

PENGARUH KETIDAKBERATURAN MASSA VERTIKAL PADA BANGUNAN YANG DIRENCANAKAN SECARA *DIRECT DISPLACEMENT BASED DESIGN*

Yoseph Ivan Hartono¹, Misael Algape², Ima Muljati³, Benjamin Lumantarna⁴

ABSTRAK : *Direct Displacement Based Design* (DDBD) merupakan metode untuk mendesain bangunan tahan gempa yang hanya mengenal pendistribusian gaya gempa secara vertikal berdasarkan *inertia force* di setiap lantai yang menyerupai metode statis ekuivalen. DDBD tidak meninjau adanya ketidakberaturan massa vertikal. Penelitian ini bertujuan mengetahui apakah cara DDBD dapat digunakan untuk bangunan dengan ketidakberaturan massa vertikal. Bangunan 12 lantai dengan massa yang tidak beraturan di wilayah Surabaya dan Jayapura akan digunakan sebagai studi kasus. Kinerja bangunan diuji menggunakan analisis dinamis riwayat waktu nonlinier terhadap *performace criteria* yang diberikan oleh Model Code DDBD. Hasil analisis menunjukkan bahwa rumusan distribusi gaya lateral di setiap lantai tidak dapat digunakan karena meskipun *drift ratio* yang terjadi pada bangunan dengan desain level 1 di wilayah Surabaya dan Jayapura memenuhi persyaratan *drift limit*. Untuk parameter *damage index*, kinerja bangunan desain level 1, 2, dan 3 pada wilayah Surabaya dan Jayapura tidak memenuhi persyaratan. Selain itu, konsep *strong column weak beam* dan *beam side sway mechanism* tidak terpenuhi.

KATA KUNCI: *direct displacement based design*, ketidakberaturan massa vertikal, analisis dinamis riwayat waktu nonlinier.

1. PENDAHULUAN

Seiring dengan berkembangnya zaman, arsitektural dari bangunan juga semakin berkembang mengikuti kebutuhan masyarakat. Namun, perkembangan ini juga menimbulkan kendala bagi desain struktur bangunan seperti ketidakberaturan massa vertikal. Bangunan dengan ketidakberaturan massa vertikal dapat menyebabkan ukuran kolom dan balok menjadi lebih besar. Hal ini menimbulkan kekakuan dan kapasitas kekuatan yang tidak beraturan pada struktur bangunan. Variabel kekakuan dan massa mempengaruhi nilai dari perpindahan suatu struktur bangunan. Oleh karena itu, dengan adanya rasio kekakuan dan massa yang besar, *inter story drift ratio* akan menjadi besar (Karavailis, et al., 2008).

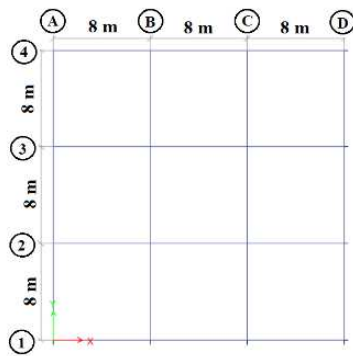
Direct Displacement Based Design (DDBD) merupakan suatu metode untuk mendesain bangunan tahan gempa yang hanya mengenal pendistribusian gaya gempa secara vertikal berdasarkan *inertia force* di setiap lantai. Selama ini DDBD tidak meninjau adanya ketidakberaturan massa vertikal. Pada penelitian ini akan dibahas rumusan distribusi gaya lateral di setiap lantai dan evaluasi kinerja bangunan dengan ketidakberaturan massa vertikal yang direncanakan secara DDBD. Bangunan 12 lantai di Surabaya dan Jayapura akan digunakan sebagai studi kasus, dapat dilihat pada **Gambar 1**. Varian massa pada bangunan dapat dilihat pada **Gambar 2**.

