

EVALUASI KINERJA STRUKTUR GEDUNG BERTINGKAT DENGAN METODE *DIRECT DISPLACEMENT BASED DESIGN* DAN *NONLINEAR PUSHOVER ANALYSIS*

Eka Faisal Nurhidayatullah¹, Yoga Maulana Akhsan², Cahyo Dita Saputro³

^{1,2,3}Universitas Teknologi Yogyakarta

Email: eka.faisal@staff.uty.ac.id

Abstrak

Indonesia berada pada wilayah cincin api pasifik dengan tingkat aktifitas seismik tinggi. Kondisi ini menyebabkan bangunan gedung di negara ini berisiko mengalami kerusakan akibat gempa bumi. Metode perencanaan struktur bangunan di Indonesia umumnya menggunakan pendekatan *Force Based Design* (FBD). FBD belum mampu mensimulasikan perilaku struktur bangunan akibat gempa secara representatif, seperti metode perancangan berbasis kinerja. Salah satu metode perencanaan berbasis kinerja yaitu *Direct Displacement Based Design* (DDBD). Meskipun demikian, hasil perancangan struktur dengan DDBD masih memerlukan evaluasi. Evaluasi kinerja struktur dapat dikerjakan dengan metode *nonlinear pushover analysis*. Penelitian ini menggabungkan dua metode yaitu DDBD dan *pushover analysis*. DDBD dikerjakan untuk mendapatkan berbagai kriteria desain berbasis kinerja. Sedangkan, analisis pushover dilakukan guna menguji kondisi aktual struktur bangunan melalui simulasi respons inelastik struktur akibat beban gempa. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perbedaan nilai perpindahan, *interstory drift*, level kinerja struktur antara metode DDBD dengan *pushover analysis* serta mengidentifikasi pola keruntuhan struktur bangunan. Berdasarkan analisis sendi plastis diketahui bahwa keruntuhan elemen struktur terjadi pada balok terlebih dahulu kemudian kolom setelahnya. Pola ini mengindikasikan bahwa mekanisme keruntuhan telah memenuhi *Strong Column Weak Beam*. Hasil *pushover analysis* menunjukkan nilai perpindahan lateral struktur bangunan lebih kecil dari pada DDBD. Hasil *pushover analysis* menunjukkan bahwa nilai *interstory drift* cenderung lebih kecil dibandingkan dengan DDBD pada hampir seluruh tingkat bangunan. Namun demikian, terdapat indikasi adanya peningkatan *interstory drift* aktual pada tingkat 2–3 dibandingkan dengan tingkat – tingkat di atasnya. Bahkan, untuk pembebanan lateral pada arah sumbu y, *interstory drift* pada tingkat tersebut telah melampaui batas yang ditargetkan oleh DDBD, meskipun demikian angkanya masih berada di bawah ambang batas *Life Safety*, yaitu sebesar 0,02. Hasil evaluasi pushover berdasarkan ATC-40 dan FEMA 440 menunjukkan tingkat kinerja aktual berada pada kategori *Immediate Occupancy* hingga *Damage Control*. Struktur bangunan menunjukkan kinerja seismik yang lebih baik dari target DDBD yaitu *Life Safety*.

Kata kunci : *Direct displacement based design, pushover analysis, perpindahan, interstory drift, kinerja struktur*

1. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara yang berada pada wilayah cincin api pasifik dengan tingkat aktifitas seismik tinggi. Kondisi ini menyebabkan bangunan gedung di Indonesia berisiko mengalami kerusakan akibat gempa bumi. Oleh karena itu, perencanaan struktur gedung tahan gempa menjadi salah satu aspek yang penting untuk menjamin keselamatan jiwa, mengurangi kerugian material, serta menjaga keberlanjutan fungsi bangunan pascagempa.

Metode perencanaan struktur bangunan tahan gempa di Indonesia umumnya menggunakan pendekatan *Force Based Design* (FBD), yaitu perencanaan yang didasarkan pada gaya gempa elastis yang direduksi menggunakan faktor reduksi gempa (R) (BSN (1) , 2019). Pendekatan ini memiliki keterbatasan karena gaya bukanlah parameter utama yang secara langsung merepresentasikan tingkat kerusakan struktur saat terjadi gempa. Hal ini menunjukkan bahwa, metode FBD belum mampu

mensimulasikan perilaku struktur bangunan akibat gempa secara representatif (Priestley, 2007).

Seiring berkembangnya konsep rekayasa gempa modern, pendekatan berbasis kinerja *Performance Based Design* (PBD) mulai banyak diterapkan baik dalam perencanaan maupun evaluasi struktur bangunan. Pendekatan ini menitikberatkan pada pencapaian target kinerja tertentu, seperti *Immediate Occupancy* (IO), *Life Safety* (LS), atau *Collapse Prevention* (CP), dengan parameter utama berupa simpangan (*displacement*) dan *drift* struktur.

Salah satu metode perencanaan berbasis kinerja yang dapat digunakan yaitu *Direct Displacement Based Design* (DDBD). DDBD mampu merencanakan struktur secara langsung berdasarkan target simpangan yang diinginkan, sehingga respons inelastik struktur dapat diperhitungkan sejak awal proses desain. DDBD menawarkan keunggulan dibandingkan metode berbasis gaya karena lebih rasional dalam

mengontrol deformasi struktur dan tingkat kerusakan yang diharapkan (Wijaya U & Tavio , 2018). Metode ini memungkinkan perencana dapat memastikan bahwa struktur mencapai tingkat kinerja yang direncanakan pada saat terjadi gempa desain.

Meskipun demikian, hasil perancangan struktur berbasis kinerja dengan metode DDBD masih memerlukan evaluasi. Evaluasi kinerja struktur bangunan secara aktual akibat gempa dapat dikerjakan dengan metode *nonlinear pushover analysis* (Nurhidayatullah & Kurniati, 2021). Melalui *nonlinear pushover analysis* dapat diketahui perilaku aktual yaitu simpangan, *interstory drift*, tingkat kinerja hingga pola keruntuhan struktur bangunan akibat gempa bumi.

Penelitian ini menggabungkan dua metode yaitu *Direct Displacement Based Design* (DDBD) dan *Nonlinear Pushover Analysis*. DDBD dikerjakan untuk mendapatkan berbagai kriteria desain berbasis kinerja yang diinginkan. Sedangkan, analisis pushover dilakukan guna menguji kondisi aktual struktur bangunan melalui simulasi respons inelastik struktur bangunan akibat beban gempa. Analisis pushover diharapkan dapat memverifikasi apakah struktur benar-benar menunjukkan perilaku nonlinier yang diharapkan, termasuk pola pembentukan sendi plastis, kapasitas, daktilitas, dan mekanisme keruntuhan.

