

EVALUASI KINERJA BANGUNAN BERLUBANG DENGAN METODE *DIRECT DISPLACEMENT-BASED DESIGN*

Merline Sutandi¹, Donovan Alfa Mboe², Ima Muljati³ dan Benjamin Lumantarna⁴

ABSTRAK : Banyak penelitian mengenai kinerja Direct Displacement Based Design (DDBD) dan Force Based Design (FBD) telah dilakukan sebelumnya. Penelitian-penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa DDBD menghasilkan performa struktur yang lebih mendekati target desain. Namun, penelitian terhadap bangunan berlubang belum pernah dilakukan sebelumnya. Konfigurasi struktur dengan *void* memiliki kekakuan portal yang bervariasi di mana hal ini mempengaruhi distribusi gaya pada setiap portal. Distribusi gaya pada bagian yang memiliki *void* akan mengalami perpindahan yang lebih besar daripada bagian yang tidak memiliki *void* khususnya jika pelat lantai diasumsikan *semi rigid*. Penelitian ini membandingkan kinerja FBD dan DDBD pada bangunan yang didesain berlubang atau memiliki *void* dengan asumsi desain bangunan tanpa lubang dan gaya geser dasar didistribusikan secara merata. Penelitian akan dievaluasi terhadap wilayah beresiko gempa tinggi dan rendah di Indonesia. 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*. Selain itu, prosedur DDBD lebih efektif dan efisien karena hasil desain mendekati *target* desain dan durasi desain sangat singkat. Satu-satunya kelemahan dari DDBD adalah biaya yang lebih mahal karena hasil desain yang menggunakan lebih banyak material.

KATA KUNCI: Direct Displacement Based Design, Force Based Design

1. PENDAHULUAN

Penelitian mengenai perbandingan kinerja metode *Force-Based Design* dan *Direct Displacement-Based Design* ini telah banyak dilakukan. Penelitian membuktikan mengenai pengujian kelayakan metode DDBD sangat efektif untuk digunakan dalam perencanaan struktur gempa. Metode DDBD menunjukkan performa bangunan lebih mendekati target desain dibandingkan dengan metode FBD. Penelitian kelayakan metode DDBD telah dilakukan terhadap struktur pada bangunan reguler (Muljati et al., 2013), struktur dengan ketidakberaturan sudut dalam (Wijaya dan Wijaya, 2013), struktur dengan ketidakberaturan geometri vertikal (Luis dan Glorie, 2013), struktur gedung dengan denah tipikal (Asisi dan Willyanto, 2014) serta beberapa penelitian lain telah dilakukan dan hasilnya sangat baik. Namun belum pernah dilakukan penelitian DDBD terhadap bangunan dengan *atria/atrium*. Oleh karena itu, perlu adanya verifikasi kembali mengenai kinerja metode DDBD dan FBD. Dalam penelitian ini, akan didesain sebuah bangunan 6-lantai dengan *void* pada wilayah beresiko gempa rendah dan tinggi dengan denah tipikal. Struktur tersebut akan didesain dengan metode FBD, yakni *Static Equivalent* (SE) dan dengan metode DDBD.

¹ Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra Surabaya, merlinesutandi@me.com.

² Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra Surabaya, donalfa28@gmail.com.

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

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

2. LANDASAN TEORI

2.1. Force-Based Design

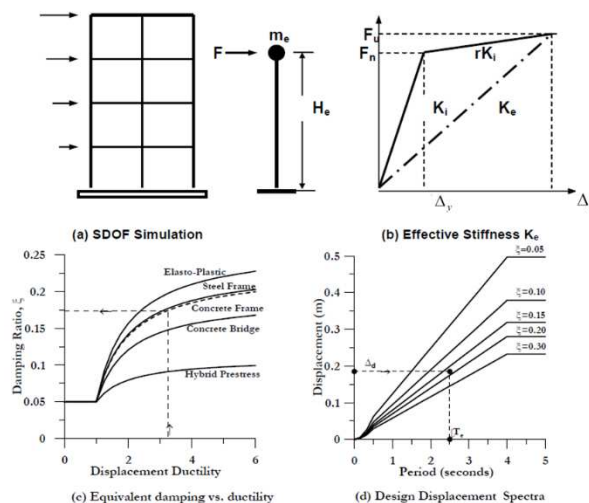
Gempa akan menimbulkan getaran/goyangan pada tanah ke segala arah dan menggetarkan bangunan yang berdiri di atas tanah tersebut. Pada dasarnya sebuah bangunan yang terkena gempa akan cenderung tidak bergerak karena mempertahankan bentuknya. Hal ini menimbulkan suatu gaya inersia pada bangunan. *Force-Based Design* menggunakan gaya inersia tersebut pada bangunan yang ditentukan oleh berat bangunan, koefisien modifikasi respons (R), dan faktor reduksi gaya (C_d).

