

EVALUASI KINERJA *DIRECT DISPLACEMENT-BASED DESIGN* DAN *FORCE BASED DESIGN* BANGUNAN *IRREGULAR PLAN* 6-LANTAI

Charly Wijaya¹, Stephen Wibiatma Wijaya², Ima Muljati³, dan Pamuda Pudjisuryadi⁴

ABSTRAK : Metode *Direct Displacement-Based Design* (DDBD) merupakan metode baru dalam perhitungan struktur bangunan terhadap gempa yang membutuhkan verifikasi secara global. Metode ini memiliki proses perhitungan yang lebih singkat dan sederhana jika dibandingkan dengan metode *Force Based Design* (FBD) yang telah banyak diaplikasikan saat ini. Penelitian kali ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja bangunan yang dihitung dengan masing-masing metode untuk melihat performanya terhadap target desain sehingga dapat diverifikasi keandalannya. Bangunan yang diteliti memiliki bentuk *irregular plan* setinggi 6-lantai yang berada pada wilayah gempa 2 dan 6 Peta Gempa Indonesia. Verifikasi terhadap kinerja bangunan didapatkan dari hasil analisis *dynamic nonlinear time history*. Hasil verifikasi dari penelitian ini menunjukkan bahwa kedua metode memberikan kinerja yang baik, namun bangunan yang didesain menggunakan metode DDBD lebih mendekati target desain yang telah ditentukan sebelumnya dibandingkan dengan yang menggunakan metode FBD. Selain itu, metode DDBD cocok untuk diterapkan pada konsep *Performance Based Design* yang memakai drift sebagai batasan desain.

KATA KUNCI : DDBD, FBD, *irregularity*

1. PENDAHULUAN

Dengan banyaknya gempa yang terjadi di daerah-daerah di beberapa negara, para ahli berusaha mengembangkan metode desain struktur bangunan terhadap gempa bumi untuk memenuhi kinerja struktur yang baik pada suatu level gempa tertentu. Secara umum, telah ditemukan bahwa struktur masih memiliki kekuatan tambahan meskipun beban yang terjadi telah menyebabkan struktur melampaui kondisi elastisnya. Penemuan ini kemudian melahirkan konsep daktilitas dan faktor reduksi gaya yang diterapkan dalam metode *Force Based Design* (FBD) untuk mendapatkan kekuatan yang dibutuhkan suatu struktur bangunan terhadap gempa. Hasil analisis akhir dari metode FBD nantinya akan dikontrol melalui *displacement* maksimum yang terjadi sesuai *code* yang berlaku. Namun, berdasarkan penelitian lebih lanjut, metode FBD tersebut ternyata memiliki kelemahan dimana adanya ketergantungan terhadap kekakuan awal untuk menentukan periode dan gaya geser sehingga seringkali diperlukan iterasi ulang, selain itu penentuan daktilitas dan faktor reduksi gaya yang sama untuk berbagai struktur ditemukan kurang tepat.

¹ Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra Surabaya, charlywen91@hotmail.com

