

EVALUASI KINERJA BANGUNAN DENGAN KETIDAKBERATURAN SUDUT DALAM YANG DIRENCANAKAN SECARA *DIRECT DISPLACEMENT BASED DESIGN*

Michael¹, Andy², Ima Muljati³ dan Benjamin Lumantarna⁴

ABSTRAK : Sesuai dengan SNI 1726-2012, *Force Based Design* merupakan metode yang digunakan dalam perencanaan struktur bangunan. Namun, seiring berkembangnya waktu, metode yang disebut *Direct Displacement-Based Design* (DDBD) menjadi opsi bagi perencana untuk mendesain struktur bangunan. Sesuai *Performance Based Design*, perencanaan harus dilakukan dalam Level 1-*No Damage*, Level 2-*Repairable Damage*, dan Level 3-*No Collapse*. Bangunan *apartment* 6 lantai dengan ketidakberaturan sudut dalam, dimana portal arah-x dan arah-y tidak seragam, dari struktur beton bertulang dengan bentang seragam diambil sebagai studi kasus. Struktur direncanakan sebagai sistem rangka pemikul momen pada daerah beresiko gempa rendah dan tinggi di Indonesia. Bangunan direncanakan dengan metode FBD maupun DDBD. Dalam metode DDBD, desain Level-3 digunakan untuk daerah beresiko gempa rendah dan Level-2 untuk daerah beresiko gempa tinggi sesuai *DDBD Model Code* (Sullivan et al., 2012). Untuk metode DDBD, penelitian dilakukan dalam 2 kondisi, yaitu distribusi *base shear* secara merata untuk tiap portal (DDBD 1), dan perhitungan *base shear* untuk masing-masing portal sesuai dengan proporsional massa (DDBD 2). Dari kedua metode yang dilakukan, ternyata metode DDBD 1 merupakan pilihan terbaik. Hasil desain tersebut diuji kinerjanya menggunakan analisis dinamis riwayat waktu nonlinier. Untuk parameter *drift*, semua bangunan menunjukkan kinerja yang memuaskan kecuali bangunan DDBD 2. Namun jika dilihat berdasarkan *damage index*, hanya metode DDBD 1 yang memenuhi semua persyaratan. Dalam parameter mekanisme keruntuhan, kondisi *beam side sway mechanism* dan *strong column weak beam* sudah terpenuhi.

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

1. PENDAHULUAN

Banyak penelitian yang mendukung bahwa penggunaan metode *Direct Displacement Based Design* dalam perencanaan sebuah struktur bangunan menghasilkan kinerja bangunan yang baik. Beberapa penelitian yang dilakukan meliputi perencanaan pada struktur bangunan reguler (Muljati et al., 2013), perencanaan pada struktur bangunan yang dilatasi akibat ketidakberaturan vertikal (Juandinata, R. dan Pranata, Y., 2014) dan ketidakberaturan horizontal (Hendratha, A. dan Adi, T., 2014). Namun, penelitian terhadap bangunan dengan ketidakberaturan sudut dalam atau horizontal yang dilakukan sebelumnya hanya menggunakan model bangunan berskala kecil, padahal desain bangunan dengan ketidakberaturan sudut dalam seringkali digunakan untuk proyek berskala besar. Oleh karena itu, penelitian ini akan menguji

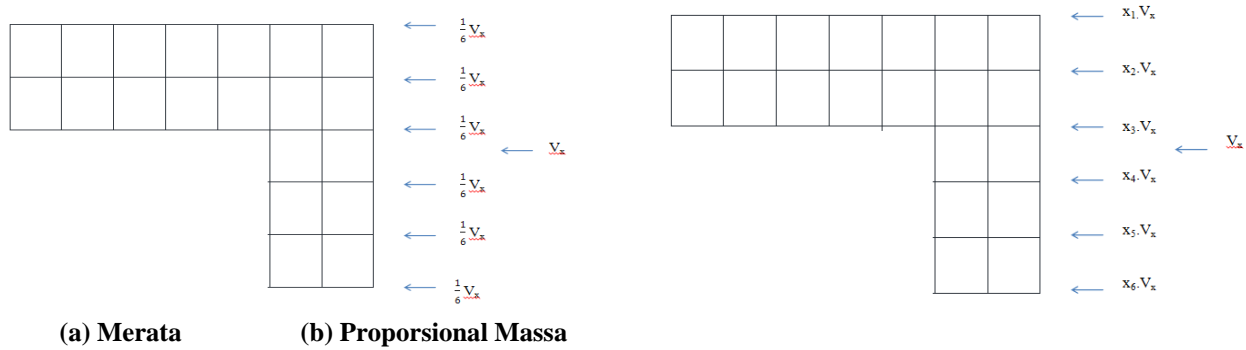
¹ Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra Surabaya, m21413102@john.petra.ac.id.

² Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra Surabaya, m21413139@john.petra.ac.id.

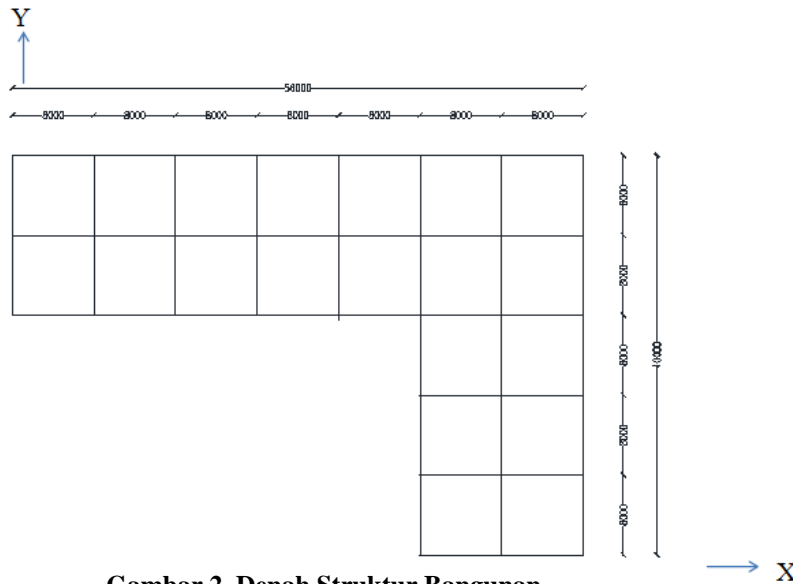
³ Dosen Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra Surabaya, imuljati@peter.petra.ac.id

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

bangunan dengan ketidakberaturan sudut dalam dengan ukuran yang lebih besar. Distribusi gaya geser per portal dilakukan secara merata seperti pada Gambar 1(a) (Hendratha, A. dan Adi, T., 2014) dan diberi kode DDBD 1. Namun, karena bangunan memiliki ukuran portal yang berbeda jauh maka dilakukan juga penelitian kondisi dua dengan distribusi gaya geser yang berbeda untuk setiap portal sebagai alternatif. Pada bangunan tersebut, distribusi gaya geser akan dilakukan sesuai proporsional massa ($x_j V_x$) seperti pada Gambar 1(b) dan diberi kode DDBD 2. Melalui penelitian ini, peneliti berharap dapat mengetahui apakah benar distribusi gaya geser tiap portal sesuai proporsional massa dapat diterapkan pada bangunan dengan ketidakberaturan sudut dalam yang didesain secara FBD (respon *spectrum*) maupun DDBD. Denah struktur dapat dilihat pada Gambar 2.



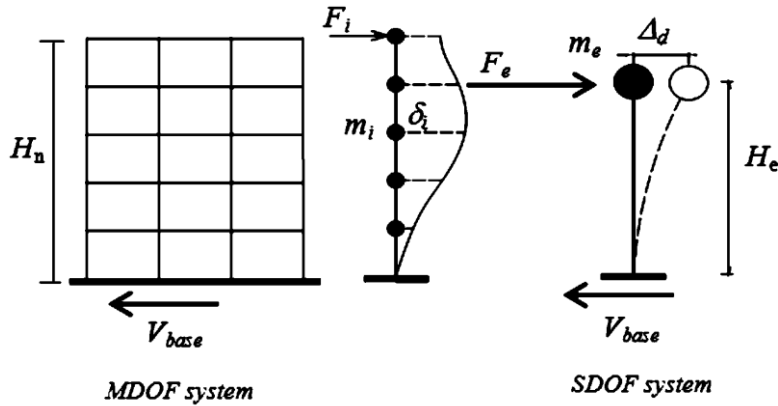
Gambar 1. Distribusi *Base Shear*



Gambar 2. Denah Struktur Bangunan

2. LANDASAN TEORI

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 3).



