

METODE PERPINDAHAN LANGSUNG PADA GEDUNG BERTINGKAT BETON BERTULANG DENGAN KETIDAKBERATURAN VERTIKAL

Yudit Agus Priambodo^{1*} dan Marlina Kamis²

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

²Program Studi Teknik Sipil Universitas Muhammadiyah Maluku Utara
marlinakamis@gmail.com

Abstrak: Metode Direct Displacement Based Design (DDBD) sebagai metode alternative dalam desain bangunan gedung tahan gempa. Beberapa kegagalan bangunan 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 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 metode DDBD memberikan level kinerja lebih tinggi dari desain rencana.

Kata kunci : perpindahan langsung, 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 Lombok yang terjadi pada tanggal 19 Agustus 2018 dengan kekuatan 6.9 skala Richter yang menghancurkan bangunan-bangunan dan memakan korban jiwa \pm 563 orang meninggal dunia. Kemudian pada tanggal 28 september 2018, gempa 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. Sebelum dan sesudah gempa Palu pada bangunan Hotel Roa-Roa

Pada tahun 2007, Priestley dkk, mengusulkan metode desain bangunan gedung bertingkat yaitu *direct displacement based design* (DDBD)[1]. 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 [2]. Kinerja struktur sendiri adalah tingkatan performa suatu struktur terhadap gempa rencana [3]. Kriteria kinerja yang ditetapkan FEMA-273 adalah sebagai berikut :

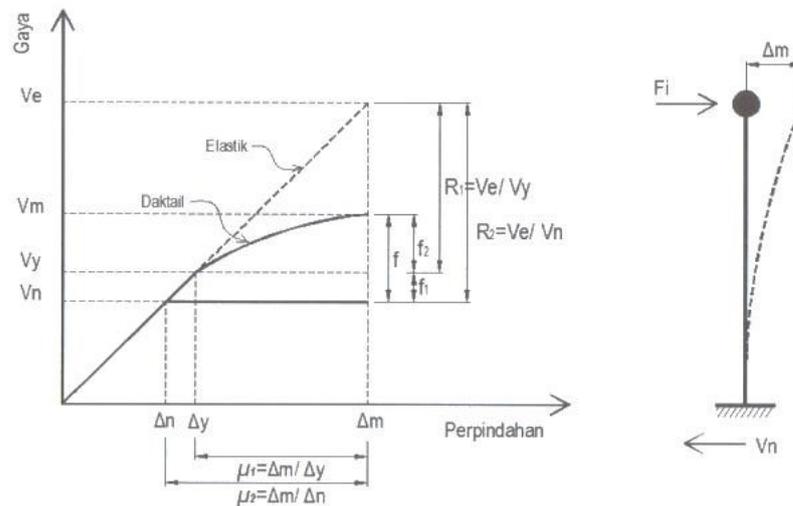
1. Segera dapat dipakai (IO = *Immediate Occupancy*),
2. Keselamatan penghuni terjamin (LS = *Life-Safety*),
3. Terhindar dari keruntuhan total (CP = *Collapse Prevention*).

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.

Keruntuhan gedung akibat *softstory* atau lantai lemah banyak terjadi. Hal ini disebabkan biasanya lantai pertama memiliki ketinggian vertikal yang lebih tinggi dari lantai di atasnya. Hal ini disebabkan lantai pertama difungsikan untuk lobi. 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[4]. Menurut Tabel 13 untuk Tipe 1a hanya diperbolehkan menggunakan analisis spektrum respons ragam dan riwayat respon seismik saja. Pada makalah ini akan disampaikan aplikasi metode DDBD pada gedung bertingkat beton bertulang yang memiliki ketidakberaturan vertikal tipe 1a untuk wilayah kota Ternate kemudian 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 [1].

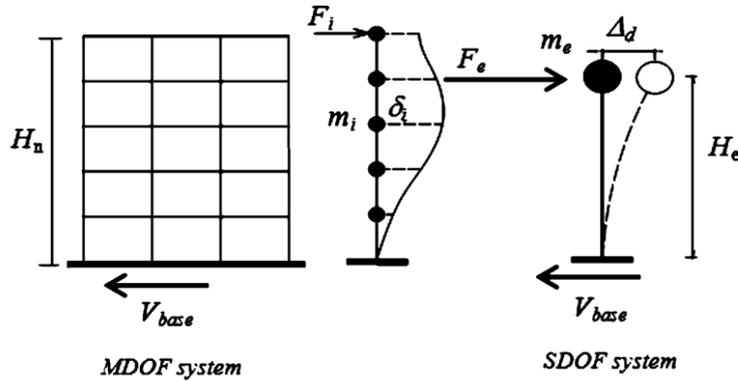


Gambar 2. Kurva gaya dan perpindahan elastik dan inelastik sistem struktur akibat gempa

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 disampaikan 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 [1] :

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.
2. 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 story 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:

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

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

3. Mengontrol simpangan desain Δ_i setiap lantai terhadap *higher mode effect*. dengan nilai amplifikasi ω_θ seperti pada pers 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.