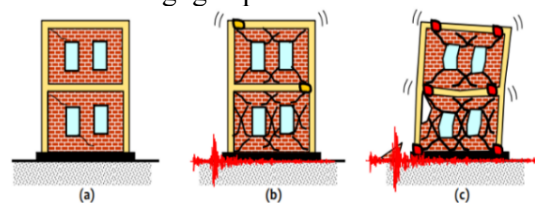
Dengan menggabungkan kedua metode berbasis kinerja dihadapkan dapat diketahui kinerja struktur bangunan tahan gempa yang lebih akurat, mampu mengidentifikasi kelemahan struktur serta mengurangi risiko keruntuhan struktur bangunan akibat gempa bumi secara signifikan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perbedaan nilai simpangan, *interstory drift*, level kinerja struktur antara metode *Direct Displacement Based Design* (DDBD) dengan *nonlinear pushover analysis* hingga mengidentifikasi pola keruntuhan pada struktur bangunan.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Bangunan Tahan Gempa

Menurut (Nurhidayatullah, E. F., & Ardiyanto., 2025), bangunan tahan gempa merupakan bangunan yang dirancang agar mampu menahan pengaruh beban gempa tanpa mengalami keruntuhan yang membahayakan keselamatan penghuni. Perencanaan bangunan tahan gempa menitikberatkan pada kemampuan struktur dalam memberikan kekuatan, kekakuan, dan daktilitas melalui penggunaan material serta

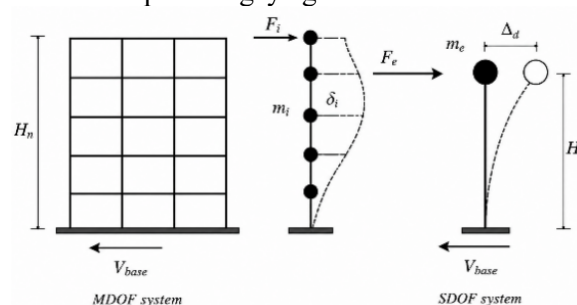
sistem struktur yang mampu menyerap dan meredam energi gempa.



Gambar 1. Respon Bangunan Gedung Terhadap Gempa (Sumber: (Vijayanarayanan, 2012))

2.2 Direct Displacement Based Design

Metode *Direct Displacement Based Design* (DDBD) adalah metode perencanaan struktur tahan gempa yang menggunakan target perpindahan (*displacement*) dan tingkat kinerja struktur sebagai dasar utama desain, sehingga perilaku inelastik struktur saat menerima gempa dapat diprediksi secara lebih realistis dibanding metode berbasis gaya (Priestley, 2007). Dalam metode DDBD, struktur direpresentasikan sebagai sistem derajat kebebasan tunggal ekuivalen, kemudian ditentukan simpangan target, redaman ekuivalen, dan periode efektif untuk memperoleh gaya geser dasar desain.



Gambar 2. SDOF Simulation
(Sumber: (Wijaya U & Tavio , 2018))

Dalam metode *Direct Displacement Based Design* (DDBD), desain perpindahan tingkat ditentukan berdasarkan *inelastic mode shape* dan tinggi masing-masing lantai struktur. Kemudian nilai ini digunakan untuk menentukan parameter seperti perpindahan SDOF (Δ_d) dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$\Delta_d = \frac{\sum_{i=0}^n (m_i \Delta_i^2)}{\sum_{i=0}^n (m_i \Delta_i)} \dots\dots\dots(1)$$

Tinggi efektif (H_e) dihitung berdasarkan persamaan berikut.

$$H_e = \frac{\sum_{i=0}^n (m_i \Delta_i h_i)}{\sum_{i=0}^n (m_i \Delta_i)} \dots\dots\dots(2)$$

Massa efektif (M_e) dihitung berdasarkan persamaan berikut.

$$M_e = \frac{\sum_{i=0}^n (m_i \Delta_i)}{\Delta_d} \dots\dots\dots(3)$$

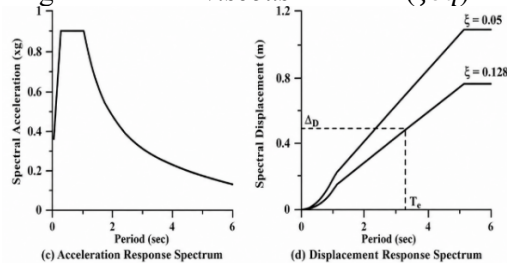
Daktilitas perpindahan (μ) dihitung berdasarkan persamaan berikut.

$$\mu = \frac{\Delta d}{\Delta y} \dots \dots \dots (4)$$

Redaman viscous ekivalen (ξ_{Fx}) dihitung berdasarkan persamaan berikut.

$$\xi_{Fx} = 0,05 + 0,565 \left(\frac{\mu - 1}{\mu \cdot \pi} \right) \dots \dots \dots (5)$$

Periode efektif (T_e) dapat dihitung dengan mengkonversi respons spektrum desain ke grafik spektra perpindahan (S_d) dengan mengkoreksi ke tingkat redaman *viscous* ekivalen (ξ_{eq}).



Gambar 3. Respons Spektrum Desain dan Spektrum Perpindahan (Sumber: (Priestley, 2007))

Kekakuan efektif (K_e) dapat dihitung berdasarkan persamaan berikut,

$$K_e = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot M_e}{T_e^2} \dots \dots \dots (6)$$

Gaya geser dasar (V_{Base}) dapat dihitung berdasarkan persamaan berikut.

$$V_{Base} = K_e \cdot \Delta d \dots \dots \dots (7)$$

Dimana:

- m_i : Massa pada tingkat ke-i (ton).
- Δ_i : Perpindahan pada lantai ke-i (m)
- H_i : Tinggi lantai pada tingkat ke-i (m)
- Δy : Perpindahan leleh SDOF (m)
- θy : Simpangan leleh pada frame

Menurut Priestley et. Al (2007), nilai drift desain hasil DDBD dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$\theta_i = \left(1,0 - 0,5 \frac{H_i}{H_n} \right) \theta_0 \dots \dots \dots (8)$$

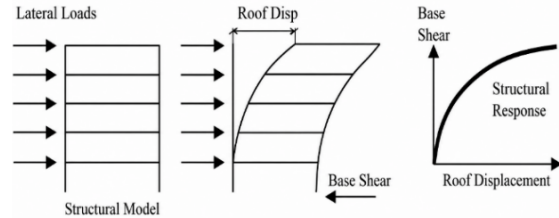
Dimana:

- θ_0 : drift desain rencana sesuai dengan target kinerja (*life safety* = 0.02)
- θ_i : drift pada lantai ke-i.
- H_i : Ketinggian pada lantai ke-I (m).
- H_n : Ketinggian puncak (m).

