

**PEMILIHAN LEVEL KINERJA STRUKTUR PADA BANGUNAN SISTEM
RANGKA BETON BERTULANG PEMIKUL MOMEN YANG DIRENCANAKAN
SECARA *DIRECT DISPLACEMENT BASED DESIGN*
STUDI KASUS : BANGUNAN BERATURAN DENGAN BENTANG SERAGAM**

Yonatan¹, Adrian Hartono² dan Ima Muljati³

ABSTRAK : Banyak penelitian yang menunjukkan bahwa metode *Direct Displacement Based Design* (DDBD) pada bangunan beraturan beton bertulang cukup efektif untuk mendesain bangunan tahan gempa dan menunjukkan kinerja yang cukup baik. Namun, penelitian – penelitian sebelumnya menggunakan beban gempa sesuai SNI 1726-2002 dan SNI 1726-2012 yang ternyata tidak setara dengan target desain *level-1*, *-2*, dan *-3* (periode ulang 100-, 500-, dan 2500-tahun) yang lazim digunakan dalam DDBD. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan penelitian kembali yang direncanakan pada 3 level kinerja sesuai dengan *A Model Code for DDBD*, yaitu pada *Level 1 – No Damage*, *Level 2 – Repairable Damage*, dan *Level 3 – No collapse* sehingga dapat mengetahui level kinerja mana yang paling realistis dari segi desain untuk diwujudkan serta menguji kinerjanya pada level tersebut. Bangunan perkantoran 4- dan 8-lantai pada wilayah beresiko gempa tinggi dan rendah akan digunakan sebagai studi kasus. Struktur yang didesain diuji dengan melakukan analisis *nonlinear time history*. Hasil penelitian ini menunjukkan perencanaan DDBD yang paling realistis dari segi desain dilakukan pada *level 2* dan DDBD memiliki kinerja yang cukup baik pada semua level gempa, baik diukur dalam parameter *drift*, *damage index*, maupun mekanisme keruntuhannya. Namun perlu diperhatikan bahwa kondisi *beam side sway mechanism* tidak dapat terjamin dengan sempurna. Meskipun demikian, kondisi *strong column weak beam* masih dapat terjaga pada seluruh bangunan.

KATA KUNCI : *direct displacement based design*, *time history analysis*, kinerja struktur.

1. PENDAHULUAN

Penelitian mengenai kinerja metode *Direct Displacement-Based Design* telah banyak dilakukan dengan menggunakan SNI-03-1726-2002 dan SNI 1726-2012 yang ternyata memiliki pemahaman yang salah terhadap pemeriksaan gempa rencana (Intan dan Valentino, 2016). Sehingga level beban gempa rencana menjadi tidak sesuai dengan level gempa pada matriks *A Model Code for Displacement-Based Seismic Design of Structures DBD12* (Sullivan et al., 2012) yang dapat dilihat pada **Tabel 1**. Disamping itu, penelitian sebelumnya hanya direncanakan pada *Level 2 – Repairable Damage* dengan *drift limit* sebesar 2,5 %. Oleh karena itu, perlu adanya penelitian kembali yang direncanakan pada 3 level kinerja sehingga dapat diketahui level kinerja mana yang paling realistis untuk diwujudkan sekaligus dapat mengetahui kinerja yang dihasilkan. Dalam penelitian ini ditinjau 16 bangunan, yaitu bangunan 4-dan 8-lantai dengan bentang masing-masing 6-dan 8-meter yang masing-masing berada di kota Surabaya (resiko gempa rendah) dan Jayapura (resiko gempa tinggi) dengan tinggi antar lantai 4-meter. Denah struktur dapat dilihat pada **Gambar 1**.

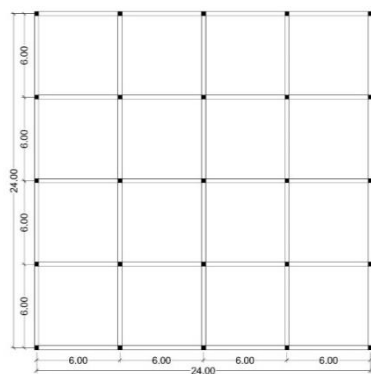
¹ Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra Surabaya, yonatanche94@gmail.com.

² Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra Surabaya, adrn_9@hotmail.com.