4. 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 viscous ekuivalen ξ_{eq} untuk struktur beton bertulang adalah:

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

- 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 :

$$R_\xi = \left(\frac{0.07}{0.02 + \xi} \right)^{0.5} \quad (13)$$

$$T_e = \frac{\Delta_d}{\Delta_\xi} T_d \quad (14)$$

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

- Menghitung kekakuan efektif k_e dari struktur SDOF dan gaya geser desain (V_{base}). Kekakuan efektif k_e diperoleh dari :

$$k_e = \frac{4\pi^2 m_e}{T_e^2} \quad (15)$$

Gaya geser desain V_{base} diperoleh dari :

$$V_{base} = k_e \Delta_d \quad (16)$$

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

$$F_i = F_t + 0.9 V_{base} \left(\frac{m_i \Delta_i}{\sum_{i=1}^n m_i \Delta_i} \right) \quad (17)$$

Dimana F_t :

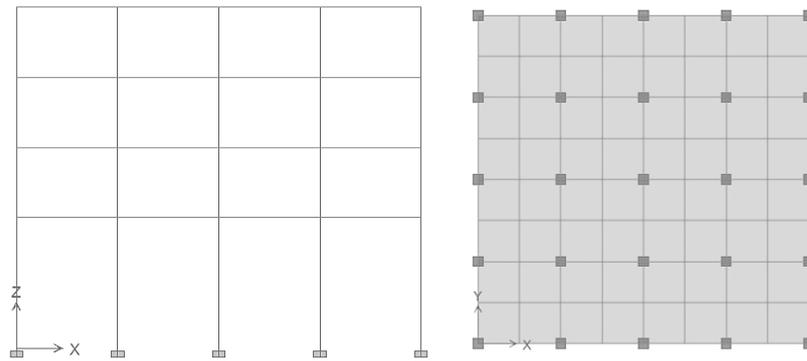
Untuk lantai atap $F_t = 0.1 V_{base}$

Untuk lantai yang lain $F_t = 0$

III. STUDI KASUS

Studi kasus yang dibahas dalam penelitian ini dijelaskan sebagai berikut :

- 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.



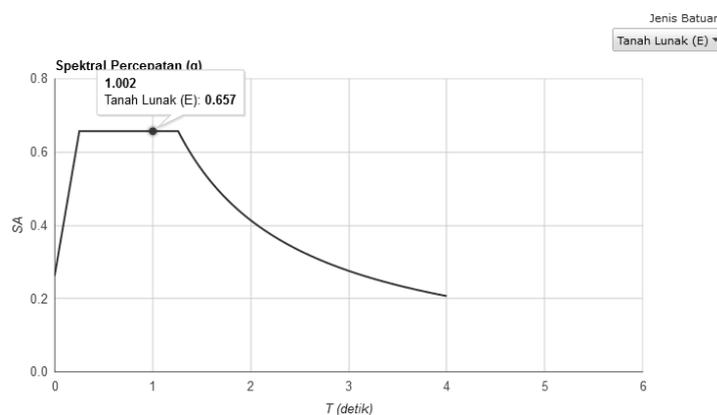
Gambar 4. Pemodelan struktur 4 lantai (elevasi dan denah)

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 [1]. Spektrum respon menggunakan kota Ternate untuk tanah lunak yang diambil dari Desain Spektra Indonesia (2011) [7].
4. Pengevaluasian kinerja struktur dilakukan dengan analisis pushover menggunakan *software* SAP2000 [8].



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 seperti pada Tabel 2 sedangkan distribusi gaya geser perlantai ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 2. Nilai-nilai parameter metode DDBD

No	Parameter	Nilai
1	Δ_d	0.302 m
2	m_e	865.274 ton
3	H_e	12.069 m
4	Δ_y	0.142 m
5	μ	2.119
6	ξ_{eq}	0.145
7	R_ξ	0.651
8	T_e	2.277 detik
9	k_e	5978.121 kN/m
10	V_{base}	1803.725 kN

Tabel 3. Distribusi gaya geser perlantai

Lantai	Gaya (F) perlantai (kN)
4	774.855
3	464.44
2	334.397
1	230.033

Hasil analisis struktur dengan distribusi gaya geser perlantai sesuai metode DDBD ditunjukkan pada Tabel 4. Dari Tabel tersebut dapat diketahui kekakuan lantai 1 lebih kecil dari 70% kekakuan lantai 2 yaitu 174.489 kN/m. Ini menunjukkan bahwa struktur mempunyai ketidakberaturan vertikal tipe 1a.