2.1.1. 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. 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 1(a)**. Hubungan gaya dan perpindahan yang ditunjukkan pada **Gambar 1(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 1(c)**. Perpindahan rencana (Δ_d) pada saat respons maksimum dan estimasi damping yang didapat dari macam-macam *displacement spectrum* seperti pada **Gambar 1(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 1 . Konsep Dasar Metode DDBD
Sumber: Priestley et al. (2007)

3. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan dengan urutan sebagai berikut:

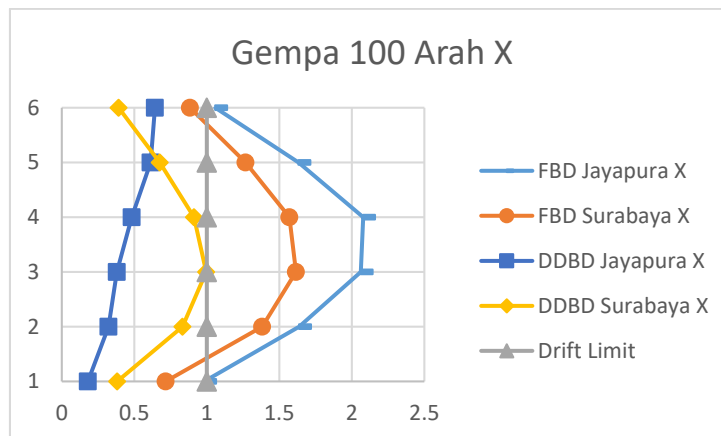
1. Mendesain bangunan berdasarkan SNI 1726-2012 untuk FBD dan DDBD menurut Priestley *et.al.* (2007) hingga didapatkan gaya geser dasar rencana (V_{base}) dan gaya inersia perantai untuk struktur bangunan.
2. Desain secara FBD dilanjutkan dengan perhitungan gaya desain yang dibutuhkan berdasarkan standar yang telah ditetapkan dalam SNI 1726-2012. 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 diinputkan pada program ETABS dalam perhitungan *Time History*.
4. Pengaplikasian beban akselerasi gempa modifikasi dari El-Centro sesuai dengan wilayah gempa masing-masing.
5. Evaluasi kinerja struktur dengan analisis dinamis *time history non-linear*. Output yang diperoleh berupa *drift*, *damage index*, dan *failure mechanism*.

4. HASIL DAN ANALISIS

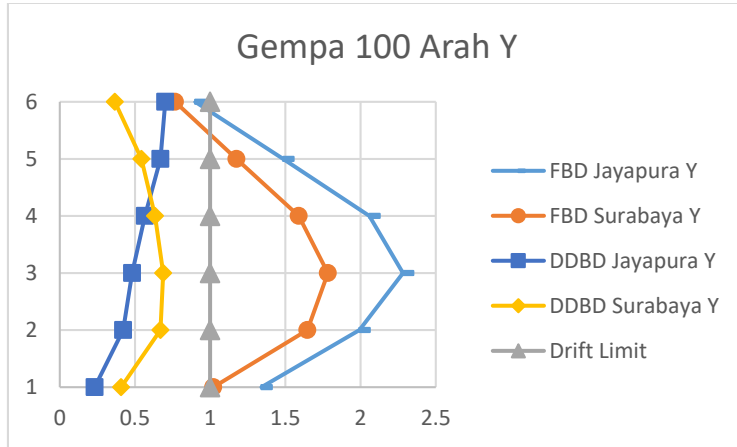
Hasil analisis ketiga metode menghasilkan kinerja struktur berupa *drift*, *damage index* dan *failure mechanism* serta *time consumption* yang akan dijabarkan satu persatu berikut ini.