Gambar 3. 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 storey 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 dihitung dengan :

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

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

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.

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

$$\omega_\theta = 1.15 - 0.0034 H_n \leq 1.0 \quad (7)$$

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 :

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

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

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

Equivalent viscous damping ξ_{eq} didapatkan dari :

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

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 ≤ 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} 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 *Over Turning Moments* yang diterima struktur, dan H adalah tinggi total struktur.

3. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini diawali dengan mempelajari literatur-literatur yang berkaitan dengan metode *Force Based Design* (FBD) dan *Direct Displacement Based Design* (DDBD). Setelah mempelajari kedua metode, perhitungan dengan metode FBD analisis Respon Spektrum dilakukan. Penelitian dilanjutkan dengan perhitungan dimensi balok dan kolom berdasarkan rumus empiris yang ada untuk metode DDBD 1 dan DDBD 2. Dalam metode DDBD 1, massa yang digunakan adalah massa keseluruhan dari struktur. Untuk metode DDBD 2, massa yang digunakan hanyalah massa 1 portal yang ditambahkan dengan massa *tributary area*. Penentuan level desain yang digunakan adalah level-3 untuk kota Surabaya, dan level-2 untuk kota Jayapura. Langkah selanjutnya yaitu penentuan target perpindahan pada tiap tingkat (Δ_i) yang dilanjutkan dengan perhitungan *Equivalent Design Displacement Single Degree of Freedom* (Δ_d). Kemudian massa ekuivalen, tinggi efektif, desain daktilitas perpindahan, dan *equivalent viscous damping* dapat dicari untuk menghitung periode efektif dan kekakuan efektif struktur. Dengan data yang sudah lengkap, maka gaya geser dasar bangunan dapat dicari. Selanjutnya dilakukan perhitungan distribusi beban gempa pada setiap tingkat dan perhitungan *capacity design* struktur bangunan.

Setelah proses perencanaan selesai, setiap struktur bangunan akan dievaluasi dengan program ETABS 15.2.2. Proses ini diawali dengan pemodelan hubungan momen-kurvatur menggunakan program CUMBIA (Montejo, 2007). Data yang didapat dari program CUMBIA kemudian dimasukkan sebagai data dalam *hinge properties* di dalam program ETABS. Setelah itu dilakukan analisis dinamis *time history non-linear*

dengan level gempa 100, 500, dan 2500 tahun untuk mengetahui kinerja struktur, baik dalam gempa arah-x maupun arah-y. Parameter-parameter yang akan dilihat sebagai penentu kinerja struktur yaitu *drift ratio*, *damage index*, dan *failure mechanism*.

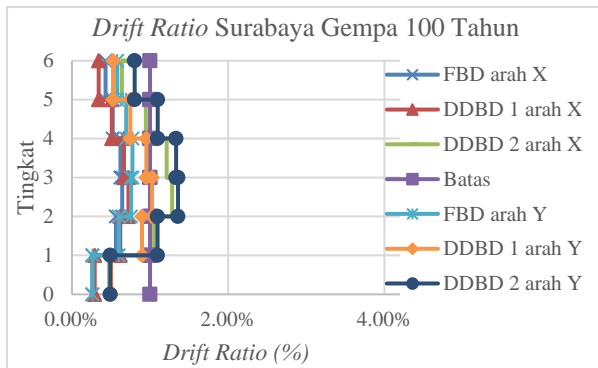
Berdasarkan hasil analisis tersebut, dapat ditentukan metode mana yang menghasilkan kinerja struktur yang memenuhi persyaratan yang ditentukan.

