

EVALUASI KINERJA *DIRECT-DISPLACEMENT BASED DESIGN* PADA PERENCANAAN BANGUNAN DENGAN KETIDAKBERATURAN TINGKAT LUNAK

Adrian Hartanto Luih¹, Kevin Agusta², Ima Muljati³, Benjamin Lumantarna⁴

ABSTRAK: Saat ini banyak ditemui bangunan yang memiliki satu atau dua lantai yang tingginya lebih besar dari lantai-lantai yang lainnya. Pada perencanaan ketahanan gempa, kondisi ini dapat menghasilkan lantai yang lunak yang mengarah pada keruntuhan *soft storey*. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui apakah adanya lantai lunak dapat mempengaruhi rumusan distribusi vertikal gaya pada setiap lantai yang digunakan untuk bangunan beraturan, jika didesain dengan metode *Direct-Displacement Based Design* (DDBD). Selanjutnya, penelitian ini juga mengevaluasi kinerja bangunan untuk mengetahui responnya terhadap gaya gempa. Sebagai studi kasus, dipilihlah bangunan perkantoran 8 lantai dengan denah tipikal di Surabaya dan Jayapura. Bangunan berupa sistem rangka beton bertulang dengan lantai lunak di lantai dasar dan lantai 5. Struktur direncanakan menggunakan metode DDBD pada target kinerja level-1 – *no damage*, level-2 – *repairable damage* dan level-3 – *no collapse*, dan dianalisis kinerjanya menggunakan analisis non-linier dinamis riwayat waktu pada gempa kecil, sedang dan besar. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perencanaan DDBD paling aman adalah desain dengan level-1 karena meskipun bangunan dengan sengaja didesain memiliki tingkat lunak, bangunan masih memiliki kinerja yang baik di semua level gempa, baik diukur dalam parameter *drift ratio*, *damage index*, maupun mekanisme keruntuhannya. Untuk penelitian lebih lanjut dengan tinggi lantai yang besar disarankan membuat kolom dengan kekakuan lateral diatas kriteria tingkat lunak (kolom yang lebih kaku), supaya tidak memiliki tingkat lunak.

KATA KUNCI: *Direct-Displacement Based Design*, ketidakberaturan tingkat lunak, analisis non-linier dinamis riwayat waktu, perencanaan berbasis kinerja.

1. PENDAHULUAN

Saat ini banyak ditemui bangunan yang memiliki satu atau dua lantai yang tingginya lebih besar dari lantai-lantai yang lainnya. Fischl dan Gärling (2004) menemukan bahwa plafon yang tinggi dapat mempengaruhi psikologis konsumen. Ruangan demikian dapat digunakan untuk restoran atau ruang serbaguna. Namun pada perencanaan ketahanan gempa, kondisi tersebut dapat menghasilkan lantai lunak yang mengarah pada keruntuhan *soft storey mechanism* (Arlekar et al. 1997, Dogan et al. 2002).

Menurut Tabel 11 SNI-1726:2012 pasal 1a, “ketidakberaturan kekakuan tingkat lunak didefinisikan ada jika terdapat suatu tingkat di mana kekakuan lateralnya kurang dari 70 persen kekakuan lateral tingkat di atasnya atau kurang dari 80 persen kekakuan rata-rata tiga tingkat di atasnya”. Struktur dengan tingkat lunak ini akan memperbesar deformasi lateral dan gaya geser pada kolom (Setia & Sharma 2012).

Saat ini telah dikembangkan metode baru yakni *Displacement Based Design* (DBD). *Direct-Displacement Based Design* (DDBD) yang dikembangkan oleh Priestley et al. (2007) merupakan varian DBD yang paling prospektif dikembangkan karena memiliki relasi langsung dengan perpindahan struktural (Judi et al. 2000). Dari banyak penelitian yang telah dilakukan, DDBD terbukti memiliki kinerja yang sangat baik, yakni memberikan hasil yang mendekati *target design*, dengan proses desain