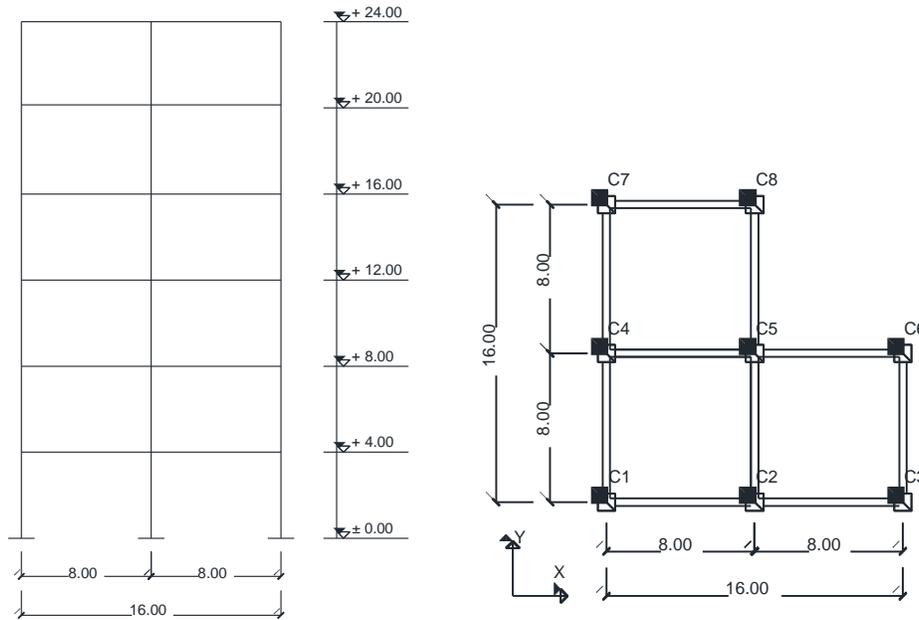
² Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra Surabaya, stephen.wibi@yahoo.com

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

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

Dengan melihat adanya kelemahan pada metode FBD, maka dikembangkanlah metode *Direct Displacement-Based Design* (DDBD) dimana dalam mendesain kekuatan yang diperlukan struktur bertujuan untuk mencapai target *displacement* dan kinerja batas sesuai yang direncanakan. Pada penelitian kali ini akan dievaluasi kinerja dari penggunaan metode DDBD dan FBD pada bangunan dengan *irregular plan* 6 lantai.

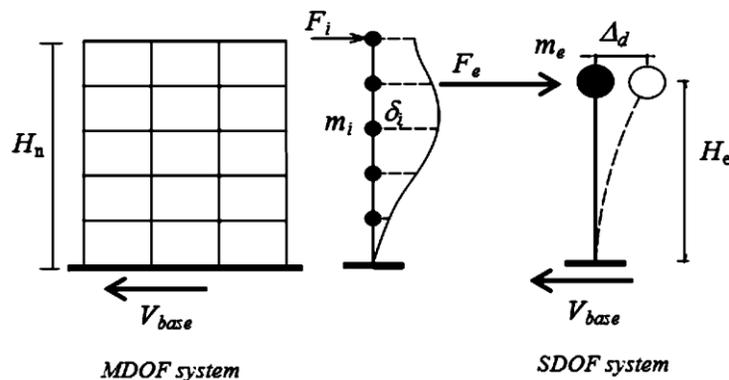
Denah bangunan yang akan ditinjau pada penelitian ini, dapat dilihat pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Elevasi Struktur dan Denah Struktur Bangunan yang Ditinjau

2. PROSEDUR DESAIN DDBD

Langkah 1 : Menentukan target *design displacement* (Persamaan 1) dan *drift* struktur MDOF di dasar bangunan yang sesuai dengan kriteria kinerja struktur (*strain* atau *drift limits*) sehingga didapatkan *design displacement* (Persamaan 3) dari struktur SDOF pengganti (**Gambar 2**).



Gambar 2. Permodelan SDOF dari Bangunan Bertingkat

Target *design displacement* setiap lantai didapatkan dari persamaan 1 berdasarkan *shape vector* yang terdapat pada persamaan 2, pada skala dari *critical story displacement* Δ_c (pada lantai 1) dan *mode shape* pada *critical storey level* δ_c (pada lantai 1 bangunan) :

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

$$\text{untuk } n \leq 4 : \delta_i = \frac{H_i}{H_n} ; \text{ untuk } n \geq 4 : \delta_i = \frac{4}{3} \cdot \left(\frac{H_i}{H_n} \right) \cdot \left(1 - \frac{H_i}{4H_n} \right) \quad (2)$$

dimana n adalah jumlah lantai bangunan, H_i adalah elevasi lantai ke- i , dan H_n tinggi total bangunan.

