

PENGUJIAN RUMUS EMPIRIS DIMENSI ELEMEN SISTEM RANGKA PENAHAN MOMEN BERATURAN YANG DIDESAIN SECARA DIRECT DISPLACEMENT BASED DESIGN

Okky Dwisetia¹, Ferry Limantau², dan Ima Muljati³

ABSTRAK: Penerapan metode *Direct Displacement Based Design* (DDBD) dalam desain bangunan tahan gempa semakin banyak digunakan dan memberikan kinerja yang baik. Dari penelitian terakhir didapatkan sebuah rumus empiris untuk memprediksi dimensi elemen struktur pada bentang dan dimensi balok dan kolom yang seragam. Rumus empiris tersebut belum diuji kinerjanya bila diterapkan pada bangunan dengan konfigurasi yang lain. Penelitian ini akan menguji rumus empiris tersebut pada Sistem Rangka Penahan Momen (SRPM) dengan bentang yang tidak seragam dan dimensi kolom yang bervariasi setiap 2-lantai agar efisien. Pengujian kinerja struktur (*drift* dan *damage index*) dilakukan dengan analisis *time history*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa rumus empiris untuk memprediksi dimensi balok dan kolom tidak bisa digunakan pada bentang yang berbeda. Kinerja bangunan yang didapatkan mengindikasikan adanya *soft storey* pada lantai 1 namun kondisi *strong column weak beam* masih tercapai. Penelitian ini juga mencoba mengatasi problem *soft storey* dengan memperbesar kapasitas rotasi yield pada lantai 1 dengan menambah tulangan dan mengecilkan dimensi kolom. Hasil yang didapatkan adalah bahwa memperbesar tulangan kurang efektif sedangkan memperkecil kolom menunjukkan adanya perbaikan yang lebih signifikan terhadap permasalahan *soft storey*. Oleh sebab itu peneliti menyarankan untuk mencoba kembali rumus empiris prediksi dimensi kolom berdasarkan tegangan penampang sebesar $0.2 f_c'$ pada SRPM dengan bentang yang seragam maupun tidak seragam.

KATA KUNCI: *direct displacement based design*, sistem rangka pemikul momen, kinerja struktur, prediksi dimensi elemen struktur.

1. PENDAHULUAN

Tingginya korban jiwa dan materiil yang dialami akibat bencana gempa menuntut dunia konstruksi untuk memiliki desain ketahanan struktur yang semakin baik. Untuk menghasilkan bangunan tahan gempa, para ahli mulai meneliti metode yang tepat untuk memenuhi kebutuhan ini. Saat ini metode yang sering dipakai adalah metode *Force-Based Design*(FBD).

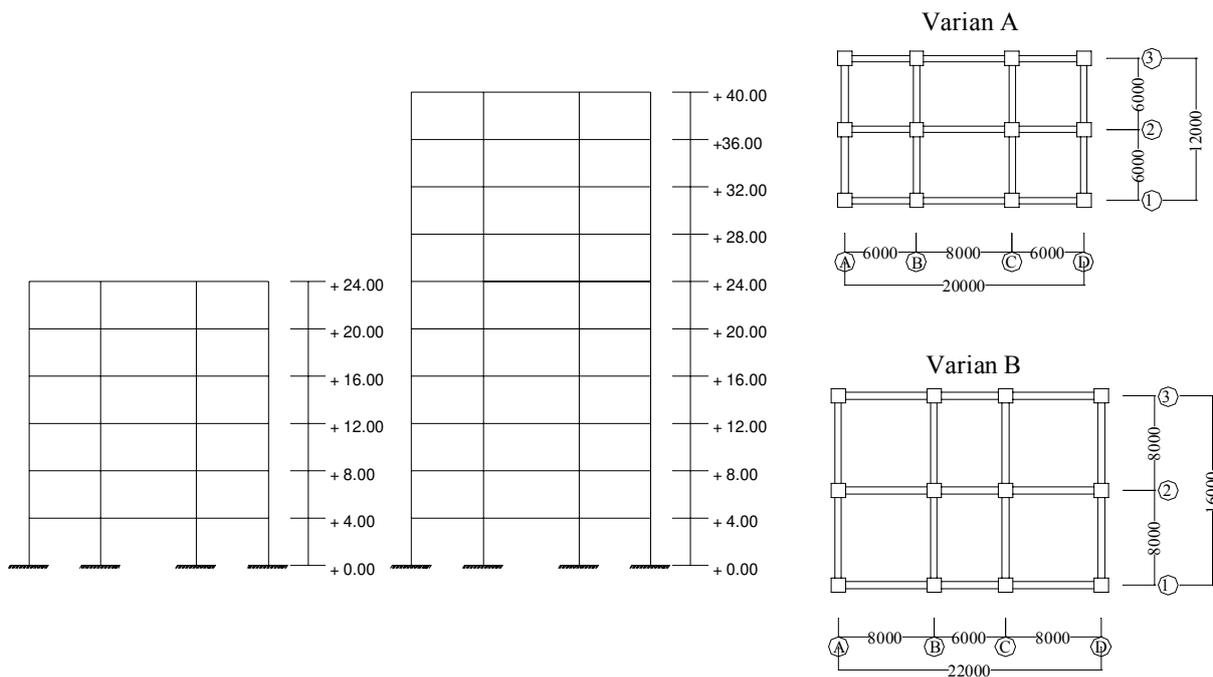
¹ Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra Surabaya, okkyd92@gmail.com

² Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra Surabaya, godlike_ferry@yahoo.com

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

Dalam prakteknya, ditemukan beberapa kelemahan pada metode ini. Untuk mengatasi permasalahan yang muncul dari penggunaan metode FBD ini, maka sejak tahun 1990-an mulai dikembangkan metode *Displacement Based Design* (DBD). Dari sekian banyak varian DBD, *Direct Displacement Based Design* (DDBD) yang dikembangkan oleh Priestley et al. (2007) menjadi yang paling prospektif untuk dikembangkan. Dari penelitian Weliem dan Widjaja (2013) serta Muljati et.al (2013) didapatkan kinerja bangunan yang didesain secara DDBD pada bangunan SRPM cukup baik. Penggunaan metode DDBD dalam mendesain bangunan sangat dipengaruhi oleh penentuan dimensi elemen struktur. Pemilihan dimensi yang tidak sesuai dapat menyebabkan proses desain yang berulang. Yenatan dan Wijaya (2013) meneliti dimensi balok dan kolom untuk SRPM dan menemukan rumus empiris untuk memprediksi dimensi kolom dan balok. Sayangnya rumus ini hanya untuk dimensi balok dan kolom dengan bentang dan dimensi yang seragam pada seluruh elemen struktur bangunan. Hal ini dianggap kurang efisien untuk mendesain bangunan SRPM lain dengan konfigurasi yang berbeda. Oleh sebab itu, rumus ini perlu diuji lebih lanjut pada struktur-struktur dengan bentang yang tidak seragam dan dimensi kolom yang berubah-ubah sepanjang ketinggian bangunan.

Penelitian ini menguji rumus empiris untuk memprediksi dimensi balok dan kolom pada bentang yang tidak seragam dan dimensi kolom yang berubah-ubah sepanjang ketinggian bangunan pada SRPM 6- dan 10- lantai di wilayah Surabaya dan Jayapura berdasarkan SNI 03-1726-2012 yang didesain dengan metode DDBD. Denah dan elevasi bangunan yang akan ditinjau pada penelitian ini, dapat dilihat pada **Gambar 1**, sedangkan beberapa parameter varian struktur dapat dilihat pada **Tabel 1**.



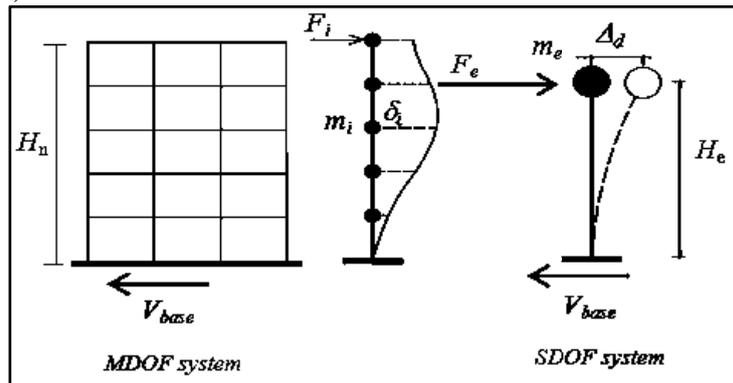
Gambar 1. Elevasi dan Denah Struktur yang Ditinjau

