$ , dan  $C_d$ .

Meskipun konsep dasar analisis ini cukup sederhana dan bukan merupakan metode terbaik untuk menyelesaikan masalah analisis atau desain, namun informasi yang dihasilkan dapat menggambarkan respons inelastic bangunan saat gempa yang dapat digunakan sebagai indikator kinerja suatu bangunan ketika menghadapi guncangan gempa kuat.

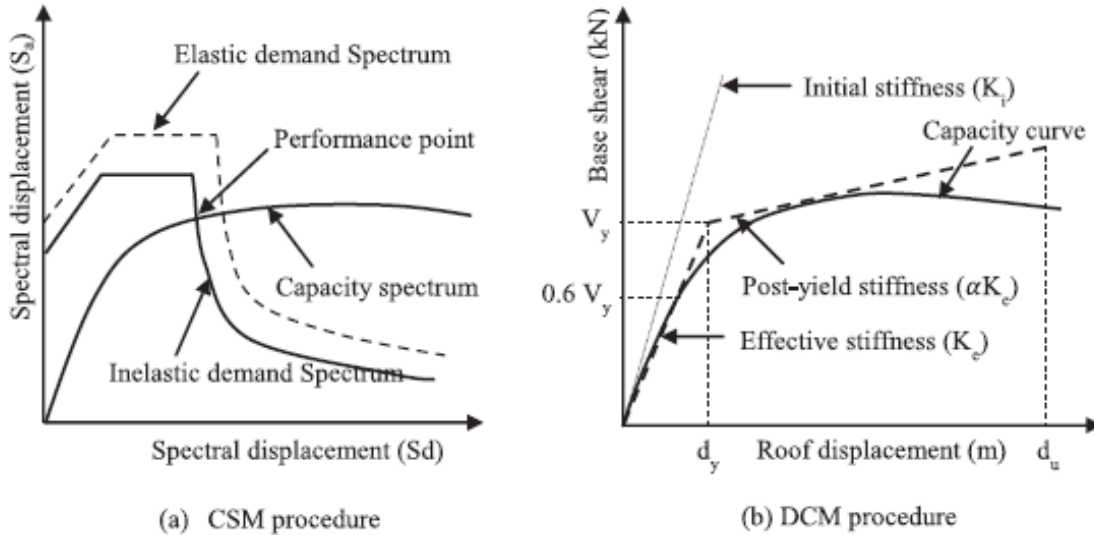
### *Performance-based seismic design* (PBSD)

*Performance based seismic design* (PBSD) adalah proses perancangan bangunan baru atau peningkatan kinerja seismik pada bangunan yang ada dengan tujuan untuk memastikan bahwa struktur bangunan dapat mempertahankan fungsinya apabila terkena beban seismik (Mehare & Joshi, 2021)

Dokumen terkait PBSD telah menyajikan beberapa prosedur evaluasi, termasuk CSM dan DCM, dengan menggunakan analisis *pushover* statis nonlinier (NLSP). Menurut Mechaala et al. (2018), DCM bekerja dengan memperkirakan perpindahan inelastis sistem MDOF dengan memanfaatkan respons linear dari sistem SDOF.

CSM membandingkan kurva kapasitas struktur dengan kurva respons spektrum untuk memperoleh titik kinerja struktur (Rosyidah & Ramadhani, 2020). Dalam CSM, kurva kapasitas dan grafik respons spektrum harus dikonversikan menjadi grafik *spectral acceleration* (Sa) – *spectral displacement* (Sd).

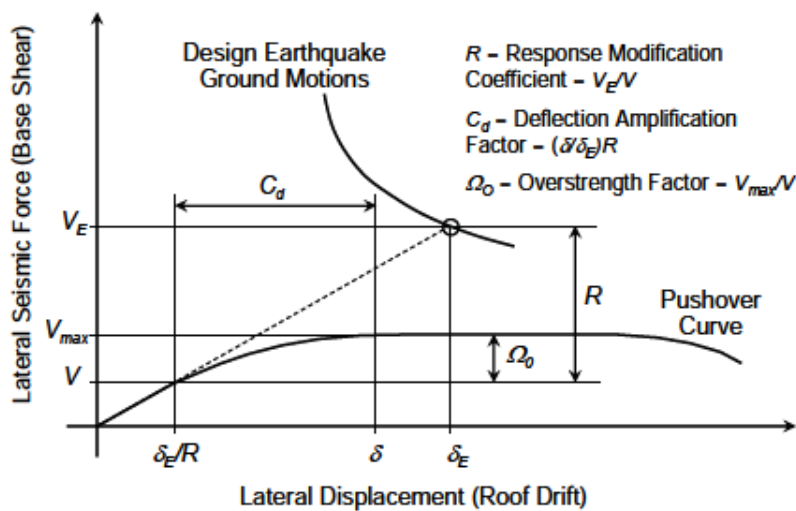
Metode CSM dan DCM dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Metode CSM dan metode DCM (Zameeruddin & Sangle, 2021)

**Faktor modifikasi respons (R)**

Faktor modifikasi respons (R) merupakan parameter penting dalam konstruksi desain seismik. Faktor modifikasi respons menggambarkan kapasitas suatu struktur dalam menyerap energi melalui perilaku inelastik (Abdi et al., 2019).



Gambar 3. Definisi faktor daktilitas dari kurva V-δ (FEMA P-695, 2009)

Kurva V-δ pada Gambar 3 diambil dari FEMA P695 (2009) yang menggambarkan perilaku struktur dari kondisi elastik hingga mencapai kondisi inelastik (sesaat sebelum runtuh). Faktor daktilitas akan sulit untuk ditentukan apabila kondisi struktur belum mencapai inelastik, dikarenakan bentuk kurva V-δ yang masih merupakan garis lurus diagonal, dan belum memiliki bagian kurva parabolik. (Prabowo & Lase, 2016)

Berdasarkan Gambar 3, nilai faktor modifikasi respons dapat dihitung menggunakan Persamaan 1

$$R = \frac{V_E}{V} \tag{1}$$

dengan  $V_E$  = nilai gaya gempa pada saat struktur elastik penuh ( $R = 1$ ),  $V$  = beban seismik rencana yang diberikan pada perancangan struktur.