Equivalent design displacement didapatkan dari :

$$\Delta_d = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i^2)}{\sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i)} \quad (3)$$

dimana m_i massa pada lantai ke- i .

Massa struktur pengganti m_e dan tinggi efektif H_e pada persamaan:

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

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

Langkah 2 : Mengontrol *target design displacement* Δ_i setiap lantai terhadap *higher mode effect*. Kontrol yang dilakukan adalah memodifikasi nilai *target design displacement* Δ_i dengan nilai amplifikasi ω_θ dimana memiliki ketentuan seperti pada Persamaan 7.

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

$$\omega_\theta = 1,15 - 0,0034H_n \leq 1,0 \quad (7)$$

dimana H_n adalah total tinggi bangunan dalam satuan meter.

Langkah 3 : Memperkirakan level *equivalent viscous damping* ξ_{eq} , dimana *displacement ductility* μ dari struktur harus diketahui terlebih dahulu sesuai Persamaan 8.

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

Yield displacement Δ_y didapatkan dari :

$$\Delta_y = \theta_y \cdot H_e \quad (9)$$

$$\theta_y = 0,5 \varepsilon_y \frac{L_b}{H_b} \quad (10)$$

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

Equivalent viscous damping ξ_{eq} didapatkan dari :

$$\xi_{eq} = 0,05 + 0,565 \cdot \left(\frac{\mu-1}{\mu\pi} \right) \quad (11)$$

Langkah 4 : Menentukan periode efektif T_e dari struktur SDOF pada saat respons *peak displacement* dengan memakai *design displacement* pada langkah 1 dan respons spectrum *design displacement* sesuai dengan level *damping* pada langkah 3, ξ_{eq} .

Berdasarkan *design displacement spectrum* maka T_e didapatkan dari :

$$R_\xi = \left(\frac{0,07}{0,02 + \xi} \right)^{0,5} \quad (12)$$

$$T_e = \frac{\Delta_d}{\Delta_\xi} T_d \quad (13)$$

dimana T_d adalah *corner period*, Δ_ξ *displacement demand* untuk level dari *equivalent viscous damping* ξ_{eq} .

Langkah 5 : Menghitung kekakuan efektif k_e dari struktur SDOF dan *design base shear* V_{base} .

Kekakuan efektif K_e didapatkan dari :

$$k_e = \frac{4\pi^2 m_e}{T_e^2} \quad (14)$$

Design base shear V_{base} didapatkan dari :

$$V_{base} = k_e \Delta_d \quad (15)$$

Langkah 6 : Membagi *design base shear* secara vertikal dan horizontal ke elemen-elemen penahan beban lateral untuk lantai selain *top roof* dengan cara :

$$F_i = 0,9 \times V_{base} (m_i \Delta_i / \sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i)) \quad (16)$$

Sedangkan untuk lantai *top roof* didapatkan dengan cara sebagai berikut :

$$F_i = 0,1 \times V_{base} + 0,9 \times V_{base} (m_i \Delta_i / \sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i)) \quad (17)$$

Langkah 7 : Mengontrol struktur terhadap P- Δ *effect* melalui *stability index* θ_Δ . Kontrol yang dilakukan berdampak kepada *design base shear* V_{base} yang diterima oleh bangunan. *Stability index* θ_Δ didapatkan melalui :

$$\theta_\Delta = P \frac{\Delta_d}{M_d} \quad (18)$$

Jika *stability index* θ_Δ yang didapatkan bernilai $\leq 0,1$, maka nilai *design base shear* V_{base} . Jika *stability index* θ_Δ yang didapatkan bernilai > 1 , maka nilai *design base shear* V_{base} harus dihitung ulang melalui Persamaan 19.

$$V_{base} = k_e \Delta_d + C \times P \frac{\Delta_d}{H} \quad (19)$$

dimana C bernilai 0,5 untuk struktur beton, P adalah gaya berat bangunan, M_d adalah total OTM yang diterima struktur (Persamaan), dan H adalah tinggi total struktur.

