

STUDI KINERJA STRUKTUR BETON BERTULANG BERATURAN YANG DIDISAIN DENGAN PERFORMANCE BASED PLASTIC DESIGN

NIDIASARI*, JATI SUNARYATI, SANDY FINANDA

Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Andalas.

*Corresponding Author : ✉ nidia@eng.unand.ac.id

Naskah diterima : 24 Juli 2023. Disetujui: 27 Agustus 2023. Diterbitkan : 30 Agustus 2023

ABSTRAK

Indonesia adalah salah satu negara yang mempunyai tingkat kegempaan sangat tinggi. Diperlukan perencanaan struktur bangunan yang mampu menahan beban gempa tersebut. Di Indonesia saat ini telah memakai pedoman tentang tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk bangunan gedung dan non gedung. Pedoman ini menggunakan konsep *Performance-Based Seismic Design* (PBSD). *Performance-Based Plastic Design* (PBPD) merupakan suatu analisis struktur dengan konsep metoda energi yang pada awalnya digunakan pada struktur baja. Untuk struktur beton bertulang metoda ini juga dapat digunakan dengan menggunakan koefisien C_2 . Untuk mengetahui level kinerja struktur yang didesain dengan menggunakan metoda *Performance-Based Plastic Design* maka dilakukan analisis terhadap struktur beton bertulang lima lantai. Selanjutnya struktur akan dianalisis dengan memakai beban dorong (*pushover*). Dari analisis kinerja struktur didapatkan nilai daktilitas struktur berdasarkan *Performance-Based Plastic Design* (PBPD) sebesar 3,014. Level kinerja berdasarkan spektrum kapasitas yaitu pada level *immediate occupancy*.

Kata kunci : *Performance-Based Seismic Design* , *Performance-Based Plastic Design*, struktur beton bertulang, *pushover*

1. PENDAHULUAN

Indonesia memiliki tingkat aktivitas seismik yang tinggi, terutama karena lokasinya yang berada di atas tiga lempeng tektonik aktif. Interaksi antar lempeng tersebut membuat Indonesia rentan terhadap gempa. Meskipun gempa bumi itu sendiri mungkin tidak mematikan, bangunan dengan struktur yang buruk adalah penyebab utama timbulnya korban jiwa. Data menunjukkan bahwa rata-rata Indonesia mengalami 10 kali gempa bumi setiap tahunnya yang mengakibatkan kerusakan signifikan. Beberapa terjadi di lepas pantai, sementara yang lain berdampak pada wilayah berpenduduk. Di daerah pemukiman padat penduduk, terdapat kebutuhan mendesak akan tindakan perlindungan untuk mengurangi

korban jiwa dan kerusakan parah akibat gempa bumi (Riza M, 2011). Dengan menerapkan prinsip teknik yang tepat serta detail konstruksi yang baik dan praktis maka kita dapat mengurangi kerugian harta benda dan kehilangan nyawa manusia. Oleh karena itu, diperlukan perencanaan struktur bangunan yang mampu menahan beban gempa tersebut.

Dalam menghadapi tantangan kerusakan pada bangunan akibat bahaya gempa, para peneliti telah mengembangkan berbagai metode untuk memperkirakan risiko yang mungkin timbul akibat gempa pada bangunan sipil. Di Indonesia saat ini memakai pedoman mengenai tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk bangunan gedung dan non gedung, SNI 1726:2019. Metode ini memodelkan gempa berdasarkan parameter S_s dan S_1 (percepatan batuan dasar pada perioda 0,2 dan 1 detik) yang akan diolah menjadi respon spektrum. Selain pendekatan perencanaan tersebut, terdapat juga metode *Performance-Based Plastic Design* (PBPD), yang merupakan suatu analisis struktur dengan menggunakan konsep metode energi. Metode PBPD menggunakan dua keadaan batas yaitu membuat target rasio simpangan dan mekanisme kegagalan yang berhubungan dengan kerusakan struktur pada leleh pertama dan pada keruntuhan plastis pada awal desain (Grigorian,2011). Metode ini bertujuan untuk memastikan bahwa struktur memenuhi tujuan kinerja yang ditentukan dalam berbagai kondisi pembebanan (Goel,1998).