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

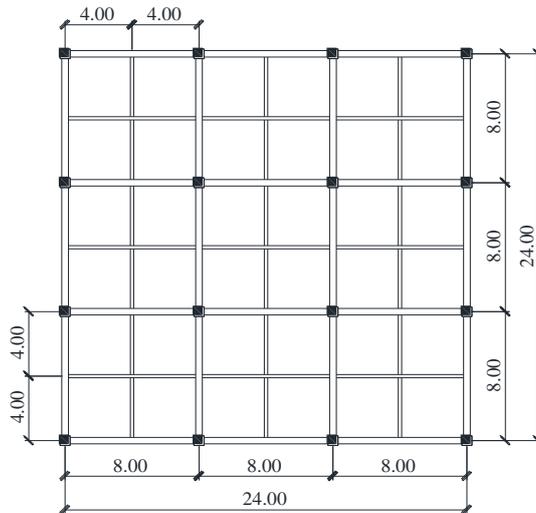
² Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra Surabaya, kevinagusta08@gmail.com.

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

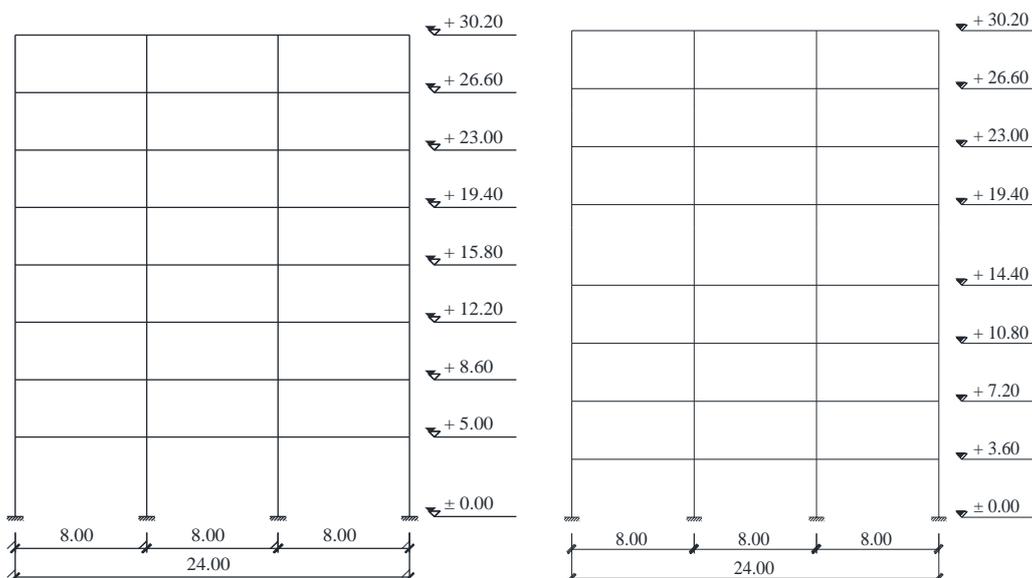
⁴ Dosen Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra Surabaya, bluman@peter.petra.ac.id.

yang lebih efektif dan efisien, meskipun biaya untuk membangun bangunan dengan desain DDBD terbilang cukup mahal dibandingkan dengan metode desain lainnya (Asisi & Willyanto 2014).

Dalam penelitian kali ini, denah bangunan yang diteliti memiliki bentang 8 meter dengan 3 bentang (seperti pada **Gambar 1** dan **2**), baik untuk arah-x maupun arah-y. Masing-masing denah memiliki dua varian, yakni Varian A dan Varian B. Varian A adalah bangunan dengan tingkat lunak di lantai dasar, sedangkan Varian B adalah bangunan dengan tingkat lunak di lantai 5. Tinggi antar lantainya adalah 5 meter untuk tingkat lunak dan 3.6 meter pada masing-masing tingkat yang lain. Masing-masing bangunan ditinjau terhadap dua wilayah, yaitu wilayah dengan risiko gempa rendah (Surabaya) dan tinggi (Jayapura). Beban gempa yang digunakan adalah El-Centro 15 April 1940 N-S yang dimodifikasi sesuai respon spektrum kota Surabaya maupun Jayapura (contohnya pada **Gambar 3**). Permodelan bangunan, modifikasi respon spektrum, dan analisis dinamis nonlinier riwayat waktu menggunakan *software* ETABS 2015 v15.2.2.