3. METODOLOGI PENELITIAN

Tahapan-tahapan yang dilakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Pada desain dengan metode DDBD dilakukan langkah-langkah sesuai yang dijelaskan pada bagian 2, sedangkan untuk metode FBD dimulai dengan permodelan struktur pada program ETABS V9.6.0 (CSI, 2005) dengan diberikan beban mati dan beban hidup yang bekerja serta beban *response spectrum* untuk mendapatkan periode dan gaya dalam berdasarkan 18 kombinasi pembebanan.
2. Dalam prosedur DDBD, perhitungan desain kapasitas mengikuti rekomendasi Priestley *et.al* (2007), dimana pengambilan gaya-gaya dalam untuk balok diambil terbesar antara akibat beban gravitasi terfaktor dengan akibat beban gempa murni (Pinto,1997). Sedangkan momen desain kolom didapat dari momen desain balok yang dikalikan faktor-faktor pembesar sesuai persyaratan yang ada. Untuk prosedur FBD, perhitungan desain kapasitas dihitung sesuai persyaratan SNI 03-2847-2002 dimana pengambilan momen nominal balok dan kolom dasar tempat terbentuknya sendi plastis didapat dari momen *ultimate*, sedangkan pendesainan terhadap tulangan geser semua komponen diambil dari momen nominal terpasang untuk mencegah kegagalan geser.
3. Pengevaluasian kinerja struktur dilakukan dengan analisis dinamis *time history nonlinear* menggunakan program SeismoStruct V.6 dimana *input* beban gempa menggunakan gempa El-Centro 15 April 1940 N-S yang dimodifikasi sesuai dengan wilayah 2 dan 6 peta gempa Indonesia. Selain itu, *input* pada program SeismoStruct pada *link properties* berupa hubungan *momen-rotation* didapat dari program CUMBIA (Montejo dan Kowalsky, 2007). Evaluasi dilakukan terhadap hasil *displacement*, *drift ratio*, *shear force*, *moment* kolom, lokasi sendi plastis, nilai *damage index*, dan *system ductility*.