4. HASIL DAN ANALISIS

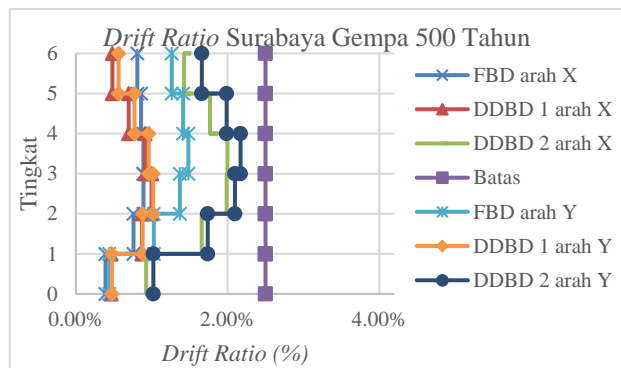
Hasil dan analisis membahas *output*/hasil *dynamic nonlinear time history analysis* dari ETABS 2015 versi 15.2.2 yang meliputi *drift ratio*, *damage index*, dan *failure mechanism*. Untuk parameter *damage index* akan menggunakan *performance matrix* bangunan berdasarkan *A Model Code for Displacement-Based Seismic Design of Structures DBD12* (Sullivan et al., 2012).

4.1. Drift Ratio

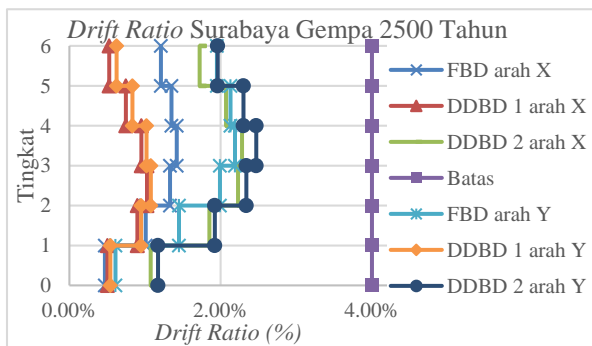
Pada **Gambar 4**. hingga **Gambar 9**. dapat dilihat perbandingan *drift ratio* dengan *drift limit* yang diijinkan menurut *A Model Code for Displacement-Based Seismic Design of Structures DBD12* (Sullivan et al., 2012).



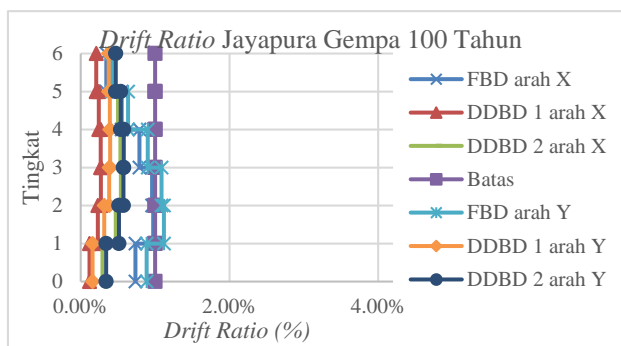
Gambar 4. Story Drift Surabaya (100 tahun)



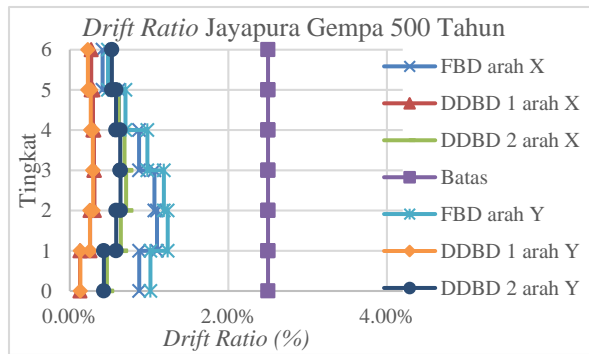
Gambar 5. Story Drift Surabaya (500 tahun)



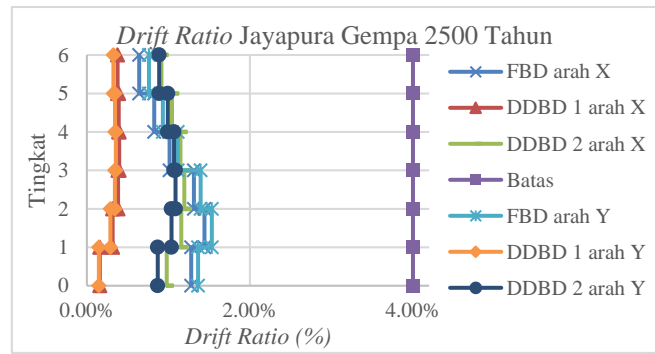
Gambar 6. Story Drift Surabaya (2500 tahun)