### Faktor kuat lebih ( $\Omega_0$ )

Bedasarkan Gambar 3 yang diambil dari FEMA P695 (2009), nilai  $\Omega_0$  dapat diperoleh menggunakan Persamaan 2.

$$\Omega_0 = \frac{V_{\max}}{V} \quad (2)$$

dengan  $V_{\max}$  = gaya geser maksimum ketika seluruh elemen struktur mengalami pelelehan dan  $V$  = beban seismik rencana yang diberikan pada perancangan struktur.

Dengan adanya faktor kuat lebih, struktur tetap aman ketika ada getaran yang cukup besar. Nilai  $\Omega_0$  yang lebih besar menunjukkan kekuatan struktur yang lebih tinggi terhadap beban seismik, memastikan struktur bawah tidak gagal lebih dulu daripada struktur atasnya (Hendrawan & Christianto, 2022).

### Faktor pembesaran defleksi ( $C_d$ )

Faktor pembesaran defleksi ( $C_d$ ) menggambarkan kemampuan struktur untuk mengalami deformasi ketika terkena beban gempa (Tavio & Wijaya, 2018). Nilai faktor pembesaran defleksi ( $C_d$ ) dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.

$$C_d = \frac{\delta}{\delta_E/R} \quad (3)$$

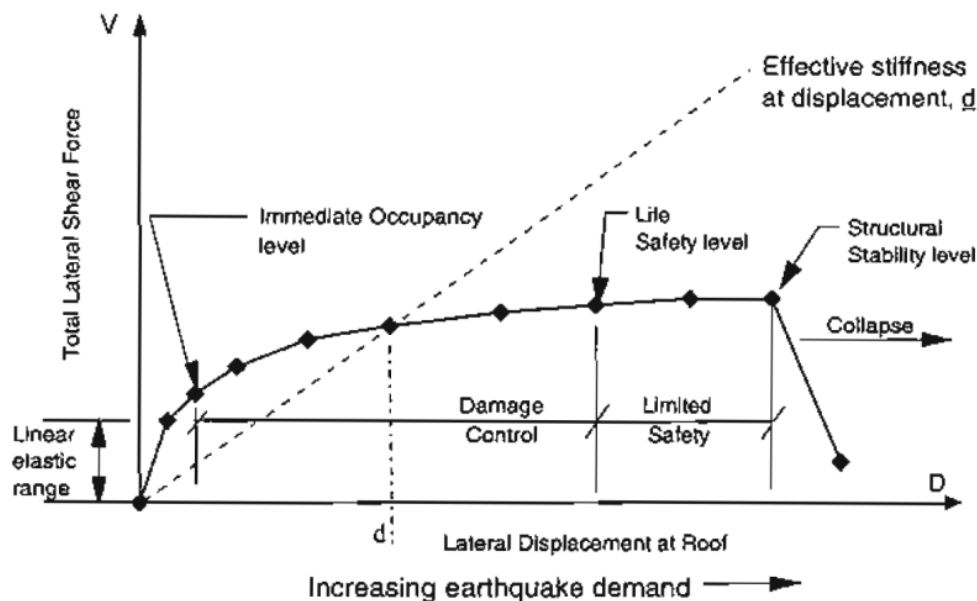
Dengan  $\delta$  = perpindahan atap ketika struktur mencapai kondisi leleh,  $\delta_E/R$  = nilai perpindahan atap ketika struktur diberikan beban seismik rencana sebesar  $V$ .

Faktor pembesaran defleksi ( $C_d$ ) diterapkan pada hasil analisis elastis untuk memperhitungkan perilaku non-linear struktur dan memberikan estimasi simpangan maksimum atap dan lantai saat terjadi gempa. (Marcella & Christianto, 2022).

### Tingkat kinerja struktur

Teknologi desain gempa saat ini telah mengadopsi konsep *performed based seismic design*, yang menggunakan analisis non-linear dengan bantuan *software* komputer untuk mengevaluasi perilaku inelastik struktur pada berbagai tingkat intensitas gempa, guna menilai kinerja struktur pada kondisi kritis.

Menurut ATC 40 (1996), terdapat beberapa tingkatan kinerja struktur yang dapat digambarkan pada kurva hubungan antara gaya-gaya yang bekerja dan perpindahan lateral seperti pada Gambar 4.



Gambar 4. Kurva kapasitas tingkat kinerja struktur (ATC 40, 1996)

Deformasi lateral pada performance point harus diperiksa dengan batasan deformasi pada berbagai tingkat kinerja seperti pada Tabel 1-2.

Tabel 1. Batasan deformasi untuk setiap tingkat kerja menurut ATC 40 (1996)

Batasan Simpangan Antar Tingkat	Tingkat Kinerja			
	<i>Immediate Occupancy</i>	<i>Damage Control</i>	<i>Life Safety</i>	<i>Structural Stability</i>
Simpangan Total Maksimum	0,01	0,01 – 0,02	0,02	$0,33 \frac{V_i}{P_i}$
Simpangan Inelastik Maksimum	0,005	0,005 – 0,015	Tidak ada batasan	Tidak ada batasan

Tabel 2. Batasan deformasi untuk setiap tingkat kerja menurut FEMA 356 (2000)

