

EFEK DAMPING EKIVALEN PADA METODE PERPINDAHAN LANGSUNG UNTUK STRUKTUR YANG MEMILIKI KETIDAKBERATURAN VERTIKAL

Yudit Agus Priambodo^{1*} dan Marlina Kamis¹

^{1*}Program Studi Teknik Sipil Universitas Muhammadiyah Maluku Utara
sipilummu.yudit@gmail.com

Abstrak: Metode *Direct Displacement Based Design* (DDBD) atau Metode Perpindahan Langsung sebagai metode alternatif dalam desain bangunan gedung tahan gempa. Beberapa metode untuk menghitung redaman ekuivalen telah diusulkan. Salah satu kegagalan bangunan adalah disebabkan karena mekanisme *softstory* atau lantai lemah. Hal ini disebabkan karena perbedaan kekakuan lantai yang lebih rendah dibanding lantai yang lain. Makalah ini membahas tentang penerapan metode DDBD dengan tiga redaman ekuivalen yang digunakan pada gedung bertingkat 4 (empat) lantai beton bertulang di Kota Ternate yang memiliki ketidakberaturan vertikal tipe 1a menurut SNI 1726-2012. Hasil analisis menunjukkan bahwa secara keseluruhan struktur tidak melampaui dirft desain yaitu *damage control* (0.025) bahkan menghasilkan level kinerja yang lebih tinggi yaitu *Serviceability*. Hasil desain menggunakan redaman ekuivalen menurut Priestley lebih ekonomis dibandingkan yang lain, hal ini disebabkan karena disain gaya geser yang diberikan adalah yang paling kecil.

Kata kunci : perpindahan langsung, redaman ekuivalen, ketidakberaturan vertikal.

I. PENDAHULUAN

Gempa bumi sebagai salah satu bencana alam yang sering terjadi di Indonesia pada tahun 2018 dengan dampak kerusakan yang cukup besar. Masih teringat gempa yang terjadi di Palu dan Donggala dengan besaran gempa 7.4 skala richter disusul dengan tsunami yang menurut Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) tercatat jumlah korban meninggal sebanyak 2.113 orang.



Gambar 1. Mall Tatura sesudah gempa Palu yang mengalami mekanisme *softstory*

Salah satu keruntuhan bangunan yang terjadi adalah mekanisme *softstory* atau lantai lemah. Mekanisme keruntuhan ini terjadi pada salah satu bangunan yaitu Mall Tatura di Palu. Hal ini terjadi karena kekakuan satu lantai lebih rendah dari lantai lainnya (Gambar 1). SNI 1726-2012 pasal 7.3.2.2 menjelaskan bahwa untuk struktur bangunan gedung yang memiliki ketidakberaturan seperti yang terdaftar dalam Tabel 11 harus dianggap mempunyai ketidakberaturan vertikal. Untuk tipe 1a yaitu ketidakberaturan kekakuan tingkat lunak dirujuk pada Tabel 13 dimana hanya diperbolehkan menggunakan analisis spektrum respons ragam dan riwayat respon seismik saja dalam penggunaan metode analisisnya [1].

Pada tahun 2007, Priestley dkk, mengusulkan metode desain bangunan gedung bertingkat yaitu *direct displacement based design* (DDBD)[2]. Metode ini muncul dengan

berkembangnya teknologi desain berbasis kinerja struktur *performance based seismic design* yaitu perencanaan dengan memanfaatkan teknik analisa non-linier berbasis komputer untuk menganalisa perilaku inelastis struktur dari berbagai macam intensitas gerakan tanah (gempa), sehingga dapat diketahui kinerjanya pada kondisi kritis [3]. Kinerja struktur sendiri adalah tingkatan performa suatu struktur terhadap gempa rencana [4]. Kriteria kinerja yang ditetapkan FEMA-273 adalah sebagai berikut :

