

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

Larissa Stefanie Paramosa¹, Evelin Larisa Sandy², Ima Muljati³

ABSTRAK : Sesuai dengan konsep *Performance Based Design*, *Direct Displacement-Based Design* (DDBD) memberikan opsi bagi perencana untuk memilih level kinerja struktur yang dikehendaki. Penelitian ini mengeksplorasi ketiga opsi desain yang dapat dipilih dalam DDBD, yaitu Level 1-*No Damage*, Level 2-*Repairable Damage*, dan Level 3-*No Collapse* pada tiga level gempa yang berbeda sesuai DDBD *Model Code*. Bangunan perkantoran dari struktur beton bertulang dengan bentang tidak seragam diambil sebagai studi kasus. Struktur direncanakan sebagai sistem rangka pemikul momen pada daerah beresiko gempa rendah dan tinggi di Indonesia. Dari ketiga level desain yang dilakukan, ternyata desain Level 2 dipandang sebagai opsi terbaik ditinjau dari kriteria efisiensi dan level kerusakan yang masih dapat ditoleransi. Hasil desain tersebut diuji kinerjanya menggunakan analisis dinamis riwayat waktu nonlinier. Untuk parameter *drift*, bangunan menunjukkan kinerja yang memuaskan untuk semua level gempa. Namun pada level gempa kecil dan sedang, terjadi pelelehan kolom pada lokasi yang tidak semestinya sehingga *beam side sway mechanism* tidak terjadi dengan sempurna. Meskipun demikian, upaya *capacity design* mampu menjamin terjadinya kondisi *strong column weak beam*.

KATA KUNCI: *direct displacement-based design*, *performance based design*, sistem rangka pemikul momen, analisis dinamis riwayat waktu nonlinier.

1. PENDAHULUAN

Banyak penelitian telah dilakukan untuk meningkatkan pemahaman akan keefektifan dan keefisienan metode DDBD, yakni pada struktur bangunan reguler (Muljati et al., 2013), bangunan sederhana 12 lantai (Widjaja dan Weliem, 2013), bangunan *irregular plan* 6 lantai (Wijaya dan Wijaya, 2013), bangunan *vertical setback* 6 lantai (Luis dan Glorie, 2013), struktur dengan adanya dilatasi pada bangunan dengan ketidakberaturan-horizantal (Hendratha dan Adi, 2014) dan ketidakberaturan-vertikal (Juandinata dan Pranata, 2014), struktur dengan ketidakberaturan melintang terhadap bidang (Kusuma dan Tabrani, 2014). Peraturan yang digunakan dalam penelitian-penelitian tersebut adalah SNI 03-1726-2002. Metode DDBD juga telah diuji terhadap peraturan yang baru, yaitu SNI 1726-2012 (Asisi dan Willyanto, 2014). Dari semua penelitian yang telah dilakukan tersebut, metode DDBD memberikan hasil yang cukup baik. Semua penelitian yang telah dilakukan tersebut menggunakan level desain 2, yaitu dengan probabilitas terjadinya gempa 10% dalam 50 tahun (**Tabel 1**). Namun, spektrum respons desain yang digunakan tidak sesuai dengan persyaratan *Performance Based Design* versi DDBD *Model Code*. Sebagai contoh untuk wilayah Surabaya pada SNI 1726-2012 memiliki periode ulang gempa yang berada di antara periode ulang 100- dan 500-tahun yang kurang lebih setara dengan periode ulang gempa 130 tahun jika dibandingkan dengan persyaratan DDBD (**Gambar 1**).

¹ Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, larissaparamosa@yahoo.com.

² Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, evelin.larisa04@gmail.com.

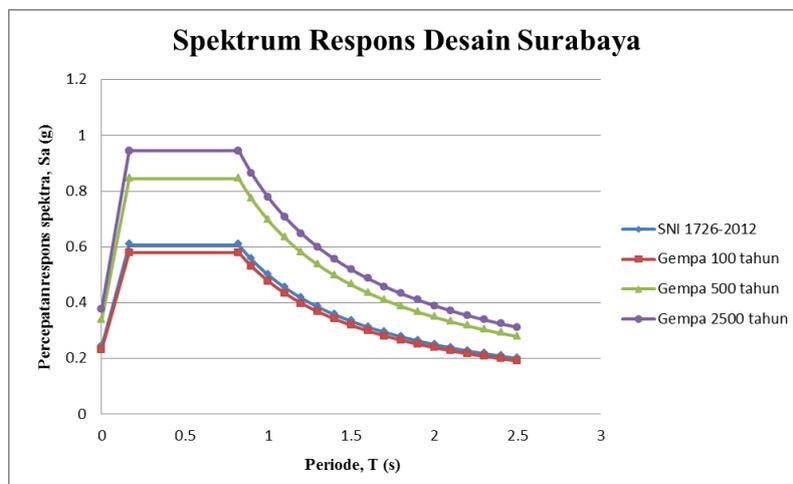
³ Dosen Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, imuljati@petra.ac.id.

Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk meluruskan kembali penelitian yang telah dilakukan sebelumnya dengan beban gempa yang sesuai dengan *Model Code* dan mengevaluasi kinerjanya terhadap 1 level desain yang paling realistis.

Tabel 1. Design Intensity (Probability of Exceedence) per Structural Category and Performance Level DDBD

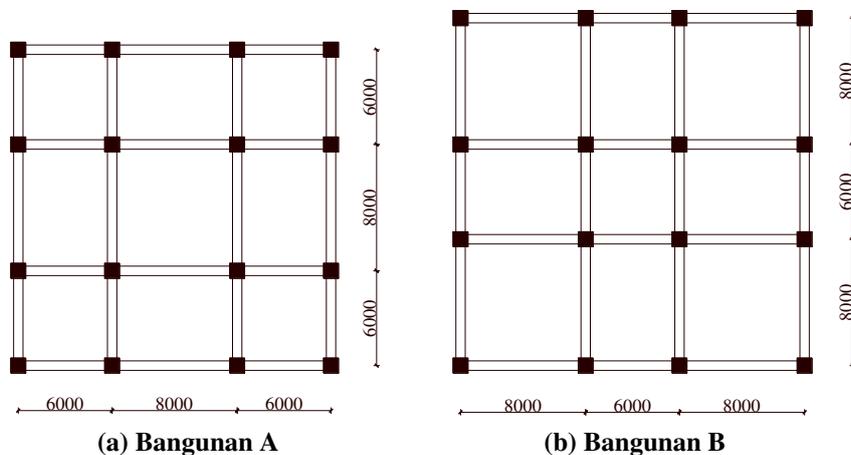
Importance Class	Earthquake Design Intensity		
	Level 1 <i>No Damage</i>	Level 2 <i>Repairable Damage</i>	Level 3 <i>No Collapse</i>
I	<i>Not Required</i>	50% in 50 years	10% in 50 years
II	50% in 50 years	10% in 50 years	2% in 50 years
III	20% in 50 years	4% in 50 years	1% in 50 years
IV	10% in 50 years	2% in 50 years	1% in 50 years
<i>Drift Limit</i>	1%	2.5%	<i>No limit - 4%</i>

Sumber: Sullivan, Priestley, dan Calvi, 2012, p. 1



Gambar 1. Beban Gempa sesuai Syarat DDBD dan SNI

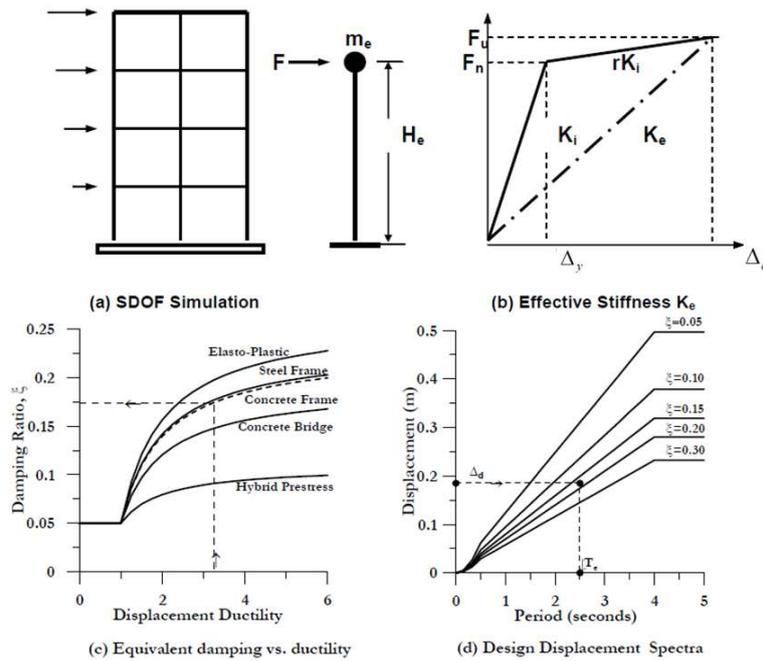
Denah bangunan yang diteliti 2 jenis dan dapat dilihat pada **Gambar 2**. Masing-masing denah memiliki dua jenis ketinggian, yakni 4- dan 8- lantai. Tinggi antar lantainya adalah 4 meter untuk semua bangunan. Masing-masing bangunan ditinjau terhadap 2 wilayah resiko gempa, yaitu rendah (Surabaya) dan tinggi (Jayapura). Beban gempa yang digunakan adalah El Centro 15 April 1940 N-S dan dimodifikasi sesuai *response spectrum* wilayah resiko Surabaya maupun Jayapura. Permodelan bangunan, modifikasi *response spectrum*, dan analisis dinamis riwayat waktu nonlinier menggunakan *software* ETABS 2015 v 15.1.0 (Computers and Structures, Inc, 2015).



