

PERBANDINGAN KINERJA BANGUNAN YANG DIDESAIN DENGAN *FORCE-BASED DESIGN* DAN *DIRECT DISPLACEMENT-BASED DESIGN* MENGGUNAKAN SNI GEMPA 2012

Fransiscus Asisi¹, Kevin Willyanto² dan Ima Muljati³

ABSTRAK : Banyak penelitian-penelitian mengenai kinerja Direct Displacement Based Design (DDBD) dan Force Based Design (FBD) telah dilakukan sebelumnya. Namun, penelitian-penelitian tersebut masih dilakukan dengan menggunakan SNI 03-1726-2002 yang sudah tidak relevan untuk dipakai lagi saat ini karena adanya perubahan peraturan dari SNI 03-1726-2002 menjadi SNI 1726-2012 oleh pemerintah. Penelitian ini membandingkan kinerja antara FBD dan DDBD menggunakan SNI 1726-2012 dengan cara mendesain struktur 6 lantai dengan denah tipikal yang sama menggunakan kedua metode pada wilayah beresiko gempa tinggi dan rendah. Struktur yang didesain diuji dengan analisis non-linear dinamis *time history*. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa struktur bangunan yang didesain dengan DDBD memberikan kinerja yang lebih baik daripada FBD baik dalam *drift ratio* ataupun *failure mechanism*. Satu-satunya kelemahan dari DDBD adalah biaya yang lebih mahal karena hasil desain yang menggunakan lebih banyak material. Namun, hasil desain DDBD lebih terjamin sesuai desain perencana dan waktu yang terbuang untuk mendesain tidak sebanyak FBD.

KATA KUNCI: *Direct Displacement Based Design, Force Based Design, Static Equivalent, Response Spectrum*, kinerja struktur.

1. PENDAHULUAN

Penelitian mengenai perbandingan kinerja metode *Force-Based Design* dan *Direct Displacement-Based Design* ini telah banyak dilakukan dengan menggunakan SNI-03-1726-2002. Hasil dari penelitian-penelitian tersebut menunjukkan bahwa kinerja dari DDBD lebih baik daripada FBD karena sesuai dengan target yang direncanakan. Namun, saat ini pemerintah telah mengeluarkan peraturan baru SNI 1726-2012 yang merupakan pembaharuan dari SNI-03-1726-2002 (Departemen Pekerjaan Umum, 2012). Oleh karena itu, perlu adanya verifikasi kembali mengenai kinerja metode DDBD dan FBD dengan adanya perubahan peraturan SNI tersebut. Dalam penelitian ini, akan didesain sebuah bangunan 6-lantai pada wilayah beresiko gempa rendah dan tinggi dengan denah tipikal. Struktur tersebut akan didesain dengan metode FBD menggunakan 2 pendekatan yakni *Static Equivalent (SE)* dan *Response Spectrum (RS)* dan dengan metode DDBD.

2. LANDASAN TEORI

2.1. *Force-Based Design*

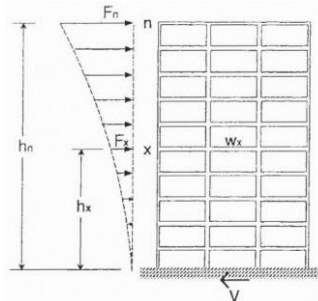
Gempa akan menimbulkan getaran/goyangan pada tanah ke segala arah dan menggetarkan bangunan yang berdiri di atas tanah tersebut. Pada dasarnya sebuah bangunan yang terkena gempa akan cenderung tidak bergerak karena mempertahankan bentuknya. Hal ini menimbulkan suatu gaya inersia pada bangunan.

¹ Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra Surabaya, fransiscus.asisi93@gmail.com.