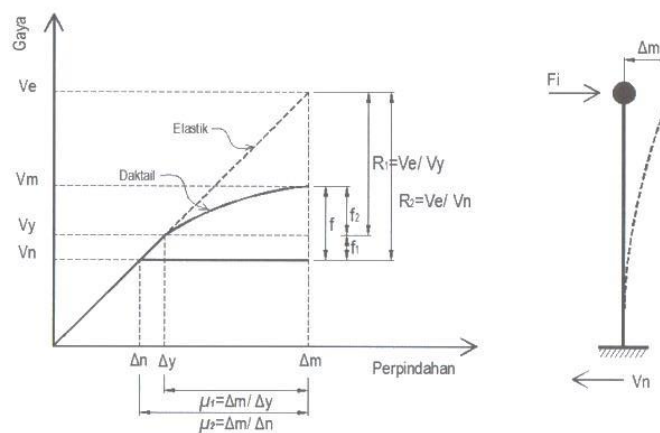
1. Segera dapat dipakai (IO = *Immediate Occupancy*),
2. Keselamatan penghuni terjamin (LS = *Life-Safety*),
3. Terhindar dari keruntuhan total (CP = *Collapse Prevention*).

Metode DDBD mendesain level kinerja dari awal dalam memprediksi kerusakan bangunan sehingga pemilik dapat menentukan level kinerja bangunan pada saat perencanaan sekaligus melakukan mitigasi bencana akibat gempa.

Pada makalah ini akan disampaikan aplikasi metode DDBD dengan tiga redaman ekuivalen yang berbeda metodenya pada gedung bertingkat beton bertulang yang memiliki ketidakberaturan vertikal tipe 1a untuk wilayah kota Ternate. Selanjutnya akan dilakukan investigasi berdasarkan tingkat kinerja yang diusulkan menggunakan program bantu yaitu SAP2000.

II. KAJIAN PUSTAKA

Menurut Priestley dkk, 2007, seperti yang dijelaskan pada Gambar 2 bahwa pada kondisi inelastik, kekuatan/gaya kurang berpengaruh dibandingkan dengan perpindahan. Hal ini akan logis untuk menggunakan perpindahan sebagai dasar desain [2].



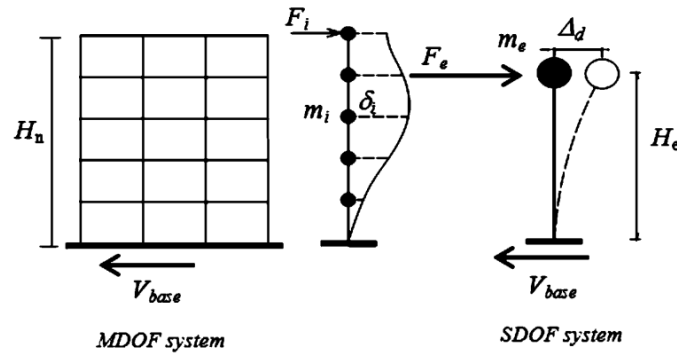
Gambar 2. Kurva gaya dan perpindahan elastik dan inelastik sistem struktur akibat gempa

Metode DDBD memberikan hasil kinerja yang lebih mendekati target design awal dibandingkan dengan metode *Force based design* (FBD) yang digunakan oleh SNI [5]. Hal senada dalam [6], bahwa DDBD tidak membutuhkan perbaikan karena struktur memenuhi kinerja yang ditargetkan sementara FBD membutuhkan usaha ekstra untuk meningkatkan kinerja struktural karena prosedur desain harus diulang dari awal. Dalam sudut pandang ini, prosedur DDBD lebih efektif dibandingkan dengan FBD.

Berikut prosedur desain metode DDBD menurut [2] :

1. Data awal yang diperlukan adalah mutu bahan, parameter gempa pada lokasi yang ditinjau, jenis dan jumlah balok, tinggi tiap lantai dan massa tiap lantai.

- Menentukan simpangan desain (Persamaan 1) struktur MDOF bangunan yang sesuai dengan kriteria kinerja struktur sehingga didapatkan perpindahan desain (Persamaan 4) dari struktur SDOF pengganti (Gambar 3).