2.3 Nonlinear Pushover Analysis

Analisis *pushover* merupakan metode untuk mengevaluasi perilaku keruntuhan struktur bangunan akibat pengaruh gempa. Pada metode ini, beban gempa rencana diasumsikan sebagai beban statik lateral yang bekerja pada pusat massa tiap lantai dan diberikan secara bertahap

hingga struktur mengalami pelelehan pada satu atau beberapa elemen. Peningkatan beban selanjutnya akan menyebabkan struktur mengalami deformasi elastis hingga plastis sampai mencapai kondisi mendekati keruntuhan (Nurhidayatullah, E. F., & Teguh, M., 2018)

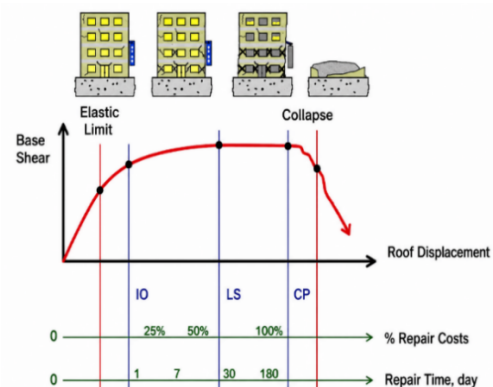


Gambar 4. Konsep Dasar Analisis *Pushover*

2.4 Tingkat Kinerja Struktur

Tingkat kinerja dalam perencanaan berbasis kinerja digunakan untuk menentukan tingkat kerusakan dan kemampuan bangunan setelah mengalami gempa. Evaluasi kinerja struktur umumnya dilakukan berdasarkan nilai perpindahan (*displacement*), drift antar lantai (*interstory drift*), serta kondisi sendi plastis yang terbentuk akibat pembebanan gempa.

ATC-40 (ATC-40, 1996) menggunakan metode *Capacity Spectrum Method* (CSM) untuk menentukan titik kinerja (*performance point*) melalui perpotongan kurva kapasitas dan spektrum respons gempa. Sedangkan FEMA 440 ((ATC), 2005), mempertimbangkan pengaruh inelastisitas struktur, degradasi kekakuan, serta karakteristik dinamik struktur terhadap respons gempa.



Gambar 5. Ilustrasi performance level struktur (Sumber: ((ATC), 2005))

Setiap *performance level* memiliki batas deformasi lateral yang berbeda-beda sesuai dengan tingkat kinerja struktur yang diinginkan. Nilai perpindahan tersebut umumnya dinyatakan dalam bentuk simpangan antar tingkat (*interstory drift*) maupun simpangan total struktur (*maximum total drift*).

Perhitungan *drift* aktual dan maksimum inelastic menurut ATC-40 dapat diperoleh dengan persamaan berikut:

$$\text{Drift aktual} = \frac{D_t}{H_{\text{total}}} \dots\dots\dots (9)$$

$$\text{Maksimum in-elastic} = \frac{D_t - D_1}{H_{\text{total}}} \dots\dots\dots (10)$$

Dimana:

D_t : Perpindahan total struktur pada titik kinerja (mm).

D_1 : Perpindahan leleh pertama (mm).

H_{total} : Tinggi total bangunan (mm).

Perhitungan target perpindahan dengan metode FEMA 440 dapat diperoleh menggunakan persamaan berikut.

$$\delta_t = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \frac{T e^2}{4 \pi^2} g \dots\dots\dots (11)$$

$$\text{Drift aktual} = \frac{\delta_t}{H_{\text{total}}} \dots\dots\dots (12)$$

Dimana:

δ_t : Target perpindahan struktur (mm).

C_0 : Faktor konversi perpindahan spektral ke perpindahan atap.

C_1 : Faktor modifikasi akibat perilaku inelastik.

C_2 : Faktor modifikasi akibat karakteristik respons struktur.

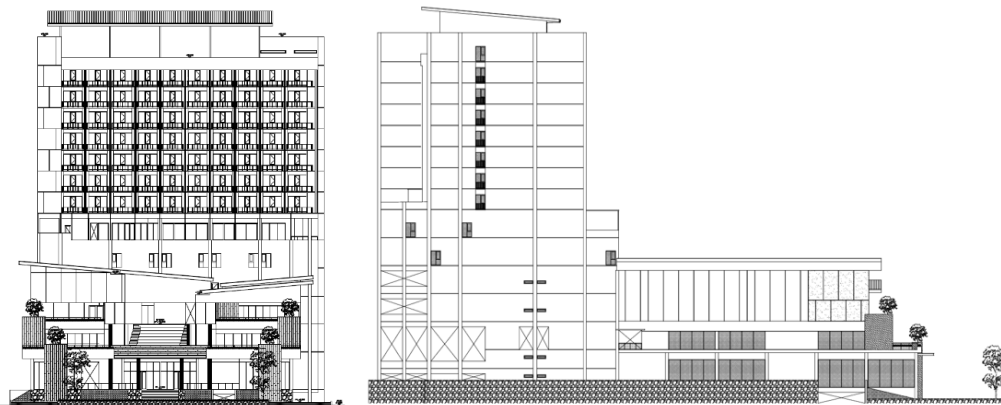
C_3 : Faktor modifikasi akibat efek *P-Delta*.

S_a : Percepatan spektral (g).

3. METODOLOGI

3.1 Objek Penelitian

Objek penelitian merupakan gedung bertingkat dengan fungsi sebagai bangunan komersial serta berlokasi di salah satu wilayah dengan kategori risiko gempa tinggi di Indonesia. Struktur bangunan menggunakan sistem rangka pemikul momen khusus dengan balok dan kolom sebagai elemen struktur pemikul gempa.



Gambar 6. (a) Tampak depan gedung objek penelitian; (b) Tampak samping gedung objek penelitian

3.2 Tahapan Pelaksanaan Penelitian

a. Studi Literatur

Studi literatur yang digunakan sebagai dasar dalam penelitian ini meliputi peraturan - peraturan yang berlaku dan penelitian terdahulu yang berkaitan dengan evaluasi kinerja struktur dengan metode analisis pushover serta *Direct Displacement Based Design* (DDBD).

b. Pengumpulan Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini yaitu Detail Engineering Design (DED) struktur yang digunakan sebagai acuan dalam pemodelan struktur menggunakan perangkat lunak ETABS v.22.

c. Perhitungan Pembebanan

Perhitungan pembebanan dilakukan meliputi beban mati, hidup dan gempa. Beban mati dan hidup diperhitungkan sesuai dengan data DED dan SNI 1727: 2020 (BSN (1) , 2019). Sedangkan respons spektrum gempa desain

dihitung berdasarkan ketentuan SNI 1726: 2019 (BSN (1) , 2019).

d. Pemodelan Struktur

Pemodelan struktur beton bertulang pada perangkat lunak ETABS *ultimate* dilakukan dengan mengacu gambar Detail Engineering Design (DED) dan dan SNI 2847: 2019 (BSN, 2019).

e. Perhitungan metode DDBD

Perhitungan perpindahan, insterstory drift dan gaya geser dasar pada metode *Direct Displacement Based Design* (DDBD) dilakukan berdasarkan target perpindahan struktur yang telah ditentukan sesuai tingkat kinerja bangunan rencana. Rencana tingkat kinerja struktur bangunan didasarkan pada ketentuan SNI 1726: 2019 dan ASCE 7-22 (ASCE/SEI 7-22, 2022) sesuai dengan kategorinya.

f. Analisis Pushover

Analisis *pushover* dikerjakan dengan memberikan gaya lateral statik pada pusat massa

tiap tingkat bangunan hingga struktur berada dalam keadaan inelastik. Dari analisis pushover diperoleh nilai simpangan, *interstory drift*, kurva kapasitas, titik kinerja, hingga tingkat kinerja pada simulasi gempa desain.