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

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

Force-Based Design menggunakan gaya inersia tersebut pada bangunan yang ditentukan oleh berat bangunan, koefisien modifikasi respons (R), dan faktor reduksi gaya (C_d). Gaya gempa tersebut direpresentasikan seperti pada **Gambar 1** dimana F_n dan F_x adalah representasi gaya gempa. (Ghosh and Fanella, 2003)



Gambar 1. Representasi Gaya Gempa pada Bangunan
Sumber: Ghosh and Fanella (2003)

2.2.1. *Static Equivalent*

Proses desain menggunakan pendekatan *static equivalent* merupakan pembebanan gempa secara statis kepada setiap lantai sebuah struktur bangunan yang besarnya ditentukan oleh massa lantai dan ketinggian lantai tersebut dari permukaan tanah, periode struktur bangunan tersebut serta faktor respons gempa C yang diambil SNI 1726-2012. Metode ini hanya berlaku pada bangunan reguler saja. (Budiono, 2011).

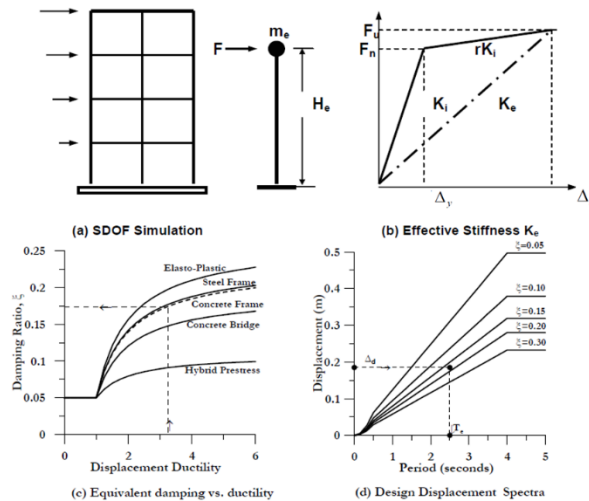
2.2.2. *Response Spectrum*

Proses desain *response spectrum* mirip dengan *static equivalent*. Tetapi yang digunakan untuk beban adalah sebuah kurva respon dengan periode getar struktur T (sumbu x) dan respon-respon maksimum berdasarkan rasio redaman dan gempa tertentu (sumbu y). Respon-respon maksimum dapat berupa simpangan maksimum (*spectral displacement, SD*) kecepatan maksimum (*spectral velocity, SV*) atau percepatan maksimum (*spectral acceleration, SA*) massa struktur *Single Degree of Freedom (SDOF)* (Widodo, 2011). Respon spektrum desain ditentukan dengan parameter respon ragam yang disesuaikan dengan klasifikasi situs dimana bangunan tersebut akan dibangun kemudian dibagi dengan kuantitas R/I . (Departemen Pekerjaan Umum, 2012).

2.2. *Direct Displacement-Based Design*

Konsep dasar *Direct Displacement Based Design (DDBD)* diambil dari Priestley et.al (2007) yang merupakan pemodelan bangunan sebagai suatu sistem *Single Degree of Freedom (SDOF)*. Dengan tinggi efektif bangunan (H_e), seperti pada **Gambar 2(a)**. Hubungan gaya dan perpindahan yang ditunjukkan pada **Gambar 2(b)** menunjukkan adanya kekakuan awal elastis (K_i) yang kemudian diikuti oleh kekakuan plastis (rK_i). Metode DDBD menggunakan kekakuan efektif (K_e) yang merupakan *secant stiffness* untuk suatu perpindahan rencana (Δ_d).

Level of equivalent viscous damping ξ menunjukkan kombinasi *elastic damping* dan *hysteretic energy* yang diserap saat respon inelastis seperti pada **Gambar 2(c)**. Perpindahan rencana (Δ_d) pada saat respons maksimum dan estimasi damping yang didapat dari macam-macam *displacement spectrum* seperti pada **Gambar 2(d)** diperlukan untuk mendapat periode efektif (T_e). Periode efektif (T_e) ini digunakan untuk menentukan kekakuan efektif (K_e) pada sistem SDOF. Dengan adanya kekakuan efektif dan perpindahan rencana ini didapatkan besaran gaya geser dasar pada SDOF. Kemudian dilanjutkan dengan penentuan distribusi beban gempa dan kapasitas desain.