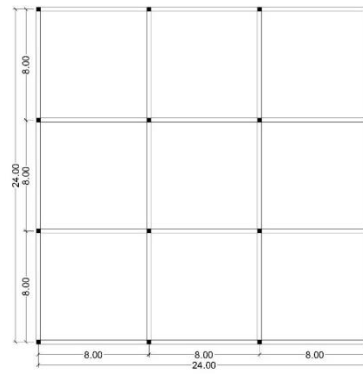
³ Dosen Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra Surabaya, imuljati@petra.ac.id

Tabel 1. Design Intensity (Probability of Exceedence) per Structural Category and Performance Level
Sumber: Sullivan et al, 2012, p.1

Importance Class	Earthquake Design Intensity		
	Level 1	Level 2	Level 3
	No Damage	Repairable Damage	No Collapse
I	Not Required	50% in 50 years	10% in 50 years
II	50% in 50 years	10% in 50 years	2% in 50 years
III	20% in 50 years	4% in 50 years	1% in 50 years
IV	10% in 50 years	2% in 50 years	1% in 50 years



a. Varian A

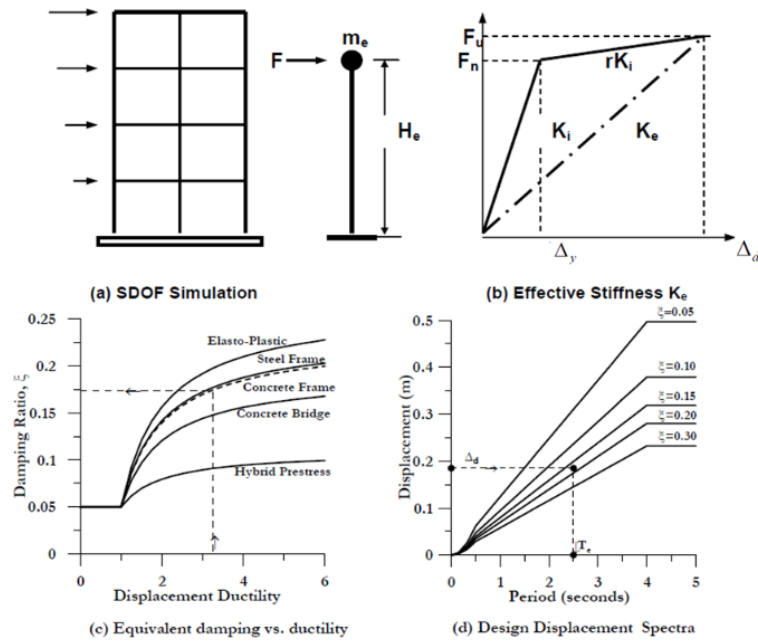


b. Varian B

Gambar 1. Denah Struktur 4- dan 8-Lantai

2. LANDASAN TEORI

Konsep dasar *Direct Displacement Based Design* (DDBD) diambil dari Priestley et.al (2007) yang merupakan pemodelan bangunan sebagai suatu sistem *Single Degree of Freedom* (SDOF), dengan tinggi efektif bangunan H_e , seperti pada **Gambar 2(a)**. Hubungan gaya dan perpindahan pada SDOF menggunakan kekakuan efektif (K_e) yang merupakan *secant stiffness* untuk suatu perpindahan rencana (Δ_d) yang ditunjukkan pada **Gambar 2(b)**. Sedangkan hubungan antara *displacement ductility* dengan *damping ratio* dapat dilihat pada **Gambar 2(c)**. Kemudian, pada **Gambar 2(d)** dapat dicari periode efektif (T_e) dengan *damping ratio* yang telah didapatkan dari **Gambar 2(c)** dengan menggunakan *design displacement spectrum*. Periode efektif (T_e) ini digunakan untuk menentukan kekakuan efektif (K_e) pada sistem SDOF. Dengan adanya kekakuan efektif dan perpindahan rencana ini didapatkan besaran gaya geser dasar pada SDOF. Kemudian dilanjutkan dengan penentuan distribusi beban gempa dan kapasitas desain.



Gambar 2. Konsep Dasar Metode DDBD
Sumber: Priestley et al. (2007)

3. METODOLOGI PENELITIAN

Pengerjaan penelitian ini diawali dengan studi literatur terhadap metode *Direct Displacement Based Design* (DDBD) untuk memahami konsep dasar serta langkah perhitungan. Setelah mempelajari metode DDBD ini, penelitian dilanjutkan dengan pengestimasi balok dan kolom berdasarkan rumus empiris yang ada. Setelah itu, perlu ditentukan target perpindahan pada tiap tingkat (Δ_i) dilanjutkan dengan perhitungan *Equivalent Design Displacement Single Degree of Freedom* (Δ_d). Selanjutnya dicari massa ekuivalen, tinggi efektif, desain daktilitas perpindahan, dan *equivalent viscous damping* sehingga didapatkan periode efektif dan kekakuan efektif struktur. Kekakuan efektif dan periode efektif digunakan untuk menghitung gaya geser dasar bangunan. Setelah didapatkan gaya geser dasar bangunan, dilakukan perhitungan untuk mendistribusi beban gempa pada setiap tingkat dan selanjutnya melakukan *capacity design* struktur bangunan.