g. Perbandingan Hasil Analisis DDBD dan *Nonlinear Pushover*

Hasil analisis metode DDBD dan pushover kemudian dibandingkan untuk mengevaluasi kesesuaian antara perilaku struktur aktual terhadap rencana struktur bangunan. Parameter yang dibandingkan yaitu perpindahan, *interstory drift*, gaya geser dasar hingga tingkat kinerja.

h. Sendi Plastis

Melalui *pushover analysis* juga dapat diketahui pola kerusakan elemen struktur balok dan kolom dalam memikul beban gempa atau kerap disebut sebagai sendi plastis (*plastic hinges*). Analisis sendi plastis dilakukan untuk mengetahui perilaku inelastic struktur akibat pengaruh beban gempa serta mengidentifikasi hirarki keruntuhan struktur bangunan.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pembebanan Struktur

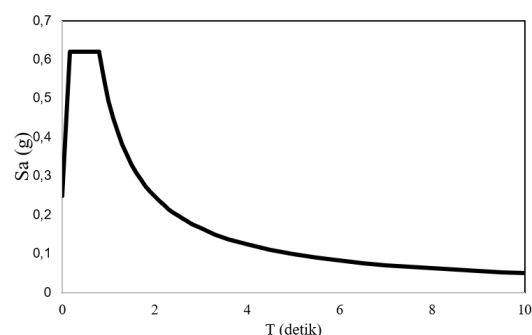
Pembebanan yang diperhitungkan pada struktur ini meliputi beban mati, hidup dan gempa. Beban mati diperhitungkan sesuai dengan data komposisi dan dimensi material struktur yang tercantum dalam *detailed engineering design* (DED). Beban hidup diperhitungkan sesuai dengan fungsi ruang berdasarkan SNI 1727:2020 (BSN (2), 2020). Beban hidup yang diberikan yaitu beban ruang = $4,79 \text{ kN/m}^2$, koridor = $3,83 \text{ kN/m}^2$ hingga penginapan = $1,92 \text{ kN/m}^2$. Sementara itu, perhitungan beban gempa dikerjakan dengan model dinamis respons spektrum sesuai dengan ketentuan SNI 1726:2019.

4.2 Pembebanan Gempa

Menurut SNI 1726: 2019 dan ASCE/SEI 7-22 (ASCE/SEI 7-22, 2022) bangunan objek penelitian termasuk dalam kategori risiko II dengan nilai faktor keutamaan gempa (I_e) sebesar 1,0. Berdasarkan nilai percepatan spectra (S_s dan S_1) dan koefisien situs wilayah setempat diperoleh respons spektrum desain lokasi objek penelitian seperti terlihat pada gambar 8.

Respons spektra gempa menunjukkan bahwa wilayah objek penelitian termasuk dalam kategori desain seismik D yang berarti mempunyai potensi serta tingkat risiko kegempaan yang tinggi. Struktur bangunan gedung yang terletak pada wilayah ini perlu

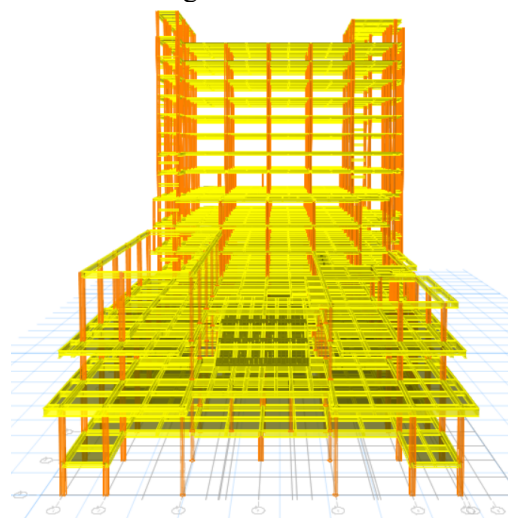
didesain dengan persyaratan kegempaan yang cukup ketat.



Gambar 5. Respon Spektra Gempa Desain

4.3 Pemodelan Struktur Bangunan

Salah satu faktor yang sangat berpengaruh terhadap tingkat validitas hasil evaluasi struktur bangunan yaitu pemodelan, seberapa mirip pemodelan struktur terhadap kondisi eksisting bangunan. Pemodelan struktur bangunan dilakukan secara tiga dimensi menggunakan perangkat lunak ETABS v22 dengan pendekatan MDOF (*Multiple Degree of Freedom*) seperti diilustrasikan oleh gambar berikut.



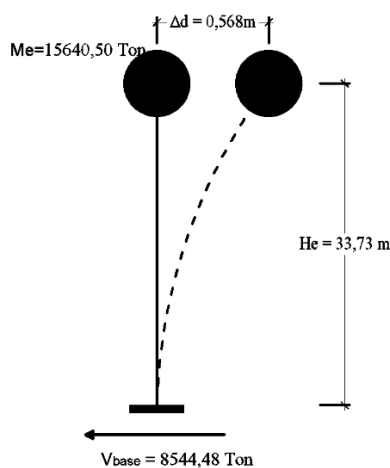
Gambar 9. Pemodelan Struktur Gedung

Pemodelan dibuat semirip mungkin dengan kondisi struktur bangunan eksisting sesuai dengan data *detailed engineering design* (DED). Sehingga diharapkan perilaku struktur pada saat mengalami gempa mampu merepresentasikan kondisi bangunan eksisting.

4.4 Gaya Geser Desain Metode DDBD

Gaya geser dasar merupakan gaya lateral yang bekerja pada dasar struktur akibat pengaruh gempa rencana yang ditinjau berdasarkan berat seismik efektif bangunan. Menurut metode DDBD, besarnya gaya geser dasar dipengaruhi

oleh massa struktur, karakteristik dinamik bangunan, serta tingkat kinerja yang direncanakan. Gedung objek penelitian termasuk kategori resiko II dengan target kinerja rencana yaitu *life safety* sesuai dengan ketentuan SNI 1726: 2019 dan ASCE/SEI 7-22 (ASCE/SEI 7-22, 2022). Perpindahan rencana untuk level kinerja *life safety* yaitu ditentukan sebesar, $\theta = 0,02$. *Life safety* berarti bahwa struktur diharapkan masih mampu mempertahankan kestabilannya saat terjadi gempa kuat meskipun telah mengalami kerusakan struktural ringan hingga sedang.