Tabel 1. Varian Struktur yang akan Diteliti

Kode Varian	Denah	Jumlah lantai	Resiko Gempa
A6L	A	6	Rendah
A10L	A	10	Rendah
A6H	A	6	Tinggi
A10H	A	10	Tinggi
B6L	B	6	Rendah
B10L	B	10	Rendah
B6H	B	6	Tinggi
B10H	B	10	Tinggi

2. PROSEDUR DESAIN DDBD

Langkah 1 : Menentukan target *design displacement* (Persamaan 1) dan *drift* struktur *Multi Degree of Freedom* (MDOF) di atap bangunan (**Gambar 2**) yang sesuai dengan kriteria kinerja struktur (*strain* atau *drift limits*) sehingga didapatkan *design displacement* (Persamaan 3) dari struktur SDOF pengganti (**Gambar 2**).



Gambar 2. Permodelan SDOF dari Bangunan Bertingkat

Target design displacement setiap lantai didapatkan dari Persamaan 1 berdasarkan *shape vector* yang terdapat pada Persamaan 2, proporsional terhadap *critical story displacement* Δ_c dan *mode shape* pada *critical storey level* δ_c (pada lantai 1 bangunan):

$$- \quad (1)$$

$$\text{untuk } n \leq 4 : \quad - ; \text{ untuk } n \geq 4 : \quad - - - - - (2)$$

dimana n adalah jumlah lantai bangunan, H_i adalah elevasi lantai ke- i , dan H_n tinggi total bangunan.

Equivalent design displacement didapatkan dari :

$$(3)$$

dimana m_i massa pada lantai ke- i .

Massa struktur pengganti m_e dan tinggi efektif H_e dihitung dengan:

$$(4)$$

$$(5)$$

Langkah 2 : Memperkirakan *level equivalent viscous damping* ξ_{eq} , dimana *displacement ductility* μ dari struktur harus diketahui terlebih dahulu sesuai Persamaan 8.

$$\mu = \frac{\Delta_d}{\Delta_y} \quad (6)$$

Yield displacement Δ_y didapatkan dari :

$$\Delta_y = y \cdot H_e \quad (7)$$

$$y = 0.5 \varepsilon_y \frac{L_b}{H_b} \quad (8)$$

dimana 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 :

$$\xi_{eq} = 0.05 + 0.565 \left(\frac{\mu - 1}{\mu \pi} \right) \quad (9)$$

Langkah 3 : Menentukan periode efektif T_e dari struktur SDOF pada saat respons *peak displacement* dengan memakai *design displacement* pada langkah 1 dan *response spectrum of design displacements* sesuai dengan level *damping* pada langkah 3, ξ_{eq} .

Berdasarkan *design displacement spectrum* maka T_e didapatkan dari :

$$R_\xi = \left(\frac{0.07}{0.02 + \xi} \right)^{0.5} \quad (10)$$

$$T_e = \frac{\Delta_d}{\Delta_\xi} T_d \quad (11)$$

dimana T_d adalah *corner period*, Δ_ξ *displacement demand* untuk level dari *equivalent viscous damping* ξ_{eq} .

Langkah 4 : Menghitung kekakuan efektif k_e dari struktur SDOF dan *design base shear* V_{base} .