Gambar 2. Denah Tipikal Bangunan yang Diteliti

2. LANDASAN TEORI

Metode *Direct Displacement Based Design* (DDBD) dari Priestley et.al (2007) memiliki konsep memodelkan suatu bangunan bertingkat yang kompleks (*Multi Degree of Freedom*) menjadi suatu sistem *Single Degree of Freedom* (SDOF) dengan tinggi efektif H_e dan massa efektif m_e (**Gambar 3(a)**). Hubungan gaya dan perpindahan (**Gambar 3(b)**) menunjukkan adanya kekakuan awal elastis (K_i) yang kemudian diikuti oleh kekakuan plastis (rK_i). Namun, dalam metode DDBD, kekakuan yang digunakan adalah kekakuan efektif (K_e). Kekakuan efektif tersebut bukan nilai yang nyata dan merupakan *secant stiffness* dari grafik kekakuan elastis dan plastis. **Gambar 3(c)** menunjukkan hubungan antara *displacement ductility* dan *damping ratio*. Perpindahan rencana (Δ_d) pada saat respons maksimum dan estimasi *damping* yang didapat dari macam-macam *displacement spectrum* (**Gambar 2.1(d)**) diperlukan untuk mendapat periode efektif (T_e).



Gambar 3. Konsep Dasar Metode DDBD (Priestley et al., 2007)

Langkah 1 : Memodelkan bangunan menjadi sistem yang lebih sederhana, yaitu SDOF. Kemudian menentukan target *displacement design* setiap lantai Δ_i didapatkan dari *shape vector* pada persamaan (2.1). Target *displacement design* tersebut berdasarkan pada perbandingan *critical storey displacement* Δ_c (pada lantai 1 bangunan) dan *inelastic mode shape* pada *critical storey level* δ_c (pada lantai dasar bangunan).

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

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

Target *displacement design* pada setiap lantai didapatkan dari:

$$\Delta_i = \delta_i \left(\frac{\Delta_c}{\delta_c} \right) \quad (2)$$

Sebelum digunakan, *desain displacement* setiap lantai harus dikalikan dengan nilai amplifikasi (ω_θ) jika persamaan (3) tidak terpenuhi. Hal ini sesuai dengan persamaan (4). Faktor ini digunakan untuk memperhitungkan *higher mode effect* yakni ketika bangunan sudah tidak lagi *first mode dominant*.

$$\omega_\theta = 1.15 - 0.0034H_n \leq 1.0 \quad (3)$$

$$\Delta_{i,\omega} = \omega_\theta \times \Delta_i \quad (4)$$

Equivalent design displacement didapatkan dari :

$$\Delta_d = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i^2)}{\sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i)} \quad (5)$$

dimana m_i massa pada lantai ke- i .

Massa struktur pengganti m_e dan tinggi efektif H_e dihitung menurut:

$$m_e = (\sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i) / \Delta_d) \quad (6)$$

$$H_e = (\sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i H_i) / \sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i)) \quad (7)$$

Langkah 2 : Mengestimasi *level equivalent viscous damping* ζ_{eq} . Untuk itu, besar nilai *displacement ductility* μ dari struktur harus diketahui terlebih dahulu.