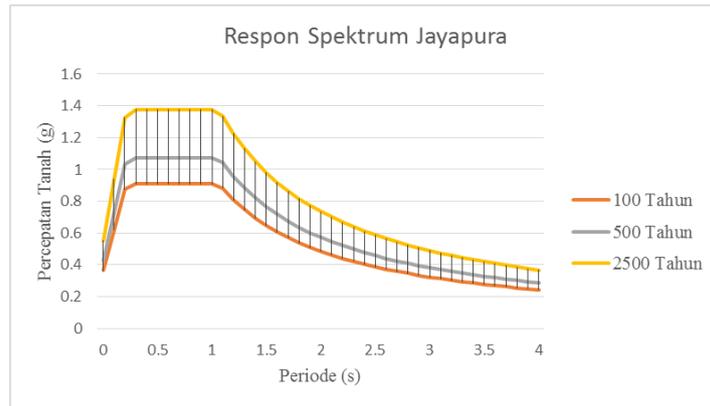
Gambar 1. Denah Struktur Bangunan



(a) Varian A dengan Tingkat Lunak di lantai dasar

(b) Varian B dengan Tingkat Lunak di lantai 5

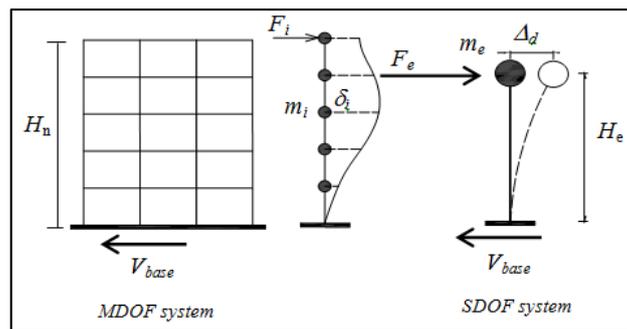
Gambar 2. Gambar Potongan



Gambar 3. Contoh Beban Gempa yang Digunakan pada Kota Jayapura

2. LANDASAN TEORI

Pada DDBD, prosedur desain diawali dengan menghitung *mode shape* dengan Persamaan 1 dan perpindahan acuan pada dasar bangunan sesuai dengan kriteria kinerja desain acuan yang dituju (*strain* atau *drift limits*). Kemudian, dicari perpindahan rencana pada struktur SDOF pengganti dengan Persamaan 2. Proses ini juga digambarkan pada **Gambar 4**.



Gambar 4. Pemodelan SDOF dari Bangunan MDOF.
Sumber: Priestly *et al* (2007)

Perhitungan kemudian dilanjutkan dengan serangkaian rumus-rumus, yakni untuk menghitung gaya geser dasar (*design base shear*), hingga mendistribusikan gaya geser dasar tersebut ke setiap lantai menurut cara perhitungan yang telah ditentukan oleh Priestley *et al* (2007).

3. PROSEDUR PERENCANAAN

Mutu material yang digunakan dalam penelitian ini disajikan dalam **Tabel 1** berikut. Untuk tegangan leleh dan *ultimate* tulangan yang digunakan dalam perhitungan, diambil nilai *overstrength* (perkuatan) 1.1 dari tegangan leleh yang sesungguhnya (Priestley *et al.*, 2007).

Tabel 1. Karakteristik Mutu Material

Material	Mutu Material (MPa)	<i>Overstrength</i> Mutu Material (MPa)
Beton (f_c')	30	30
Tulangan longitudinal (f_y)	400	440
Tulangan sengkang balok (f_y)	400	440
Tulangan sengkang kolom (f_y)	400	440

Beban mati dan beban hidup yang digunakan sesuai dengan SNI 1727-2013. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Beban Mati dan Beban Hidup pada Bangunan

Jenis Beban	Besar Beban
Berat sendiri struktur beton bertulang	2,400 kg/m ³
Beban dinding	650 kg/m ³
Beban <i>finishing</i> (keramik, spesi, plafon, <i>ducting</i>)	122.8 kg/m ²
Beban hidup atap	97.86 kg/m ²
Beban hidup non atap	244.65 kg/m ²

Beban gempa yang digunakan adalah gempa El-Centro 1940 *North-South* yang sudah disesuaikan dengan respons spektrum gempa di Surabaya dan Jayapura. Respons spektrum gempa tersebut diambil dari SNI 1726-2012 dan dikonversikan menjadi gempa periode ulang 100, 500, dan 2500 tahun seperti pada **Tabel 3** dan **Tabel 4**.

