

PERBANDINGAN PERENCANAAN BEBAN GEMPA BERDASARKAN METODE SPEKTRUM KAPASITAS DAN SPEKTRA TITIK LULUH

Richard Frans¹ dan Yoyong Arfiadi²

¹Departemen Sipil, Universitas Atma Jaya Makassar, Jl. Tanjung Alang 23, Makassar

²Program Studi Teknik Sipil, Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Jl. Babarsari 44, Yogyakarta

Email: richardfrans.rf@gmail.com

ABSTRAK: Metode spektra titik luluh merupakan metode untuk melakukan analisis struktur dalam kondisi inelastic dan untuk mendapatkan koefisien geser tingkat saat luluh yang diperkirakan dari perpindahan saat luluh. Sedangkan metode spektrum kapasitas (ATC-40) menyediakan kapasitas dari suatu struktur selama terjadi gempa. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk membandingkan hasil yang didapatkan dengan menggunakan metode spektrum kapasitas dan metode spektra titik luluh. Kemudian, kedua hasil ini dibandingkan dengan teori pendekatan yang diusulkan pada FEMA 356 yang telah diperbaiki pada FEMA 440 untuk mendapatkan asumsi target perpindahan. Studi kasus yang dibahas pada penelitian ini adalah gedung 4 lantai dan gedung 10 lantai yang didisain di kota Jakarta. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa tidak terjadi perbedaan yang cukup signifikan antara disain dengan menggunakan metode spektrum kapasitas dan metode spektra titik luluh dari segi titik perpindahan luluh pertama, perpindahan maksimum, dan daktilitas dari struktur tersebut, begitu juga dengan hasil yang didapatkan dengan menggunakan asumsi dalam FEMA 360 dan FEMA 440 dari asumsi target perpindahan.

Kata kunci: metode spektra titik luluh, metode spektrum kapasitas, FEMA 360, FEMA 440

THE COMPARISON BETWEEN CAPACITY SPECTRUM METHOD AND YIELD POINT SPECTRA ON THE DESIGN OF EARTHQUAKE LOAD

Abstract: Yield point spectra method is a method for analyzing the structure under inelastic conditions. Yield point spectra method is a method to obtain the current level of yield shear coefficient estimated from melted displacement. While the method of spectrum capacity (ATC-40) provides the capacity of a structure during an earthquake. The purpose of this study was to compare the results obtained using the capacity spectrum method and yield point spectrum method. Subsequently both of these results were compared with the theoretical approach proposed in FEMA 356 which has been fixed at FEMA 440 to obtain the displacement target assumptions. The case studies discussed in this research is a four and ten stories building which is designed in the city. The result shows that there was not a significant difference between the design using capacity spectrum method and yield point spectra method in terms of transferring first point yield, the maximum displacement, and ductility of the structures, as well as the results obtained using the assumptions in FEMA 360 and FEMA 440 of the displacement target assumption.

Keywords: yield point spectra method, capacity spectrum method, FEMA 360, FEMA 440

PENDAHULUAN

Analisis struktur untuk kondisi inelastik telah banyak berkembang. Beberapa metode telah diaplikasikan dalam mendisain struktur gedung dengan kondisi inelastik. Metode yang sering digunakan adalah analisis statik ekuivalen, analisis dinamik non-linier, dan analisis beban dorong statik (*static pushover analysis*). Ketiga metode ini membutuhkan hitungan yang cukup panjang untuk mendapatkan variabel yang diinginkan (gaya geser lateral, perpindahan luluh, dan lain sebagainya) untuk mendisain suatu struktur. Selain ketiga metode tersebut, metode spektra titik luluh (*yield point spectra*) merupakan salah satu metode empiris yang telah dikembangkan oleh Aschheim dan Black (2000), yang telah dimasukkan ke dalam FEMA P-750. Kelebihan dari metode ini adalah tidak membutuhkan perhitungan yang cukup panjang untuk memprediksi perpindahan dan gaya geser lateral saat luluh. Metode spektra titik luluh ditunjukkan dengan grafik yang menghubungkan antara perpindahan saat luluh. Koefisien geser tingkat dengan daktilitas konstan dapat diperoleh dari hubungan antara perioda, koefisien reduksi kuat luluh, dan daktilitas. Mengingat prediksi perpindahan saat luluh dan sifat-sifat ragam dapat diprediksi dengan cukup akurat (Building Seismic Safety Council, 2009), metode spektra titik luluh merupakan alternatif untuk mendapatkan geser dasar dari suatu bangunan gedung (Arfiadi, 2015).