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

Yield displacement Δ_y didapatkan dari :

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

$$\theta_y = 0.5 \varepsilon_y \frac{L_b}{H_b} \quad (10)$$

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

Equivalent viscous damping ζ_{eq} didapatkan dari :

$$\zeta_{eq} = 0.05 + 0.565 \left(\frac{\mu - 1}{\mu \pi} \right) \quad (11)$$

Langkah 3 : Menentukan periode efektif T_e dari struktur SDOF saat *peak displacement response* dengan menggunakan *design displacement* pada langkah 1 dan *response spectrum design displacement* sesuai dengan *level damping* yang didapatkan pada langkah 2.

Setelah *displacement spectrum* dengan *damping level 5%* selesai dibuat, dapat dibuat *displacement spectrum* dengan *damping level* ξ_{eq} dengan mengalikan *displacement spectrum 5%* dengan faktor R_ξ sesuai persamaan (12).

$$R_\xi = \left(\frac{0.07}{0.02 + \xi} \right)^{0.5} \quad (12)$$

Periode efektif didapatkan dari:

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

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

Langkah 4 : Menghitung besarnya kekakuan efektif K_e dari struktur SDOF dan *design base shear* V_{base} .

Kekakuan efektif K_e dihitung dengan menggunakan persamaan:

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

Design base shear V_{base} didapatkan dari :

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

Hasil *design base shear* harus ditambahkan dengan faktor *P-Δ effect* sesuai dengan persamaan (17) melalui *stability index* (θ_Δ) yang diperoleh dari persamaan (16).

$$\theta_\Delta = P \frac{\Delta_d}{M_d} \quad (16)$$

$$V_{base} = K_e \Delta_d + C \times P \frac{\Delta_d}{H} \quad (17)$$

dimana M_d adalah momen guling, P adalah gaya berat seluruh bangunan (kN), dan C adalah faktor kopel untuk bangunan beton (0.5).

Gaya geser dasar tersebut kemudian didistribusikan ke elemen-elemen penahan beban lateral. Gaya lateral tiap lantai tersebut kemudian digunakan untuk desain kapasitas balok dan kolom sesuai metode DDBD.

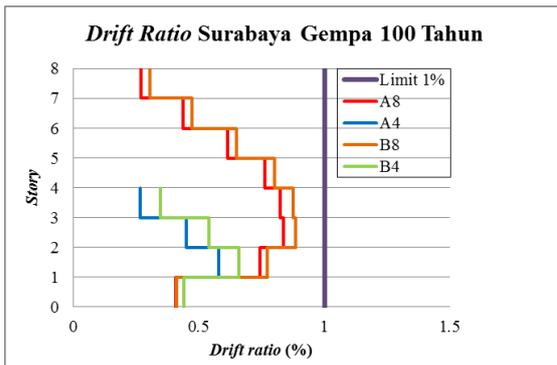
3. HASIL DAN ANALISIS

Berdasarkan hasil perhitungan dimensi dan tulangan yang dihasilkan (Paramosa dan Sandy, 2016), Level 2 dianggap paling realistis dalam perencanaan karena dimensi yang tidak terlalu besar dan

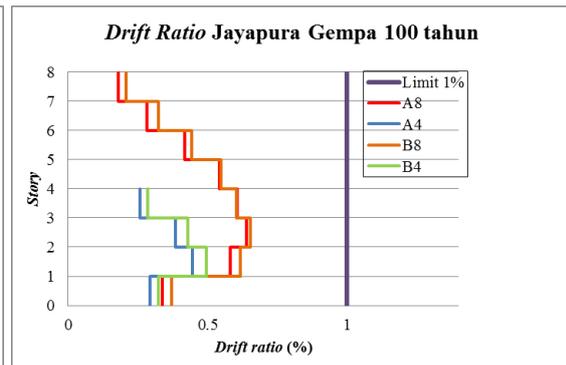
tulangan yang tidak terlalu banyak. Level 1 tidak dipilih karena dimensinya terlalu besar, sedangkan Level 3 tidak dipilih karena dikhawatirkan akan mengalami kerusakan yang lebih besar.