Tabel 3. Konversi Percepatan Tanah Puncak Surabaya

Jenis Tanah	100 Tahun			500 Tahun			2500 Tahun		
	PBA	FPGA	PSA	PBA	FPGA	PSA	PBA	FPGA	PSA
B. Batuan	0.09	1	0.09	0.19	1	0.19	0.33	1	0.33
C. Tanah Keras	0.09	1.2	0.11	0.19	1.2	0.23	0.33	1.07	0.35
D. Tanah Sedang	0.09	1.6	0.15	0.19	1.42	0.27	0.33	1.17	0.38
E. Tanah Lunak	0.09	2.5	0.23	0.19	1.78	0.34	0.33	1.12	0.37

Sumber : Pusat Penelitian dan Pengembangan Permukiman – Kementerian Pekerjaan Umum, 2011).

Tabel 4. Konversi Percepatan Tanah Puncak Jayapura

Jenis Tanah	100 Tahun			500 Tahun			2500 Tahun		
	PBA	FPGA	PSA	PBA	FPGA	PSA	PBA	FPGA	PSA
B. Batuan	0.26	1	0.26	0.44	1	0.44	0.61	1	0.61
C. Tanah Keras	0.26	1.14	0.3	0.44	1	0.44	0.61	1	0.61
D. Tanah Sedang	0.26	1.28	0.33	0.44	1.06	0.47	0.61	1	0.61
E. Tanah Lunak	0.26	1.4	0.36	0.44	0.9	0.4	0.61	0.9	0.55

Sumber : Pusat Penelitian dan Pengembangan Permukiman – Kementerian Pekerjaan Umum, 2011).

4. HASIL DAN ANALISIS

Data-data hasil analisis dinamis tersebut diambil dari ETABS 2015 dan disajikan dalam bentuk tabel dan gambar. Semua hasil analisis yang ditampilkan diambil dari 1 arah saja karena denah bangunan simetris untuk arah-x dan -y.

4.1. *Drift Ratio*

Drift ratio merupakan perbedaan perpindahan antara satu lantai dengan lantai di atasnya/ dibawahnya yang kemudian dibagi dengan tinggi lantai yang dituju. Data *drift ratio* diteliti menggunakan ETABS 2015 v.15.2.2.

Menurut data yang didapatkan, beberapa sendi plastis timbul di lantai lunak yang sudah direncanakan. Namun, ada juga sebagian kecil kolom yang mengalami sendi plastis pada lantai dasar karena kapasitasnya tidak mampu menahan gaya tekan yang terjadi di ujung bawah kolom. Sendi plastis yang

terjadi masih dalam batasan toleransi *drift* setiap level, dimana batasan ini masih dalam batas perencanaan, sehingga masih dapat dikatakan tepat sasaran.

4.2. Damage Index

Dalam penelitian ini persyaratan *damage index* yang digunakan mengacu kepada *Model Code* DDBD, dimana di dalamnya terdapat empat 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 5 - Tabel 6**.