PBPD awalnya diterapkan pada struktur baja dan kemudian dikembangkan agar dapat diterapkan pada struktur beton bertulang (Liao,2010). Perbedaan utama konsep desain terletak pada kurva histerisis antara baja dan beton bertulang. Kurva histerisis menggambarkan respons riwayat waktu elemen struktur terhadap beban dinamik, termasuk beban pada kondisi *loading* dan *unloading*. Pengaruh kekakuan dan kekuatan struktur tercermin dalam kurva histerisis. Struktur yang dirancang oleh PBPD biasanya dievaluasi dengan analisis *pushover* statis nonlinier karena dapat memberikan hasil yang cukup akurat jika menggunakan model *hysteresis* yang tepat (Sejal,2021).

Pada struktur beton bertulang, penurunan kekakuan dan kekuatan struktur sering terjadi, yang dapat disebut sebagai *picing*, terutama saat struktur mengalami beban siklik. Picing dalam struktur beton bertulang umumnya terjadi karena adanya retakan saat perpindahan dalam satu arah. Untuk mengatasi pengurangan kekuatan dan kekakuan ini, koefisien C_2 diperlukan sebagai koreksi perbaikan, sesuai dengan panduan FEMA 440 (2005).

Perencanaan struktur tahan gempa berbasis kinerja adalah suatu proses yang dapat diterapkan pada perencanaan bangunan baru maupun perkuatan untuk bangunan yang sudah ada. Tahapan perencanaan ini dimulai dengan membuat model rencana, yang disimulasikan terhadap skenario gempa. Hasil simulasi memberikan informasi mengenai tingkat kerusakan dan ketahanan struktur. Hasil ini dapat memprediksi tingkat keselamatan, dan tingkat risiko kerusakan pada struktur (Dewobroto,2005).

Kinerja struktur merupakan gabungan kinerja komponen struktural dan nonstruktural. Terdapat tiga level kinerja berdasarkan FEMA 273 (1997) yaitu:

- a. IO (*Immediate Occupancy*), risiko cedera yang mengancam jiwa akibat kerusakan struktural sangat rendah dan bangunan bisa langsung digunakan. Beberapa bagian perlu perbaikan struktural kecil namun tidak bersifat segera.
- b. LS (*Life-Safety*), risiko cedera ada namun rendah, sudah terdapat kerusakan struktural sehingga bangunan perlu diperbaiki sebelum ditempati kembali.
- c. CP (*Collapse Prevention*), telah terjadi kerusakan besar pada struktur, yang berpotensi menyebabkan penurunan kekakuan dan kekuatan sistem penahan gaya

lateral. Struktur tersebut masih bisa menahan beban grafitasinya, namun tidak aman untuk ditempati kembali, karena ada kemungkinan runtuh jika ada aktifitas gempa susulan.

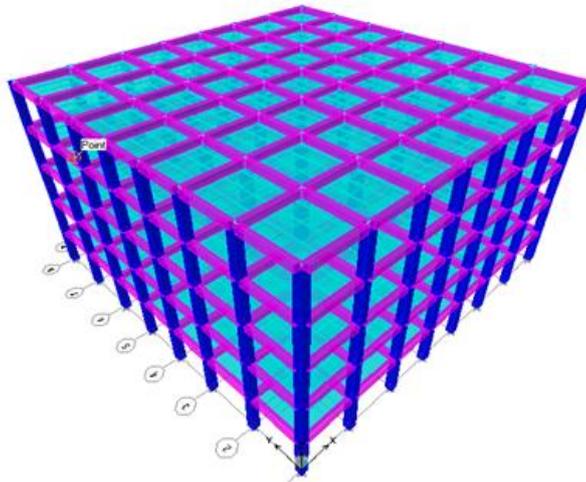
Fokus penelitian ini adalah untuk mendapatkan kinerja struktur yang didisain berdasarkan Performance Based Plastic Design (PBPD) pada struktur bangunan beton bertulang dengan lima lantai.