Kekakuan efektif k_e didapatkan dari :

$$k_e = \frac{4\pi^2 m_e}{T_e^2} \quad (12)$$

Design base shear V_{base} didapatkan dari :

$$V_{base} = k_e \Delta_d \quad (13)$$

Langkah 5 : Membagi *design base shear* secara vertikal dan horizontal ke elemen-elemen penahan beban lateral untuk lantai selain *top roof* sesuai dengan :

$$F_i = 0.9 \times V_{base} (m_i \Delta_i / \sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i)) \quad (14)$$

Sedangkan untuk lantai *top roof* didapatkan dengan cara sebagai berikut :

$$F_i = 0.1 \times V_{base} + 0.9 \times V_{base} (m_i \Delta_i / \sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i)) \quad (15)$$

3. METODOLOGI PENELITIAN

Tahapan-tahapan yang dilakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Desain dengan metode DDBD dilakukan langkah-langkah sesuai yang dijelaskan pada bagian 2. Dimensi awal balok dan kolom ditentukan berdasarkan rumus empiris Yenatan dan Wijaya (2013). Tinggi balok diambil sebesar $1/10$ bentang untuk gempa rendah dan $1/9$ bentang untuk gempa tinggi sedangkan lebarnya diambil $1/2$ hingga $2/3$ tinggi balok, sedangkan untuk dimensi kolom diprediksi dari nilai tegangan penampang sebesar 0.13 kali kuat tekan beton.
2. Dalam prosedur DDBD, perhitungan desain kapasitas mengikuti rekomendasi Priestley *et.al* (2007), dimana pengambilan gaya-gaya dalam untuk balok diambil terbesar antara akibat beban gravitasi terfaktor dengan akibat beban gempa murni (Pinto, 1997). Sedangkan momen desain kolom didapat dari momen desain balok yang dikalikan faktor-faktor pembesar sesuai persyaratan yang ada.
3. Pengevaluasian kinerja struktur dilakukan dengan analisis dinamis *time history nonlinear* menggunakan program SeismoStruct V.6.5 dimana *input* beban gempa menggunakan gempa El-Centro 15 April 1940 N-S yang dimodifikasi agar sesuai dengan spektrum respon wilayah Surabaya dan Jayapura. Selain itu, *input* pada program SeismoStruct pada *link properties* berupa hubungan

momen-rotation didapat dari program CUMBIA (Montejo & Kowalsky, 2007).Evaluasi dilakukan terhadap hasil *drift ratio*, nilai *damage index*, dan mekanisme keruntuhan.

4. HASIL PENELITIAN DAN ANALISIS

Dimensi balok dan kolom beserta tulangnya yang diperoleh berdasarkan rumus empiris ditunjukkan pada **Tabel 2, Kolom [1]**.Setelah dilakukannya analisis dinamis pada bangunan, maka didapatkan hasil untuk metode DDBD terhadap berbagai varian yang diteliti sebagai berikut :

Tabel 2. Dimensi Varian dan Rasio Tulangan pada Varian A6H

Lantai	Daerah	Rumus Empiris [1]		Penambahan Tulangan** [2]	Pengecilan Dimensi 0.2fc' [3]	
		Dimensi(mm)	Rho (%)	Rho	Dimensi(mm)	Rho (%)
6	Corner	650x650*	2.5	2.5	650x650	2.5
	Side	650x650*	4.6	4.6	650x650	4.6
	Interior	650x650*	4.5	4.5	650x650	4.5
5	Corner	650x650*	1.5	2	650x650	2
	Side	650x650*	3.6	3.6	650x650	3.6
	Interior	650x650*	3.6	3.6	650x650	3.6
4	Corner	750x750	1.4	2	750x750	2
	Side	750x750	3.5	3.5	750x750	3.5
	Interior	750x750	3.5	3.5	750x750	3.5
3	Corner	750x750	2	2	750x750	2
	Side	750x750	4.4	5	750x750	5
	Interior	750x750	5	5	750x750	5
2	Corner	950x950	1.5	1.5	750x750	2
	Side	950x950	1.9	2.4	750x750	3.8
	Interior	950x950	2.4	2.4	750x750	3.8
1	Corner	950x950	1.5	2	750x750	3.2
	Side	950x950	2.4	3.2	750x750	5
	Interior	950x950	2.9	3.2	750x750	5

Catatan: * = Perubahan Dimensi dari 0.13fc' menjadi 0.1 fc' karena ρ melebihi ρ_{max}