Gambar 7. Story Drift Jayapura (100 tahun)



Gambar 8. Story Drift Jayapura (500 tahun)

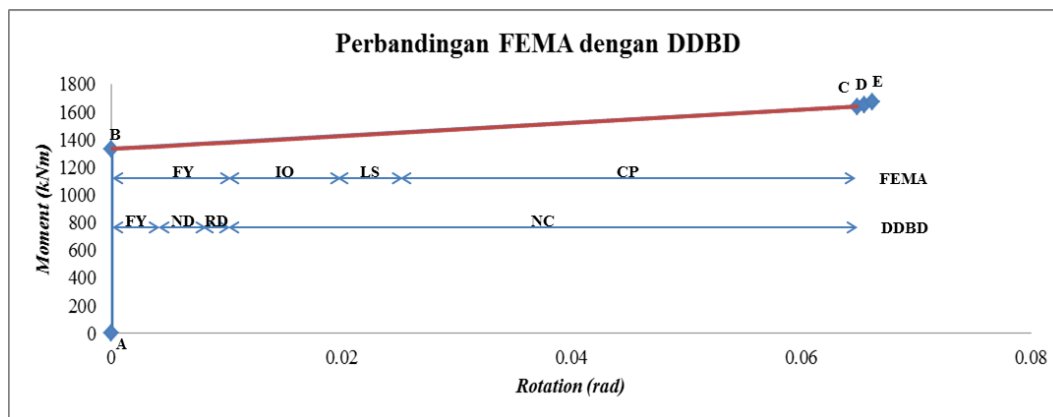


Gambar 9. Story Drift Jayapura (2500 tahun)

Berdasarkan drift ratio, dapat dilihat bahwa metode DDBD 1 memiliki kinerja bangunan yang paling baik dibandingkan metode lain, baik di kota Surabaya maupun Jayapura.

4.2. Damage Index

Nilai *damage index* juga dapat digunakan sebagai parameter evaluasi kinerja bangunan. Parameter *damage index* ini mengacu pada persyaratan FEMA 356 yang terdiri dari kondisi *first yield*, *immediate occupancy*, *life safety*, dan *collapse prevention*. Namun, penelitian ini menggunakan persyaratan *damage index* yang digunakan mengacu kepada *Model Code DDBD* (Sullivan et al., 2012), dimana di dalamnya terdapat 4 kondisi, yakni *first yield* (FY), *no damage* (ND), *repairable damage* (RD), dan *no collapse* (NC). Kondisi *no damage* (ND) yang terjadi setelah *first yield* (FY) menyatakan bangunan dapat beroperasi secara total setelah terkena gempa tanpa harus diperbaiki. Bila dilihat pada **Gambar 10**, persyaratan DDBD berbeda dengan FEMA 356, dan kriteria yang digunakan DDBD sangat ketat bila dibandingkan dengan FEMA 356. Hasil *damage index* balok dan kolom selengkapnya dapat dilihat pada.



Gambar 10. Perbandingan Persyaratan FEMA 356 dan DDBD

Hasil analisis menunjukkan bahwa untuk kota Surabaya yang mewakili wilayah gempa kecil, hanya bangunan DDBD 1 yang memenuhi kriteria. Bangunan yang didesain dengan metode DDBD 1 merupakan desain yang memiliki kinerja yang sesuai kriteria pada setiap level gempa arah-x maupun arah-y.

Untuk kota Jayapura yang mewakili wilayah gempa besar bangunan metode DDBD 1 tidak mengalami sendi plastis pada balok maupun kolom sehingga dikategorikan sebagai *first yield* saja. Untuk bangunan

dengan metode FBD dan DDBD 2, kondisi kolom melewati batasan sendi plastis sehingga tidak memenuhi persyaratan untuk gempa 100 tahun dan gempa 500 tahun.