Gambar 2 . Konsep Dasar Metode DDBD
Sumber: Priestley et al. (2007)

3. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan dengan urutan sebagai berikut:

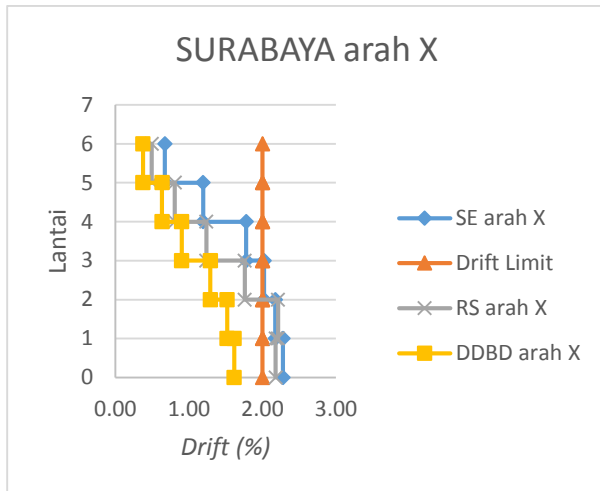
1. Mendesain bangunan berdasarkan SNI 1726-2012 untuk FBD dan DDBD menurut Priestley *et.al.* (2007) hingga didapatkan gaya geser dasar rencana (V_{base}) dan gaya inersia per lantai untuk masing-masing varian struktur.
2. Desain secara FBD dilanjutkan dengan perhitungan gaya desain yang dibutuhkan berdasarkan standar yang telah ditetapkan dalam SNI 1726-2012 dan SNI 2847-2013. Sedangkan DDBD akan dilanjutkan dengan prosedur mencari gaya desain yang telah disarankan oleh Priestley *et.al.* (2007). Hasil gaya desain kemudian digunakan untuk mencari jumlah tulangan yang dibutuhkan.
3. Analisis *moment-curvature* dari program CUMBIA (Montejo, 2007) untuk memperoleh *link-properties* yang dibutuhkan untuk modeling pada SeismoStruct v6.5 (SeismoSoft, 2007).
4. Membuat respon spektrum dari gempa El-Centro 1940 North-South yang sesuai dengan respon spektrum gempa di Surabaya dan Ambon, Indonesia dengan program SeismoMatch yang dihaluskan dengan program RESMAT (Lumantarna dan Lukito, 1997).
5. Modeling struktur di SeismoStruct v6.5 dan pengaplikasian beban akselerasi gempa modifikasi dari El-Centro sesuai dengan wilayah gempa masing-masing varian.
6. Evaluasi kinerja struktur dengan analisis dinamis *time history non-linear* dengan SeismoStruct v6.5. Output yang diperoleh berupa *drift*, *damage index*, dan *failure mechanism*.

4. HASIL DAN ANALISIS

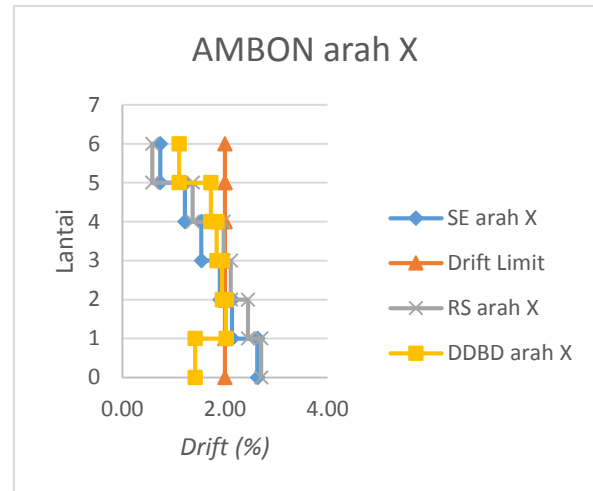
Hasil analisis ketiga metode menghasilkan kinerja struktur berupa *drift*, *damage index* dan *failure mechanism* serta *material consumption* dan *time consumption* yang akan dijabarkan satu persatu berikut ini.

