

EVALUASI KINERJA METODE *DIRECT DISPLACEMENT BASED DESIGN* DAN *FORCE BASED DESIGN* PADA BANGUNAN *VERTICAL SETBACK* 6 LANTAI

Stefany Marsilea Glorie¹, Victor Luis², Ima Muljati³, Pamuda Pudjisuryadi⁴

ABSTRAK : Metode *Force Based Design* (FBD) yang biasa digunakan untuk mendesain bangunan tahan gempa ternyata disadari memiliki beberapa kelemahan fundamental. Sebuah metode baru bernama *Direct Displacement Based Design* (DDBD) dirancang dengan langkah – langkah yang lebih efektif untuk menjawab kelemahan FBD. Penelitian ini dilakukan untuk menggunakan metode DDBD dan FBD dalam mendesain bangunan *vertical setback* sampai memverifikasi hasil kinerjanya. Bangunan 6 lantai yang diuji ini diletakkan pada wilayah 2 dan 6 peta gempa Indonesia. Hasil kinerja kedua metode dianalisis dengan metode *Time History Non Linear*. Kedua metode ini memiliki penyimpangan hasil pada daerah *setback* bangunan. Tetapi, evaluasi penelitian menyatakan bahwa kinerja metode DDBD lebih mendekati performa yang ditargetkan daripada metode FBD.

KATA KUNCI: DDBD, FBD, *vertical setback*

1. PENDAHULUAN

Gempa bumi merupakan bencana alam yang tidak dapat diprediksi dan seringkali membuat manusia putus asa. Banyak kerugian yang terjadi akibat gempa bumi, seperti hilangnya nyawa manusia dan kerusakan – kerusakan bangunan. Sebagai tindakan untuk meminimalisasi kerugian tersebut, manusia membutuhkan prosedur desain bangunan yang baik. Banyak prosedur desain bangunan yang sudah diujicobakan dan direalisasikan di dunia saat ini. Salah satu prosedur itu dikenal dengan nama *Force Based Design* (yang selanjutnya disebut FBD). Metode FBD lebih mengarah pada bagaimana menentukan kekuatan yang diperlukan (kuat perlu) bangunan berdasarkan beban gempa yang terjadi.

Namun, menurut M.J.N. Priestley (2007), salah satu peneliti yang mempertanyakan filosofi dasar FBD, beliau menemukan kelemahan – kelemahan yang bersifat fundamental dari metode tersebut. Beranjak dari hal itu, maka muncullah sebuah metode baru bernama *Direct Displacement Based Design* (yang selanjutnya disebut DDBD) untuk mengatasi kelemahan metode FBD. Metode DDBD ini menjadi *displacement* sebagai acuan menentukan kekuatan yang diperlukan bangunan terhadap beban gempa rencana.

Pada penelitian kali ini akan dibahas mengenai evaluasi kinerja metode DDBD dengan FBD pada bangunan *vertical setback* 6 lantai. Di mana bangunan dengan ketidakberaturan vertikal sendiri menjadi tantangan dalam proses mendesainnya.

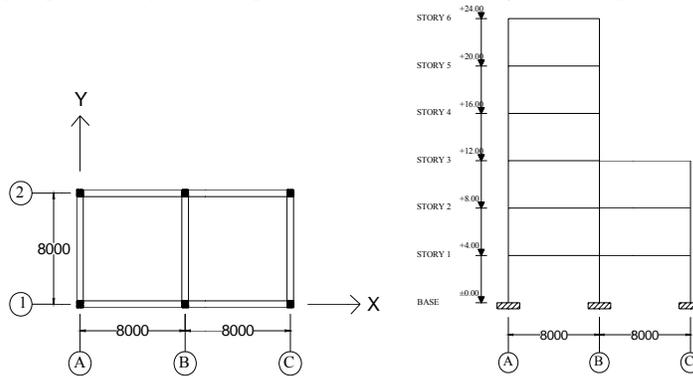
¹Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra Surabaya, stefanyng@ymail.com.

²Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra Surabaya, vincentius.victor.007@gmail.com.

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

⁴Dosen Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra Surabaya, pamuda@petra.ac.id.

Denah bangunan yang diteliti, yaitu bangunan *vertical setback* 6 lantai dapat dilihat pada **Gambar 1**.