Analisis pushover dilakukan untuk verifikasi perpindahan leleh hasil dari metode DDBD. Peraturan yang digunakan untuk menentukan titik kinerja adalah FEMA 440 *displacement modification* yang *built in* pada software SAP2000. Titik kinerja yang diperoleh dari metode DDBD dan analisis pushover ditampilkan pada Tabel 5 berikut.

Tabel 4. Kekakuan lantai

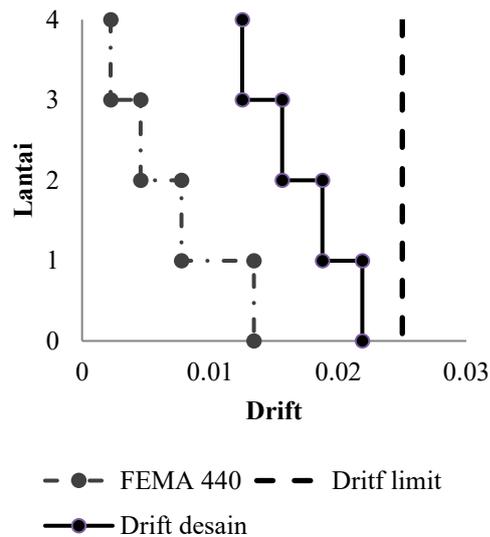
Lantai	Gaya geser lantai (kN)	Perpindahan tiap lantai (mm)	Kekakuan lantai (kN/mm)
4	774.855	1.1272	687.416
3	1239.295	3.6189	342.451
2	1573.692	6.3132	249.270
1	1803.725	11.4938	156.930

Tabel 5. Hasil analisis ddbd dan pushover

Parameter	Metode DDBD	Fema 440
Perpindahan Leleh Δ_y (mm)	142	54.3819
Target perpindahan Δ_m (mm)	302	124.716
Level kinerja	Life Safety	Immediate Ocupancy

Dari Tabel 5 di atas dapat dilihat bahwa metode FEMA 440 menghasilkan target perpindahan jika dibandingkan dibawah nilai rencana dengan metode DDBD. Jika menggunakan level kinerja FEMA-440 maka struktur masih masuk kategori *Immediate Ocupancy* 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 dift ditampilkan grafik pada Gambar 6.



Gambar 6. Nilai drift sistem struktur

Dari Gambar 6 tersebut dapat diketahui bahwa hasil pushover dari struktur lebih kecil dari level kinerja rencana sesuai metode DDBD dan mendekati level yang lebih tinggi yaitu *Serviceability*. Hal ini disebabkan desain elemen struktur menggunakan SAP2000 dimana masih belum cukup mendetail dalam pemodelan sendi platinya. Namun keseluruhan hasil tidak melampaui drift limit rencana yaitu 0.025 (*Damage control*).

V. KESIMPULAN

Hasil perbandingan analisis dari metode DDBD dengan hasil aktual pushover menggunakan metode FEMA 440 maka diambil kesimpulan bahwa struktur tidak melampaui drift desain yaitu *damage control* (0.025) artinya kinerja struktur sesuai dengan metode DDBD. Dengan demikian dapat diketahui kinerja struktur yang didesain setelah terjadi bencana gempa. Untuk pemodelan sendi platis yang detail disarankan menggunakan software khusus yang

dibuat untuk mengetahui level kinerja struktur seperti PERFORM 3D misalnya agar hasilnya lebih akurat.

REFERENSI

- [1] Priestley, M.J.N, Calvi, G.M and Kowalsky, M.J., *Displacement Based Seismic Design of Structure*. IUSS Press. Pavia, 2007.
- [2] 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.
- [3] Tavio dan Wijaya , U., *Desain Rekayasa Gempa Berbasis Kinerja*, Yogyakarta : Penerbit ANDI, 2018.
- [4] *SNI 1726:2012 : Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung*, Badan Standarisasi Nasional, 2012.
- [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] (2018) *Desain Spektra Indonesia*. [Online]. Available http://puskim.pu.go.id/desain_spektra_indonesia_2011/
- [8] (2017) *Computers and Structures, Inc., SAP2000 Static Pushover Analysis: Watch & Learn*. Available :<https://www.csiamerica.com/products/etabs/watch-and-learn>