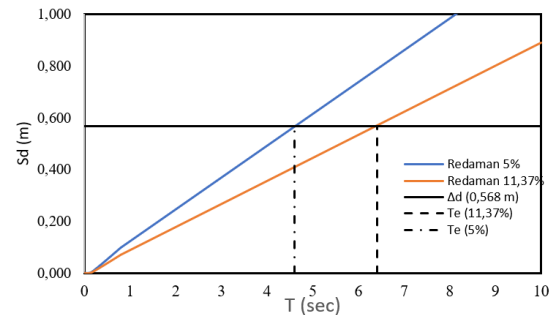


Gambar 10. Sistem SDOF

Target perpindahan sistem struktur bangunan yang merupakan MDOF (*Multiple Degree of Freedom*) diperoleh dengan mengubah sistem struktur ke dalam SDOF (*Single Degree of Freedom*) sesuai dengan persamaan (1). Hasil analisis sistem SDOF menghasilkan target perpindahan (Δd), tinggi efektif struktur ekuivalen (H_e), Massa efektif (M_e) dan gaya geser dasar (V_{base}) seperti yang ditunjukkan oleh gambar 10. Parameter – parameter sistem SDOF tersebut kemudian digunakan untuk menghitung nilai daktilitas perpindahan (μ) (persamaan (4)) dan redaman viskositas ekuivalen (persamaan (5)). Berdasarkan perhitungan didapatkan nilai daktilitas perpindahan arah x sebesar 1,530 dan arah y sebesar 1,567 serta redaman viskositas ekuivalen sistem SDOF sebesar 11,37% pada gempa arah x dan 11,65% arah y. Nilai daktilitas dan redaman viskositas ekuivalen menunjukkan bahwa struktur termasuk kategori daktilitas sedang. Pada kondisi inelastis akibat beban gempa, struktur mampu mengalami perpindahan lateral sebesar 1,5 kali dari batas perpindahan lelehnya serta dapat mendissipasi energi sebesar 11 % sebelum mengalami keruntuhan. Semakin

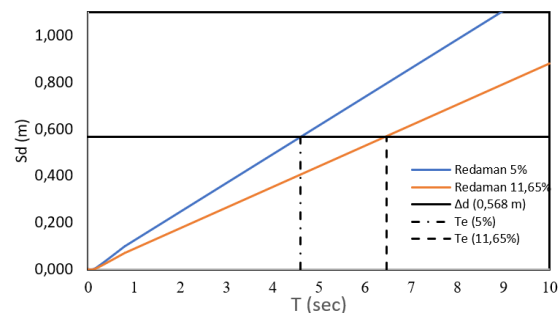
besar nilai daktilitas dan redaman viskositas ekuivalen maka semakin besar deformasi plastis yang dapat terbentuk pada struktur bangunan sehingga semakin sulit untuk diruntuhkan.

Kurva respons spektrum percepatan gempa desain (gambar 8) dikonversi kedalam respons spektrum perpindahan guna mendapatkan periode efektif struktur bangunan pada kondisi inelastik.



Gambar 11. Periode efektif struktur bangunan akibat gempa arah x

Berdasarkan kurva spektrum perpindahan redaman viskositas ekuivalen 11,37%, pada perpindahan (Δd) sebesar 0,568 m didapat periode efektif (T_e) 6,4 detik.



Gambar 12. Periode efektif struktur bangunan akibat gempa arah y

Berdasarkan kurva spektrum perpindahan redaman viskositas ekuivalen 11,65%, pada perpindahan (Δd) sebesar 0,568 m didapat periode efektif (T_e) 6,46 detik. Periode getar alami struktur bangunan dalam kondisi elastik atau redaman 5% menunjukkan nilai sebesar 0,568 detik. Pada kondisi perilaku inelastik, periode getar alami struktur memperlihatkan angka yang lebih panjang. Kondisi retak beton dan pelelehan baja tulangan tersebut juga mengakibatkan terjadinya penurunan kekakuan struktur.

Berdasarkan persamaan (6) diketahui nilai kekakuan efektif (K_e) struktur dalam kondisi inelastik yaitu sebesar 15050,89 Ton/m pada arah x dan 14735,65 Ton/m arah y. Sedangkan menurut persamaan (7), untuk menghasilkan

kondisi inelastik dengan perpindahan (Δd) 0,568m diperlukan gaya geser dasar (V_{Base}) sebesar 8544,48 Ton pada arah x dan 8365,51 Ton untuk arah y.

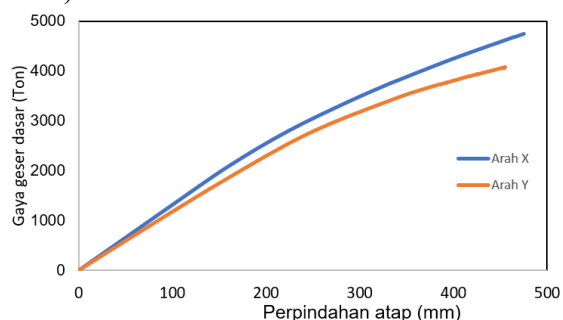
4.5 Kinerja Struktur Dengan Metode Pushover Analysis

Berdasarkan ulasan sebelumnya diperoleh berbagai kriteria penting dalam desain struktur bangunan dengan metode DDBD yaitu target perpindahan (Δd), redaman viskositas ekuivalen (ξ_{eq}), periode efektif (T_e), kekakuan efektif (K_e), dan gaya geser dasar (V_{Base}). Beragam kriteria desain tersebut diharapkan dapat dipenuhi supaya target rencana kinerja *life safety* dapat tercapai. Struktur bangunan tetap dalam kondisi stabil dan tidak berpotensi mengalami keruntuhan apabila gempa kuat terjadi.

Untuk mengetahui kinerja struktur secara aktual perlu dilakukan simulasi analisis kegempaan berbasis nonlinear (Nurhidayatullah, E. F., & Dwi Kurniati., 2025). Pada penelitian ini simulasi gempa dikerjakan dengan metode *nonlinear static pushover analysis*.

1. Kurva Kapasitas Struktur

Salah satu luaran hasil analisis pushover yang sangat ampuh yaitu kurva kapasitas yang merupakan hubungan antara gaya geser dasar dan perpindahan atap struktur bangunan (Nurhidayatullah, E. F. & Kurniati, D. K., 2022).



Gambar 13. Kurva Kapasitas

Kurva kapasitas dapat secara ampuh memberikan gambaran mengenai perilaku aktual struktur gedung pada saat memikul beban gempa. Kurva kapasitas menunjukkan bagaimana beban gempa yang semakin besar mengakibatkan perpindahan lateral sehingga struktur yang mula-mula masih berada dalam kondisi elastik menjadi inelastik. Gambar 13 menunjukkan bahwa struktur mulai memasuki fase inelastik, yaitu kondisi retaknya selimut beton dan pelepasan baja tulangan pertama, apabila gaya geser dasar melebihi kisaran 2500 Ton dan perpindahan atap 200 mm. Kondisi inelastik ini

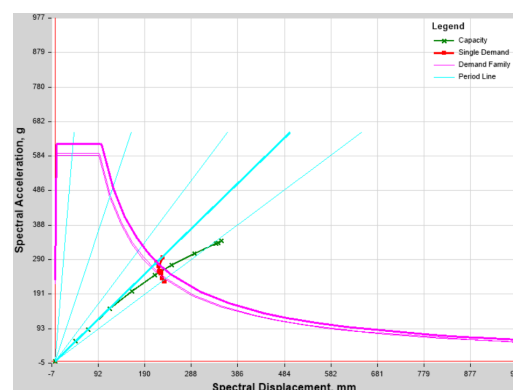
juga menyebabkan penurunan kekakuan efektif struktur. Secara umum struktur pada arah x memiliki kekakuan efektif yang lebih tinggi dibandingkan arah y baik dalam kondisi elastik maupun inelastik. Hal tersebut dapat diartikan sebagai kemampuan struktur dalam menahan beban gempa arah x lebih baik dari pada gempa pada arah sumbu y.