Prediksi Perpindahan Saat Luluh (*Yield Displacement*)

Langkah pertama untuk mendapatkan perkiraan perpindahan luluh dari struktur adalah menentukan *yield drift ratio* dari struktur tersebut. Salah satu keuntungan menggunakan spektra titik luluh adalah karena rasio simpangan antar lantai pada saat luluh (*yield drift ratio*) relatif dapat diperkirakan dengan cukup akurat, dan tidak tergantung dari jumlah lantai atau tinggi gedung (Arfiadi, 2015, FEMA P-750). FEMA P-750 memberikan perkiraan nilai *yield drift ratio* yang tergantung pada sistem dari struktur tersebut seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Estimasi *yield drift ratio* berdasarkan FEMA P-750

Sistem Penahan Beban Lateral	Estimasi <i>yield drift ratio</i> (%)
Bangunan Beton Bertulang	
Rangka Momen	0,5 sampai 0,6
Dinding geser kantilever	0,1 h/l _w
Bangunan Baja	
Rangka Momen	1 sampai 1,2
<i>Special Truss Moment Frames</i>	0,75
Rangka Bresing Konsentrik	0,3
Rangka Bresing Eksentrik	0,5
Rangka Bresing Tertahan Tekuk	0,3–0,5

Selanjutnya nilai perpindahan luluh (*yield displacement*) dapat dihitung dengan persamaan:

$$D_y = \left(\frac{D_y}{h} \right) h \tag{1}$$

dengan D_y adalah perpindahan luluh, D_y/h adalah *yield drift ratio*, h adalah tinggi total bangunan.

PERPINDAHAN PUNCAK MAKSIMUM (*MAXIMUM PEAK DISPLACEMENT*)

Pembatasan pada nilai perpindahan puncak maksimum bertujuan untuk mencegah terjadinya *interstory drift* yang berlebihan dan batasan *system ductility demands* dengan maksud untuk melindungi elemen non-struktural dan sistem pemikul momen terhadap kerusakan berlebih yang mungkin timbul (FEMA P-750). Perpindahan puncak maksimum merupakan fungsi dari *allowable story drift* dan batas daktilitas dari sistem penahan beban lateral tersebut. Berdasarkan FEMA P-750, *allowable story drift* dihitung sesuai dengan persamaan berikut:

$$D_{u,\Delta} = \frac{\Delta_a}{h_{sx} \alpha_{3,stat}} h \tag{2}$$

dengan $D_{u,\Delta}$ adalah perpindahan puncak maksimum berdasarkan *allowable story drift*, Δ_a adalah *allowable story drift*. h_{sx} adalah tinggi tingkat yang ditinjau, $\alpha_{3,stat}$ adalah parameter yang sesuai pada Tabel 2. Pada Tabel 2 ditunjukkan juga parameter lain yang akan dibahas pada uraian selanjutnya.

Tabel 2. Perkiraan parameter oleh FEMA P-750 untuk sistem rangka momen

Jumlah tingkat	Γ_1	α_1	$h_{eff,1}/h$	$\alpha_{3,stat}$
1	1	1	1	1
2	1,21	0,94	0,79	1,19
3	1,27	0,90	0,73	1,23
5	1,32	0,86	0,70	1,26
10	1,35	0,82	0,67	1,28
≥ 20	1,37	0,80	0,66	1,29

Sedangkan pembatasan nilai perpindahan puncak maksimum yang didasari batas daktilitas dari sistem struktur sesuai dengan persamaan berikut:

$$D_{u,\mu} = \mu_d D_y \quad (3)$$

$$\mu_d = \mu_c / I \quad (4)$$

dengan $D_{u,\mu}$ adalah perpindahan puncak maksimum berdasarkan batas daktilitas ijin, D_y adalah perpindahan luluh, I adalah faktor kepentingan (*importance factor*) μ_d adalah batas daktilitas rencana, μ_c adalah batas daktilitas sistem untuk bangunan beton bertulang sesuai pada Tabel 3 berdasarkan FEMA P-750.