¹ Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra Surabaya, yoseph.ivan18@gmail.com

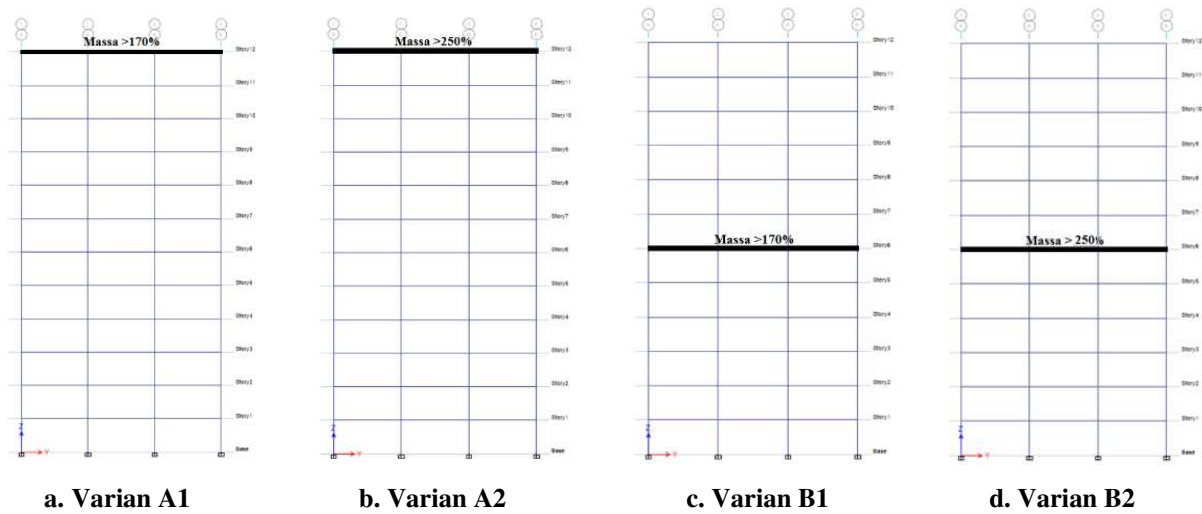
² Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra Surabaya, algapemisael@gmail.com

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

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



Gambar 1. Denah Tipikal Bangunan (Lantai 1-12)



a. Varian A1

b. Varian A2

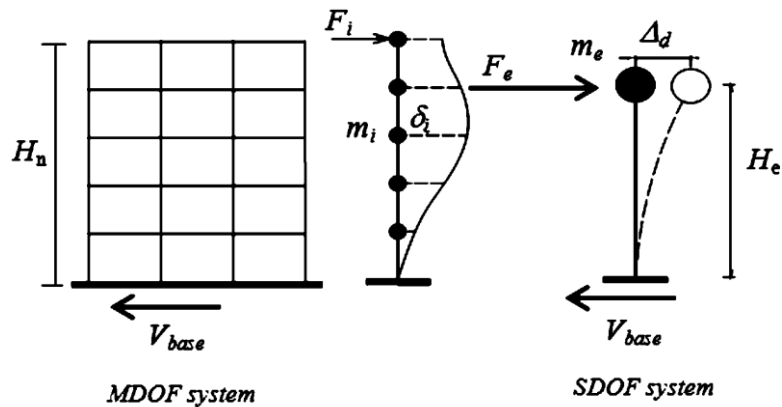
c. Varian B1

d. Varian B2

Gambar 2. Massa pada Bangunan yang Ditinjau

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 :

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

Dimana m_i massa pada lantai ke- i .

Massa struktur pengganti m_e dan tinggi efektif H_e dihitung dengan :

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

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

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 :

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

$$\Theta_y = 0.5 \varepsilon_y \frac{L_B}{H_B} \quad (10)$$

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

Tahapan-tahapan yang dilakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut : Tahapan awal dalam pengerjaan penelitian ini adalah studi literatur terhadap metode *Direct Displacement Based Design* (DDBD) untuk mengerti lebih dalam mengenai konsep dasar serta langkah-langkah perhitungannya. Selain itu juga dilakukan studi literatur terhadap adanya ketidakberaturan massa pada perilaku bangunan. Selanjutnya dilakukan prosedur DDBD hingga didapatkan *design base shear* dan jumlah tulangan yang dibutuhkan. Perhitungan jumlah tulangan menggunakan program *Spreadsheet*. Proses tersebut akan dilakukan terhadap tiap-tiap varian bangunan pada wilayah Surabaya dan Jayapura.