2. Level Kinerja Struktur

Kondisi struktur bangunan pada simulasi gempa desain dapat diprediksi secara lebih tepat melalui analisis level kinerja. Level kinerja struktur dapat diketahui berdasarkan titik kinerja, yang merupakan pertemuan antara respons spektrum gempa desain dan kurva kapasitas. Dalam kajian ini digunakan metode ATC-40 dan FEMA 440 untuk menentukan titik dan level kinerja bangunan.

a. Level kinerja menurut ATC-40

Hasil analisis titik kinerja dengan metode ATC-40 menunjukkan bahwa, simulasi gempa desain yang dikerjakan pada arah sumbu x menghasilkan nilai *drift ratio* sebesar 0,501% dengan gaya geser dasar 3498,151 Ton.

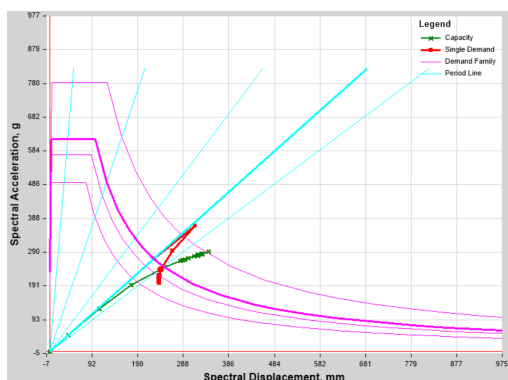


Gambar 14. Titik Kinerja Pada Gempa Arah X

Nilai *drift ratio* menunjukkan bahwa level kinerja struktur gempa desain masih berada pada kategori *Immediate Occupancy* (IO). Struktur bangunan hanya mengalami kerusakan ringan, mampu mempertahankan kekuatan dan kekakuannya serta sesegera mungkin dapat ditempati kembali setelah inspeksi dan beberapa perbaikan elemen non struktural (lampu, *air conditioner*, proyektor dan lain lain).

Hasil analisis titik kinerja dengan metode ATC-40 menunjukkan bahwa, simulasi gempa desain yang dikerjakan pada arah sumbu y menghasilkan nilai *drift ratio* sebesar 0,541% dengan gaya geser dasar 3498,151 Ton. Nilai *drift ratio* menunjukkan bahwa level kinerja struktur gempa desain masih berada pada

kategori *Immediate Occupancy* (IO). Struktur bangunan hanya mengalami kerusakan ringan, mampu mempertahankan kekuatan dan kekakuannya serta sesegera mungkin dapat ditempati kembali setelah inspeksi dan beberapa perbaikan elemen non struktural (lampu, *air conditioner*, proyektor dan lain lain).



Gambar 15. Titik Kinerja Pada Gempa Arah Y

b. Level kinerja menurut FEMA 440

Analisis titik kinerja struktur metode FEMA 440 dilakukan dengan perhitungan berdasarkan persamaan (11) dan (12). Hasil analisis menunjukkan nilai *drift* akibat gempa arah x sebesar 1,018% dan arah y sebesar 0,950%. Metode FEMA 440 menghasilkan *drift* yang cenderung lebih besar dari pada ATC – 40. Pada gempa arah x, level kinerja struktur termasuk dalam kategori *Damaged Control* (DC) dan sedangkan arah y termasuk dalam kategori *Immediate Occupancy* (IO).

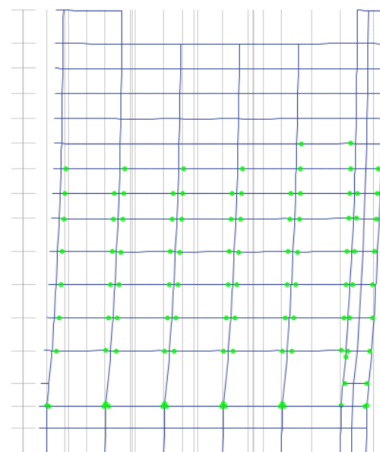
Damage Control (DC) berarti bahwa pasca terjadinya gempa struktur berada pada kondisi kerusakan ringan hingga sedang yang masih terkendali, struktur bangunan tetap stabil dan aman terhadap keruntuhan, meskipun memerlukan perbaikan sebelum dapat digunakan kembali secara normal. Sedangkan *Immediate Occupancy* (IO) sama dengan penjelasan sebelumnya.

3. Sendi Plastis

Hirarki keruntuhan elemen struktur bangunan akibat beban gempa juga dapat diketahui melalui *nonlinear pushover analysis*.

Distribusi sendi plastis yang terbentuk pada elemen struktur pemikul gaya gempa yaitu balok dan kolom merepresentasikan mekanisme keruntuhan bangunan. Hasil analisis *pushover* memperlihatkan bahwa sendi plastis mula-mula terbentuk pada elemen balok sedangkan pada kolom hanya muncul secara terbatas. Pola ini menunjukkan bahwa mekanisme perilaku

struktur diawali oleh balok (*beam sway mechanism*), bukan kolom (Prawirodikromo, 2012). Struktur telah memenuhi prinsip *Strong Column–Weak Beam* (SCWB), di mana kolom memiliki kapasitas yang lebih kuat dibandingkan balok sehingga mampu menjaga stabilitas struktur dan menghasilkan perilaku yang daktail terhadap beban gempa.



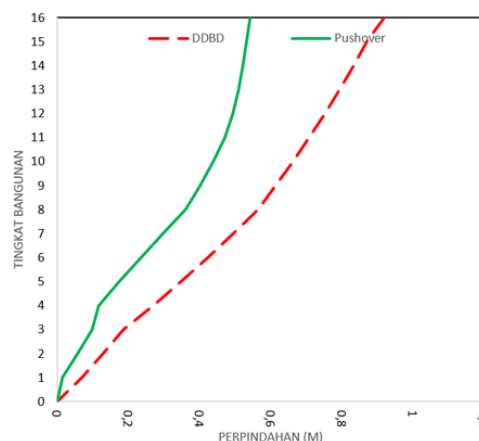
Gambar 16. Sendi Plastis

4.6 Perbandingan Kinerja Struktur Metode DDBD Dengan *Nonlinear Pushover Analysis*

Kinerja aktual hasil analisis pushover dan kinerja rencana metode DDBD perlu dibandingkan untuk mengukur seberapa besar tingkat kesesuaian perilaku struktur bangunan terhadap batasan yang telah diatur dalam perancangan. Terdapat beberapa parameter kinerja struktur yang dapat dibandingkan yaitu perpindahan, simpangan antar tingkat (*interstory drift*) hingga tingkat kinerja struktur bangunan.

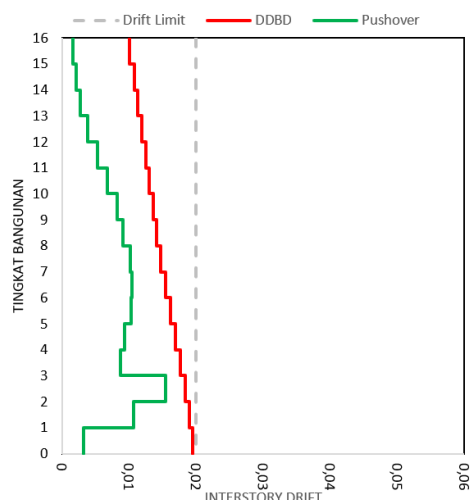
1. Perbandingan Perpindahan dan *Interstory Drift*

Perbandingan nilai perpindahan dan *interstory drift* dapat dilihat pada gambar 17 sampai dengan gambar 20.