Tabel 3. Daktilitas sistem ijin berdasarkan FEMA P-750

Sistem Penahan Beban Lateral	Khusus	Menengah	Biasa
Bangunan Beton Bertulang			
Rangka Momen	2,4	1,5	0,9
Dinding Geser Kantilever	1,6	-	1,3

Nilai perpindahan puncak maksimum diambil nilai minimum di antara Persamaan (2) dan (3) sebagai berikut:

$$D_u = \min(D_{u,\Delta}, D_{\Delta,\mu}) \quad (5)$$

HUBUNGAN SISTEM DERAJAT KEBEBASAN MAJEMUK (*SDOF*) DAN SISTEM DERAJAT KEBEBASAN TUNGGAL (*MDOF*)

Nilai spektra titik luluh dihitung berdasarkan asumsi sistem derajat kebebasan tunggal. Oleh karena struktur gedung merupakan sistem berderajat kebebasan majemuk, maka perlu ada hubungan antara sistem derajat kebebasan majemuk dan sistem derajat kebebasan tunggal. Gaya geser lateral sistem derajat kebebasan tunggal (V_y^*) dan perpindahan sistem derajat kebebasan tunggal (D_y^*) dapat

ditentukan dengan membagi gaya geser lateral sistem derajat kebebasan majemuk (V_y) dan perpindahan sistem derajat kebebasan majemuk (D_y) dengan faktor partisipasi ragam pertama (Γ_1). Karena kontribusi dari ragam yang lebih tinggi terhadap perpindahan puncak adalah kecil, maka gaya geser lateral yang dibutuhkan terhadap *drift ratio* berdasarkan pada sistem derajat kebebasan tunggal ekuivalen (*ESDOF*) yang dicerminkan dari kontribusi dari ragam pertama. Selanjutnya diperoleh sebagai berikut:

$$D_y^* = \frac{D_y}{\Gamma_1} \quad (6)$$

$$V_y^* = \frac{V_y}{\Gamma_1} \quad (7)$$

$$V_y = C_y W \quad (8)$$

dengan D_y^* adalah perpindahan luluh untuk sistem derajat kebebasan tunggal, V_y^* adalah gaya geser lateral untuk sistem derajat kebebasan tunggal, V_y adalah gaya geser lateral untuk sistem derajat kebebasan majemuk, D_y adalah perpindahan luluh untuk sistem derajat kebebasan majemuk, Γ_1 adalah faktor partisipasi ragam pertama, W adalah berat struktur keseluruhan. Estimasi nilai faktor partisipasi ragam pertama dapat dilihat pada Tabel 2 atau dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$\Gamma_1 = \frac{\phi_1 W \{1\}}{\phi_1^T W \phi_1} \quad (9)$$

KOREKSI GAYA GESER LATERAL DASAR (V_{yc})

Berdasarkan FEMA P-750, gaya geser lateral terkoreksi (V_{yc}) mengikuti persamaan:

$$V_{yc} = \left(\frac{h_{eff,1}}{h_{eff,\beta}} \right) \cdot V_y \quad (10)$$

$$h_{eff,\beta} = \frac{\sum F_i \cdot h_i}{\sum F_i} \quad (11)$$

dengan V_{yc} adalah gaya geser lateral dasar terkoreksi, $h_{eff,1}$ adalah titik berat dari momen guling berdasarkan ragam pertama yang sesuai dengan Tabel 2, V_y adalah gaya geser lateral sebelum dikoreksi, F_i adalah gaya lateral pada lantai ke- i .

SPEKTRA TITIK LULUH (YIELD POINT SPECTRA)

Spektra titik luluh merupakan grafik yang menghubungkan hubungan antara koefisien kuat geser luluh (C_y) dan perpindahan saat luluh (D_y) dengan daktilitas tertentu. Grafik spektra titik luluh tergantung pada grafik respons spektra pada kondisi elastik. Persamaan yang digunakan untuk membuat grafik spektra titik luluh adalah sebagai berikut:

$$D_y = \frac{1}{R_\mu} \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2 S_a \tag{12}$$

$$C_y = \frac{S_a}{R_\mu} \tag{13}$$

dengan D_y adalah perpindahan saat luluh, T adalah periode struktur, S_a adalah spektrum respons percepatan, C_y adalah koefisien kuat geser luluh, R_μ adalah faktor reduksi kuat luluh. Nilai R_μ merupakan fungsi dari daktilitas sistem (μ) dan waktu getar struktur (T). Beberapa penelitian yang pernah diusulkan untuk mendapatkan hubungan antara R_μ - μ - T antara lain:

1. Nassar dan Krawinkler (1991)

$$R_\mu = \{ c(\mu - 1) + 1 \}^{1/c} \tag{14}$$

$$c(\alpha, T) = \frac{T^a}{1 + T^a} + \frac{b}{T} \tag{15}$$

dengan a dan b bergantung pada koefisien a (rasio dari kekakuan setelah terjadi luluh dan kekakuan elastik).