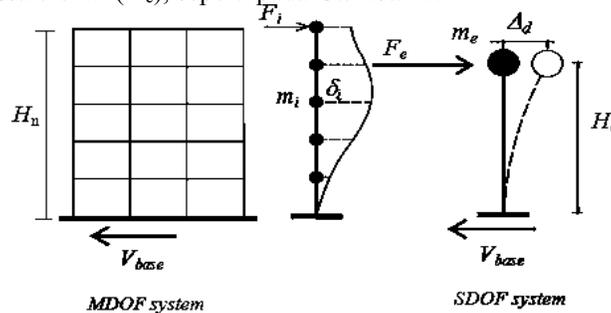


Gambar 1. Denah Struktur dan Elevasi Bangunan 6 Lantai Vertical Setback

2. PROSEDURDESAINDDBD

Langkah 1 : Menentukan *displacement target* (Δ_c) yang ditentukan dari *drift limit* dari peraturan atau *strain limit* dari material secara SDOF. Kemudian, setelah itu *displacement target* maksimum per lantai yang digunakan sebagai representasi dari SDOF untuk analisis MDOF.

Langkah 2: Mendefinisikan *target displacement shape* (Persamaan (1)) dan mereduksi struktur MDOF menjadi struktur SDOF dengan *equivalent design displacement* (Δ_d) pada ketinggian efektif ekuivalen (H_e) dan massa efektif (m_e), seperti pada **Gambar 2**.



Gambar 2. Permodelan SDOF dari Bangunan Bertingkat (Massena et.al, 2002)

Target desain *displacement* setiap lantai Δ_i didapatkan dengan menggunakan *shape vector* dari persamaan 2, berdasarkan skala dari *critical story displacement* Δ_c dan *mode shape at the critical story level* δ_c .

Target *desain displacement* dari setiap lantai didapatkan dari :

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

$$\text{untuk } n \leq 4 : \quad \text{---}; \quad \text{untuk } n \geq 4 : \quad \text{---} \quad \text{---} \quad \text{---} \quad (2)$$

dimana H_i tinggi tiap lantai, H_n tinggi total bangunan.

Equivalent desain displacement didapatkan dari :

dimana m_i massa pada lantai ke-i.

The mass of substitute structure m_e dan tinggi efektif H_e diberikan dengan persamaan:

$$m_e = \left(\sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i) / \Delta_d \right) \quad (4)$$

$$H_e = \left(\sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i H_i) / \sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i) \right) \quad (5)$$

Langkah 3: Memperhitungkan pengaruh *higher mode effect*. Pengaruhnya sangat ditentukan oleh tinggi bangunan dan dapat dilihat pada persamaan:

$$\Delta_{i,\omega} = \omega_\theta \cdot \Delta_i \quad (6)$$

dimana:

$$\omega_\theta = 1,15 - 0,0034H_n \leq 1,0 \quad (H_n \text{ dalam } m) \quad (7)$$

jika ω_θ lebih besar nilainya dari 1, maka Persamaan (6) yang digunakan dalam menentukan *equivalent design displacement* (Persamaan (3)), m_e (Persamaan (4)), dan H_e (Persamaan (5)).

Langkah 4: Mengestimasikan level dari *equivalent viscous damping* ξ_{eq} . Untuk mendapatkan *equivalent viscous damping* ξ_{eq} harus diketahui terlebih dahulu *displacement ductility* μ dari struktur.

$$\mu = \frac{\Delta_d}{\Delta_y} \quad (8)$$

Yield displacement Δ_y didapatkan dari :

$$\Delta_y = \frac{2M_1\theta_{y1} + M_2\theta_{y2}}{2M_1 + M_2} \cdot H_e \quad (9)$$

$$\theta_{y1} = 0.5\varepsilon_y \frac{L_{b1}}{H_{b1}} \quad (10)$$

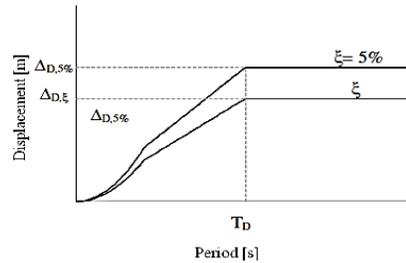
$$\theta_{y2} = 0.5\varepsilon_y \frac{L_{b2}}{H_{b2}} \quad (11)$$

Dimana M_1 dan M_2 adalah momen dari bentang luar dan dalam, θ_y rotasi dari balok, ε_y strain dari tulangan baja, L_b dan H_b adalah panjang dan tinggi balok.