Setelah dilakukan *capacity design*, prosedur penelitian dilanjutkan dengan pemilihan hasil *capacity design level 1, 2, dan 3* untuk menentukan level desain yang paling realistis dengan melihat dimensi dan tulangan yang dihasilkan *capacity design* dari masing-masing level.

Hal selanjutnya yang dilakukan adalah mengevaluasi kinerja struktur yang diawali dengan pemodelan hubungan momen-kurvatur menggunakan program CUMBIA (Montejo, 2007) untuk setiap lokasi sendi plastis yang direncanakan, yaitu menurut pola keruntuhan yang aman. Pola keruntuhan yang aman adalah pola *beam-side-sway mechanism*, dimana lokasi sendi plastis terletak di ujung balok dan ujung bawah kolom. Setelah itu dilakukan analisis dinamis *time history non-linear* dengan program ETABS untuk mengetahui kinerja struktur. Output yang diperoleh berupa *drift, damage index, dan failure mechanism*.

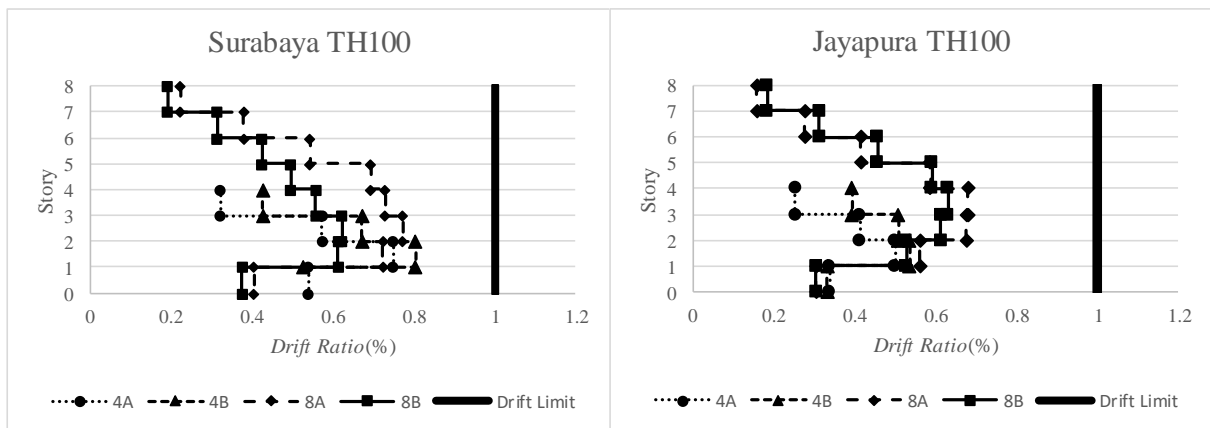
Berdasarkan hasil analisis dan evaluasi terhadap berbagai macam varian yang telah dilakukan, maka dapat ditarik kesimpulan target kinerja mana yang paling realistis yang dapat digunakan sebagai target desain serta bagaimana kinerja bangunan pada target desain tersebut.

4. HASIL DAN ANALISIS

Hasil dan analisis membahas *output/hasil dynamic nonlinear time history analysis* dari ETABS 2015 versi 15.1.0 yang meliputi *drift ratio*, *damage index*, dan *failure mechanism*. Untuk evaluasi tingkat kinerja, ditampilkan *performance matrix* bangunan berdasarkan *A Model Code for Displacement-Based Seismic Design of Structures DBD12* (Sullivan et al., 2012).