Gambar 17. Perbandingan Perpindahan Arah X

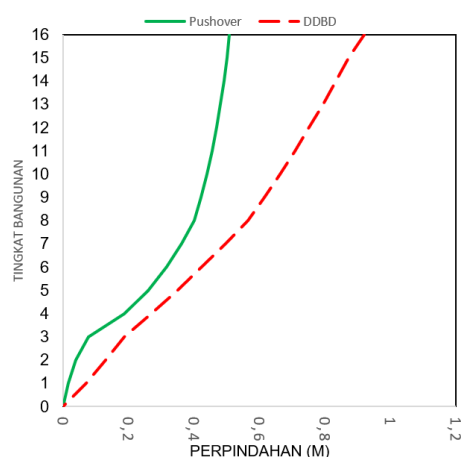
Perbandingan perpindahan struktur bangunan akibat gempa arah x, menunjukkan bahwa hasil perpindahan analisis *pushover* secara konsisten lebih kecil dibandingkan dengan DDBD. Hal tersebut menunjukkan bahwa perpindahan aktual struktur akibat beban lateral lebih rendah daripada yang ditargetkan dalam perencanaan.



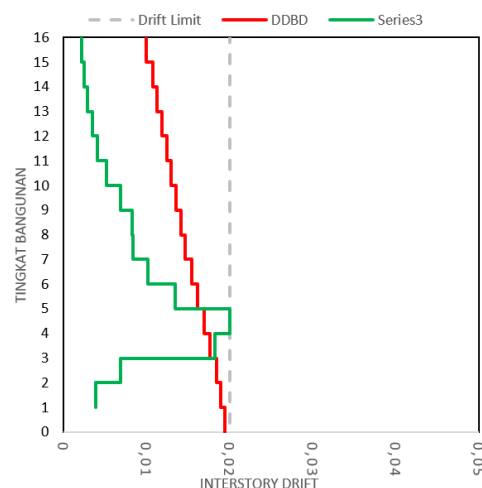
Gambar 18. Perbandingan *Interstory Drift* Arah X

Berdasarkan perbandingan *interstory drift* arah sumbu x, terlihat bahwa drift aktual hasil *pushover* secara umum lebih kecil dari pada DDBD pada hampir seluruh tingkat bangunan. Pada tingkat 2-3 tampak terjadi sedikit peningkatan drift hasil *pushover*, namun nilainya belum melebihi DDBD dan batas toleransi *life safety* yaitu 0,02.

Perbandingan perpindahan struktur bangunan akibat gempa arah y, menunjukkan bahwa hasil perpindahan analisis *pushover* secara konsisten lebih kecil dibandingkan dengan DDBD. Hal tersebut menunjukkan bahwa perpindahan aktual struktur akibat beban lateral lebih rendah daripada yang ditargetkan dalam perencanaan.



Gambar 19. Perbandingan Perpindahan Arah Y



Gambar 20. Perbandingan *Interstory Drift* Arah Y

Berdasarkan perbandingan *interstory drift* arah sumbu y, terlihat bahwa *interstory drift* aktual hasil *pushover* masih lebih kecil dari pada DDBD pada hampir seluruh tingkat bangunan. Namun, pada tingkat 2-3 tampak terjadi peningkatan drift hasil *pushover* secara cukup signifikan hingga nilainya melebihi batas DDBD. Meskipun demikian, angkanya belum melampaui ambang batas toleransi bangunan *life safety* yaitu 0,02.

Perpindahan dan *interstory drift* metode *pushover analysis* dan DDBD menunjukkan pola yang cenderung seragam pada kedua arah sumbu bangunan. Perpindahan struktur bangunan akibat gempa dengan simulasi *pushover* menunjukkan nilai yang lebih kecil dari pada DDBD. Struktur secara aktual memiliki tingkat kekakuan yang lebih tinggi dibanding rencana, sehingga deformasinya lebih terkendali.

Interstory drift hasil *pushover analysis* menunjukkan nilai yang cenderung lebih kecil dari pada DDBD pada hampir seluruh tingkat bangunan. Akan tetapi, hasil analisis *pushover* mengindikasikan adanya perbesaran *interstory drift* aktual pada tingkat 2-3 dibanding dengan tingkat - tingkat di atasnya bahkan akibat beban lateral arah sumbu y, angkanya sudah melebihi batas DDBD. Hal tersebut menyebabkan pola *interstory drift pushover* sedikit berbeda dibanding dengan DDBD.

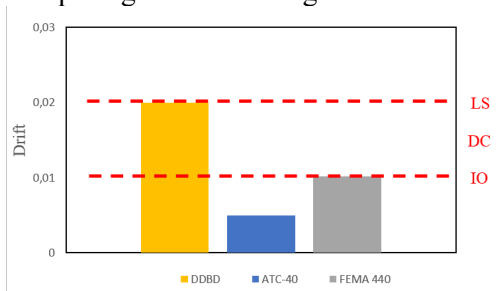
Sistem struktur bangunan objek penelitian tergolong ke dalam kategori rangka pemikul momen khusus. Sistem struktur jenis ini sangat mengandalkan fleksibilitas dalam memikul beban gempa. Tingkat - tingkat bawah berpotensi mengalami *interstory drift* yang sangat besar terlebih pada bangunan tingkat tinggi dan semakin mengecil pada tingkat -

tingkat di atasnya (Prawirodikromo, 2012). Selain itu, *interstory drift* yang cukup besar pada gedung objek penelitian ditengarai juga didukung oleh adanya satu tingkat struktur kolom yang tingginya 1,5 kali kolom tingkat - tingkat di atasnya. Hal tersebut menyebabkan kekakuan struktur tingkat tersebut lebih kecil dari tingkat lainnya.

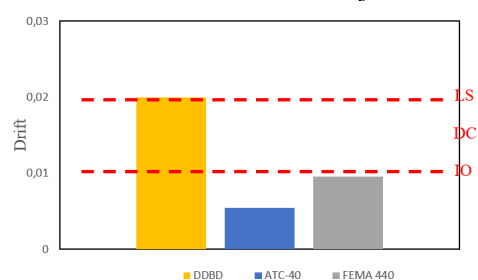
Dalam desain struktur rangka pemikul momen, pola *interstory drift* harus diperhatikan secara sungguh – sungguh. Perbesaran *drift* yang tidak terkendali pada tingkat – tingkat bawah berpotensi menyebabkan efek *soft story*. Adanya efek *soft story* berpotensi menyebabkan terjadinya mekanisme keruntuhan tingkat (*story failure mechanism*), ketidakstabilan struktur bahkan keruntuhan total bangunan apabila gempa kuat terjadi. Oleh karena itu pedoman desain struktur tahan gempa seperti SNI 1726: 2019 dan ASCE 7 – 22 membatasi nilai *interstory drift*. Bangunan objek penelitian termasuk kategori *life safety* memiliki ambang batas *drift* sebesar 0,02. Berdasarkan analisis, *interstory drift* aktual struktur bangunan belum melebihi ambang batas toleransi, sehingga struktur tidak berpotensi mengalami kegagalan *soft story*.