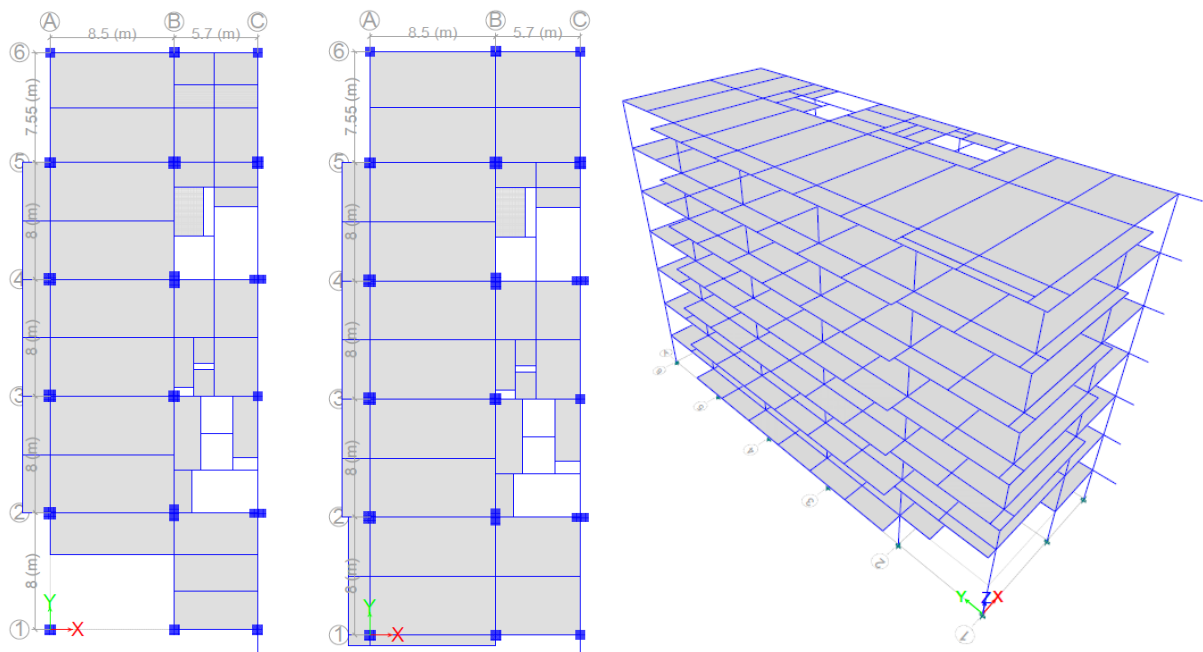
Elemen	Tingkatan Kinerja		
	Collapse Prevention (S-5)	Life Safety (S-3)	Immediate Occupancy (S-1)
Portal Rangka Beton	4% simpangan sementara atau permanen	2% simpangan sementara; 1% simpangan permanen	1% simpangan sementara; simpangan permanen diabaikan
Dinding Beton	2% simpangan sementara atau permanen	1% simpangan sementara; 0,5% simpangan permanen	0,5% simpangan sementara; simpangan permanen diabaikan

## 2. METODE PENELITIAN

Pemodelan dan analisis pada penelitian ini dilakukan menggunakan program ETABS. Struktur dimodelkan sebagai struktur 3D dengan sistem struktur berupa balok dan kolom. Perhitungan beban struktur mengacu pada SNI 1727:2020 yang kemudian dievaluasi menggunakan analisis statik non linier.

### Deskripsi umum bangunan

Bangunan yang akan dimodelkan dalam analisis ini merupakan gedung beton bertulang dengan sistem penahan gempa berupa sistem rangka pemikul momen khusus yang terdiri dari balok dan kolom. Bangunan memiliki ketinggian 27,5 meter dengan 8 lantai yang diperuntukkan sebagai perkantoran, yang dapat dilihat pada Gambar 5. Bangunan yang akan dievaluasi berlokasi di daerah Gading Serpong, Tangerang Selatan, dan diasumsikan berada di atas tanah lunak. Data gedung yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 3.



Gambar 5. Denah dan tampak 3D Gedung

Tabel 3. Data struktur bangunan

Elemen Struktur	Keterangan
Luas Bangunan	$47,55 \times 14,2 \text{ m}^2$
Tinggi Bangunan	27,5 m
Tinggi Lantai antar Tingkat	
Lantai Dasar	3,50 m
Lantai Tipikal (6 Lantai)	4,00 m
Mutu Beton	
Balok dan Pelat Lantai	25 MPa
Kolom Lt. 1 – 4	35 MPa
Kolom Lt. 4 – 6	30 MPa
Kolom Lt. 6 – Atap	25 MPa
Mutu Baja Tulangan	
Tulangan Longitudinal	420 MPa
Tulangan Sengkang	420 MPa

### Prosedur analisis

Dalam penelitian ini, perhitungan beban gravitasi pada struktur mengacu pada SNI 1727:2020 dan perhitungan beban gempa mengacu pada SNI 1726:2019. Analisis beban gempa dilakukan menggunakan analisis respon spektrum (ARS). Pada analisis ini, dilakukan perbandingan antara gaya gempa dari analisis statik ekuivalen (ASE) dengan gaya gempa hasil ARS yang diperoleh dengan bantuan program ETABS. Hasil dari perbandingan tersebut kemudian akan menjadi dasar dalam menentukan gaya gempa desain pada struktur bangunan. Apabila gaya geser dasar dari hasil ASE lebih besar dari hasil ARS, maka nilai gaya geser dasar ARS perlu diamplifikasi sedemikian sehingga sama dengan gaya geser dasar hasil ASE.

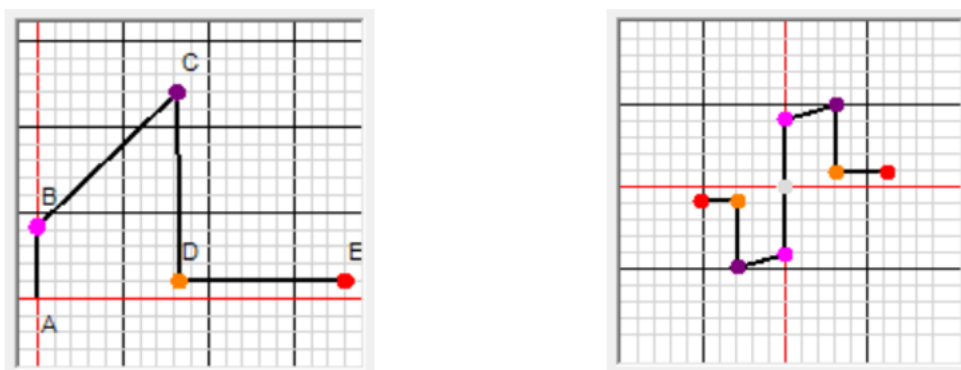
Selanjutnya, dilakukan analisis gaya-gaya dalam menggunakan program ETABS menggunakan kombinasi pembebanan menurut SNI 1727:2020 untuk memperoleh nilai gaya-gaya dalam elemen struktur. Gaya dalam yang diperoleh akan digunakan untuk mendesain penulangan. Hasil desain tulangan kemudian dimasukkan ke dalam program ETABS untuk kemudian dilakukan pemodelan sendi plastis untuk melakukan analisis *pushover*.