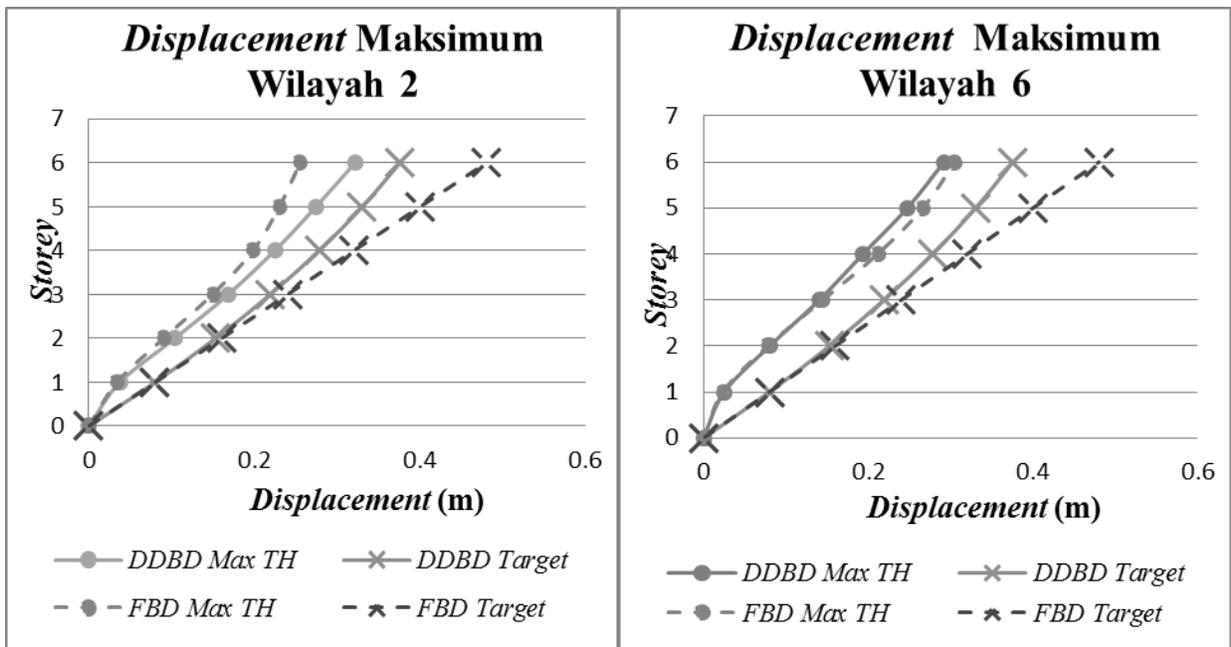
4. HASIL PENELITIAN DAN ANALISIS

Setelah dilakukannya analisis dinamis pada bangunan, maka didapatkan hasil untuk kedua metode DDBD dan FBD pada masing-masing wilayah gempa adalah sebagai berikut :