Gambar 3. Permodelan SDOF dari bangunan bertingkat

Simpangan desain setiap lantai didapatkan dari Persamaan 1 berdasarkan *shape vector* yang terdapat pada Persamaan 2 atau 3, pada skala dari *critical storey displacement* Δ_c (pada lantai 1) dan *mode shape* pada *critical storey level* δ_c (pada lantai 1) :

$$\Delta_i = \delta_i \frac{\Delta_c}{\delta_c} \quad (1)$$

Untuk $n \leq 4$ lantai

$$\delta_i = \frac{H_i}{H_n} \quad (2)$$

Untuk $n > 4$ lantai

$$\delta_i = \frac{4}{3} \frac{H_i}{H_n} \left(1 - \frac{H_i}{4H_n} \right) \quad (3)$$

Dimana n adalah jumlah lantai bangunan, H_i adalah elevasi lantai ke- i , dan H_n tinggi total bangunan. Perpindahan desain ekuivalen:

$$\Delta_d = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \Delta_i^2}{\sum_{i=1}^n m_i \Delta_i} \quad (4)$$

Dimana m_i massa pada lantai ke- i

Massa dan tinggi struktur ekuivalen:

$$m_e = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \Delta_i}{\Delta_d} \quad (5)$$

$$H_e = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \Delta_i H_i}{\sum_{i=1}^n m_i \Delta_i} \quad (6)$$

- Mengontrol simpangan desain Δ_i setiap lantai terhadap *higher mode effect*. dengan nilai amplifikasi ω_θ seperti pada Persamaan 8.

$$\Delta_{i,\omega} = \omega_\theta \Delta_i \quad (7)$$

$$\omega_\theta = 1.15 - 0.0034H_n \geq 1.0 \quad (8)$$

dimana H_n adalah total tinggi bangunan dalam satuan meter.

- Memperkirakan redaman viscous ekuivalen ξ_{eq} , dimana daktilitas perpindahan μ dari struktur harus diketahui terlebih dahulu sesuai Persamaan 9.

$$\mu = \frac{\Delta_d}{\Delta_y} \quad (9)$$

Perpindahan leleh diperoleh dari:

$$\Delta_y = \theta_y H_e \quad (10)$$

$$\theta_y = 0.5 \varepsilon_y \frac{L_b}{H_b} \quad (11)$$

dimana Θ_y adalah rotasi dari balok , ε_y adalah strain dari tulangan baja, L_b dan H_b adalah panjang dan tinggi balok.

Redaman ekuivalen untuk beton bertulang yang digunakan [7]:

a. Redaman viscous ekuivalen menurut Priestley dkk, 2007:

$$\xi_{eq} = 0.05 + 0.565 \left(\frac{\mu-1}{\mu\pi} \right) \quad (12)$$

b. Redaman viscous ekuivalen menurut Gulkan Sozen, 1974:

$$\xi_{eq} = 0.05 + 0.2 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{\mu}} \right) \quad (13)$$

c. Redaman viscous ekuivalen menurut Iwan, 1980:

$$\xi_{eq} = 0.05 + 0.0587(\mu - 1)^{0.371} \quad (14)$$

5. Menentukan periode efektif T_e dari struktur SDOF pada saat respons perpindahan puncak dengan memakai perpindahan desain pada langkah 2 dan spektrum perpindahan sesuai dengan damping pada langkah 4, ξ_{eq} .

Berdasarkan spektrum perpindahan maka T_e didapatkan dari :

$$R_\xi = \left(\frac{0.07}{0.02 + \xi} \right)^{0.5} \quad (15)$$

$$T_e = \frac{\Delta_d}{\Delta_\xi} T_d \quad (16)$$

dimana T_d adalah *corner period*, Δ_ξ kebutuhan perpindahan untuk level dari redaman viscous ekuivalen ξ_{eq} .

6. Menghitung kekakuan efektif k_e dari struktur SDOF dan gaya geser desain (V_{base}).

Kekakuan efektif k_e diperoleh dari :

$$k_e = \frac{4\pi^2 m_e}{T_e^2} \quad (17)$$

Gaya geser desain V_{base} diperoleh dari :

$$V_{base} = k_e \Delta_d \quad (18)$$

7. Membagi gaya geser desain searah vertikal ke tiap-tiap lantai dengan persamaan :

$$F_i = F_t + 0.9V_{base} \left(\frac{m_i \Delta_i}{\sum_{i=1}^n m_i \Delta_i} \right) \quad (19)$$

Dimana F_t :