4.1. Drift Ratio

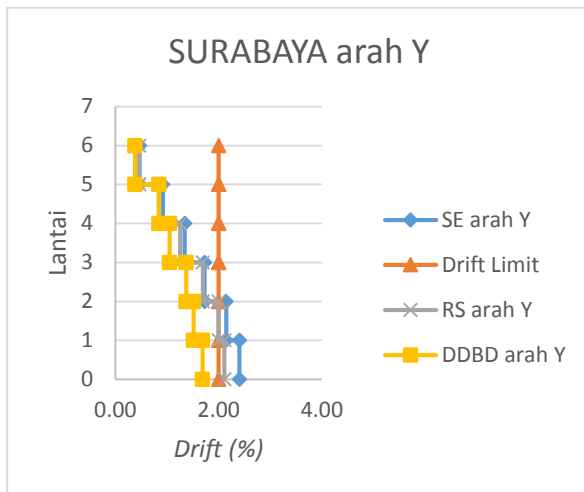
Hasil *drift* dapat dilihat pada **Gambar 3** sampai **Gambar 6**.



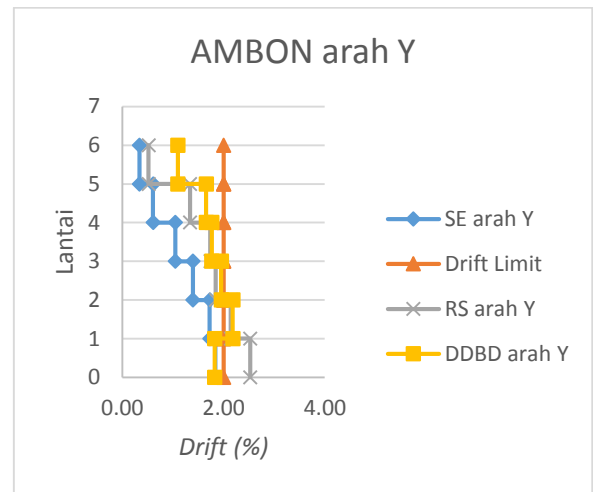
Gambar 3. Drift Surabaya X



Gambar 4. Drift Ambon X



Gambar 5. Drift Surabaya Y



Gambar 6. Drift Ambon Y

Dapat dilihat bahwa DDBD lebih unggul dalam hal *drift ratio* karena dapat menghasilkan target displacement sesuai target perhitungan. Khusus untuk DDBD AMBON arah Y, terjadi drift yang melebihi batas pada lantai 2. Namun, hal itu hanya terjadi pada detik 5,88 hingga 5,98 atau selama 0,12 s. Sehingga, dapat dianggap bahwa *displacement* desain DDBD AMBON masih bisa diterima.

4.2. Damage Index

Dari data berupa deformasi berupa rotasi pada ujung-ujung elemen-elemen struktur, diolah menggunakan *spreadsheet* dengan membandingkan rotasi yang terjadi (θ_n) dengan θ_y dan θ_u yang diperoleh dari analisis *moment-curvature* CUMBIA. Kondisi sendi plastis berdasarkan *damage index* dapat dilihat pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Kriteria *Damage Index*

Batas	Kondisi
0-0,1	<i>First Yield</i>
0,1-0,25	<i>Serviceability</i>
0,25-0,4	<i>Damage Control</i>
0,4-1	<i>Safety</i>
>1	<i>Unacceptable</i>

Damage Index Performance Matrix merupakan perbandingan metode desain terhadap tingkat kerusakan struktur yang diatur dalam SNI 1726-2012. Dalam hal ini dapat dilihat perbandingannya pada **Tabel 2** dan **Tabel 3**.