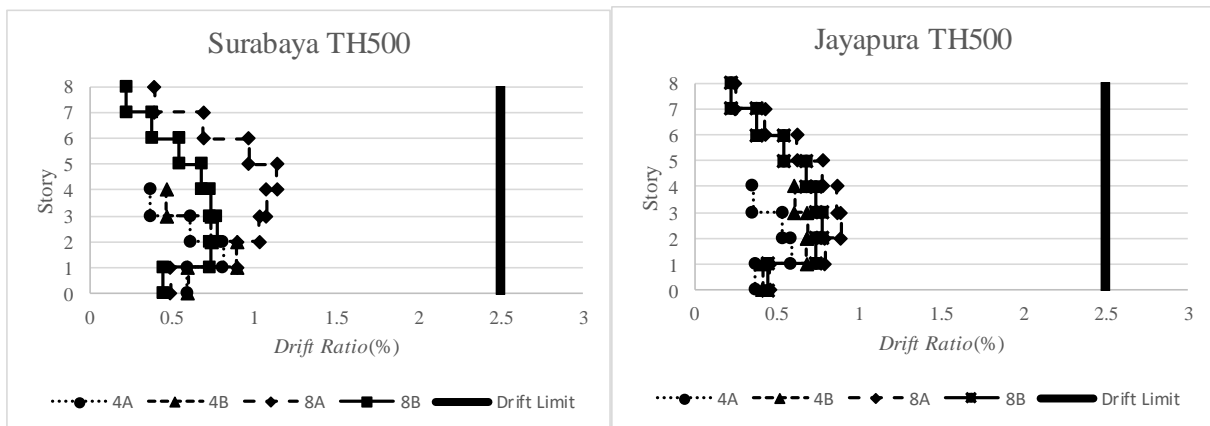
4.1. Drift Ratio

Pada **Gambar 3**. hingga **Gambar 8**. dapat dilihat perbandingan *drift ratio* dengan *drift limit* yang diijinkan menurut *A Model Code for Displacement-Based Seismic Design of Structures DBD12* (Sullivan et al., 2012).



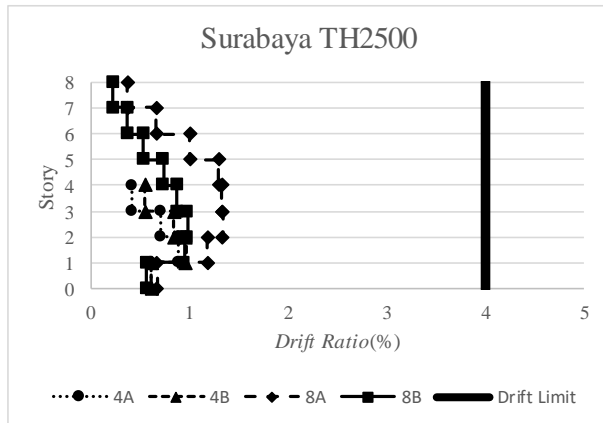
Gambar 3. *Story Drift* Surabaya (100 tahun)

Gambar 4. *Story Drift* Jayapura (100 tahun)

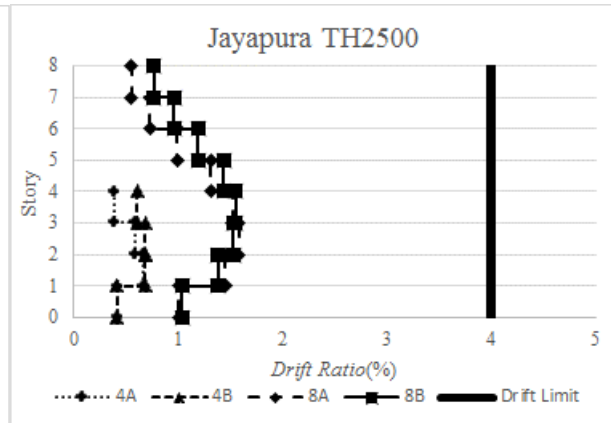


Gambar 5. *Story Drift* Surabaya (500 tahun)

Gambar 6. *Story Drift* Jayapura (500 tahun)



Gambar 7. Story Drift Surabaya (2500 tahun)



Gambar 8. Story Drift Jayapura (2500 tahun)

Berdasarkan hasil *drift ratio*, dapat dilihat bahwa kinerja DDBD yang direncanakan pada level 2 sangat baik karena *drift ratio* yang dihasilkan masih jauh dari *drift limit* (1%, 2.5%, dan 4%).

4.2. Damage Index

Dari analisis melalui program ETABS 2015, didapatkan rotasi maksimum baik untuk kolom dan balok. Besar kriteria *damage index* ditentukan berdasarkan *A Model Code for Displacement-Based Seismic Design of Structures DBD12* (Sullivan et al., 2012). Penggolongan *damage index* dengan cara membandingkan batasan rotasi yang digunakan dengan rotasi maksimum yang terjadi. Hasil kinerja struktur berdasarkan rotasi balok dan kolom dapat dilihat pada **Tabel 2** dan **Tabel 3**.