4.3. Failure Mechanism

Berdasarkan hasil yang didapat, bisa dilihat banyak kolom yang berada dalam kondisi *no collapse*. Namun, sendi plastis yang terjadi masih dalam batas kapasitas plastis (B), dimana batasan plastis ini masih mendekati batas elastis sehingga boleh dikatakan bahwa kolom masih dalam batas aman. Pengecekan gaya dalam kolom juga dilakukan untuk mengetahui apakah kolom mengalami tekan atau tarik. Hasil pengecekan pada *time step* terakhir menunjukkan bahwa kolom masih mengalami tekan, sehingga semua bangunan di kota Surabaya dan Jayapura masih aman.

Bangunan pada wilayah gempa Surabaya dan Jayapura sudah memenuhi konsep desain *strong colum weak beam*. Balok mengalami leleh terlebih dahulu dibandingkan kolom. Jika dilihat, hanya kolom yang berada di lantai dasar yang dalam kondisi *no collapse*. Berdasarkan hasil-hasil tersebut kondisi *beam side sway mechanism* sudah tercapai. Hal ini berlaku untuk pembebanan gempa arah-x maupun arah-y.

4.4. Rasio Distribusi Base Shear Tiap Portal Bangunan DDBD2

Rasio distribusi *base shear* tiap portal hasil analisis non-linear riwayat waktu bangunan DDBD2 dibandingkan dengan *base shear* rencana tiap portal bangunan DDBD2 terlihat pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Rasio Distribusi Base Shear Tiap Portal Bangunan Arah-X Kota Jayapura Gempa 100 th

Portal X	Base Shear		
	Gempa arah x positif	Gempa arah x negatif	Rencana
1	8.03%	8.09%	6.97%
2	9.27%	9.52%	10.31%
3	9.20%	9.55%	10.31%
4	20.95%	21.23%	20.73%
5	32.08%	30.55%	30.89%
6	20.47%	21.07%	20.79%
Total	100.00%	100.00%	100.00%

Dari **Tabel 1**. Terlihat bahwa rasio distribusi base shear tiap portal arah x dari hasil analisis hampir serupa dengan rasio distribusi *base shear* rencana tiap portal. Hal ini juga terjadi bangunan-bangunan lain di kota Surabaya dan Jayapura baik di portal x maupun portal y dengan selisih rentang 1%-5%. Namun akibat analisa secara tiga dimensi, bangunan mengalami puntir sehingga ketika dikenakan gempa arah x, terjadi *base shear* arah y yang mengakibatkan penambahan momen pada arah y.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa distribusi *base shear* bangunan dengan ketidakberaturan sudut dalam secara proporsional massa sesuai dengan *base shear* yang terjadi, namun menghasilkan kinerja bangunan yang kurang baik. Perencanaan dengan metode DDBD 1 menghasilkan struktur dengan kinerja terbaik, baik untuk wilayah dengan risiko gempa rendah (kota Surabaya) maupun wilayah dengan risiko gempa tinggi (kota Jayapura), dibandingkan dengan metode FBD dan DDBD2.

6. DAFTAR REFERENSI

- Hendratha, A. dan Adi, T. (2014). *Pengaruh Dilatasi pada Bangunan dengan Ketidakberaturan Sudut Dalam yang Didesain Secara Direct Displacement Based*. (Tugas Akhir No. 1101 1951/SIP/2014). Program Studi Teknik Sipil. Universitas Kristen Petra, Surabaya.
- Juandinata, R. dan Pranata, Y. (2014). *Pengaruh Dilatasi pada Bangunan dengan Ketidakberaturan Geometri Vertikal yang Didesain Secara Direct Displacement Based*. (Tugas Akhir No. 1101 1952/SIP/2014). Program Studi Teknik Sipil. Universitas Kristen Petra, Surabaya.
- Montejo, L.A. (2007). *CUMBIA*. Department of Civil, Construction, and Environmental Engineering, North Carolina State University, North Carolina.
- Muljati et.al. (2013). *Evaluasi Metode FBD dan DDBD pada SRPM di Wilayah 2 dan 6 Peta Gempa Indonesia*. (Tugas Akhir No. 1101 1875/SIP/2012). Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, Surabaya.
- Sullivan, T.J., Priestley, M.J.N dan Calvi, G.M., (2012). *A Model Code for Displacement-Based Seismic Design of Structure*. IUSS Press.