Tabel 5. 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	B1,A1,A2	B2,A3,B3		
	500 tahun		A1,B1,A2,B2,B3	A3	
	2500 tahun		A1,B1,A2	B2,B3	A3
Jayapura	100 tahun	B1,A1	B2,B3,A2	A3	
	500 tahun	B1,A1	A2	B2,A3,B3	
	2500 tahun		B1,A1,A2		B2,A3,B3

= not acceptable

Tabel 6. 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	B1,A1,B2,B3	A2		A3
	500 tahun	B1	A1		A2,B2,A3,B3
	2500 tahun	B1		A1	A2,B2,A3,B3
Jayapura	100 tahun	B1			B2,A1,A3,A2,B3
	500 tahun	B1			B2,A1,A3,A2,B3
	2500 tahun				B2,B1,A1,A3,A2,B3

= not acceptable

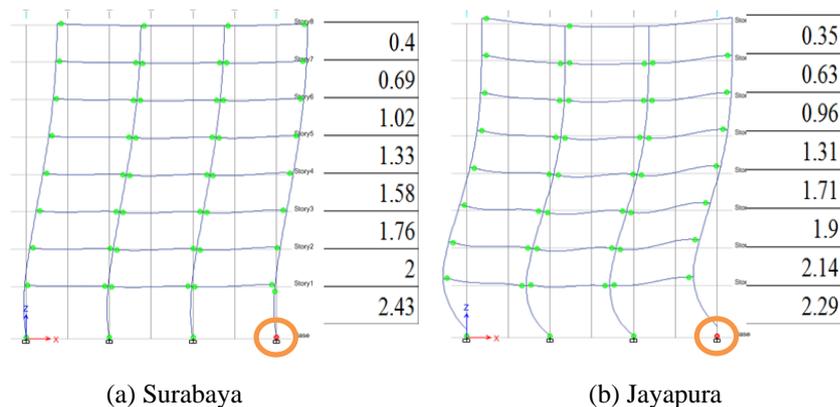
Dari data yang telah ditampilkan, bangunan yang berada dalam wilayah Surabaya memiliki kinerja yang cukup baik pada baloknya. Kerusakan balok pada semua bangunan masuk dalam persyaratan dan bisa diterima, kecuali bangunan Jayapura level-3 Varian A (dengan tingkat lunak di lantai dasar). Namun, jika kita melihat dari *Damage Index* kolomnya, ada banyak bangunan yang tidak memenuhi persyaratan, yakni bangunan Surabaya: A2, B2; dan bangunan Jayapura: A1, A2, B2 (dengan A adalah varian dengan tingkat lunak di lantai dasar dan B adalah varian dengan tingkat lunak di lantai 5, sedangkan angka 1-3 adalah level bangunan yang didesain dengan DDBD). Namun, kerusakan bangunan di Surabaya masih lebih baik daripada kerusakan bangunan di Jayapura karena bangunan yang memenuhi persyaratan di Surabaya lebih banyak daripada Jayapura.

Kerusakan bangunan pada wilayah Jayapura hampir sama dengan bangunan pada wilayah Surabaya. Balok pada bangunan Jayapura mengalami cukup banyak kerusakan. Namun untuk kolomnya, kerusakan kolom yang terjadi kebanyakan pada fase *no collapse*. Hal tersebut terjadi karena persyaratan DDBD yang begitu ketat dibandingkan dengan FEMA 356. 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. Selain itu, hal ini juga dipengaruhi oleh bangunan yang dengan sengaja didesain memiliki tingkat lunak.

4.3. *Soft Storey Mechanism*

Ada beberapa sendi plastis timbul di lantai lunak yang sudah direncanakan (contoh pada **Gambar 5**). Sendi plastis yang terjadi masih dalam batasan toleransi drift setiap level, dimana batasan ini masih dalam batas perencanaan, sehingga masih dapat dikatakan tepat sasaran.



Gambar 5. Deformed Shape disertai Drift Ratio (%) pada Bangunan Level-3 Varian A (Tingkat Lunak di Lantai Dasar) dengan Periode Ulang Gempa 2500 tahun