Dari analisis *pushover*, didapatkan pola keruntuhan pada model struktur serta kurva *pushover* (kurva kapasitas). Kurva *pushover* menunjukkan hubungan antara gaya geser dengan perpindahan atap. Kurva ini kemudian digunakan untuk menilai kinerja struktur menggunakan metode metode spektrum kapasitas (CSM) yang mengacu pada ATC 40 (1996), serta metode koefisien perpindahan (DCM) yang mengacu pada FEMA 356 (2000) dan FEMA 440 (2005).

### Pemodelan sendi plastis

Sendi plastis pada elemen balok dan kolom dimodelkan secara otomatis menggunakan bantuan program ETABS. Pemodelan sendi plastis pada elemen balok kolom mengacu pada ASCE 41-17 yang mengadopsi pola sendi plastis terpusat di kedua ujung elemen struktur. Perilaku sendi plastis yang dipilih yaitu *deformation controlled* untuk kedua elemen struktur (balok dan kolom). Perilaku sendi plastis berupa *deformation controlled* mengakibatkan perilaku struktur relatif lebih daktail dibandingkan dengan perilaku sendi *force controlled*. Hal ini dikarenakan parameter kegagalan ditentukan berdasarkan deformasi ketimbang kekuatan ultimitnya.

Berdasarkan ASCE 41-17 (2017), terdapat kriteria penerimaan untuk sendi plastis dengan perilaku *deformation controlled*, yang didasarkan pada hubungan antara beban dengan deformasi yang terjadi. Grafik kriteria penerimaan sendi plastis dapat dilihat pada Gambar 6



(a) Grafik kriteria penerimaan sendi plastis kolom (b) Grafik kriteria penerimaan sendi plastis balok

Gambar 6. Grafik hubungan beban – deformasi (ASCE 41-17, 2017)

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### Kontrol simpangan antar tingkat

Pemeriksaan simpangan antar tingkat berguna untuk memeriksa kecukupan dimensi balok dan kolom terhadap kekakuan struktur bangunan secara keseluruhan. Pemeriksaan kekakuan diperlukan agar struktur rangka pemikul momen khusus membatasi fleksibilitas struktur sehingga memenuhi syarat layan bangunan.

Mengacu pada SNI 1726:2019, simpangan antar tingkat desain ( $\Delta$ ) diperoleh dari selisih defleksi di pusat massa antara tingkat teratas dan terbawah pada struktur. Nilai defleksi pusat massa pada tingkat x ( $\delta_x$ ) dapat diperoleh melalui Peramaan 4

$$\delta_x = \frac{C_d \times \delta_{xe}}{I_e} \tag{4}$$

Dengan  $C_d$  = faktor pembesaran defleksi,  $\delta_{xe}$  = defleksi di tingkat-x yang disyaratkan, yang ditentukan dengan analisis elastic,  $I_e$  = faktor keutamaan gempa.

Untuk memenuhi persyaratan kinerja batas ultimate struktur, simpangan antar tingkat struktur harus dibatasi tidak boleh melebihi 0,025 (25%) dari tinggi lantai yang bersangkutan. Dengan nilai  $C_d = 5,5$  dan  $I_e = 1$ , hasil kontrol simpangan antar tingkat dapat dilihat pada Tabel 4 dan Tabel 5.

Menurut SNI 1726:2019, untuk memenuhi persyaratan kinerja batas ultimate struktur, simpangan antar tingkat tidak boleh melebihi simpangan antar tingkat izin ( $\Delta_a$ ) sebesar 0,025 (25%) dari tinggi tingkat yang bersangkutan. Untuk bangunan dengan kategori desain seismik tipe D, E, atau F, simpangan antar tingkat desain tidak boleh melebihi  $\Delta_a/\rho$  untuk semua tingkat. Dengan nilai  $C_d = 5,5$ ;  $\rho = 1,3$  dan  $I_e = 1$ , hasil kontrol simpangan antar tingkat dapat dilihat pada Tabel 4 dan Tabel 5.

Tabel 4. Kontrol simpangan antar tingkat arah X

Lantai	Tinggi (mm)	Kinerja Batas Ultimate Arah X				Keterangan
		Drift X (mm)	$\delta$ (mm)	$\Delta$ (mm)	$\Delta_a$ (mm)	
Atap	4000	58,60	322,32	25,32	76,92	OK
7	4000	54,00	296,99	41,72	76,92	OK
6	4000	46,41	255,27	53,80	76,92	OK
5	4000	36,63	201,47	62,49	76,92	OK
4	4000	25,27	138,98	61,25	76,92	OK
3	4000	14,13	77,73	51,18	76,92	OK
2	4000	4,65	25,55	25,55	76,92	OK

Tabel 5. Kontrol simpangan antar tingkat arah Y

Lantai	Tinggi (mm)	Kinerja Batas Ultimate Arah Y				Keterangan
		Drift Y (mm)	$\delta$ (mm)	$\Delta$ (mm)	$\Delta a$ (mm)	
Atap	4000	60,27	331,46	23,32	76,92	OK
7	4000	56,03	308,14	38,41	76,92	OK
6	4000	49,04	269,74	51,43	76,92	OK
5	4000	39,69	218,31	62,47	76,92	OK
4	4000	28,33	155,84	67,20	76,92	OK
3	4000	16,12	88,64	61,16	76,92	OK
2	4000	5,00	27,48	27,48	76,92	OK

### Kontrol ketidakberaturan torsi

Berdasarkan SNI 1726:2019, Adanya ketidakberaturan torsi didefinisikan sebagai kondisi dimana simpangan antar tingkat maksimum pada salah satu ujung struktur melintang terhadap sumbu melebihi 1,2 atau 1,4 kali simpangan antar tingkat rata-rata pada kedua ujung struktur.

Apabila bangunan mengalami ketidakberaturan torsi atau torsi berlebih, maka nilai torsi tak terduga perlu diperbesar dengan faktor pembesaran  $A_x$ . Nilai  $A_x$  dapat dihitung menggunakan Persamaan 5.

$$A_x = \left( \frac{\delta_{\max}}{1,2 \delta_{\text{avg}}} \right)^2 \quad (5)$$

Dengan  $\delta_{\max}$  = perpindahan maksimum ditingkat x (mm) dengan asumsi  $A_x = 1$  (mm),  $\delta_{\text{avg}}$  = perpindahan lantai rata-rata dengan asumsi  $A_x = 1$  (mm). Nilai faktor pembesaran torsi ( $A_x$ ) tidak boleh kurang dari 1 atau lebih dari 3. Hasil kontrol torsi pada bangunan dapat dilihat pada Tabel 6 dan Tabel 7.