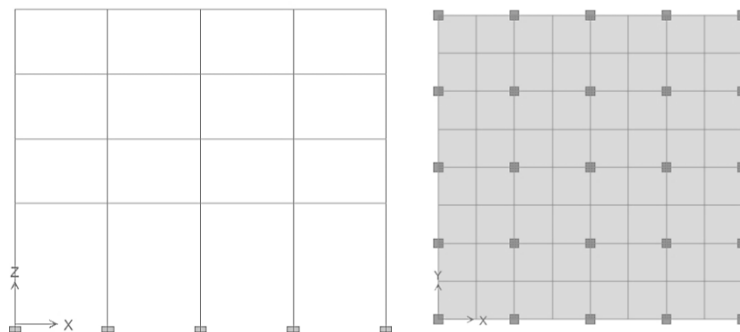
Untuk lantai atap $F_t = 0.1V_{base}$

Untuk lantai yang lain $F_t = 0$

III. STUDI KASUS

Studi kasus yang dibahas dalam penelitian ini dijelaskan sebagai berikut :

1. Model struktur yang digunakan yaitu gedung 4 (empat) lantai 3(tiga) dimensi, empat bentang @ 5m. Sistem struktur rangka beton bertulang pemikul momen dengan mutu beton K300 dengan mutu baja BjTS 40 dan BjTP24. Nilai I (faktor keutamaan) = 1 dan R (faktor reduksi gempa) = 8. Konfigurasi struktur seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. Penampang kolom K50x50, balok induk 25x40, balok anak 20x30. Massa bangunan seperti pada Tabel 1.



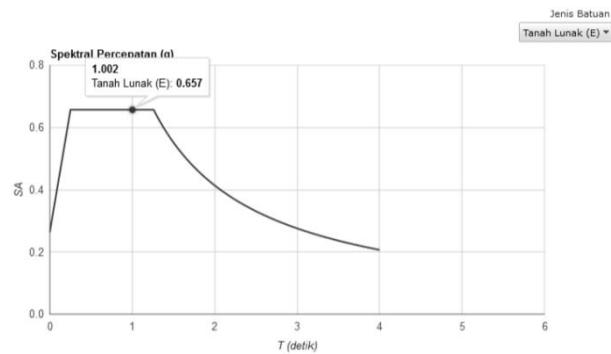
Gambar 4. Pemodelan struktur 4 lantai (elevasi dan denah)

Tabel 1. Data tinggi lantai dan massa struktur

Lantai	Tinggi (m)	Massa (ton)
4	3.5	239.0155
3	3.5	239.0155
2	3.5	239.0155
1	5.5	269.0501

Parameter gempa adalah kota Ternate untuk tanah lunak yaitu $S_{DS} = 0.65$, $S_{D1} = 0.819$.

2. Pada desain dengan metode DDBD dilakukan langkah-langkah sesuai yang dijelaskan pada bab 2 dengan target simpangan lantai adalah 0.025 untuk tingkat kinerja level 2 (*damage control*)
3. Dalam prosedur DDBD, perhitungan desain kapasitas mengikuti rekomendasi Priestley dkk, (2007). Spektrum respon menggunakan kota Ternate untuk tanah lunak yang diambil dari Desain Spektra Indonesia (2011)[8].
4. Pengevaluasian kinerja struktur dilakukan dengan analisis pushover menggunakan *software* SAP2000[9].



Gambar 5. Spektrum respon Ternate untuk tanah lunak dengan parameter gempa $S_s = 1.083g$ dan $S_1 = 0.512g$

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil analisis perencanaan menggunakan metode DDBD dengan target kinerja *damage control* yaitu 0.025 (batasan dirft) diperoleh nilai parameter yang digunakan untuk ketiga metode redman ekivalen seperti pada Tabel 2.