2. METODA PENELITIAN

Struktur bangunan beton bertulang yang dianalisis merupakan gedung lima lantai dengan layout persegi. Denah bangunan memiliki panjang 26.5 m dan lebar 26.5 m. Tinggi tiap lantai seragam dari lantai satu hingga atap yaitu 3.5 m sehingga tinggi total bangunan adalah 17.5 m. Bangunan ini difungsikan sebagai gedung kantor. Pemodelan struktur dalam bentuk 3D ditampilkan pada Gambar 1. Material yang digunakan pada elemen kolom, balok dan pelat memiliki kuat tekan karakteristik, $f_c' = 29.05$ MPa. Dimensi penampang yang digunakan ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Dimensi penampang

Jenis elemen	Dimensi
Kolom	50 × 50 cm
Balok	50 × 35 cm
Pelat Lantai	12 cm



Gambar 1. Permodelan struktur tiga dimensi

Perhitungan gaya geser gempa berdasarkan Performance-Based Plastic Design (PBPD) adalah sebagai Berikut (Liao,2010):

1. Periode dasar (T)

$$T = C_u \cdot C_t \cdot H_n^x \quad (1)$$

2. Nilai koefisien (C_2)

Nilai C_2 Berkorelasi dengan nilai T dan R

$$C_2 = 1.1 - 0.045(T - 0.8) \quad (2)$$

3. Rotasi plastis (θ_p)

$$\theta_p = \frac{\theta_u}{C_2} - \theta_y \quad (3)$$

4. Daktilitas (μ_s)

$$\mu_s = \frac{\theta_u}{\theta_y \cdot C_2} \quad (4)$$

5. Faktor perubah untuk persamaan keseimbangan energy (γ)

$$\gamma = \frac{2\mu_s - 1}{R_\mu^2} \quad (5)$$

6. Faktor perbandingan gaya geser (β_i)

$$\gamma = \left(\frac{\sum_{i=1}^n w_i h_i}{w_n h_n} \right)^{0.75T-0.2} \quad (6)$$

7. Parameter gaya geser rencana (α)

$$\alpha = \left(\sum_{i=1}^n (\beta_i - \beta_{i+1}) h_i \right) \left(\frac{w_n h_n}{\sum_{j=1}^n w_j h_j} \right)^{0.75T-0.2} \left(\frac{\theta_p 8\pi^2}{T^2 g} \right) \quad (7)$$

8. Gaya geser dasar gempa rencana (V)

$$\frac{V}{W} = \frac{-\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 + 4\gamma C_e^2}}{2} \quad (8)$$

9. Gaya lateral pada tingkat paling atas suatu struktur (F_n)

$$F_n = V \left(\frac{w_n h_n}{\sum_{j=1}^n w_j h_j} \right)^{0.75T-0.2} \quad (9)$$

10. Gaya lateral pada tingkat i (F_i)

$$F_i = (\beta_i - \beta_{i+1}) F_n \quad (10)$$

Keterangan:

C_u : Koefisien untuk batas atas pada perioda

- $C_{t,x}$: Nilai parameter perioda pendekatan
- H_n : Tinggi struktur
- R : Faktor reduksi gaya
- θ_p : Rotasi plastis
- C_2 : Koefisien
- γ : Faktor perubah untuk persamaan keseimbangan energi
- R_μ : Faktor reduksi daktilitas
- μ_s : Daktilitas rencana
- β_i : Faktor perbandingan gaya geser
- α : Parameter gaya geser rencana
- V : Gaya geser dasar gempa rencana
- W : Berat total dari struktur
- T : Perioda
- F_n : Gaya lateral pada tingkat paling atas suatu struktur
- F_i : Gaya lateral pada tingkat i

Analisis respon struktur kemudian dilakukan untuk mendapatkan gaya dalam, selanjutnya dilakukan desain tulangan untuk setiap elemen struktur. Analisis kinerja berupa penentuan level kinerja, daktilitas aktual, dan performance point berdasarkan spektrum kapasitas dan kapasitas ultimit.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Pemodelan dan respon struktur

Rekapitulasi parameter desain yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 2. Nilai gaya geser dasar kemudian disistribusikan sebagai gaya lateral yang bekerja pada setiap lantai (Tabel 3).

Tabel 2. Parameter Desain pada PBPD

Parameter Desain	Nilai
S_a	
T , detik	0.858
C_2	1.097
Yield Drift ratio, %	0.5
Target Drift ratio, %	1.3225
μ	3.645
R_μ	3.645
γ	0.473
α	1,652
Design Base Shear (V), N	4437687.3

Tabel 3. Gaya lateral tiap lantai

Lantai	F_i (N)
roof	129987
lantai 5	884887
lantai 4	513143
lantai 3	314634
lantai 2	151422

Simpangan antar lantai desain (Δ) harus dihitung sebagai selisih terbesar dari defleksi titik-titik di atas dan di bawah yang diperhatikan yang letaknya segaris secara vertikal di sepanjang salah satu bagian tepi struktur. Batasan simpangan antar lantai tingkat desain (Δ) ditentukan pada simpangan antar lantai ijin yang ditentukan berdasarkan kategori risiko gedung. Berdasarkan informasi nilai simpangan antar lantai pada arah-x dan -y pada Tabel 4, dapat dilihat bahwa simpangan antar lantai yang terjadi lebih kecil daripada simpangan ijin.