Tabel 2. *Damage Index Performance Matrix* untuk Balok

Wilayah Gempa	Metode Desain	Arah	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>
Surabaya	SE	X		O			
		Y		O			
	RSA	X		O			
		Y		O			
	DDBD	X		O			
		Y		O			
Ambon	SE	X			O		
		Y			O		
	RSA	X			O		
		Y			O		
	DDBD	X		O			
		Y			O		
<i>Damage Index</i>			< 0,1	0,1 - 0,25	0,25 - 0,4	0,4 - 1	> 1

Tabel 3. *Damage Index Performance Matrix* untuk Kolom

Wilayah Gempa	Metode Desain	Arah	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>
Surabaya	SE	X		O			
		Y		O			
	RSA	X		O			
		Y		O			
	DDBD	X	O				
		Y	O				
Ambon	SE	X		O			
		Y		O			
	RSA	X		O			
		Y		O			
	DDBD	X		O			
		Y		O			
<i>Damage Index</i>			< 0,1	0,1 - 0,25	0,25 - 0,4	0,4 - 1	> 1

O = Envelope nilai *damage index*

■ = Standar SNI 1726-2012

Dari hasil *envelope damage index*, dapat dilihat bahwa seluruh elemen struktur masih berada di bawah batas SNI 1726-2012 yakni *damage control*.

4.3. Failure Mechanism

Selain *damage index*, konfigurasi sendi plastis juga menentukan mekanisme keruntuhan bangunan. Mekanisme yang baik adalah ketika seluruh joint balok leleh tetapi hanya joint ujung bawah (lantai 1) dan ujung atas (lantai 6) kolom yang diperbolehkan leleh. Hal ini menyebabkan mekanisme keruntuhan yang aman bagi pengguna. Untuk ulasan hasil *failure mechanism* untuk ketiga metode dapat dilihat pada **Tabel 4**.

Tabel 4. Kinerja Bangunan dari Failure Mechanism

Wilayah Gempa	<i>Static Equivalent</i>	<i>Response Spectrum</i>	<i>Direct Displacement</i>
Surabaya	Mekanisme keruntuhan sangat sulit untuk dicapai. Banyak kolom yang mengalami plastis. Walaupun demikian, kondisi <i>strong column-weak beam</i> tetap terjaga. Struktur hampir mengalami <i>soft-story</i> di lantai 1.		Mekanisme keruntuhan relatif baik. Masih ada beberapa kolom pada lantai 2 dan 4 mengalami <i>first yield</i> . Tetapi, secara umum mekanisme keruntuhan dapat diterima karena kondisi <i>strong column-weak beam</i> tetap terjaga. Tidak ada kecenderungan <i>soft-story</i> .
Ambon	Mekanisme keruntuhan sangat jelek. Banyak sekali kolom yang mengalami plastis pada tempat yang tidak diperbolehkan leleh. Bahkan ada kolom yang hampir di semua lantai leleh. Terjadi <i>soft-story</i> pada portal eksterior.	Mekanisme keruntuhan yang diinginkan sama sekali tidak tercapai. Mirip dengan <i>Static Equivalent</i> Ambon, tetap menunjukkan kemungkinan terjadinya <i>soft-story</i> pada lantai 1 baik untuk portal interior maupun eksterior.	Mekanisme keruntuhan yang terjadi tidak sesuai yang diinginkan. Banyak sekali kolom yang mengalami plastis di tempat yang tidak diperbolehkan. Dan menunjukkan kemungkinan terjadi <i>soft-story</i> pada lantai 1 portal interior.

Dalam hal *failure mechanism*, DDBD lebih unggul dalam hal memprediksi mekanisme runtuhnya suatu bangunan. Terbukti dari 4 model DDBD, hampir semua mendekati *Beam Side Sway Mechanism* hanya DDBD Ambon Interior yang tidak memenuhi *failure mechanism* karena bangunan tersebut termasuk *mode 2 dominant*. Sehingga, *drift* pada bangunan tersebut menjadi besar yang berakibat pada banyak terbentuknya sendi plastis.

4.4. Material Consumption

Perbandingan kebutuhan material masing-masing metode desain dapat dilihat pada **Tabel 5**.

Tabel 5. Material Consumption

Wilayah Gempa	Surabaya (Rendah)			Ambon (Tinggi)		
	Metode	FBD - SE	FBD - RS	DDBD	FBD - SE	FBD - RS
Berat Tulangan (T)	109.97	105.76	152.34	163.81	168.46	194.38
Volume Beton (m ³)	368.89	368.89	801.54	753.83	753.83	992.05

Dalam hal *material consumption*, DDBD lebih banyak menggunakan material daripada FBD. Namun, jika melihat hasil kinerja struktur hasil desain dengan FBD, metode DDBD bisa dikatakan lebih efektif dan efisien.