2. Perbandingan Level Kinerja

Desain berdasarkan metode DDBD pada gedung objek penelitian yang termasuk kategori risiko II menargetkan kategori level kinerja *life safety* (LS). Hasil analisis *pushover* yang ditentukan dengan metode ATC-40 dan FEMA 440 menunjukkan level kinerja yang berbeda. Perbedaan level kinerja kedua metode dapat dilihat pada gambar 21 dan gambar 22.

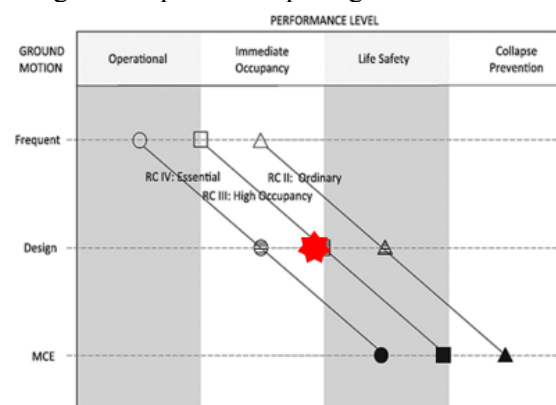


Gambar 21. Level Kinerja Arah X



Gambar 22. Level Kinerja Arah Y

Hasil evaluasi menggunakan metode ATC-40 dan FEMA 440 menunjukkan bahwa kinerja aktual struktur masih berada pada tingkat *Immediate Occupancy* (IO) hingga *Damaged Control* (DC). Dari simulasi beban gempa secara nonlinear diperoleh level kinerja yang lebih baik dari pada tingkat kinerja target bangunan yaitu *life safety*. Hubungan kesesuaian antara level kinerja, besaran gempa dan kategori risiko bangunan dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 23. Performance Object Matrix (ASCE/SEI 7-22, 2022)

Berdasarkan Gambar 23, bangunan objek penelitian yang termasuk kategori risiko II ditargetkan mencapai level kinerja *Life Safety* (LS) pada simulasi gempa rencana. Hasil evaluasi *pushover* berdasarkan ATC-40 dan FEMA 440 menunjukkan tingkat kinerja aktual berada pada kategori *Immediate Occupancy* (IO) hingga *Damage Control* (DC). Hal ini menunjukkan bahwa struktur memiliki kinerja seismik yang lebih baik dari target desain, dengan tingkat kerusakan yang relatif ringan serta kemampuan mempertahankan fungsi dan kekakuan struktur setelah gempa sehingga tidak berpotensi mengalami keruntuhan.

5. KESIMPULAN

a. Berdasarkan analisis sendi plastis diketahui bahwa keruntuhan elemen struktur terjadi pada balok terlebih dahulu kemudian kolom setelahnya. Pola ini mengindikasikan bahwa mekanisme keruntuhan telah memenuhi konsep *Strong Column–Weak Beam*.

b. Hasil *pushover analysis* menunjukkan nilai perpindahan lateral struktur bangunan yang lebih kecil dari pada *Direct Displacement-Based Design* (DDBD).

c. Hasil *pushover analysis* menunjukkan bahwa nilai *interstory drift* cenderung lebih kecil dibandingkan dengan hasil metode *Direct*

Displacement-Based Design (DDBD) pada hampir seluruh tingkat bangunan. Namun demikian, terdapat indikasi adanya peningkatan *interstory drift* aktual pada tingkat 2–3 dibandingkan dengan tingkat – tingkat di atasnya. Bahkan untuk pembebanan lateral pada arah sumbu Y, nilai *interstory drift* pada tingkat tersebut telah melampaui batas drift yang ditargetkan DDBD, meskipun demikian masih berada di bawah ambang batas *Life Safety*, yaitu sebesar 0,02.

d. Hasil evaluasi pushover berdasarkan ATC-40 dan FEMA 440 menunjukkan bahwa tingkat kinerja aktual berada pada kategori *Immediate Occupancy* hingga *Damage Control*. Hal ini berarti struktur memiliki kinerja seismik yang lebih baik dari target *Direct Displacement-Based Design* (DDBD) yaitu *Life Safety*.

6. DAFTAR PUSTAKA

- American Society of Civil Engineers. (2022). *Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures (ASCE/SEI 7-22)*. American Society of Civil Engineers.
- Applied Technology Council. (1996). *Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings: Volume 1 (ATC-40)*. Applied Technology Council.
- Applied Technology Council. (2005). *Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures (FEMA 440)*. Federal Emergency Management Agency.
- Badan Standardisasi Nasional. (2019a). *SNI 1726:2019: Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan nongedung*. Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2019b). *SNI 2847:2019: Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung dan penjelasan*. Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2020). *SNI 1727:2020: Beban desain minimum dan kriteria terkait untuk bangunan gedung dan struktur lain*. Badan Standardisasi Nasional.
- Nurhidayatullah, E. F., & Ardiyanto. (2025). Seismic performance study of multi-storey building structures with nonlinear time history analysis method. *Journal of Civil Engineering, Building and Transportation*, 9(1), 62–79. <https://doi.org/10.31289/jcebt.v9i1.12622>
- Nurhidayatullah, E. F., & Kurniati, D. (2021). Potensi kerusakan bangunan bertingkat sedang dengan skenario gempa lebih besar sama dengan 5 SR sebagai upaya mitigasi kebencanaan di Yogyakarta. *Teras Jurnal*, 11(1), 125–139. <https://doi.org/10.29103/tj.v11i1.409>
- Nurhidayatullah, E. F., & Kurniati, D. (2022). Korelasi perilaku struktur bangunan berdasarkan parameter R, Cd, dan Ω terhadap tingkat kinerja pada beragam simulasi gempa. *Jurnal Teknik Sipil Unaya*, 8(2), 189–203. <https://doi.org/10.30601/jtsu.v8i2.2841>
- Nurhidayatullah, E. F., & Kurniati, D. (2025). Prediction of ground motion due to the influence of nonlinear soil conditions using probabilistic approach. *Teknisia*, 29(2), 80–93. <https://doi.org/10.20885/teknisia.vol29.iss2.art2>
- Nurhidayatullah, E. F., & Teguh, M. (2018). Kinerja seismik struktur pada tipe gedung dengan ketidakberaturan ketinggian dan denah. *Teknisia*, 23(1), 450–462.
- Prawirodikromo, W. (2012). *Seismologi teknik & rekayasa kegempaan*. Pustaka Pelajar.
- Priestley, M. J. N., Calvi, G. M., & Kowalsky, M. J. (2007). *Displacement-based seismic design of structures*. IUSS Press.
- Vijayanarayanan, A. R. (2012). *Earthquake safety of building contents (non-structural elements)*. National Information Centre of Earthquake Engineering.
- Wijaya, U., & Tavio. (2018). *Desain rekayasa gempa berbasis kinerja (performance based design)*. Andi.