Equivalent viscous damping ξ_{eq} didapatkan dari :

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

Langkah 5: *Effective period* (T_e) bisa didapatkan dari *equivalent design displacement* (Δ_d) dari langkah 2 dan *equivalent viscous damping* (ξ_{eq}) dari langkah 4.



Gambar 3. *Design Displacement Spectrum* (Sullivan & Calvi (2009))

Dari **Gambar 3**, maka *effective period* T_e didapatkan dari :

$$R_\xi = \left(\frac{0,07}{0,02 + \xi} \right)^{0,5} \quad (13)$$

$$T_e = \frac{\Delta_{d,5\%}}{\Delta_{d,\xi}} T_D \quad (14)$$

dimana T_D adalah *corner period* yang besarnya diambil sebesar 4 detik, $\Delta_{d,\xi}$ *displacement demand* untuk level dari *equivalent viscous damping* ξ_{eq} .

Langkah 6: Menentukan kekakuan efektif K_e dari struktur SDOF dan *design base shear* V_{base} .

Effective stiffness K_e didapatkan dari :

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

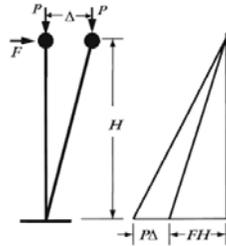
Design base shear V_{base} didapatkan dari :

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

Langkah 7: Mendistribusikan *design base shear* secara vertikal dan horizontal ke elemen-elemen penahan beban lateral.

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

Langkah 8: Mengecek pengaruh P- Δ pada struktur SDOF, lihat **Gambar 4**. Pengaruh P- Δ bisa diabaikan kalau yang terjadi sangat kecil. Besar kecilnya pengaruh P- Δ dilihat dari *stability index*.



Gambar 4. Pengaruh P- Δ pada SDOF (Priestley, et al (2007))

$$\theta_\Delta = \frac{P \cdot \Delta_d}{M_{base}} \quad (18)$$

dimana:

$$M_{base} = OTM = \sum_{j=1}^n F_j (H_j - H_1) \quad (19)$$

Jika $\theta_\Delta \leq 0,1$ maka Persamaan (16) boleh dipakai karena pengaruh P- Δ bisa diabaikan. Jika $\theta_\Delta > 0,1$ maka Persamaan (16) digantikan dengan persamaan:

$$V_{base} = K_e \Delta_d + \frac{C \cdot P \cdot \Delta_d}{H_e} \quad (20)$$

dimana C konstanta, untuk struktur beton bertulang bernilai 0,5.

3. METODOLOGI PENELITIAN

Berikut ini merupakan tahapan-tahapan penelitian :

1. Dilakukan desain gempa dengan metode DDBD dan FBD. metode DDBD dihitung secara manual dengan menggunakan program *Microsoft Excel*. Struktur dihitung secara tiga dimensi kemudian dikonversikan menjadi dua dimensi, yakni analisis dilakukan pada setiap portal arah x dan arah y. Analisis lebih lanjut dilakukan dengan cara-cara yang telah