Terdapat 3 level desain yang digunakan dalam perhitungan, yaitu level 1 - *No Damage*, level 2 – *Repairable Damage*, dan level 3 - *No Collapse*. Level 1 menggunakan beban gempa periode ulang 100 tahun dan memiliki batas *drift ratio* 1%, level 2 menggunakan beban gempa periode ulang 500 tahun dan memiliki batas *drift ratio* 2.5%, sedangkan level 3 menggunakan beban gempa periode ulang 2500 tahun dan memiliki batas *drift ratio* 4%. Dari ketiga level desain yang digunakan ternyata desain level 1 merupakan desain yang paling menentukan karena desain level 1 memiliki ukuran dimensi struktur yang paling besar.

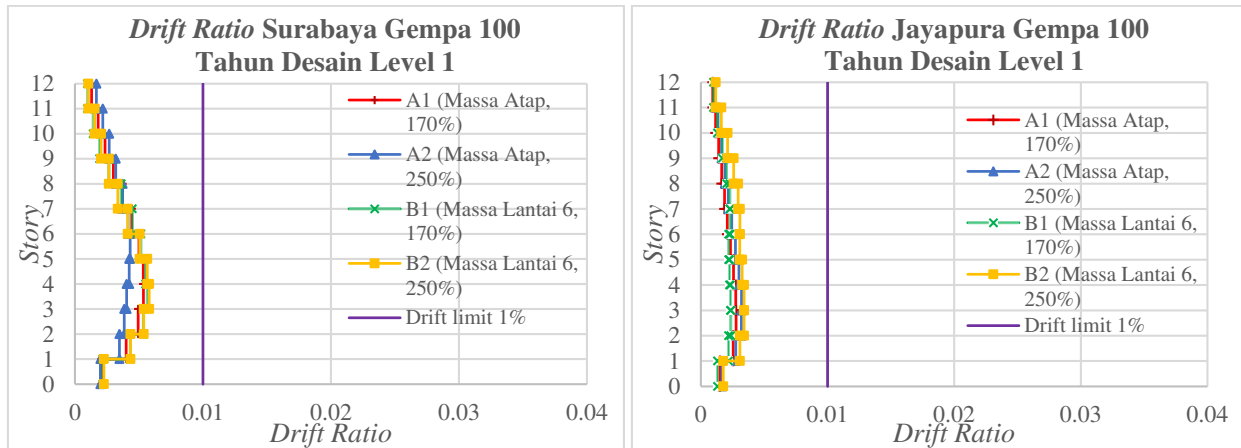
Pada setiap struktur varian bangunan yang ditinjau akan dievaluasi kinerjanya yang diawali dengan mencari hubungan momen-kurvatur menggunakan program CUMBIA (Montejo, 2007). Selanjutnya dilakukan analisis dinamis Time History non-linear dengan program ETABS. Kinerja struktur diukur melalui parameter: *story drift*, *damage index* dan mekanisme keruntuhan plastis sesuai EuroCode8. Tahapan-tahapan tersebut dilakukan untuk tiap-tiap *design* level bangunan (level 1, level 2, dan level 3).

4. HASIL DAN ANALISIS

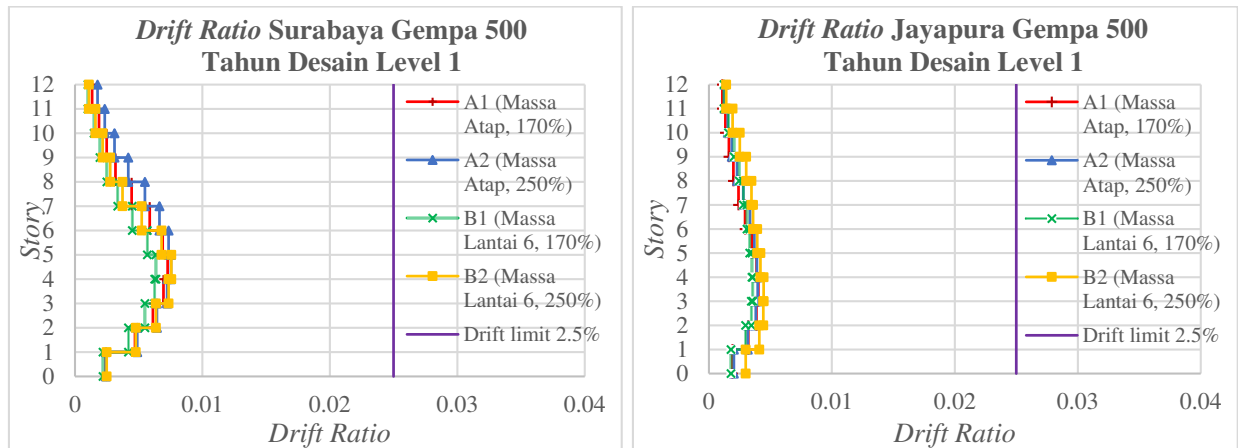
Hasil dan analisis membahas *output* dari *dynamic nonlinear time history analysis* dari yang meliputi *drift ratio*, *damage index*, dan *failure mechanism*.