** = Dimensi kolom sama dengan rumus empiris

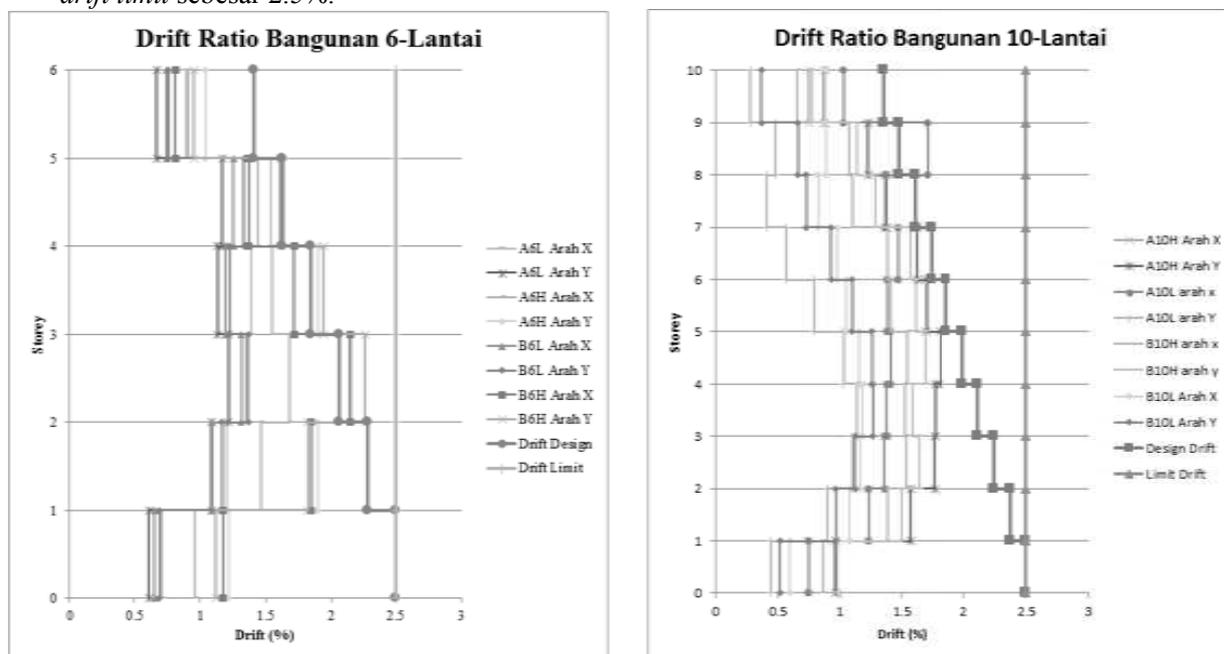
1. Rumus empiris prediksi dimensi

Rumus Empiris untuk balok tidak dapat dipakai pada bentang yang berbeda-beda sedangkan untuk prediksi dimensi kolom tidak bisa dipakai karena pada saat melakukan *capacity design*, kolom teratas menghasilkan rasio tulangan (ρ) yang melebihi ρ_{max} (6%). Oleh karena itu dimensinya diperbesar tegangan penampangannya sebesar 0.1fc'.

2. Drift ratio

Gambar 3 menunjukkan *drift ratio* untuk berbagai varian pada bangunan 6- dan 10- lantai. *Drift ratio target* dari DDBD adalah *drift ratio* yang terjadi akibat *displacement* yang telah diperoleh dari perhitungan metode DDBD. Dari hasil grafik dapat dilihat bahwa ada beberapa drift ratio pada

bangunan 6- dan 10- lantai yang melebihi *drift design* namun semua drift yang terjadi tidak melebihi *drift limit* sebesar 2.5%.