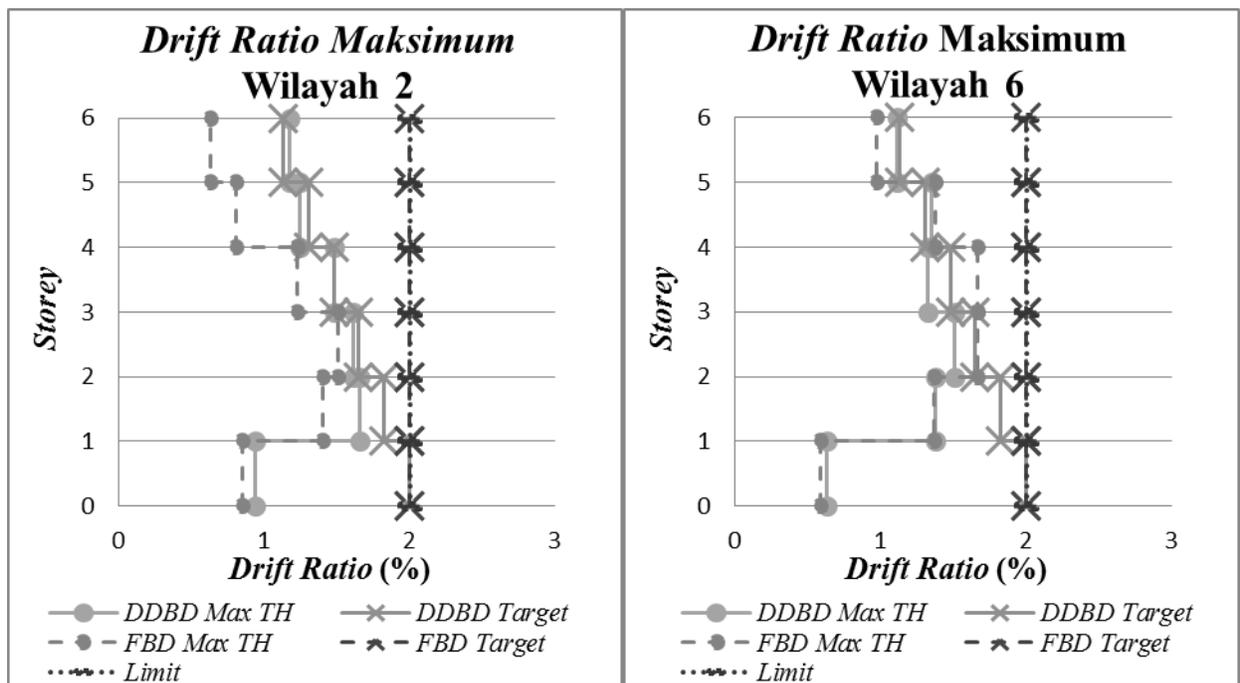
1. *Displacement* dan *drift ratio*

Dapat dilihat pada **Gambar 3** dan **Gambar 4** hasil dari *displacement* dan *drift ratio* pada wilayah gempa 2 dan 6 untuk masing-masing metode, serta perbandingannya terhadap *displacement target* dan *drift ratio target* masing-masing metode. *Displacement target* dari DDBD diperoleh dari perhitungan metode DDBD, sedangkan *displacement target* untuk FBD diambil berdasarkan *seismic level life safety* yang driftnya dibatasi sebesar 2%. *Drift ratio target* dari DDBD adalah *drift ratio* yang terjadi akibat *displacement* yang telah diperoleh dari perhitungan metode DDBD, sedangkan *drift ratio target* untuk FBD diambil berdasarkan *seismic level life safety* yang driftnya dibatasi sebesar 2%.

Dapat dilihat bahwa perbedaan antara *displacement* terjadi dengan *displacement target* serta *drift ratio* terjadi dengan *drift ratio target* untuk metode DDBD lebih kecil jika dibandingkan dengan metode FBD.



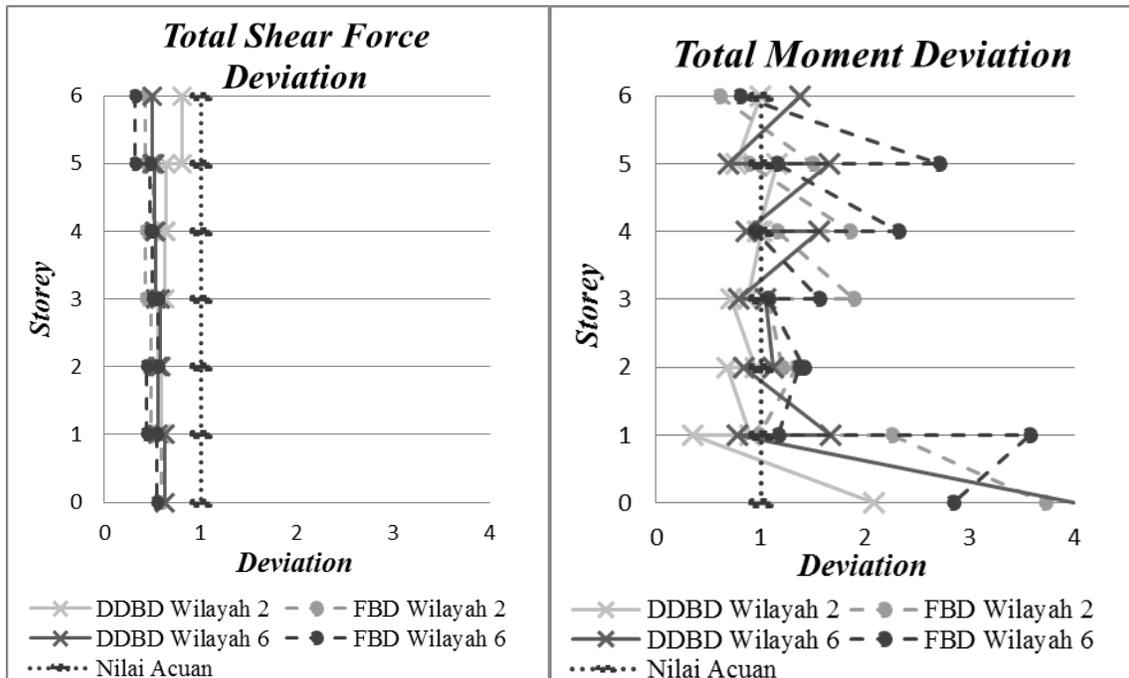
Gambar 3. Grafik Perbandingan Hasil Displacement



Gambar 4. Grafik Perbandingan Drift Ratio

2. Shear dan Moment

Dapat dilihat pada **Gambar 5** yang menunjukkan *total shear deviation* dan *total moment deviation* kolom untuk masing-masing metode pada wilayah gempa 2 dan 6. Nilai deviasi ini didapat dari hasil pembagian nilai hasil *time history* dengan nilai dari target desain dimana dapat dikatakan jika *deviation* mendekati angka 1 (nilai acuan) berarti hasil desain memiliki kinerja yang efektif. Dapat disimpulkan bahwa pada metode DDBD dan FBD, *deviation* yang terhitung sama-sama tidak jauh berbeda dari nilai acuan.