3.1. Drift Ratio

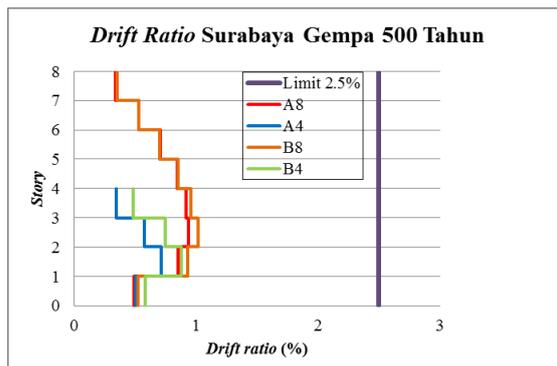
Nilai *drift ratio* tersebut kemudian ditampilkan dalam bentuk grafik, dikelompokkan berdasarkan periode ulang gempa dan wilayah gempa, serta dibandingkan dengan batasan *drift* yang ditentukan (**Gambar 5-10**). Gempa periode ulang 100 tahun mewakili beban gempa level desain 1, gempa periode ulang 500 tahun mewakili beban gempa level desain 2, dan gempa periode ulang 2500 tahun mewakili beban gempa level desain 3.



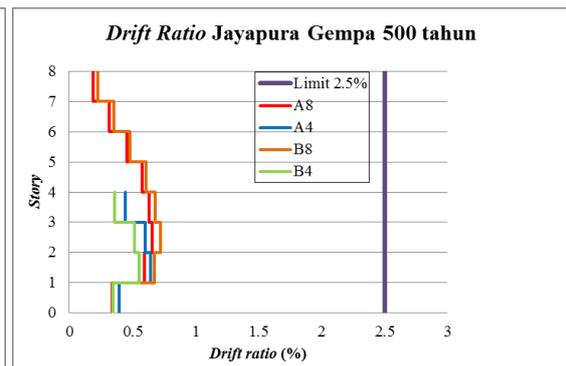
Gambar 5. Drift Ratio Surabaya 100 Tahun



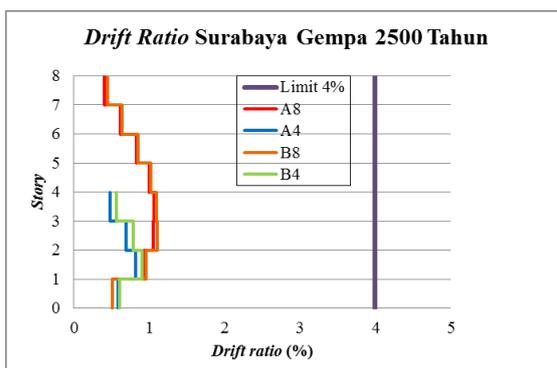
Gambar 6. Drift Ratio Jayapura 100 Tahun



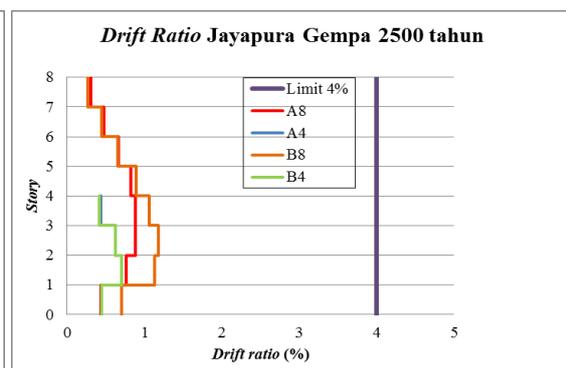
Gambar 7. Drift Ratio Surabaya 500 Tahun



Gambar 8. Drift Ratio Jayapura 500 Tahun



Gambar 9. Drift Ratio Surabaya 2500 Tahun



Gambar 10. Drift Ratio Jayapura 2500 Tahun

Dari data yang ditampilkan dalam grafik, dapat disimpulkan bahwa kinerja bangunan DDBD pada wilayah Surabaya dan Jayapura untuk semua beban gempa sudah baik. Hal tersebut terbukti dari lebih kecilnya *drift* yang terjadi bila dibandingkan dengan *drift limit*.

3.2. Damage Index

Pada umumnya, persyaratan *damage index* mengacu kepada persyaratan FEMA 356 yang terdiri dari kondisi *first yield*, *immediate occupancy*, *life safety*, dan *collapse prevention*. Namun, dalam penelitian ini persyaratan *damage index* yang digunakan mengacu kepada *Model Code DDBD*, dimana di dalamnya terdapat 4 kondisi, yakni *first yield* (FY), *no damage* (ND), *repairable damage* (RD), dan *no collapse* (NC). Hasil *damage index* balok dan kolom selengkapnya dapat dilihat pada **Tabel 3-4**.