Gambar 3. Grafik Perbandingan *Drift Ratio*

3. *Damage Index* dan Mekanisme Keruntuhan
 Berdasarkan analisis *time history*, ternyata terjadi *soft storey* dilantai 1 pada semua varian. Semua kolom lantai 1 bagian atas mengalami leleh dengan nilai *damage index* antara 0.01-0.043. Meskipun demikian, kondisi *Strong Column Weak Beam* tetap terjaga dimana pelelehan diawali terlebih dahulu pada balok dan disusul pada kolom.
4. Perbaikan pada kolom yang mengalami *yield* dengan menambah tulangan
 Kolom yang mengalami *yield* disebabkan karena rotasi *yield* kolom lebih kecil dari rotasi yang terjadi sehingga untuk memperbaiki perlu untuk memperbesar kapasitas rotasi *yield* yang bisa dilakukan dengan menambahkan tulangan. Penambahan tulangan kolom dilakukan dengan menambahkan nilai ρ pada kolom antara 0.5% - 1.5% tergantung dari besarnya *Damage Index* yang terjadi pada daerah yang leleh dan dibulatkan kelipatan 4 tulangan. Setelah itu didapatkan nilai *Damage Index* lalu dibandingkan dengan sebelumnya. Hasil yang didapatkan yaitu pada kolom selain lantai 1 tidak ada sendi plastis namun pada kolom lantai 1 bagian atas masih mengalami *yield* sehingga masih terjadi *soft storey*. Jadi penambahan tulangan untuk mengatasi *soft storey* tidak efektif. Penambahan tulangan dapat dilihat pada **Tabel 2, Kolom [2]**.
5. Penambahan tulangan dan memperkecil dimensi pada kolom pada lantai 1
 Selain penambahan tulangan untuk memperbesar rotasi *yield* bisa dilakukan dengan memperkecil dimensi berdasarkan rumus kurvatur. Dari rotasi yang terjadi setelah penambahan tulangan dicoba memperkecil dimensinya hingga rotasi *yield*nya mendekati rotasi yang terjadi pada kolom lantai 1 bagian atas. Dimensi yang memiliki rotasi *yield* yang mendekati rotasi target ternyata menghasilkan tegangan penampang sebesar $0.2 f_c'$. Lalu dilakukan perubahan dimensi pada kolom di atasnya yang dapat dilihat pada **Tabel 2, Kolom [3]**. Hasil yang didapatkan cukup baik yaitu pada kolom atas lantai 1 banyak yang tidak terjadi sendi plastis meskipun masih ada beberapa yang masih leleh dengan *Damage Index* maximum 0.02. Drift setelah adanya perubahan menunjukkan hasil yang

cukup baik. Jadi pengurangan dimensi ternyata menunjukkan hasil yang lebih signifikan terhadap perbaikan *soft storey*.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil evaluasi kinerja bangunan dengan bentang yang berbeda dan dimensi kolom yang bervariasi sepanjang ketinggian bangunan dapat disimpulkan bahwa:

1. Rumus Empiris Yenatan dan Wijaya (2013) tidak dapat dipakai untuk memprediksi dimensi balok dan kolom.
2. Upaya memperbaiki kinerja struktur yang dilakukan dengan penambahan tulangan ternyata tidak efektif, sedangkan pengurangan dimensi mengindikasikan perbaikan yang lebih baik.
3. Peneliti menyarankan untuk menguji coba kembali rumus empiris Yenatan dan Wijaya (2013) dengan mengubah rumus empiris untuk dimensi kolom berdasarkan tegangan penampang sebesar $0,2 f_c'$ pada SRPM dengan bentang seragam maupun tidak seragam, dengan konfigurasi yang lain.

6. DAFTAR REFERENSI

- Departemen Pekerjaan Umum. (2012). *SNI-03-1726-2012. Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- Montejo, L.A. (2007). *CUMBIA*. North Carolina: Department of Civil, Construction, and Environmental Engineering, North Carolina State University
- Priestley, M.J.N, Calvi, G.M dan Kowalsky, M.J. (2007). *Displacement-Based Seismic Design of Structure*. Pavia: IUSS Press.
- SeismoSoft. (2007). *SeismoStruct – A Computer Program for Static and Dynamic Nonlinear Analysis of Framed Structure*, available from URL: <http://www.seissoft.com>
- 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. Jurusan Teknik Sipil. Universitas Kristen Petra. Surabaya.
- Yenatan, E. dan Wijaya, A. S. (2013). *Studi Penentuan Dimensi Elemen Struktur pada Sistem Rangka Pemikul Momen Beraturan yang Didesain dengan Metode Direct Displacement Based Design*. Tugas Akhir No. 1101 1924/SIP/2013 Jurusan Teknik Sipil. Universitas Kristen Petra. Surabaya