Gambar 5. Grafik *Total Shear Deviation* dan *Total Moment Force Deviation*

3. Damage Index

Pada **Tabel 1** ditampilkan kinerja bangunan yang dilihat dari *damage index* yang terjadi berdasarkan standard *Asian Concrete Model Code (ACMC, 2001)*.

Tabel 1. *Matrix Performance Bangunan Berdasarkan Damage Index*

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

Keterangan : ● = kisaran nilai *damage index* yang terjadi

4. System Ductility

Untuk mengetahui *system ductility* maka perlu dilakukan pengujian *pushover* pada bangunan dengan menggunakan program SeismoStruct V.6. untuk mendapatkan *yield displacement* yang terjadi dari metode DDBD dan FBD. Meskipun sebenarnya penggunaan *pushover* ini kurang tepat untuk bangunan dengan *irregular plan*, namun analisis ini hanya bertujuan untuk mendapatkan perkiraan hasil yang dapat dicapai bangunan. Nilai dari *displacement ultimate* diambil dari batasan *drift 2%* sesuai ACMC dan hasil analisis *time history* sebelumnya.

Dapat dilihat dari **Tabel 2** bahwa Δ_u hasil *time history* baik pada metode DDBD dan FBD, masih dibawah batasan nilai Δ_u 2%, sehingga nilai *system ductility* terjadi juga masih lebih kecil dari *system ductility* sesuai batasan 2%.

Tabel 2. System Ductility

Metode	Wilayah Gempa	Δ_u Design (m)	Δ_y Design (m)	μ Design	Δ_u TH (m)	Δ_u 2% (m)	Δ_y Pushover (m)	μ Terjadi	μ 2%
DDBD	Wil. 2	0,274	0,204	1,342	0,321	0,480	0,220	1,461	2,182
	Wil. 6	0,273	0,158	1,726	0,292	0,480	0,155	1,884	3,096
FBD	Wil. 2	-	-	4	0,255	0,480	0,170	1,501	2,823
	Wil. 6	-	-		0,305	0,480	0,123	2,480	3,902

5. KESIMPULAN

Dengan melihat hasil dari evaluasi kinerja struktur terhadap metode DDBD dan FBD diatas, maka dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Pada kedua metode menghasilkan mekanisme keruntuhan yang baik yaitu *beam side sway mechanism*.
2. Kedua metode sama-sama menghasilkan kinerja struktur bangunan yang baik. Tetapi, metode DDBD memberikan hasil kinerja yang lebih mendekati target *design* awal.

6. DAFTAR REFERENSI

- ACMC 2001. (2001). *Asian Concrete Model Code Level 1 & 2 Documents*. Tokyo: Author.
- Computer and Structures, Inc. (2005). *ETABS v9.6.0, Extended Three Dimensional Analysis of Building System*. Berkeley, California, USA: Author.
- Departemen Pekerjaan Umum. (2002). SNI-03-2847-2002. *Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung*. Badan Standarisasi Nasional. Jakarta.
- Montejo, L.A. and Kowalsky, M.J. (2007). *CUMBIA*. Department of Civil, Construction and Environmental Engineering. North Carolina State University, USA : North Carolina.
- Pinto, P.E. (1997). *Seismic Design of RC Structures for Controlled Inelastic Response*, CEB Bulletin No.236, Comite Euro-International du Beton, Lausanne, Switzerland.
- Priestley, M.J.N, Calvi, G.M and 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 Structure*, <<http://www.seissoft.com>> (2007)