Tabel 3. Damage Index Balok

Wilayah Resiko Gempa	Periode Ulang Gempa TH	<i>First Yield</i>	<i>No Damage</i>	<i>Repairable Damage</i>	<i>No Collapse</i>
Surabaya	100 tahun	A8	A4, B8, B4		
	500 tahun		A8, A4, B8, B4		
	2500 tahun		A8, A4, B8, B4		
Jayapura	100 tahun	A8, A4, B4	B8		
	500 tahun	A4, B4	A8, B8		
	2500 tahun	A4, B4	A8	B8	

■ = not acceptable

Tabel 4. Damage Index Kolom

Wilayah Resiko Gempa	Periode Ulang Gempa TH	<i>First Yield</i>	<i>No Damage</i>	<i>Repairable Damage</i>	<i>No Collapse</i>
Surabaya	100 tahun	A4, B8, B4			A8
	500 tahun	A4, B8, B4			A8
	2500 tahun	A4, B4			A8, B8
Jayapura	100 tahun	B8, B4			A8, A4
	500 tahun	B4			A8, A4, B8
	2500 tahun	B4			A8, A4, B8

■ = not acceptable

Dari data yang telah ditampilkan, bangunan yang berada dalam wilayah Surabaya memiliki kinerja yang baik pada baloknya. Kerusakan balok pada semua bangunan masuk dalam persyaratan dan bisa diterima. Untuk kolomnya, ada 2 bangunan yang tidak memenuhi persyaratan, yakni bangunan A8 yang diberikan beban gempa kecil dan sedang. Namun, kerusakan bangunan di Surabaya masih dapat dikatakan bagus karena hampir semua bangunan masuk dalam persyaratan. Untuk wilayah Jayapura, balok mengalami kerusakan yang masih masuk dalam persyaratan, sedangkan kerusakan kolom yang terjadi kebanyakan ada pada fase *no collapse*. Hal tersebut terjadi karena persyaratan DDBD yang begitu ketat. Batasan antara *no damage*, *repairable damage*, dan *no collapse* dalam metode DDBD sangat pendek dan dekat dengan titik *first yield* (titik B) bila dibandingkan dengan persyaratan FEMA 356. Bisa saja dalam syarat DDBD sudah masuk dalam tingkat *no collapse* tetapi dalam syarat FEMA 356 masih dalam batas *immediate occupancy* sehingga masih dalam batas aman.

3.3. Failure Mechanism

Failure mechanism yang diharapkan terjadi adalah *beam side sway mechanism*. Mekanisme ini mensyaratkan terjadinya kondisi *strong column weak beam*. Dari hasil pengujian, terdapat beberapa kolom yang leleh padahal tidak seharusnya leleh. Setelah dilakukan pemeriksaan, ternyata sendi plastis ini disebabkan karena banyak kolom yang mengalami tarik yang tidak terprediksi ketika proses desain dan ada juga sebagian kecil kolom yang kapasitasnya tidak mampu menahan gaya tekan yang terjadi. Meskipun begitu, sendi plastis yang terjadi kebanyakan masih dalam batas *first yield* dimana batasan tersebut masih mendekati batas elastis sehingga boleh dikatakan bahwa kolom masih dalam batas aman.

Pemeriksaan lebih lanjut dilakukan pada detik terakhir *time history*, yakni setelah gempa berakhir, apakah kolom mengalami tarik atau tidak. Hal ini merupakan salah satu faktor yang menentukan apakah elemen struktur masih memiliki kapasitas yang cukup atau tidak. Selama pada detik terakhir masih terjadi tekan pada kolom dan kapasitas kolom mampu menahan gaya tersebut, maka dapat dikatakan bahwa bangunan tersebut aman. Baik untuk wilayah Surabaya maupun Jayapura semua kolomnya dapat dikatakan aman.