4.5. Time Consumption

Kinerja bangunan berdasarkan *time consumption* dapat dilihat pada **Tabel 6**.

Tabel 6. Kinerja Bangunan Dari Time Consumption

Wilayah Gempa	<i>Static Equivalent</i>	<i>Response Spectrum</i>	<i>Direct Displacement</i>
Surabaya	Untuk memperoleh satu desain, memakan waktu dan tenaga yang banyak. Tetapi, hasil desain yang dihitung belum tentu memenuhi target desain sehingga jika hasil yang dicapai buruk, harus diulang lagi dari awal pengerjaan karena drift dan mekanisme yang terjadi tidak bisa diketahui di awal desain.		Hanya membutuhkan 1 kali perhitungan dan hasil yang diperoleh sudah cukup memuaskan.
Ambon	Mirip dengan FBD di Surabaya. Tetapi sangat sulit untuk menemukan ukuran balok dan kolom yang sesuai. Sehingga, dibutuhkan iterasi desain yang lebih banyak daripada Surabaya.		

Dalam hal *time consuming*, DDBD jauh lebih menghemat waktu, proses perhitungan lebih singkat dan mudah. Hasil yang dikeluarkan pun tidak jauh berbeda dari perencanaan karena adanya *displacement target*. Sedangkan FBD memakan banyak sekali waktu untuk mendesain dikarenakan tidak diketahuinya *displacement target*. Sehingga, untuk mendapatkan desain yang memuaskan, harus melalui perulangan dari awal beberapa kali.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil evaluasi kinerja struktur bangunan yang didesain menggunakan FBD dan DDBD pada bangunan 6 lantai di wilayah beresiko gempa rendah dan tinggi di Indonesia, dapat disimpulkan:

- DDBD memiliki kinerja yang jauh lebih baik daripada FBD.
- Proses desain DDBD lebih efektif dan efisien dibandingkan proses desain FBD.
- Biaya untuk membangun bangunan dengan desain DDBD lebih mahal daripada desain FBD.

Penelitian ini mengindikasikan bahwa hasil desain metode *static equivalent* dan *response spectrum* versi SNI 1726-2012 menghasilkan *drift* yang berlebih dan menunjukkan kemungkinan terjadinya *soft-story*. Untuk itu, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut pada bangunan-bangunan yang lain.

6. DAFTAR REFERENSI

- Budiono, B. (2011). "Konsep SNI Gempa 1726-201X." *Konstruksi Indonesia Melangkah ke Masa Depan*. Seminar HAKI 2011, Jakarta, Indonesia, 26 - 27 Juli.
- Departemen Pekerjaan Umum. (2012). *SNI 1726-2012 Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non-gedung*, Badan Standarisasi Nasional, Jakarta, Indonesia.
- Ghosh, S.K. and Fanella, D.A. (2003). *Seismic and Wind Design of Concrete Buildings*, International Code Council, United States.
- Lumantarna, B. dan Lukito, M. (1997). "RESMAT Sebuah Program Interaktif untuk Menghasilkan Riwayat Waktu Gempa dengan Spektrum Tertentu." *Proceedings of HAKI Conference 1997*, Jakarta, Indonesia, August 13 - 14.
- Montejo, L.A. (2007). *CUMBIA*, Department of Civil, Construction, and Environmental Engineering North Carolina State University, North Carolina, United States.
- Priestley, M.J.N., Calvi, G.M. and Kowalsky, M.J. (2007). *Displacement-Based Seismic Design of Structure*, IUSS Press, Pavia, Italy.
- SeismoSoft. (2007). *SeismoStruct – A Computer Program for Static and Dynamic Nonlinear Analysis of Framed Structure*, Seismosoft, Pavia, Italy.
- Widodo. (2011). *Seismologi Teknik & Rekayasa Kegempaan*, Pustaka Pelajar, Yogyakarta, Indonesia.