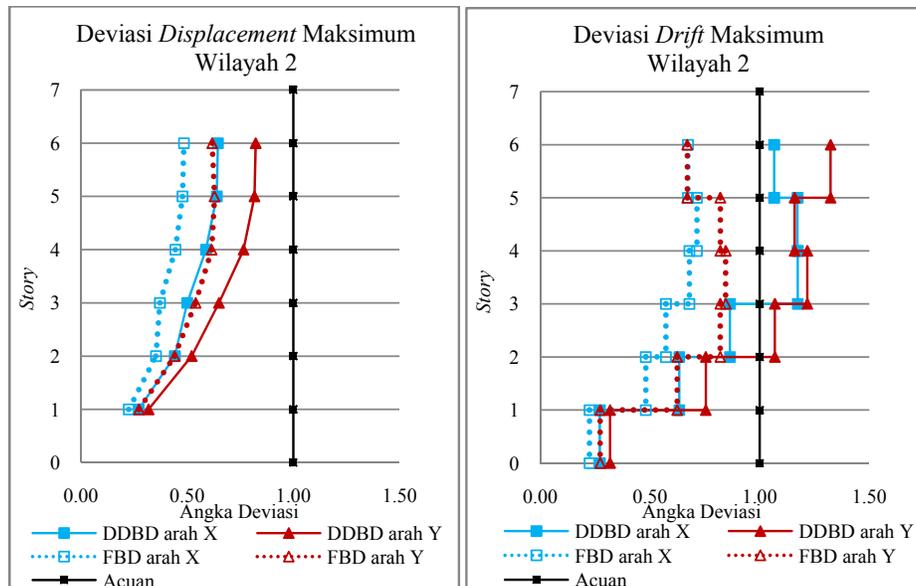
- dijelaskan pada bagian 2. Pada metode FBD, analisis awal dilakukan dengan permodelan di ETABS V.9.6.0 (CSI, 2005). Setelah permodelan selesai, program ETABS V.9.6.0 (CSI, 2005) di-run dan hasilnya diolah lebih lanjut dengan bantuan program *Microsoft Excel*. Desain dilakukan dengan *Response Spectrum*. Semua beban gravitasi untuk kedua metode adalah sama. Beban gempa mengikuti ketentuan prosedur masing-masing desain.
- Untuk prosedur DDBD dilakukan desain kapasitas sesuai dengan rekomendasi dari Priestley *et.al* (2007), untuk balok gaya dalam yang terjadi diambil yang terbesar antara gaya gempa dan gravitasi. Sedangkan untuk kolom gaya dalam didapatkan dari balok yang diperbesar dengan faktor omega sesuai dengan syarat-syarat yang sesuai dengan rekomendasi Priestley *et.al* (2007). Untuk prosedur FBD dilakukan pemodelan struktur, bangunan dianalisis secara statis dan dihasilkan gaya-gaya dalam berdasarkan 18 kombinasi pembebanan. Tulangan longitudinal balok dan kolom plastis didesain terhadap momen *ultimate*. Tulangan transversal seluruh komponen struktur didesain dengan momen *probable* akibat tulangan terpasang. Desain tulangan tersebut dicek rasio tulangannya sesuai SNI 03-2847-2002.
 - Evaluasi hasil kinerja terhadap struktur berdasarkan analisis dinamis *Time History Non Linear* dengan menggunakan program SeismoStruct V.6 (SeismoSoft, 2007) berupa *displacement*, *drift ratio*, lokasi sendi plastis, dan pola keruntuhan yang terjadi. Hubungan *moment-curvature* untuk balok dan kolom ditentukan dengan program CUMBIA (Montejo, 2007). *Output hinge properties* dari CUMBIA (Montejo, 2007) merupakan *input* untuk analisis *time history nonlinear* dengan program SeismoStruct V.6 (SeismoSoft, 2007).

4. HASIL PENELITIAN DAN ANALISIS

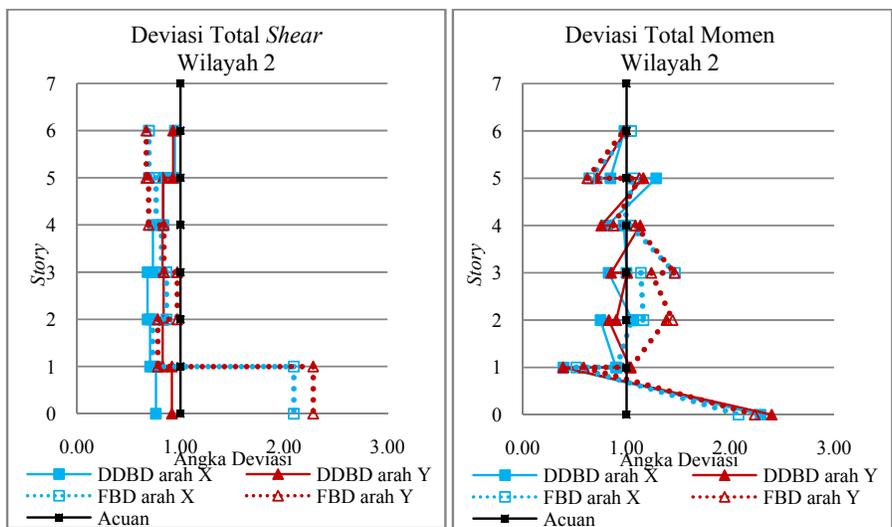
Hasil penelitian berupa evaluasi kinerja yang memperlihatkan perbandingan hasil yang diperoleh antara DDBD dan FBD meninjau dari angka deviasi untuk parameter *displacement*, *drift ratio*, *shear* kolom, momen kolom.