2. Miranda dan Bertero (1994)

$$R_\mu = \frac{\mu - 1}{\Phi(T, T_g)} + 1 \tag{16}$$

dengan $\Phi(T, T_g)$ bergantung pada keadaan tanah dasar. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat langsung pada Miranda dan Bartero (1994).

3. Cuesta, Aschheim, dan Fajfar (2003)

$$R = \left\{ \begin{array}{l} c_1(\mu - 1)^{c_r} \frac{T}{T_a} + 1, \quad \frac{T}{T_a} \leq 1 \\ c_1(\mu - 1)^{c_r} + 1, \quad \frac{T}{T_a} > 1 \end{array} \right\} \tag{17}$$

$$T_a = 0,75\mu^{0,2}T_1 \tag{18}$$

$$T_1 = 2\pi \frac{\phi_{ev} v_{g,max}}{\phi_{ea} a_{g,max}} \tag{19}$$

dengan $c_1 = 1,35$, $c_r = 0,95$, $a_{g,max}$ adalah percepatan puncak maksimum pada tanah dasar (*peak ground velocity*), $v_{g,max}$ adalah kecepatan puncak maksimum pada tanah dasar (*peak ground velocity*), ϕ_{ea} adalah faktor amplikasi percepatan, dan ϕ_{ev} adalah faktor amplikasi kecepatan.

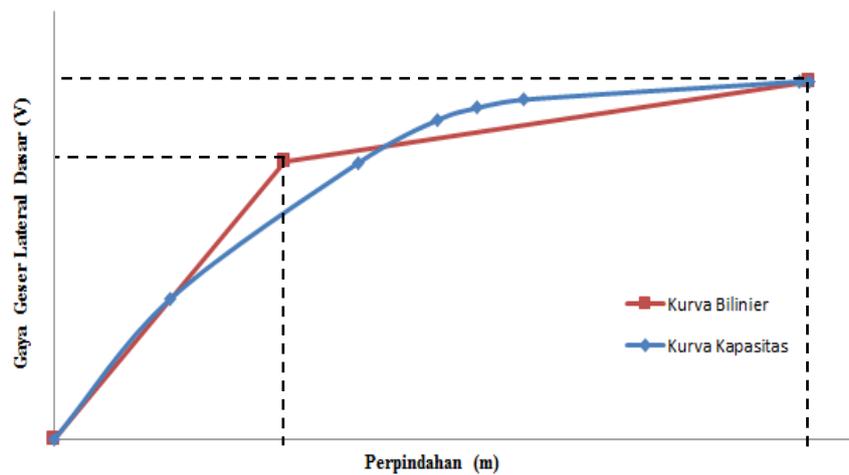
METODE SPEKTRUM KAPASITAS (CAPACITY SPECTRUM METHOD) DAN TARGET PERPINDAHAN

Kurva kapasitas adalah kurva yang menghubungkan antara gaya geser lateral dan perpindahan maksimum dari suatu struktur. Nilai gaya geser lateral dan perpindahan maksimum dari kurva kapasitas didapatkan dari analisis beban dorong statik (*static pushover analysis*). Langkah hitungan adalah dengan menaikkan beban statik yang terpusat pada masing-masing titik berat tiap lantai secara bertahap sampai terjadi peluluhan pertama pada struktur tersebut. Kemudian, beban tersebut kembali ditingkatkan sampai target perpindahan tercapai atau sampai kondisi pasca-elastik hingga kondisi plastis dari bangunan tersebut tercapai. Kurva kapasitas yang didapatkan dari analisis *pushover* dapat dikonversikan ke dalam spektrum kapasitas dengan format ADRS (*Acceleration Displacement Response Spectra/S_a-S_d*). Berdasarkan ATC-40, kurva kapasitas dapat dikonversikan menjadi spektrum kapasitas dengan persamaan sebagai berikut:

$$S_{a,i} = \frac{V_i / W}{\alpha_1} \tag{20}$$

$$S_{d,i} = \frac{\Delta_{roof}}{(PF_1) \cdot \phi_{1,roof}} \tag{21}$$

dengan α_1 adalah koefisien massa untuk ragam pertama, PF_1 adalah faktor partisipasi ragam pertama, $\phi_{1,roof}$ adalah nilai ragam pertama untuk lantai atap. Kurva spektrum kapasitas selanjutnya dikonversikan menjadi kurva bilinear dengan tujuan untuk mendapatkan perpindahan luluh, gaya geser luluh, serta periode struktur pada saat luluh. Cara untuk mendapatkan kurva bilinear dapat dilihat pada ATC-40 (1996).

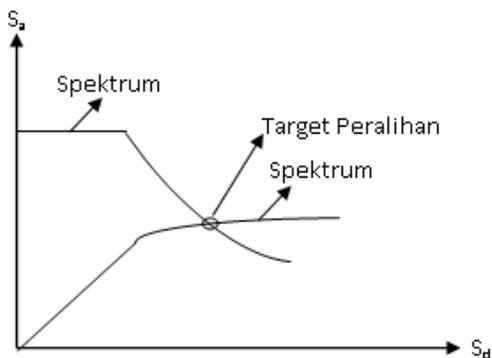


Gambar 1. Kurva kapasitas dan kurva bilinier

Sedangkan untuk *demand curve*, sesuai format ADRS yang sama dengan spektrum kapasitas digunakan persamaan berikut,

$$S_{d,i} = \frac{T_i^2}{4\pi^2} S_{a,i} g \tag{22}$$

dengan $S_{d,i}$ adalah spektrum perpindahan, $S_{a,i}$ adalah spektrum percepatan, T_i adalah waktu getar alami struktur, g adalah percepatan gravitasi ($9,81 \text{ m/s}^2$).



Gambar 2. Titik perpotongan kurva spektrum kapasitas dan spektrum *demand*

Perpotongan antara kurva spektrum kapasitas dan kurva *demand spectrum* merupakan titik target perpindahan. Dengan diketahuinya target perpindahan, kinerja dari suatu struktur bangunan dapat ditentukan. Target perpindahan juga bisa didapatkan secara empirik. Metode koefisien perpindahan yang terdapat dalam dokumen FEMA 356 dan FEMA 440 merupakan persamaan empirik untuk memperkirakan target perpindahan dari struktur sebagai berikut:

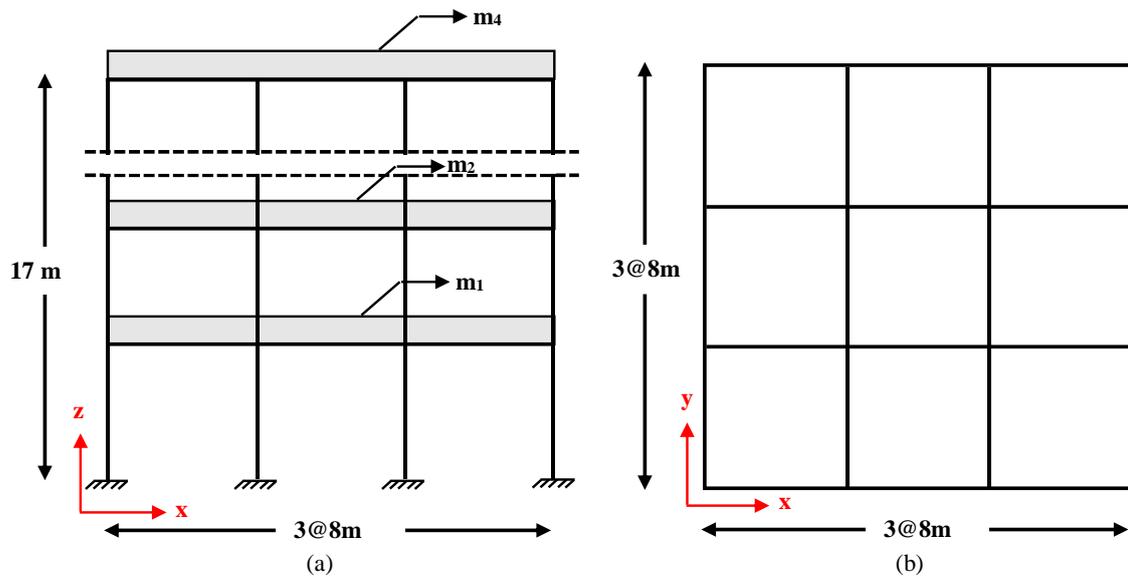
$$\delta_t = C_0 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot S_a \left(\frac{T_e}{2\pi} \right)^2 \cdot g \tag{23}$$