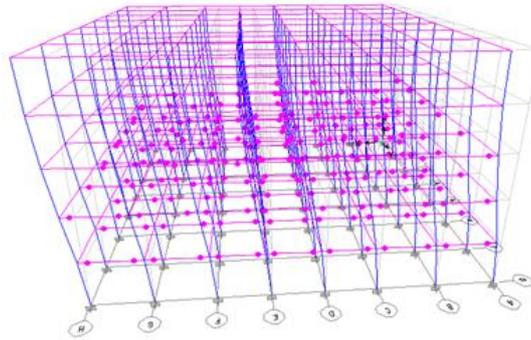
Tabel 4. Simpangan antar lantai

Story	U_x	Tinggi lantai	Drift D_x (m)	Simpangan Per lantai	Simpangan Ijin	Ket
5	0.0215	3.5	0.0014	0.0077	0.06731	ok
4	0.0201	3.5	0.0037	0.0204	0.06731	ok
3	0.0164	3.5	0.0057	0.0314	0.06731	ok
2	0.0107	3.5	0.0065	0.0358	0.06731	ok
1	0.0042	3.5	0.0042	0.0231	0.06731	ok

Story	U_y	Tinggi lantai	Drift D_y (m)	Simpangan Per lantai	Simpangan Ijin	Ket
5	0.0022	3.5	0.0001	0.00055	0.06731	ok
4	0.0021	3.5	0.0004	0.0022	0.06731	ok
3	0.0017	3.5	0.0006	0.0033	0.06731	ok
2	0.0011	3.5	0.0007	0.00385	0.06731	ok
1	0.0004	3.5	0.0004	0.0022	0.06731	ok

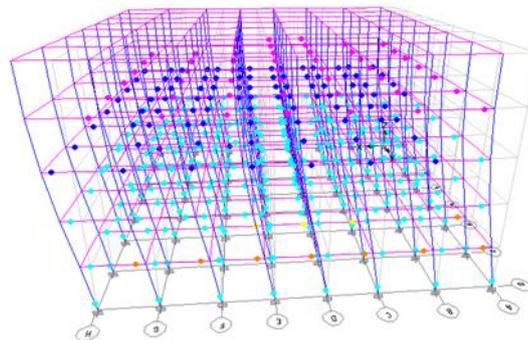
3.2. Kinerja struktur

Dalam analisis statis nonlinear, pengaruh gempa dijadikan beban statik yang nantinya akan ditingkatkan secara bertahap sampai melampaui pembebanan yang mampu diterima struktur, sehingga struktur mengalami pelepasan pertama (sendi plastis) yang kemudian akan mengakibatkan perubahan sifat struktur yang semula elastik berubah menjadi bentuk pasca elastik hingga mencapai kondisi plastis. Beban gempa yang direncanakan berdasarkan *Performance-Based Plastic Design* (PBPD) diubah menjadi beban statik ekuivalen, yang kemudian dibebankan kepada struktur pada pusat massa. Setelah dilakukan analisis *pushover* maka didapatkan lokasi sendi plastis pada struktur. Lokasi sendi plastis yang pertama terjadi pada balok. Berarti elemen struktur balok yang mengalami kondisi plastis terlebih dahulu. Lokasi sendi plastis pertama untuk PBPD terjadi pada step ke-8 (Gambar 2).