Tabel 2. Nilai-nilai parameter metode DDBD

No	Parameter	Priestley	Gulkan Sozen	Iwan
1	Δ_d	0.302 m	0.302 m	0.302 m
2	m_e	865.274 ton	865.274 ton	865.274 ton
3	H_e	12.069 m	12.069 m	12.069 m
4	Δ_y	0.142 m	0.142 m	0.142 m
5	μ	2.119	2.119	2.119
6	ξ_{eq}	0.145	0.113	0.111
7	R_ξ	0.651	0.727	0.73
8	T_e	2.277 detik	2.041 detik	2.03 detik
9	k_e	5978.121 kN/m	7437.202 kN/m	7517.002 kN/m
10	V_{base}	1803.725 kN	2243.96 kN	2268.037 kN

Hasil analisis struktur dengan distribusi gaya geser perlantai sesuai metode DDBD dengan redaman ekivalen menurut Priestley ditunjukkan pada Tabel 3. Dari Tabel tersebut dapat

diketahui kekakuan lantai 1 lebih kecil dari 70% kekakuan lantai 2 yaitu 174.489 kN/m. Distribusi gaya geser per lantai dengan redaman ekuivalen menurut Gulkan Sozen ditunjukkan pada Tabel 4. Dari Tabel tersebut dapat diketahui kekakuan lantai 1 lebih kecil dari 70% kekakuan lantai 2 yaitu 174.488 kN/m. Distribusi gaya geser per lantai dengan redaman ekuivalen menurut Iwan ditunjukkan pada Tabel 5. Dari Tabel tersebut dapat diketahui kekakuan lantai 1 lebih kecil dari 70% kekakuan lantai 2 yaitu 174.488 kN/m. Ini menunjukkan bahwa struktur yang didesain dengan ketiga redaman ekuivalen tersebut mempunyai ketidakberaturan vertikal tipe 1a.

Analisis pushover dilakukan untuk verifikasi perpindahan leleh hasil dari metode DDBD untuk ketiga redaman ekuivalen (Tabel 6). Peraturan yang digunakan untuk menentukan titik kinerja adalah FEMA 440 *displacement modification* yang *built in* pada software SAP2000.

Tabel 3. Kekakuan lantai untuk redaman ekuivalen menurut Priestley

Lantai	Gaya geser lantai (kN)	Perpindahan tiap lantai (mm)	Kekakuan lantai (kN/mm)
4	774.855	1.1272	687.416
3	1239.295	3.6189	342.451
2	1573.692	6.3132	249.270
1	1803.725	11.4938	156.930

Tabel 4. Kekakuan lantai untuk redaman ekuivalen menurut Gulkan Sozen

Lantai	Gaya geser lantai (kN)	Perpindahan tiap lantai (mm)	Kekakuan lantai (kN/mm)
4	963.975	1.1272	708.805
3	1541.771	3.6189	339.268
2	1957.784	6.3132	249.269
1	2243.961	11.4938	156.930

Tabel 5. Kekakuan lantai untuk redaman ekuivalen menurut Iwan

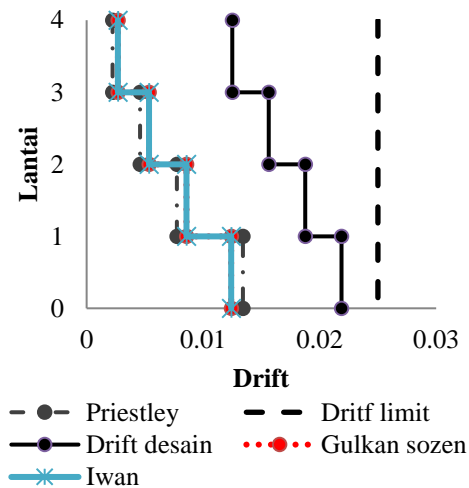
Lantai	Gaya geser lantai (kN)	Perpindahan tiap lantai (mm)	Kekakuan lantai (kN/mm)
4	974.318	1.1272	708.853
3	1558.313	3.6189	339.265
2	1978.79	6.3132	249.268
1	2268.037	11.4938	156.930

Tabel 6. hasil analisis pushover

Parameter	Fema 440		
	Priestley	Gulkan Sozen	Iwan
Perpindahan Leleh Δ_y (mm)	54.382	60.1482	60.1482
Target perpindahan Δ_m (mm)	124.716	126.387	126.387
Daktilitas	2.293	2.101	2.101
Daktilitas DDBD	2.119	2.119	2.119
Level kinerja	Immediate Occupancy	Immediate Occupancy	Immediate Occupancy

Dari Tabel 6 di atas dapat dilihat bahwa metode FEMA 440 menghasilkan target perpindahan dibawah nilai rencana dengan metode DDBD. Jika menggunakan level kinerja FEMA-440 maka struktur masih masuk kategori *Immediate Occupancy* sedangkan level kinerja rencana menggunakan DDBD (0.025) masuk ke level *Life Safety*.