dengan C_0 sampai dengan C_3 adalah koefisien untuk memperkirakan perpindahan global maksimum sesuai FEMA 440, dan T_e adalah perioda efektif.

CONTOH KASUS

Struktur bangunan rangka momen beton bertulang 4 lantai

Struktur pertama yang akan ditinjau adalah struktur sistem rangka momen 4 lantai seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. Ada 3 bentang untuk masing-masing arah sumbu-x dan sumbu-y dengan panjang masing-masing bentang adalah 8 meter seperti yang terlihat pada Gambar 3(b). Massa dari masing-masing lantai dapat dilihat pada Tabel 4. Percepatan gravitasi (g) diambil sama dengan $9,81 \text{ m/s}^2$. Struktur direncanakan di Jakarta dengan kondisi tanah lunak dan dianggap sebagai bangunan baru. Tinggi lantai pertama adalah 5 meter dan tinggi lantai berikutnya adalah 4 meter, sehingga total ketinggian struktur adalah 17 meter. Struktur tersebut diperuntukkan sebagai bangunan kantor sehingga faktor kepentingan (*importance factor*) sama dengan 1. Hitungan dimensi balok dan kolom beton bertulang menggunakan program bantu ETABS Nonlinier v.9.7.0. dengan kombinasi beban hidup dan beban mati; serta beban lateral yang didapatkan dari metode spektra titik luluh. Beberapa variabel yang akan dibandingkan antara lain, perpindahan puncak saat luluh, perpindahan



Gambar 3. (a) Potongan melintang struktur gedung 4 lantai, (b) Denah struktur gedung 4 lantai

puncak maksimum, gaya geser lateral saat luluh, daktilitas struktur, serta titik perpindahan (target perpindahan) dari struktur tersebut dengan menggunakan dua metode analitik serta satu metode empirik. Metode analitik yang digunakan adalah analisis beban dorong statik (*static pushover analysis*) yang akan menjadi dasar untuk metode spektrum kapasitas dan metode spektra titik luluh. Untuk target perpindahan, ditambahkan perbandingan dengan menggunakan rumus empirik yang disarankan dalam dokumen FEMA 356 dan FEMA 440.

Tabel 4. Massa tiap lantai untuk gedung 4 lantai

Lantai	1	2	3	4
Massa (ton)	119,0948	116,6483	113,3896	96,9492

Hitungan untuk memprediksi gaya geser lateral dan perpindahan pada saat luluh dengan menggunakan metode spektra titik luluh mengikuti langkah-langkah berikut ini.

1. Menentukan *yield drift* dari struktur. Berdasarkan nilai *yield drift ratio* pada Tabel 1 untuk sistem rangka momen beton bertulang diambil 0,55%. Jadi, didapatkan nilai perpindahan luluh (D_y) sebesar $0,55/100 \cdot 17 = 0,0935$ m atau 93,5 mm.
2. Menentukan perpindahan puncak maksimum. Berdasarkan Tabel 2 dan Tabel 3, Persamaan (2) dan Persamaan

(3), dan batas simpangan ijin antar lantai ($\Delta a/h_{sx}$) oleh SNI 1726-2012, didapatkan nilai perpindahan puncak maksimum ($D_{u,\Delta}$),

$$D_{u,\Delta} = \frac{\Delta_a}{h_{sx} \alpha_{3,stat}} h = \frac{0,02}{1,245} \cdot 17 = 273,1 \text{ mm}$$