Tabel 6. Ketidakberaturan torsi arah X

Lantai	Ketidakberaturan Torsi Arah X				
	$\delta_{\max}$ (mm)	$\delta_{\text{avg}}$ (mm)	$\delta_{\max}/\delta_{\text{avg}}$ (mm)	Batasan	Keterangan
Atap	7,22	6,32	1,14	1,2	OK
7	11,06	9,79	1,13	1,2	OK
6	13,21	11,95	1,11	1,2	OK
5	15,63	13,78	1,13	1,2	OK
4	16,95	13,89	1,22	1,2	TORSI
3	15,67	11,16	1,40	1,2	TORSI BERLEBIH
2	6,759	5,637	1,199	1,2	OK

Tabel 7. Ketidakberaturan torsi arah Y

Lantai	Ketidakberaturan Torsi Arah X				
	$\delta_{\max}$ (mm)	$\delta_{\text{avg}}$ (mm)	$\delta_{\max}/\delta_{\text{avg}}$ (mm)	Batasan	Keterangan
Atap	5,12	4,96	1,03	1,2	OK
7	8,19	7,86	1,04	1,2	OK
6	10,52	10,12	1,04	1,2	OK
5	12,43	11,98	1,04	1,2	OK
4	12,90	12,58	1,03	1,2	OK
3	11,65	11,38	1,02	1,2	OK
2	5,38	5,18	1,04	1,2	OK



Berdasarkan hasil yang diperoleh, struktur mengalami ketidakberaturan torsi berlebih pada arah X, sehingga diperlukan faktor pembesaran torsi tak terduga ( $A_x$ ) untuk lantai 4 dan lantai 3 pada arah X. Nilai faktor pembesaran torsi tak terduga ( $A_x$ ) untuk lantai 3 dan 4 pada arah X dapat dilihat pada Tabel 8.

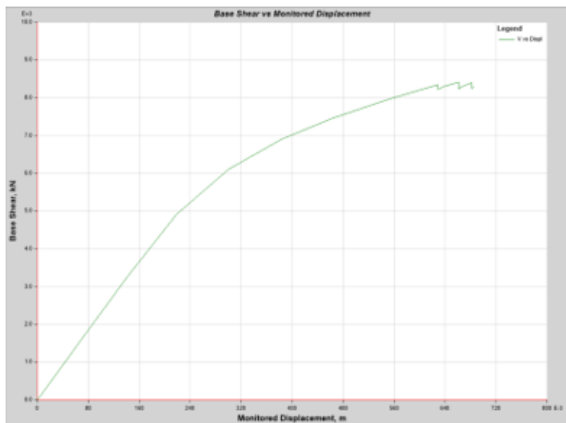
Tabel 8. Faktor pembesaran torsi arah X

Lantai	Faktor Pembesaran Torsi Arah X				
	$\delta_{max}$ (mm)	$\delta_{avg}$ (mm)	$A_x$ (mm)	%	Eksentrisitas (m)
4	16,95	13,89	1,03	5,2%	1,86
3	15,67	11,16	1,37	6,9%	2,47

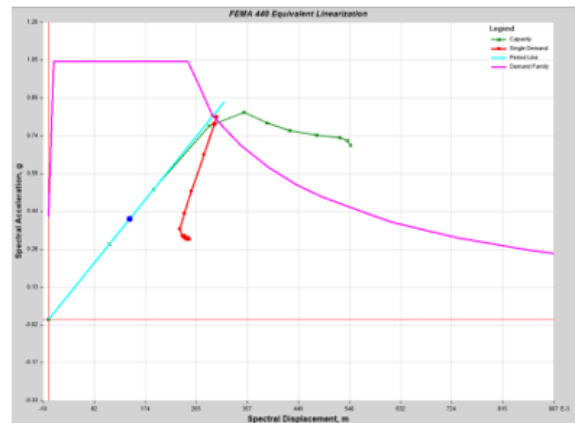
**Analisis pushover**

Pada penelitian ini, analisis *pushover* dilakukan berdasarkan ASCE 41-17. Pemodelan struktur dengan sendi plastis kemudian dilakukan analisis dengan beban *pushover* untuk arah X dan arah Y dengan meninjau 1 titik pada struktur sebagai *control node*. Hasil dari analisis *pushover* akan berupa kurva kapasitas struktur ( $V - \delta$ ).

Kurva kapasitas menggambarkan kemampuan struktur dalam menahan beban lateral yang diperoleh dengan membandingkan besarnya gaya geser dasar aktual dengan pergeseran yang terjadi pada bagian atas struktur (defleksi atap) sebagai hasil dari analisis *pushover*. Kurva kapasitas dari gedung yang dibahas dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 7-8.

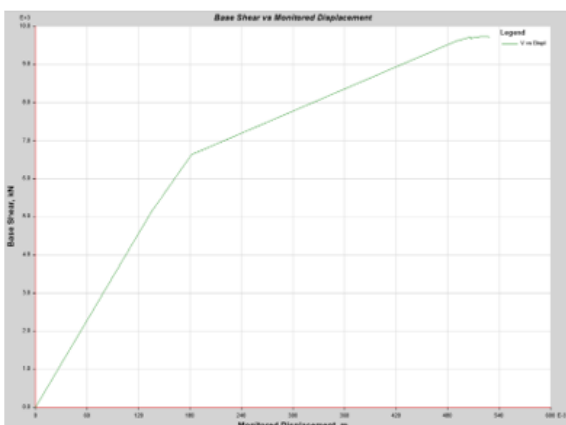


(a) Kurva Kapasitas X ( $V$  vs  $\delta$ )