Tabel 2. Kinerja Struktur Berdasarkan Rotasi Balok

Wilayah	Periode Ulang Gempa	First Yield	No Damage	Repairable Damage	No Collapse
Surabaya	100	8A,8B	4A,4B		
	500		4A,4B,8A,8B		
	2500		4A,4B,8B	8A	
Jayapura	100	4A,4B,8B	8A		
	500	4A	4B,8A,8B		
	2500	4A	4B		8A,8B

■ = Tidak memenuhi harapan target desain

Tabel 3. Kinerja Struktur Berdasarkan Rotasi Kolom

Wilayah	Periode Ulang Gempa	First Yield	No Damage	Repairable Damage	No Collapse
Surabaya	100	4A,4B,8B			8A
	500	4A,4B,8B			8A
	2500	4A,4B,8B			8A
Jayapura	100	4B,8B			4A,8A
	500	4B,8A			4A,8B
	2500				4A,4B,8A,8B

■ = Tidak memenuhi harapan target desain

Hasil penelitian menunjukkan bahwa bangunan DDBD yang didesain pada level 2 memiliki kinerja yang sangat baik, ditinjau pada elemen struktur balok baik pada wilayah Surabaya maupun Jayapura. Kinerja elemen struktur kolom, pada wilayah Surabaya dan Jayapura memiliki kinerja yang cukup baik.

Beberapa elemen kolom tidak memenuhi harapan target desain (pelelehan terjadi pada *base column*). Hal ini disebabkan oleh kriteria *damage index* berdasarkan *A Model Code for Displacement-Based Seismic Design of Structures DBD12* (Sullivan et al., 2012) yang terlalu ketat jika dibandingkan dengan FEMA 356 (2000). Jika diukur menggunakan kriteria berdasarkan FEMA 356 (2000), kinerja bangunan dapat memenuhi harapan target desain.

4.3. Failure Mechanism

Selain *damage index*, konfigurasi sendi plastis juga menentukan mekanisme keruntuhan bangunan. Mekanisme yang baik adalah ketika seluruh *joint* balok leleh tetapi hanya *joint* ujung bawah kolom lantai 1 dan ujung atas kolom lantai teratas yang diperbolehkan leleh. Hal ini menyebabkan mekanisme keruntuhan yang aman bagi pengguna. Dari hasil penelitian ini *beam side sway mechanism* pada bangunan yang direncanakan secara DDBD tidak terjamin dengan sempurna. Hal ini dikarenakan muncul sendi plastis kolom selain pada ujung kolom lantai paling bawah dan ujung kolom lantai paling atas. Sendi plastis itu muncul karena kolom tidak mampu menahan gaya *axial* tarik akibat beban gempa. Namun, pada kondisi akhir dari gempa, kolom kembali dianalisis kembali dan menunjukkan bahwa kolom mengalami tekan dan masih aman dalam menerima gaya yang terjadi. Dari hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa konsep *strong column weak beam* masih dapat terjaga dan tidak ada kecenderungan *soft-story* baik pada wilayah Surabaya dan Jayapura.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian terhadap sistem rangka beton bertulang pemikul momen dengan bentang seragam yang direncanakan menggunakan metode DDBD pada tiga level desain yang berbeda, dapat disimpulkan bahwa:

Desain *level 2 – Repairable Damage* memberikan hasil desain yang paling realistis diukur dari kriteria efisiensi bahan dan tingkat kerusakan yang diterima. Bangunan memenuhi kriteria *drift* dan *damage index* balok pada semua level gempa. Namun, ada beberapa kolom yang mengalami pelelehan pada lokasi yang tidak seharusnya sehingga mekanisme keruntuhan yang diharapkan tidak dapat tercapai sepenuhnya. Meskipun demikian kondisi *strong column weak beam* tetap terjamin pada seluruh bangunan.

6. DAFTAR REFERENSI

- FEMA 356. (2000). *NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings*. D.C.: Federal Emergency Management Agency, Washington.
- Intan, R.P. Dan Valentino, A. (2016). *Evaluasi Kinerja Direct Displacement Based Design pada Bangunan Beraturan untuk Beberapa Level Gempa*. Tugas Akhir No. 1101 2067/SIP/2015 Jurusan Teknik Sipil. Universitas Kristen Petra. Surabaya.
- Montejo, L.A. (2007). *CUMBIA*. North Carolina: Department of Civil, Construction, and Environmental Engineering, North Carolina State University
- Priestley, M.J.N, Calvi, G.M dan Kowalsky, M.J. (2007). *Displacement-Based Seismic Design of Structure*. Pavia: IUSS Press.
- Sullivan, T.J., Priestley, M.J.N dan Calvi, G.M., (2012). *A Model Code for Displacement-Based Seismic Design of Structure*. Pavia: IUSS Press.