4.1. Drift Ratio

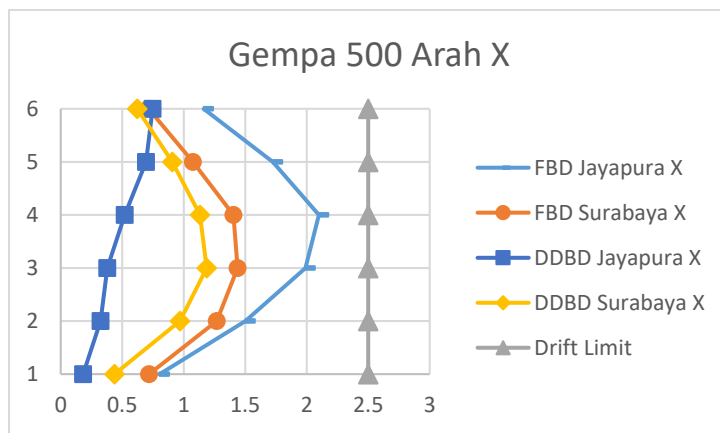
Hasil *drift* dapat dilihat pada **Gambar 2** sampai **Gambar 13**.



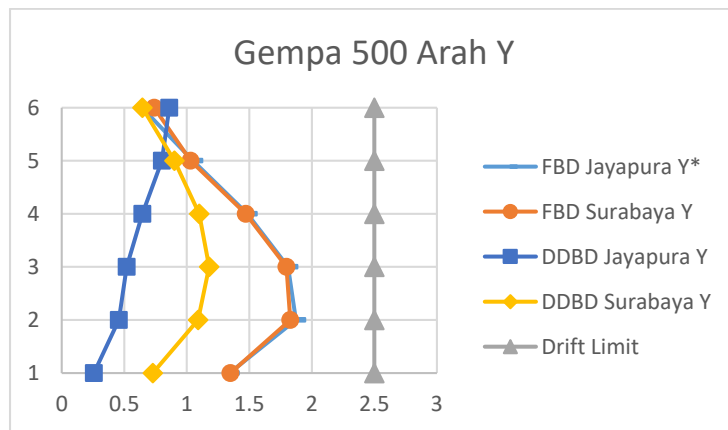
Gambar 2. *Drift* Arah X Periode Gempa 100 Tahun



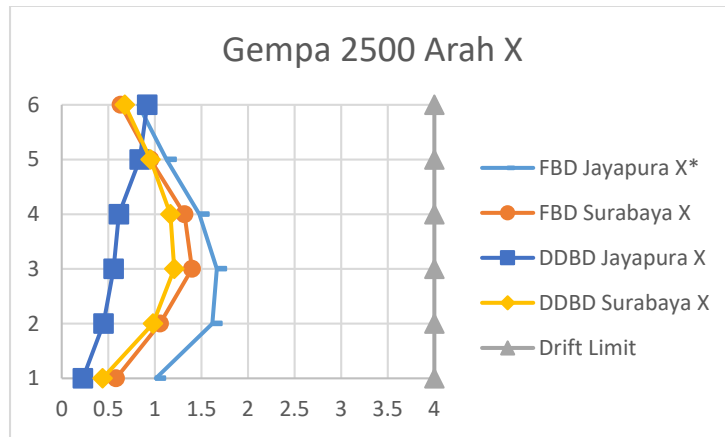
Gambar 3. Drift Arah Y Periode Gempa 100 Tahun



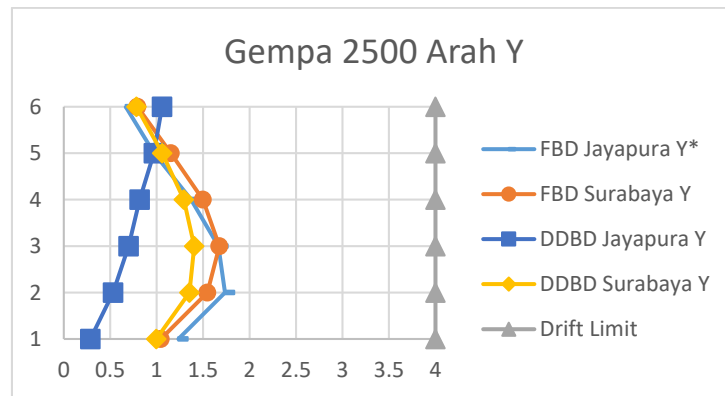
Gambar 4. Drift Arah X Periode Gempa 500 Tahun