Selanjutnya nilai drift aktual hasil analisis pushover digunakan untuk mengetahui perilaku akhir dari struktur yang didesain. Nilai drift hasil adalah perpindahan antar lantai dibagi dengan ketinggian tiap lantai. Hasil perbandingan drift ditampilkan grafik pada Gambar 6.



Gambar 6. Nilai drift sistem struktur menurut FEMA 440

Dari Gambar 6 tersebut dapat diketahui bahwa level kinerja hasil pushover dari struktur lebih kecil dari rencana sesuai metode DDBD untuk ketiga redaman ekuivalen yang digunakan dan mendekati level yang lebih tinggi yaitu *Immediate Occupancy*. Hal ini disebabkan desain elemen struktur menggunakan SAP2000 dimana masih belum cukup mendetail dalam pemodelan sendi platisnya. Struktur dengan redaman Priestley memberikan drift paling besar pada lantai satu dibandingkan yang lain. Ini disebabkan gaya geser desainnya lebih kecil yaitu 1803.725 kN dibanding dengan menurut Gulkan sozen dan Iwan. Untuk gaya geser desain menurut Gulkan sozen dan Iwan memberikan nilai yang kurang lebih sama. Gaya geser desain yang lebih kecil akan menghasilkan desain tulangan kolom yang lebih sedikit sehingga driftnya lebih besar. Hal ini juga didukung oleh nilai daktilitas menurut Priestley juga paling besar bahkan melebihi daktilitas desain metode DDBD. Namun keseluruhan hasil tidak melampaui drift limit rencana yaitu 0.025.

V. KESIMPULAN

Hasil perbandingan analisis dari metode DDBD untuk ketiga redaman ekuivalen yang digunakan dengan hasil aktual pushover menggunakan metode FEMA 440 memberikan kesimpulan bahwa secara keseluruhan struktur tidak melampaui drift desain yaitu *damage control* (0.025) bahkan menghasilkan level kinerja yang lebih tinggi yaitu *Serviceability*. Hasil desain menggunakan redaman ekuivalen menurut Priestley lebih ekonomis dibandingkan yang lain, hal ini disebabkan karena disain gaya geser yang diberikan adalah yang paling kecil.

REFERENSI

- [1] SNI 1726:2012 : Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung, Badan Standarisasi Nasional, 2012.

- [2] Priestley, M.J.N, Calvi, G.M and Kowalsky, M.J., *Displacement Based Seismic Design of Structure*. IUSS Press. Pavia, 2007.
- [3] Dewobroto, W., “Evaluasi Kinerja Struktur Baja Tahan Gempa dengan Analisa Pushover”, *Civil Engineering National Conference : Sustainability Construction & Structural Engineering Based on Professionalism – Unika Soegijapranata*, Semarang 17-18 Juni 2005.
- [4] Tavio dan Wijaya , U., *Desain Rekayasa Gempa Berbasis Kinerja*, Yogyakarta : Penerbit ANDI, 2018.
- [5] Wijaya, C. dan Wijaya, S.W., “Evaluasi Kinerja Direct Displacement Based Design dan Force Based Design Bangunan Irregular Plan 6-Lantai”, Skripsi, Universitas Kristen Petra, Surabaya, 2013.
- [6] Muljatia, I., Asisia, F., Willyantoa, K., “Performance of force based design versus direct displacement based design in predicting seismic demands of regular concrete special moment resisting frames”, *The 5th International Conference of Euro Asia Civil Engineering Forum, Procedia Engineering* 125 (2015) 1050 – 1056.
- [7] Blandon, Carlos A., “Equivalent viscous damping equations for direct displacement Based design”, *Journal of Earthquake Engineering*, 2005.
- [8] (2018) Desain Spektra Indonesia. [Online]. Available http://puskim.pu.go.id/desain_spektra_indonesia_2011/
- [9] (2017) Computers and Structures, Inc., SAP2000 Static Pushover Analysis: Watch & Learn. Available :<https://www.csiamerica.com/products/etabs/watch-and-learn>