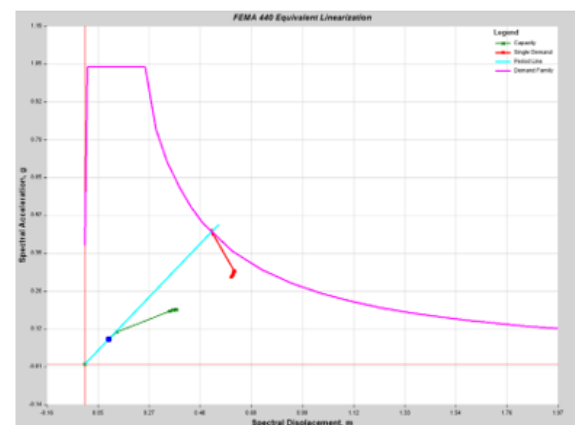


(b) Kurva Kapasitas X ( $S_a$  vs  $S_d$ )

Gambar 7. Kurva kapasitas arah X



(a) Kurva Kapasitas Y ( $V$  vs  $\delta$ )



(b) Kurva Kapasitas Y ( $S_a$  vs  $S_d$ )

Gambar 8. Kurva kapasitas arah Y

Dalam evaluasi seismik bangunan, bahaya gempa perlu diperhatikan. Bahaya gempa yang disebabkan oleh pergerakan tanah adalah semua bahaya gempa dengan meninjau spektrum respons redaman 5% di sumbu ordinat pada periode pendek (0,2 detik) dan periode panjang (1 detik), dalam respons maksimum arah horizontal (ASCE, 2017).

Desain parameter periode pendek ( $S_{xs}$ ) dan periode panjang ( $S_{x1}$ ) ditentukan berdasarkan level bahaya seismik yang diharapkan. Pada penelitian ini, level bahaya seismik yang ditinjau adalah BSE-2N dan BSE-1N. Parameter  $S_{xs}$  dan  $S_{x1}$  untuk BSE-2N ditentukan berdasarkan Bab 6 SNI 1726:2019, sedangkan untuk BSE-1N diperoleh dari  $2/3$  dari nilai parameter  $S_{xs}$  dan  $S_{x1}$  pada BSE-2N. Parameter tersebut kemudian digunakan untuk memplot grafik respon spektrum ke dalam grafik kurva kapasitas ( $S_a - S_d$ ).

$S_{xs}$  dan  $S_{x1}$  juga dapat digunakan untuk memeriksa kinerja struktur. Nilai  $S_{xs}$  dan  $S_{x1}$  akan mempengaruhi *performance point* yang diperoleh dalam metode CSM ataupun DCM. *Performance point* yang diperoleh berupa gaya lateral ( $V$ ) dan perpindahan ( $\delta$ ) kemudian ditinjau pada kurva kapasitas  $V - \delta$  untuk menentukan kinerja struktur pada kondisi *performance point* tersebut.

Berdasarkan hasil grafik  $S_a-S_d$  dengan desain parameter BSE-1N dan BSE-2N, diperoleh nilai untuk gaya geser dan perpindahan seperti pada Tabel 9.

Tabel 9. Gaya geser dan perpindahan struktur

	Parameter Gaya Geser dan Perpindahan Struktur							
	$V_E$ (g)	$\delta_E$ (mm)	$V_{max}$ (g)	$\delta_{max}$ (mm)	$V_{yield}$ (g)	$\delta_{yield}$ (mm)	$V_{design}$ (g)	$\delta_{design}$ (mm)
Arah X	0,82	0,29	0,84	0,54	0,52	0,19	0,09	0,14
Arah Y	0,47	0,53	0,19	0,39	0,11	0,13	0,09	0,1

Dari nilai parameter yang diperoleh, dapat dihitung nilai  $R$ ,  $\Omega_0$ , dan  $C_d$  ditinjau berdasarkan nilai  $V_{yield}$  (beban seismik ketika pada struktur terdapat satu elemen mencapai leleh), dan  $V_{design}$  (beban seismik rencana yang diberikan pada perancangan struktur) menggunakan rumus sesuai dengan yang telah disebutkan sebelumnya. Nilai faktor daktilitas dapat dilihat pada Tabel 10.

Tabel 10. Faktor daktilitas struktur

	Menggunakan $V_{yield}$			Menggunakan $V_{design}$		
	$R$	$\Omega_0$	$C_d$	$R$	$\Omega_0$	$C_d$
Arah X	1,56	1,59	2,87	9,11	9,31	3,99
Arah Y	3,63	2,26	4,06	5,18	2,15	3,92

## Evaluasi kinerja struktur

Metode yang digunakan dalam evaluasi kinerja struktur bangunan yang ditinjau adalah dengan menggunakan *Capacity Spectrum Method* (CSM), dan *Displacement Coefficient Method* (DCM).

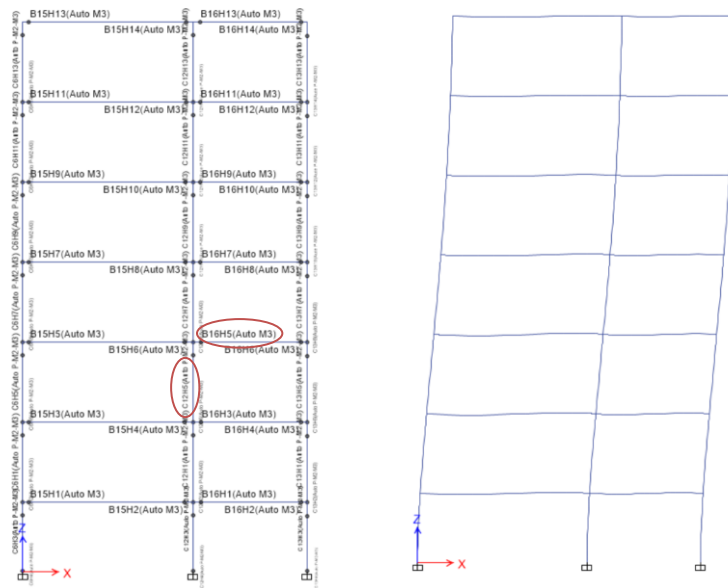
Hasil dari CSM dan DCM pada struktur yang ditinjau dapat dilihat pada Tabel 11-12.