Gambar 5. Drift Arah Y Periode Gempa 500 Tahun



Gambar 6. Drift Arah X Periode Gempa 2500 Tahun



Gambar 7. Drift Arah Y Periode Gempa 2500 Tahun

Dari data yang ditampilkan dalam **Gambar 2** sampai **Gambar 7**, dapat disimpulkan bahwa kinerja bangunan yang didesain menggunakan DDBD pada wilayah Surabaya dan Jayapura lebih baik jika dibandingkan dengan FBD. Pada **Gambar 2** dan **Gambar 3** terlihat FBD memiliki hasil yang melebihi *drift limit* yang diijinkan. Pada **Gambar 4** sampai **Gambar 7** terlihat bahwa DDBD dan FBD memiliki hasil yang sama baik. Akan tetapi, pada saat menjalankan *time history analysis* bangunan yang didesain metode FBD periode gempa 500 tahun tinjau arah Y, 2500 tahun tinjau arah X dan 2500 tahun tinjau arah Y masing-masing berhenti pada detik ke 11.545, 7.335 dan 6.315.

4.2. Damage Index

Selain nilai *drift ratio*, terdapat nilai *damage index* yang dapat digunakan untuk mengevaluasi kinerja bangunan. 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). Persyaratan DDBD berbeda dengan FEMA 356, dan kriteria yang digunakan DDBD sangat ketat bila dibandingkan dengan FEMA 356 seperti yang telah dijelaskan pada sub bab 3.7. Hasil *damage index* balok dan kolom selengkapnya dapat dilihat pada **Tabel 2** dan **Tabel 3**.

Tabel 2. Damage Index Performance Matrix untuk Balok

Wilayah Resiko Gempa	Periode Ulang Gempa TH	<i>First Yield</i>	<i>No Damage</i>	<i>Repairable Damage</i>	<i>No Collapse</i>
DDBD Surabaya	100 tahun				X,Y
	500 tahun				X,Y
	2500 tahun				X,Y
DDBD Jayapura	100 tahun		X	Y	
	500 tahun				X,Y
	2500 tahun				X,Y
S.E Surabaya	100 tahun				X,Y
	500 tahun				X,Y
	2500 tahun				X,Y
S.E Jayapura	100 tahun				X,Y
	500 tahun				X,Y
	2500 tahun				X,Y

= not acceptable

Tabel 3. Damage Index Performance Matrix untuk Kolom

Wilayah Resiko Gempa	Periode Ulang Gempa TH	<i>First Yield</i>	<i>No Damage</i>	<i>Repairable Damage</i>	<i>No Collapse</i>
DDBD Surabaya	100 tahun	X	Y		
	500 tahun	X			Y
	2500 tahun				X,Y
DDBD Jayapura	100 tahun		X	Y	
	500 tahun				X,Y
	2500 tahun				X,Y
S.E Surabaya	100 tahun				X,Y
	500 tahun				X,Y
	2500 tahun				X,Y
S.E Jayapura	100 tahun				X,Y
	500 tahun				X,Y
	2500 tahun				X,Y

= not acceptable

Kerusakan bangunan pada wilayah Jayapura hampir sama dengan bangunan pada wilayah Surabaya. Balok pada bangunan yang didesain baik secara DDBD maupun FBD memberikan hasil yang hampir mirip. Balok pada wilayah Jayapura yang didesain secara DDBD memberikan hasil yang cukup baik pada gempa rendah namun belum memenuhi kriteria yang ditetapkan metode DDBD. Pada kolom, DDBD memberikan hasil yang lebih baik meskipun ada beberapa yang tidak memenuhi kriteria yang ditetapkan DDBD. Kriteria yang ditetapkan DDBD sangat ketat bila di bandingkan dengan FEMA 356. Bisa saja pada DDBD tidak memenuhi namun pada FEMA 356 masih dalam batas aman.