Setelah itu, dilakukan pemeriksaan lebih lanjut pada detik terakhir time history, yakni setelah gempa berakhir (atau sampai berakhirnya Time History Analysis akibat non-konvergensi pada saat analisis), apakah kolom mengalami tarik atau tidak. Hal ini merupakan salah satu faktor yang menentukan apakah elemen struktur masih memiliki kapasitas pada kolom cukup atau tidak. Jika pada detik terakhir masih terjadi tekan pada kolom dan kapasitas kolom mampu menahan gaya tersebut, maka dapat dikatakan bahwa bangunan tersebut aman. Untuk wilayah Surabaya semua kolom pada Varian B dapat dikatakan aman, sedangkan pada Varian A level-2 dan level-3 THA berakhir sebelum mencapai 30 detik karena ada kegagalan kolom (melebihi toleransi yang diberikan). Untuk wilayah Jayapura, kolom-kolom pada Varian A level-1 dan Varian B level-1 saja yang dapat dikatakan aman, karena THA untuk Varian A&B level-2 dan -3 berakhir sebelum mencapai 30 detik akibat kegagalan kolom (melebihi toleransi yang diberikan).

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

1. Rumusan distribusi vertikal gaya pada setiap lantai untuk bangunan beraturan tidak dapat diterapkan pada bangunan dengan tingkat lunak jika didesain dengan metode DDBD.
2. Kinerja bangunan dengan tingkat lunak yang didesain dengan metode DDBD adalah sebagai berikut:
 - Desain dengan level-1 secara keseluruhan cukup memuaskan karena bangunan dapat bertahan dalam batas-batas toleransi yang diberikan tanpa adanya kegagalan pada kolom.

- Desain dengan level-2 dan -3 pada wilayah Surabaya dengan Varian B sudah cukup memuaskan karena bangunan dapat berahan dalam batas-batas toleransi yang diberikan tanpa adanya kegagalan pada kolom.
- Desain dengan level-2 dan -3 pada Varian A (tingkat lunak di lantai dasar) dan Jayapura (baik Varian A maupun Varian B-tingkat lunak di lantai 5) tidak begitu memuaskan karena meskipun *drift ratio* yang terjadi masih dalam batas toleransi, ada kolom yang telah mengalami kegagalan. Alasannya diperkirakan karena bangunan dengan sengaja didesain dengan tingkat lunak, sehingga mengalami kegagalan yang cukup awal ketika gempa terjadi.

5.2. Saran

Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk mengatasi *soft storey mechanism* pada perencanaan bangunan yang memiliki ketidakberaturan tinggi lantai seperti yang telah diteliti pada skripsi ini, dengan kekakuan lateral yang cukup stabil (tidak menghasilkan tingkat lunak). Disamping itu, juga perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai perencanaan DDBD pada bangunan yang lebih tinggi (dengan jumlah lantai yang lebih banyak).

6. DAFTAR REFERENSI

- Arlekar, J.N., Jain, S.K., and Murty, C.V.R. (1997). Seismic Response of RC Frame Buildings with Soft First Storeys, *Proceedings of the CBRI Golden Jubilee Conf. on Natural Hazards in Urban Habitat*, New Delhi.
- Asisi, F. & 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.
- Badan Standardisasi Nasional (2012). *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Gedung*, SNI-03-1726-2012.
- Badan Standardisasi Nasional (2013). *Beban Minimum untuk Perancangan Bangunan Gedung dan Struktur Lain*, SNI-1727-2013.
- Dogan, M., Kirac, N. and Gonen, H. (2002). Soft Storey Behaviour in an Earthquake and Samples of Izmit-Duzce, *ECAS International Symposium on Structural and Earthquake Engineering 2002*, Ankara, Turkey, 42-49.
- Fischl, G. & Gärling, A. (2004). Enhancing Well-Being in Health Care Facilities by Architectural Design: A Methodological Study. In B. Martens, & A. G. Keul (Eds.), *Evaluation in Progress: Strategies for Environmental Research and Implementation*. Hogrefe & Huber, Toronto.
- Judi, H.J., Davidson, B.J. and Fenwick, R.C. (2000, January 30th - February 4th). The Direct Displacement Based Design Method: A Damping Perspective. *The Twelfth World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, NZ.
- Priestley, M.J.N., Calvi, G.M. and Kowalsky, M.J. (2007). *Displacement-Based Seismic Design of Structures*. IUSS Press, Pavia, Italy.
- Setia, S. and Sharma, V. (2012). Seismic Response of RC Buildings with Soft Storey. *International Journal of Applied Engineering Research*, Vo.7 (11).