4.1. Drift Ratio

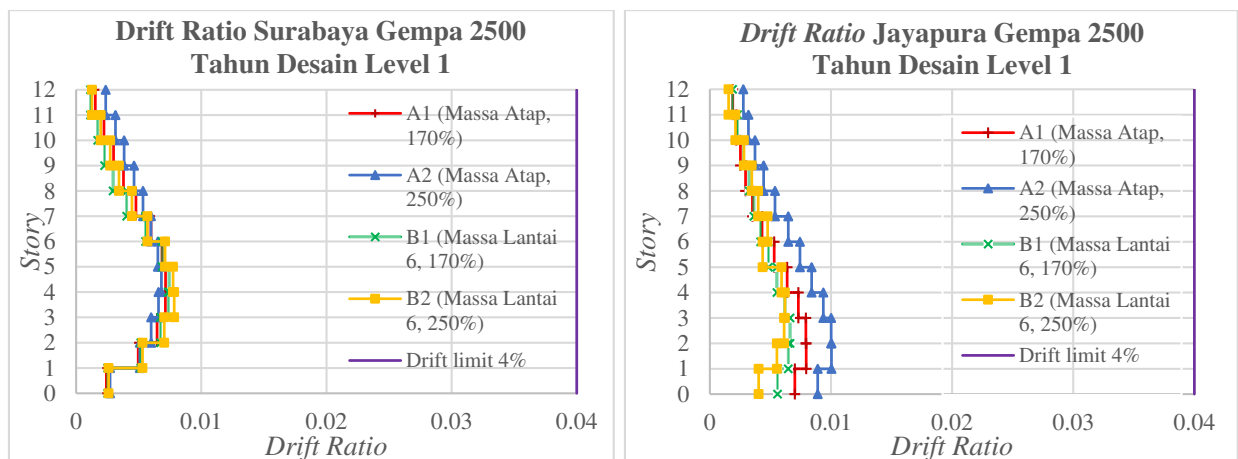
Karena desain level yang menentukan adalah desain level 1, maka seperti yang diharapkan, desain level 2 dan 3 menunjukkan kinerja yang tidak memuaskan, yaitu melewati syarat *drift limit*. Nilai *drift ratio* desain level 1 ditampilkan dalam bentuk grafik, dikelompokkan berdasarkan periode ulang gempa dan wilayah gempa, serta dibandingkan dengan batasan drift yang ditentukan (**Gambar 4-6**).