4.3. Failure Mechanism

Selain *Damage Index*, konfigurasi sendi plastis juga menentukan mekanisme keruntuhan bangunan. Keruntuhan yang baik adalah ketika joint balok leleh dan joint kolom hanya diperbolehkan pada ujung kolom lantai ujung bawah dan atas. Untuk konsep desain *strong column weak beam*, bangunan pada wilayah gempa Surabaya dan Jayapura memenuhi konsep desain tersebut. Walaupun Namun jika dilihat terdapat beberapa kolom yang diperbolehkan mengalami sendi plastis terjadi dan ada yang tidak diperbolehkan juga terjadi. Untuk yang diperbolehkan, ada yang berada dalam kondisi *no collapse* tetapi balok pada *joint* yang sama berada dalam kondisi *first yield*. Hal ini tidak berarti kolom berada 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 sidesway mechanism* karena ada kolom yang mengalami leleh di tempat yang tidak seharusnya. Namun beberapa bangunan dengan desain menggunakan metode FBD tidak dapat dianalisis. Bangunan yang tidak dapat dianalisis adalah bangunan yang dicoba pada gempa 500 arah Y, gempa 2500 arah X dan gempa 2500 arah Y.

4.4. Time Consumption

Kinerja bangunan berdasarkan *time consumption* dapat dilihat pada **Tabel 4**.

Tabel 4. Kinerja Bangunan Time Consumption

Wilayah Gempa	Static Equivalent	Direct Displacement
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.
Jayapura	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 lebih menghemat waktu jika dilakukan dengan mengikuti DDBD menggunakan level 3 (*low seismicity*) untuk Surabaya dan level 2 (*high seismicity*) untuk Jayapura sesuai dengan *A Model Code for Displacement-Based Seismic Design of Structures DBD12* dari *Priestley et al.* (2007). Akan tetapi jika menggunakan desain pada 3 level berbeda dan diambil hasil yang paling baik maka DDBD memakan waktu yang lebih lama dibandingkan FBD.

5. KESIMPULAN

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

- DDBD memiliki kinerja yang lebih baik karena memberikan hasil yang mendekati *target* desain. Catatan: *Time History Analysis* pada metode FBD yang mengalami *Convergence Error* yang dikarenakan bangunan hancur.
- Biaya untuk membangun bangunan dengan metode desain DDBD sangat mahal bila dibandingkan dengan metode desain FBD.
- Desain dengan membagi rata distribusi gaya tanpa memperhatikan lubang atau *rigid*, sebaiknya tidak dilakukan.

Dari hasil yang telah didapatkan maka perlu dilakukan penelitian lagi mengenai distribusi gaya pada bangunan dengan lubang dan meneliti perbandingan DDBD dan FBD dengan *target* desain berbeda terhadap FBD menggunakan *Static Equivalent* dan *Response Spectrum*. Juga perlu dicek pengaruh letak lubang pada denah yang tidak simetris terhadap desain DDBD dan pengaruh coakan yang besar pada bangunan yang tidak dapat di dilatasi terhadap desain DDBD.

6. 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*. (Tugas Akhir No. 1101 1996/SIP/2014). Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra. Surabaya.
- Budiono, B. (2011). "Konsep SNI Gempa 1726-201X." *Konstruksi Indonesia Melangkah ke Masa Depan*. Seminar HAKI 2011, 26 - 27 Juli, Jakarta, Indonesia.
- Luis, V. dan Glorie, S.M. (2013). *Evaluasi Kinerja Metode Direct Displacement-Based Design dan Force Based Design pada Bangunan Vertical Setback 6 Lantai*. (Tugas Akhir No. 1101 1891/SIP/2013). Program Studi Teknik Sipil. Universitas Kristen Petra. Surabaya.
- Montejo, L.A. (2007). *CUMBIA* [Computer Software]. 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.
- Priestley, M.J.N., Calvi, G.M. dan Kowalsky, M.J. (2007). *Displacement-Based Seismic Design of Structure*. IUSS Press. Pavia.
- Wijaya, C. dan Wijaya, S.W. (2013). *Evaluasi Kinerja Direct Displacement Based Design dan Force Based Design Bangunan Irregular Plan 6-Lantai*. (Tugas Akhir No. 11011894/SIP/2013). Program Studi Teknik Sipil. Universitas Kristen Petra. Surabaya.