Angka Deviasi

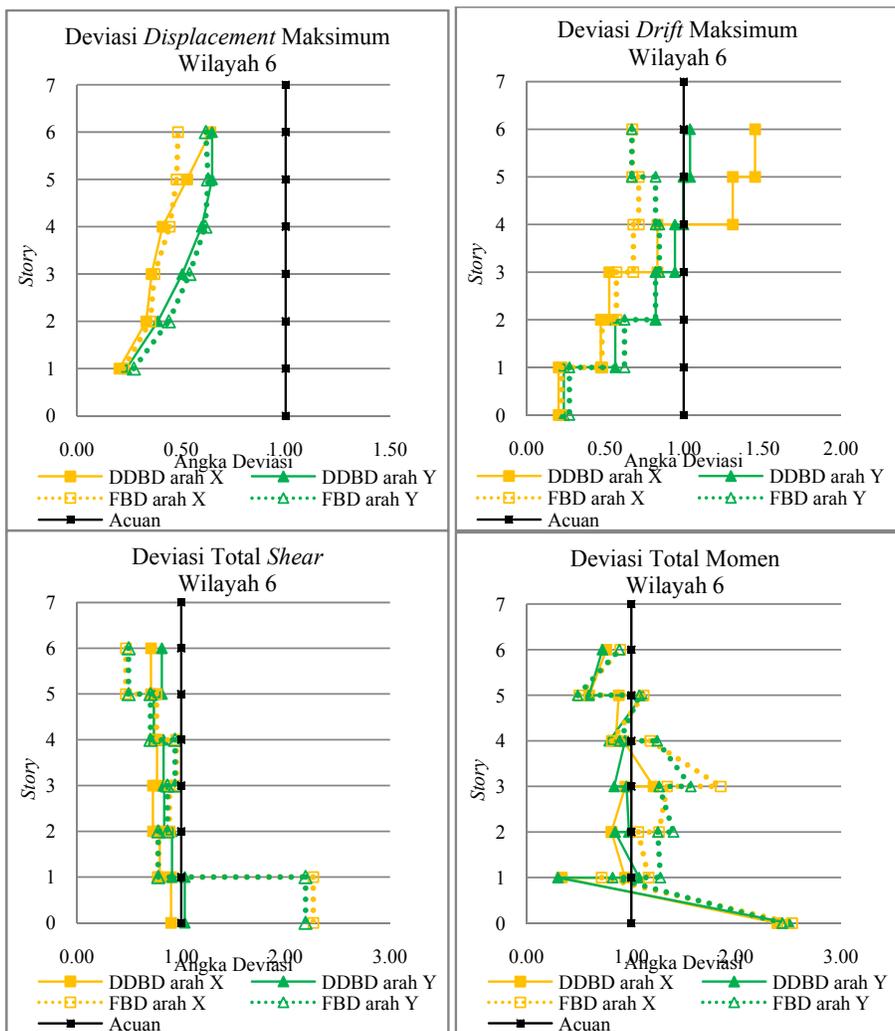
Gambar 5 dan 6 memperlihatkan angka deviasi pada Wilayah 2 dan 6 yaitu berupa perbandingan antara hasil analisis *Time History Non Linear* dibagi dengan angka yang ditargetkan. Angka deviasi yang semakin mendekati 1 menunjukkan semakin baik pula kinerja metode tersebut.



Gambar 5. Grafik Angka Deviasi Pada Wilayah 2



Gambar 5. (lanjutan)



Gambar 6. Grafik Angka Deviasi Pada Wilayah 6

Tabel 1 memperlihatkan hasil matriks dari evaluasi terhadap angka deviasi dari kedua wilayah yang diteliti. Kode D sebagai *displacement*, Dr sebagai *drift ratio*, S sebagai total *shear*, M sebagai total momen dari bangunan.

Tabel 1. Matriks Evaluasi Angka Deviasi Kinerja Metode DDBD dan FBD

Angka Deviasi	Wilayah 2								Wilayah 6							
	Arah X				Arah Y				Arah X				Arah Y			
	D	Dr	S	M	D	Dr	S	M	D	Dr	S	M	D	Dr	S	M
DDBD	●	●	●	●	●	●	●	●			●	●	●	●	●	●
FBD									●	●						

Evaluasi Kinerja

Tabel 2 menunjukkan angka *Damage Index* dari hasil analisis *Time History Non-Linear* yang kinerjanya diukur berdasarkan standar ACMC.