Tabel 11. Kinerja struktur berdasarkan beban gempa

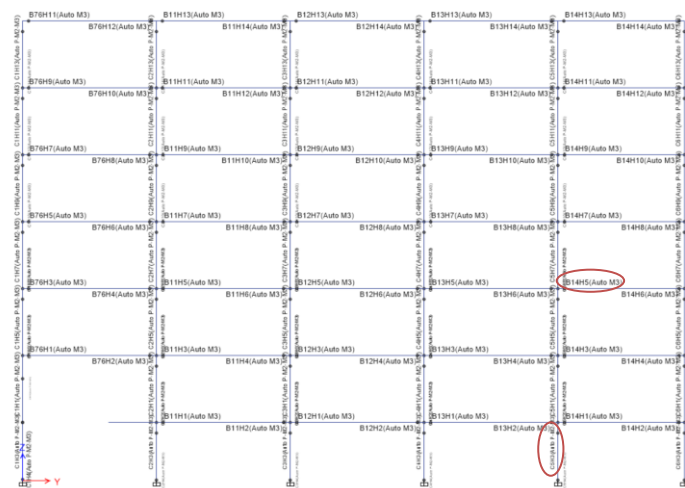
Parameter	Metode Evaluasi							
	BSE-2N				BSE-1N			
	CSM		DCM		CSM		DCM	
	Arah X	Arah Y	Arah X	Arah Y	Arah X	Arah Y	Arah X	Arah Y
Shear (kN)	5086,05	-	5059,71	9717,23	3339,57	-	3352,97	9587,93
$\delta$ (m)	0,23	-	0,22	0,72	0,14	-	0,15	0,49
Kinerja	A - IO	-	A - IO	LS - CP	A - IO	-	A - IO	IO - LS
<i>Pushover step</i>	3 - 4	-	3 - 4	18	2 - 3	-	2 - 3	2 - 3

Dari Tabel 11, dapat dilihat bahwa hasil analisis CSM dan DCM memiliki nilai yang tidak jauh berbeda. Nilai gaya geser yang diperoleh pada analisis CSM dan DCM memiliki selisih  $<1\%$ . Untuk analisis CSM arah Y tidak diperoleh *performance point* dikarenakan grafik kurva kapasitas tidak memiliki titik temu dengan grafik respons spektrum.

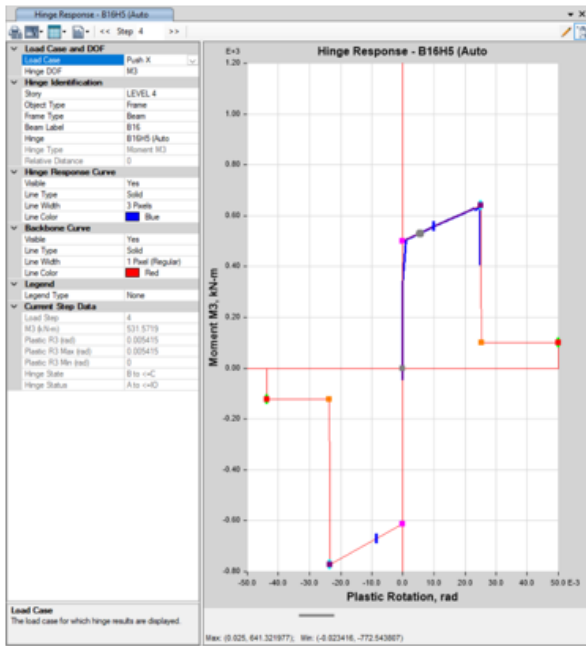
Kondisi sendi plastis dan struktur bangunan ketika mencapai *target displacement* dapat dilihat pada Gambar 9-12.



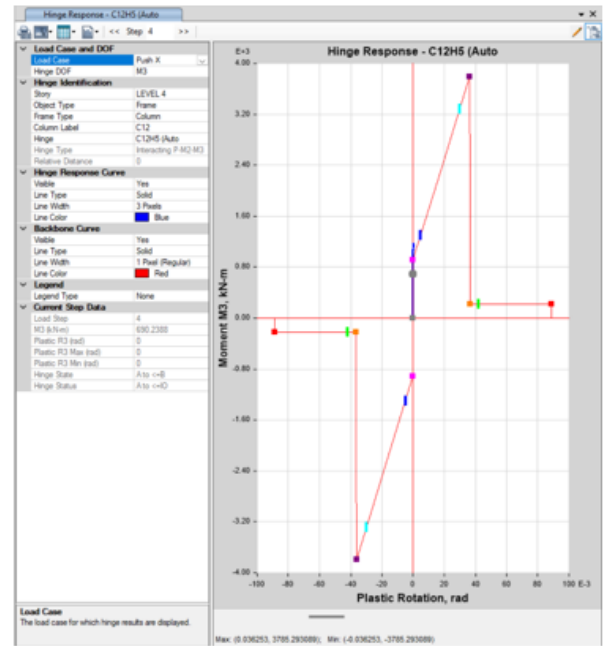
Gambar 9. Kondisi struktur bangunan arah X