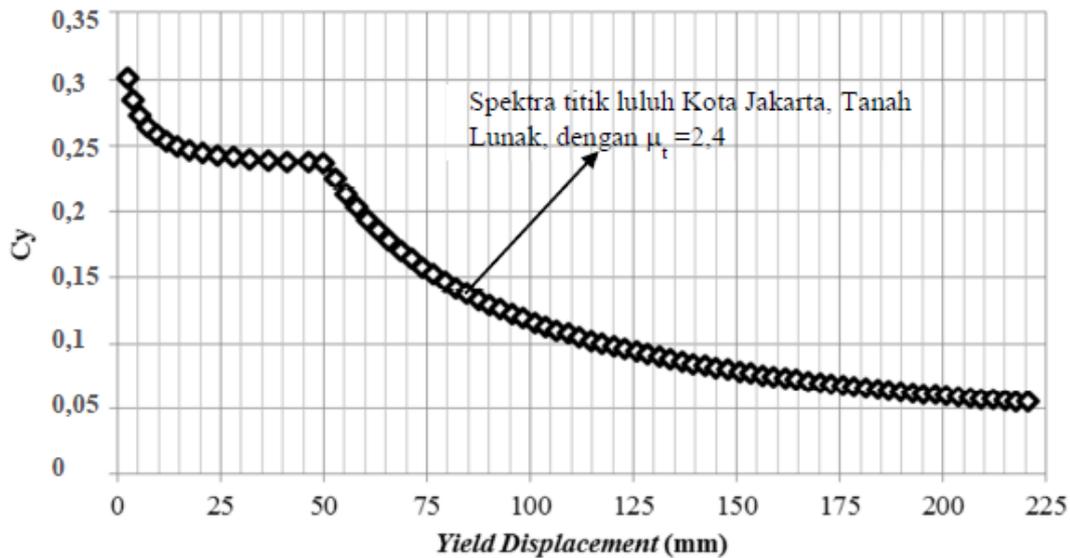
$$D_{u,\mu} = \mu_d \cdot D_y = 2,4 \cdot 93,5 = 224,4 \text{ mm}$$

Diambil nilai minimum dari kedua nilai tersebut, yaitu 224,4 mm, yang menjadi kontrol perpindahan puncak maksimum.

3. Menentukan perpindahan luluh sistem derajat kebebasan tunggal ekuivalen (ESDOF) dengan menggunakan Persamaan (6). Berdasarkan Tabel 2, estimasi nilai Γ_1 adalah 1,295.

$$D_y^* = \frac{D_y}{\Gamma_1} = \frac{93,5}{1,295} = 72,2 \text{ mm}$$

4. Menentukan nilai koefisien kuat geser luluh (C_y). Untuk mendapatkan nilai C_y . Mula-mula dibuat grafik spektra titik luluh sesuai dengan grafik respons spektra untuk kota Jakarta dengan kondisi tanah lunak berdasarkan daktilitas konstan (μ_t) sebesar 2,4. Nilai R_μ menggunakan persamaan yang diajukan oleh Nassar dan Krawinkler (1991). Berdasarkan grafik spektra titik luluh pada Gambar 4, untuk nilai $D_y^* = 72,2$ mm, dan nilai $C_y^* = 0,162$.



Gambar 4. Grafik spektra titik luluh kota Jakarta dengan kondisi tanah lunak dan daktilitas konstan($\mu_t = 2,4$)

5. Menentukan nilai C_y, V_y, V_{yc}

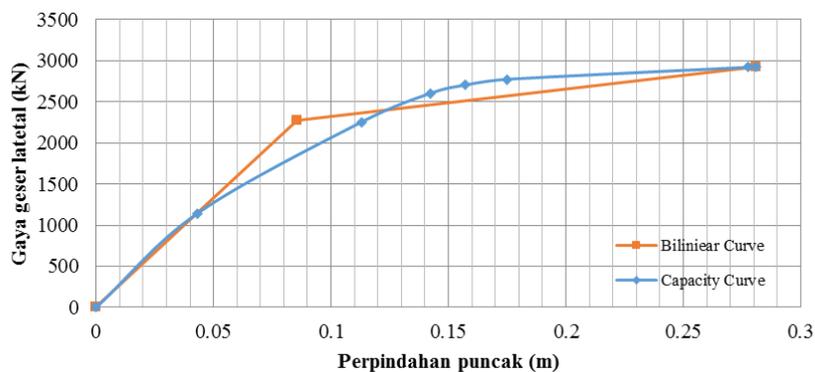
$$C_y = \alpha_1 \cdot C_y^* = 0,88 \cdot 0,162 = 0,1426$$

$$V_y = C_y \cdot W = 0,1426 \cdot 4376,064 = 623,8961 \text{ kN}$$

$$V_{yc} = \left(\frac{h_{ef,1}}{h_{ef,0}} \right) V_y = \left(\frac{0,715}{0,7936} \right) \cdot 623,8961 = 562,104 \text{ kN}$$