Untuk konsep desain *strong column weak beam*, bangunan pada wilayah gempa Surabaya dan Jayapura sudah memenuhi konsep desain tersebut. Balok leleh hingga mencapai tingkatan yang lebih parah daripada kolom. Terdapat beberapa kolom yang berada dalam kondisi *no collapse* tetapi balok pada *joint* yang sama berada dalam kondisi *first yield*. Namun, hal ini tidak berarti kolom berada dalam kondisi yang lebih parah karena balok tetap mengalami rotasi yang lebih besar daripada kolom. Hanya saja batasan kolom lebih ketat jika dibandingkan dengan batasan balok. Meskipun seluruh bangunan memenuhi kondisi *strong column weak beam*, tidak seluruh bangunan memenuhi kondisi *beam side sway mechanism* karena ada kolom yang mengalami leleh di tempat yang tidak seharusnya.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian terhadap bangunan beraturan yang memiliki bentang tidak seragam yang didesain menggunakan DDBD pada tiga level desain yang berbeda, dapat disimpulkan bahwa:

1. Level 2 lebih realistis jika dibandingkan dengan level -1 dan -3 karena biaya yang dibutuhkan pada level 1 lebih mahal dan kerusakan bangunan dikhawatirkan lebih parah jika menggunakan level 3.
2. Untuk parameter *drift*, bangunan menunjukkan kinerja yang memuaskan untuk semua level gempa. Namun pada level gempa kecil dan sedang, terjadi pelelehan kolom pada lokasi yang tidak semestinya sehingga *beam side sway mechanism* tidak terjadi dengan sempurna. Meskipun demikian, upaya *capacity design* mampu menjamin terjadinya kondisi *strong column weak beam*.

5. DAFTAR REFERENSI

- Asisi, F. dan Willyanto, K. (2014). *Perbandingan Kinerja Bangunan yang Didesain Dengan Force-Based Design dan Direct Displacement-Based Design menggunakan SNI gempa 2012*. Skripsi, Universitas Kristen Petra, Surabaya.
- Computers and Structures, Inc. (2015). *ETABS 2015 – Integrated Building Design Software (Version 15.1.0)* [Computer Software], California.
- Hendratha, A. dan Adi, T. (2014). *Pengaruh Dilatasi pada Bangunan dengan Ketidakberaturan Sudut Dalam yang Didesain secara Direct Displacement Based*. Skripsi, Universitas Kristen Petra, Surabaya.
- Juandinata, R. dan Pranata, Y. (2014). *Pengaruh Dilatasi pada Bangunan dengan Ketidakberaturan Geometri Vertikal yang Didesain secara Direct Displacement Based*. Skripsi, Universitas Kristen Petra, Surabaya.
- Kusuma, A. dan Tabrani, F.H. (2014). *Direct Displacement Based Design pada Sistem Rangka dengan Ketidakberaturan Pergeseran Melintang terhadap Bidang*. Skripsi, Universitas Kristen Petra, Surabaya.
- Luis, V. dan Glorie, S.M. (2013). *Evaluasi Kinerja Metode Direct Displacement-Based Design Dan Force Based Design Pada Bangunan Vertical Setback 6 Lantai*. Skripsi, Universitas Kristen Petra, Surabaya.
- Muljati et.al. (2013). *Evaluasi Metode FBD dan DDBD pada SRPM di Wilayah 2 dan 6 Peta Gempa Indonesia*. Skripsi, Universitas Kristen Petra, Surabaya.
- Paramosa, L.S. dan Sandy, E.L. (2016). *Pemilihan Level Kinerja Struktur pada Bangunan Sistem Rangka Pemikul Momen yang Direncanakan Secara Direct Displacement-Based Design. Studi Kasus : Bangunan Beraturan dengan Bentang Tidak Seragam*. Skripsi, Universitas Kristen Petra, Surabaya.

- Priestley, M.J.N., Calvi, G.M. dan Kowalsky, M.J. (2007). *Displacement-Based Seismic Design of Structure*, IUSS Press, Pavia, Italy.
- Sullivan, T.J., Priestley, M.J.N., Calvi, G.M. (2012). *A Model Code for Displacement-Based Seismic Design of Structure*, IUSS Press, Pavia, Italy.
- Weliem, N. dan Widjaja, K. (2013). *Evaluasi Kinerja Direct Displacement-Based Design dan Force Based Design pada Regular Frame 12 Lantai*. Skripsi, Universitas Kristen Petra, Surabaya.
- Wijaya, C. dan Wijaya, S.W. (2013). *Evaluasi Kinerja Direct Displacement Based Design dan Force Based Design Bangunan Irregular Plan 6-Lantai*. Skripsi, Universitas Kristen Petra, Surabaya.