Tabel 2. Angka Damage Index

Struktur Bangunan	Performance Level				
	<i>First Yield</i>	<i>Serviceability</i>	<i>Damage Control</i>	<i>Safety</i>	<i>Unacceptable</i>
		<i>Limit State</i>	<i>Limit State</i>	<i>Limit State</i>	<i>Limit State</i>
	TH	TH	TH	TH	TH
DDBD Wilayah 2	●				
DDBD Wilayah 6	●				
FBD Wilayah 2		●			
FBD Wilayah 6		●			
<i>Damage Index</i> Maksimum	< 0,1	0,1 - 0,25	0,25 - 0,4	0,4 - 1	> 1

Keterangan : ● = angka *Damage Index* berada pada kisaran nilai tersebut

Angka Daktilitas

Tabel 3 memperlihatkan angka daktilitas yang terjadi (μ terjadi) dari analisis *pushover* dibandingkan dengan daktilitas rencana (μ rencana) untuk setiap metode.

Tabel 3. Daktilitas Struktur dari Pushover analisis

Metode	Wilayah Gempa	Δ_d (m)	Δ_y (m)	Δ_u (m)	Δ_y (m)	μ Terjadi	μ Rencana
DDBD	Wil. 2 arah x	0,252	0,185	0,242	0,15	1,61	1,36
	Wil. 2 arah y	0,252	0,185	0,309	0,19	1,63	1,36
	Wil. 6 arah x	0,252	0,144	0,241	0,138	1,75	1,75
	Wil. 6 arah y	0,252	0,144	0,243	0,158	1,54	1,75
FBD	Wil. 2 arah x	-	-	0,221	0,09	2,46	4
	Wil. 2 arah y	-	-	0,282	0,09	3,13	4
	Wil. 6 arah x	-	-	0,202	0,075	2,69	4
	Wil. 6 arah y	-	-	0,237	0,08	2,96	4

5. KESIMPULAN

Berdasarkan evaluasi kinerja struktur yang dihasilkan dari proses analisis *Time History Non-linear* dan *Pushover*, performa dari bangunan *vertical setback* 6 lantai yang direncanakan untuk metode DDBD dan FBD dapat disimpulkan:

1. Dalam proses mendesain dengan prinsip *strong column weak beam*, mekanisme *beam side sway* terjadi pada kedua metode yang digunakan.
2. Kedua metode tersebut menghasilkan kinerja struktur yang cukup baik, namun metode DDBD menghasilkan hasil yang lebih mendekati target desain. Hal ini ditunjukkan dalam hasil analisis *Time History Non-Linear* pada *displacement*, *shear kolom*, dan momen kolom. Dan juga hasil analisis *Pushover* untuk angka daktilitasnya.
3. *Drift* yang dihasilkan dari bangunan dengan metode DDBD melebihi target desain yang direncanakan, khususnya ada perbesaran *drift* di daerah *setback*. Namun, *drift* tersebut masih dalam batas toleransi 2%, batas *safety limit* yang direncanakan.

6. DAFTAR REFERENSI

- ACMC 2001. (2001). *Asian Concrete Model Code Level 1 & 2 Documents*. Tokyo. Author.
- Computer and Structures, Inc. (2005). *ETABS v9.6, Extended Three Dimensional Analysis of Building System*. Berkeley, California, USA. Author.
- Massena, B., Bento, R., Degee, H. (2002). *Assessment of Direct Displacement-Based Seismic Design of Reinforced Concrete Frames*. 15 WCEE USBOA.
- Montejo, L. A. (2007). *CUMBIA*. Department of Civil, Construction, and Environmental Engineering. North Carolina State University, USA. North Carolina.
- Priestley, M.J.N, Calvi, G.M dan Kowalsky, M.J. (2007). *Displacement-Based Seismic Design of Structure*. IUSS Press. Pavia.
- SeismoSoft, *SeismoStruct - A Computer Program for Static and Dynamic Nonlinear Analysis of Framed Structures*, available from URL: <http://www.seismosoft.com>, 2007.
- SNI03-1726-2002: *Standar Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Rumah dan Gedung*. (2002). Badan Standarisasi Nasional. Jakarta.
- SNI 03-2847-2002: *Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung*. (2002). Badan Standarisasi Nasional. Jakarta.
- Sullivan, T.J., Calvi, G.M., (2009). *A Model Code for Displacement-Based Seismic Design of Structure*. IUSS Press. Pavia.