Gambar 4. Drift Ratio Surabaya dan Jayapura (100 Tahun) Desain Level 1



Gambar 5. Drift Ratio Surabaya dan Jayapura (500 Tahun) Desain Level 1



Gambar 6. Drift Ratio Surabaya dan Jayapura (2500 Tahun) Desain Level 1

Melalui data yang ditampilkan pada **Gambar 4-6**, dapat dilihat bahwa bangunan level 1 di wilayah Surabaya dan Jayapura pada beban gempa 100, 500, dan 2500 tahun memenuhi persyaratan *drift limit* yaitu 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* (Sullivan et al., 2012). Penggolongan *damage index* dilakukan dengan cara membandingkan batasan rotasi yang digunakan dengan rotasi maksimum yang terjadi. Hasil analisis menunjukkan bahwa *damage index* pada balok dari bangunan level 2 dan 3 di wilayah Surabaya tidak memenuhi syarat. Sementara untuk *damage index* pada kolom dari bangunan level 1, 2, dan 3 di wilayah Surabaya, tidak memenuhi syarat. Pada bangunan pada level 1, 2, dan 3 di wilayah Jayapura, *damage index* terjadi pada balok dan kolom melebihi persyaratan. Jadi, yang memenuhi persyaratan *damage index* hanya balok dari bangunan level 1 di wilayah Surabaya. Hasil pemeriksaan lebih lanjut menunjukkan bahwa terdapat kejanggalan pada kolom bangunan A1 dan B1 level 1 di wilayah Surabaya, *damage index* untuk gempa 100 dan 500 tahun berada pada kondisi *no collapse* namun pada gempa 2500 tahun *damage index* berada pada posisi *first yield*. Pada kolom bangunan A2 level 3 di wilayah Surabaya juga terdapat kejanggalan yang sama, pada gempa 100 tahun *damage index* berada pada posisi *no collapse* namun pada gempa 500 tahun *damage index* berada pada posisi *first yield*. Penyebab kejanggalan ini masih belum kami ketahui dan harus dikaji lebih lanjut.

4.3. *Failure Mechanism*

Hasil analisis menunjukkan bahwa daerah dengan ketidakberaturan massa vertikal mengalami sendi plastis terlebih dahulu. Sehingga, ketidakberaturan massa vertikal sangat mempengaruhi perilaku keruntuhan suatu bangunan. Analisis lebih lanjut menunjukkan bahwa terdapat beberapa kolom yang berada dalam kondisi *no collapse*, tetapi balok pada *joint* yang sama masih berada dalam batas elastis. Hal ini tidak berarti bahwa kolom berada pada 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. Selain itu, tidak seluruh bangunan pada wilayah gempa Surabaya dan Jayapura yang memenuhi konsep *strong column weak beam* dan kondisi *beam side sway mechanism* karena terdapat kolom yang leleh terlebih dahulu di tempat yang tidak seharusnya.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian terhadap bangunan 12 lantai dengan ketidakberaturan massa vertikal yang didesain secara DDBD pada tiga level desain yang berbeda, dapat disimpulkan bahwa:

1. *Drift ratio* yang terjadi pada bangunan desain level 2 dan 3 di wilayah Surabaya dan Jayapura untuk beban gempa 100 tahun melebihi *drift limit* 1%, tetapi untuk bangunan desain level 1 di wilayah Surabaya dan Jayapura masih memenuhi batasan *drift limit*. Hal ini menunjukkan bangunan dengan ketidakberaturan massa vertikal yang di rencanakan dengan metode *Direct Displacement Based Design* masih memenuhi untuk batasan *drift limit*.
2. Untuk parameter *damage index*, kinerja bangunan desain level 1, 2, dan 3 pada wilayah Surabaya dan Jayapura tidak memenuhi persyaratan, yaitu untuk beban gempa 100 tahun maksimum *no damage*, 500 tahun maksimum *repairable damage*, 2500 tahun maksimum *no collapse*. Selain itu, konsep *strong column weak beam* dan *beam side sway mechanism* tidak terpenuhi.

3. Rumusan distribusi gaya lateral di setiap lantai pada metode *Direct Displacement Based Design* tidak dapat digunakan pada bangunan dengan ketidakberaturan massa vertikal.

6. DAFTAR REFERENSI

EuroCode 8 (2012). *Seismic Design of Building Part 1*. Author, Eropa.

Karavailis, T.L., Bazeos, N., Beskos, D.E. (2008). "Estimation of Seismic Inelastic Deformation Demand in Plane Steel MRF with Vertical Mass Irregularities." *Engineering Structures*. Vol. 30, No. 1, 3265-3275.

Montejo, L.A. (2007). *CUMBIA*. Department of Civil, Construction, and Environmental Engineering, North Carolina State University, Raleigh, North Carolina.

Sullivan, T.J., Priestley, M.J.N. dan Calvi, G.M. (2012). *A Model Code for Displacement-Based Seismic Design of Structure*. IUSS Press, Pavia, Italy.