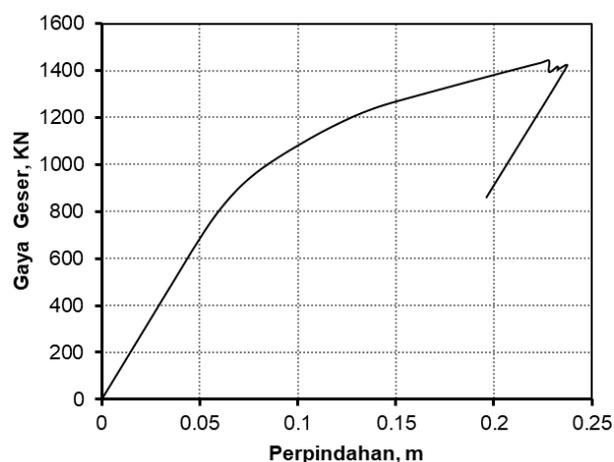
Gambar 2. Sendi plastis pertama

Hasil akhir analisis pushover pada step ke-27 (Gambar 3) menunjukkan terjadinya keruntuhan pada struktur. Distribusi sendi plastis pada gedung hanya terjadi pada elemen balok dan kolom lantai dasar saja, sehingga tidak terjadi mekanisme tingkat. Hal tersebut sesuai dengan metode perencanaan kolom kuat-balok lemah (*strong column weak beam*).



Gambar 3. Sendi plastis saat terjadi keruntuhan

Kurva *pushover* menunjukkan hubungan antara perpindahan yang terjadi dengan gaya geser yang diterima oleh struktur mulai terjadinya leleh pertama sampai struktur tersebut runtuh seperti dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4 Kurva *Pushover*

Level kinerja ditentukan berdasarkan spektrum kapasitas, dimana dalam metoda spektrum kapasitas proses dimulai dengan menghasilkan kurva hubungan gaya perpindahan yang memperhitungkan kondisi inelastis struktur. Setelah titik kinerja struktur diketahui maka selanjutnya menentukan tingkat kinerja dari struktur. Untuk menentukan titik kinerja maka perlu diinputkan data spektrum respon. Hasil analisis memperlihatkan bahwa dengan metode spektrum kapasitas level kinerja struktur diperoleh drift ratio 0.0066 dan maksimum simpangan inelastik 0.00213.

4. KESIMPULAN

Metoda *Performance-Based Plastic Design* dapat digunakan sebagai pilihan metoda dalam desain bangunan tahan gempa pada struktur beton bertulang. Nilai koefisien C_2 yang digunakan dalam desain sebesar 1,097. Level kinerja struktur berdasarkan spektrum kapasitas berada pada level *immediate occupancy* berarti apabila terjadi gempa, gedung tidak mengalami kerusakan struktural dan non struktural, sehingga bangunan aman dan dapat langsung dipakai.

DAFTAR PUSTAKA

- Applied Technology Council, (1997). NEHRP Guidelines for The Seismic Rehabilitation of Buildings (FEMA Publication 273), Washington, D.C
- Applied Technology Council, (2005). FEMA 440 Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures. California. Washington, D.C
- Badan Standarisasi Nasional. (2019). Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan nongedung. SNI 1726-2019. Jakarta.
- Cheng Liao, W. (2010). Performance-Based Plastic Design of Earthquake Resistant Reinforced Concrete Moment Frames. A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy (Civil Engineering) in the University of Michigan. Michigan.
- Dewobroto, W. (2005). Evaluasi Kinerja Struktur Baja Tahan Gempa dengan Analisa Pushover. Civil Engineering National Conference: Sustainability Construction and Strutural Engineering. Semarang
- Goel, Subhash C., Leelataviwat, Sutat. (1998). Seismic design by plastic method, Engineering Structures, Volume 20, Issues 4–6, 1998, Pages 465-471, ISSN 0141-0296, [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(97\)00147-8](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(97)00147-8).

- Grigorian, Mark., Grigorian, Carl. (2011). Performance control for seismic design of moment frames, *Journal of Constructional Steel Research*, Volume 67, Issue 7, Pages 1106-1114, ISSN 0143-974X, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2011.02.001>.
- Riza, M. (2011). Perencanaan Bangunan Tahan Gempa. Diakses melalui <http://www.perencanaanstruktur.com/2010/07/perencanaan-bangunan-tahan-gempa.html> pada tanggal 7 Maret 2015.
- Sejal P. Dalal, Purvang Dalal. (2021). Strength, Deformation and Fragility assessment of Reinforced Concrete Moment Resisting frame designed by Force Based Design and the Performance Based Plastic Design method for Seismic loads, *Structures*, Volume 29, Pages 1154-1164, ISSN 2352-0124, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.11.029>.
- Zhenhua Huang, Liping Cai, Yashica Pandey, Yong Tao, William Telone. (2021). Hysteresis effect on earthquake risk assessment of moment resisting frame structures, *Engineering Structures*, Volume 242, 2021, 112532, ISSN 0141-0296, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112532>.