Gambar 10. Kondisi struktur bangunan arah Y

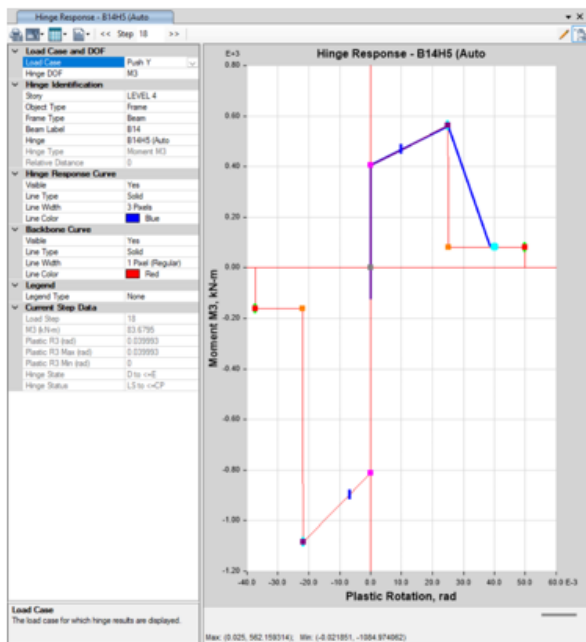


(a) Sendi plastis B16H5

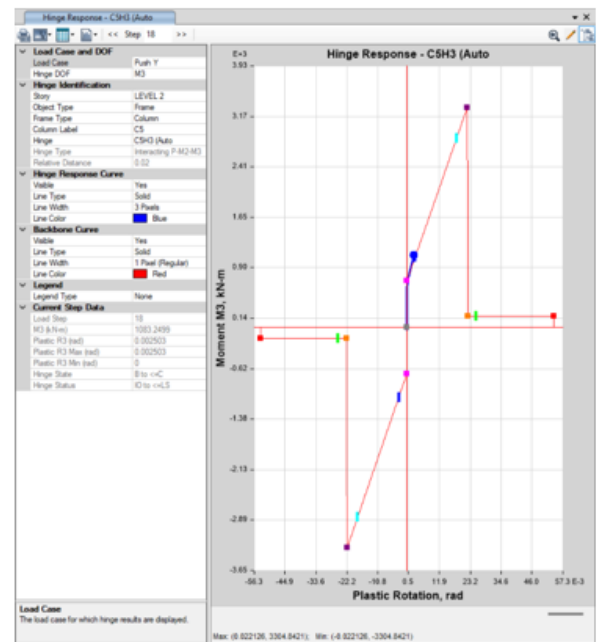


(b) Sendi plastis C12H5

Gambar 11. Kondisi sendi plastis balok dan kolom arah X



(a) Sendi plastis B14H5



(b) Sendi plastis C5H3

Gambar 12. Kondisi struktur bangunan arah Y

#### 4. KESIMPULAN

Dari hasil analisis yang dilakukan pada struktur bangunan, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Dari hasil analisis *pushover* arah X, nilai faktor daktilitas berdasarkan  $V_{design}$  memiliki nilai R dan  $\Omega_0$  lebih besar dari nilai yang direkomendasikan oleh SNI 1726:2019, sedangkan nilai  $C_d$  lebih kecil dibandingkan yang direkomendasikan oleh SNI 1726:2019.

2. Dari hasil analisis *pushover* arah Y, nilai faktor daktilitas berdasarkan  $V_{design}$  masih dibawah nilai yang direkomendasikan oleh SNI 1726:2019.
3. Dari hasil analisis *pushover* arah X dan Y, nilai faktor daktilitas berdasarkan  $V_{yield}$  masih dibawah nilai yang direkomendasikan oleh SNI 1726:2019.
4. Struktur arah Y tidak memperoleh *performance point* dikarenakan kapasitas struktur yang kurang optimal sehingga struktur sudah mengalami kegagalan sebelum mencapai titik target yang direncanakan.
5. Berdasarkan beban gempa BSE-1N dan BSE-2N, struktur arah X memiliki kinerja seismik di bawah level yang diharapkan. Hal ini berarti desain struktur dapat dioptimasi kembali sehingga level kinerja struktur dapat ditingkatkan.
6. Berdasarkan beban gempa BSE-1N dan BSE-2N, level kinerja struktur pada arah Y di atas level kinerja yang diharapkan. Hal ini berarti perlu adanya perbaikan desain dengan menambah kekuatan seperti menambah tulangan sedemikian sehingga level kinerja struktur dapat mencapai kinerja yang diharapkan.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abdi, H., Hejazi, F., & Jaafar, M. S. (2019). Response modification factor - review paper. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 357(1), 012003. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/357/1/012003>
- American Society of Civil Engineers. (2017). *Seismic evaluation and retrofit of existing buildings* (ASCE 41-17). <https://ascelibrary.org/doi/book/10.1061/9780784414859>
- Applied Technology Council. (1996). *Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings volume 1* (ATC 40).
- Badan Standardisasi. (2020). *Beban desain minimum dan kriteria terkait untuk bangunan gedung dan struktur lain* (SNI 1727:2020). <http://sispk.bsn.go.id/SNI/DaftarList>
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). *Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan nongedung* (SNI 1726:2019). <http://sispk.bsn.go.id/SNI/DaftarList>
- Federal Emergency Management Agency. (2000). *Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings* (FEMA 356). <https://www.fema.gov/multimedia-library>
- Federal Emergency Management Agency. (2005). *Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures* (FEMA 440). <https://www.fema.gov/multimedia-library>
- Federal Emergency Management Agency. (2009). *Quantification of building seismic performance factors* (FEMA P 695). <https://www.fema.gov/multimedia-library>
- Hendrawan, R., & Christianto, D. (2022). Faktor daktilitas struktur beton bertulang dengan bresing baja eksentris. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 5(4), 881-888. <https://doi.org/10.24912/jmts.v5i4.20425>
- Marcella, V., & Christianto, D. (2022). Analisis R,  $\Omega_0$ , Cd pada struktur rangka beton bertulang dengan multistory X-bracing menggunakan metode pushover. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 5(2), 457-468. <https://doi.org/10.24912/jmts.v5i2.16975>
- Mechaala, A., Chikh, B., Guezouli, S., Hamma, Z., Mehani, Y., & Benbouras, Mouhamed. A. (2018). Evaluation of the displacement coefficient method for seismic demands of structures. *Prossiding 1st International Conference on Vulnerability and Rehabilitation of Structures, Algiers*, 315-320.
- Mehare, S. P., & Joshi, M. M. (2021). Performance based seismic design of RCC building. *International Journal of Progressive Research in Science and Engineering*, 7(2), 80-83.
- Prabowo, A., & Lase, Y. (2016). Tinjauan nilai faktor modifikasi respon (R) dan faktor kuat lebih ( $\Omega_0$ ) pada struktur gabungan rangka baja dan rangka beton bertulang dengan analisis pushover. *Jurnal Teknik Sipil ITB*, 23(1), 75-88.
- Rosyidah, A., & Ramadhani, N. (2020). Direct displacement based design and capacity spectrum method for special moment resisting frame. *Logic: Jurnal Rancang Bangun Dan Teknologi*, 20(1), 6-12. <https://doi.org/10.31940/logic.v20i1.1455>
- Sutanto, M. K., & Christianto, D. (2022). Analisa nilai faktor daktilitas dengan metode pushover dengan perkuatan bresing diagonal tunggal. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 5(2), 469-480. <https://doi.org/10.24912/jmts.v5i2.16671>
- Tavio, & Wijaya, U. (2018). *Desain rekayasa gempa berbasis kinerja (performance based design) dilengkapi contoh program bantu Etabs* (Ed. 2). Andi.
- Zameeruddin, M., & Sangle, K. K. (2021). Performance-based seismic assessment of reinforced concrete moment resisting frame. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 33(3), 153-165. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.04.005>