Sebagai perbandingan dari hasil yang didapatkan dengan menggunakan metode spektra titik luluh, analisis beban dorong statik dikerjakan pada gedung 4 lantai ini untuk mendapatkan kurva kapasitas, yang digunakan untuk mendapatkan beberapa karakteristik struktur, antara lain: nilai gaya geser lateral saat luluh, perpindahan saat luluh, perpindahan maksimum, daktilitas struktur. Pembuatan kurva kapasitas menggunakan program bantu ETABS Nonlinier v.9.7.0 dan divalidasi dengan

menggunakan metode spektrum kapasitas pada dokumen ATC-40 yang diprogram dengan bantuan program MATLAB R2014A. Representasi spektrum kapasitas yang digunakan untuk mendapatkan perpindahan luluh, serta gaya geser luluh adalah kurva bilinear. Gambar 5 menunjukkan hubungan antara gaya geser lateral dan perpindahan puncak dengan menggunakan analisis statik dorong (*push over analysis*) serta kurva bilinear dari kurva kapasitas. Sedangkan Tabel 5 menunjukkan perbandingan hasil yang didapatkan dengan menggunakan metode spektra titik luluh dengan metode spektrum kapasitas. Dari hasil yang didapatkan, tidak terdapat perbedaan yang cukup signifikan dari lima variabel yang dibandingkan.



Gambar 5. Hubungan gaya geser lateral dengan perpindahan puncak dengan menggunakan metode analisis statik dorong untuk struktur gedung 4 lantai

Tabel 5. Perbandingan hasil antara metode spektra titik luluh dan metode kurva kapasitas untuk bangunan 4 lantai

Variabel	Analisis statik dorong (Pushover Analysis)	Metode spektra titik luluh (Yield Point Spectra)
$V_{yield} (SDOF)$ (kN)	568,4500	562,1022
$u_{yield} (SDOF)$ (m)	0,0640	0,0722
$u_{yield} (MDOF)$ (m)	0,0857	0,0935
u_{max} (m)	0,2810	0,2244
T	1,3352	1,3392
μ	3,2789	2,4000

Sedangkan untuk perkiraan titik perpindahan, *post yield stiffness* untuk metode spektra titik luluh, diambil 10% dari kekakuan sebelum luluh (*initial stiffness*). Hasil dari perkiraan titik perpindahan dengan menggunakan metode spektra titik luluh dibandingkan dengan metode spektrum kapasitas yang berdasarkan pada kurva kapasitas dan kurva *demand*, serta persamaan empirik berdasarkan metode koefisien perpindahan FEMA 356 dan FEMA 440 seperti pada Persamaan (23). Tabel 6 menunjukkan estimasi target perpindahan dari beberapa metode. Terlihat dengan jelas bahwa tidak terdapat perbedaan yang cukup signifikan dari keempat nilai titik perpindahan (target perpindahan) dari struktur 4 lantai tersebut.

Struktur bangunan rangka momen beton bertulang 10 lantai

Struktur ke dua yang akan ditinjau adalah struktur yang identik dengan struktur pertama akan tetapi ada penambahan jumlah lantai menjadi 10 lantai dengan ketinggian total 40 m dengan ketinggian masing-masing lantai adalah 4 meter. Struktur merupakan sistem rangka pemikul momen beton bertulang. Prosedur untuk mendapatkan gaya geser lateral dan perpindahan saat luluh dengan metode spektra titik luluh sama dengan aplikasi pertama (struktur 4 lantai). Berdasarkan Tabel 7, dapat dilihat bahwa keenam variabel yang dibandingkan tidak mempunyai perbedaan yang cukup signifikan. Hal ini menguatkan asumsi bahwa nilai perpindahan luluh dan perpindahan maksimum dapat diprediksi dengan baik jika mengetahui tinggi tingkat serta daktilitas ijin dari struktur. Tabel 8 menunjukkan tidak terdapat perbedaan yang cukup signifikan dari metode spektra titik luluh dengan metode lainnya. Ini berarti metode spektra titik luluh dapat juga digunakan untuk memprediksi titik perpindahan (target perpindahan) dari struktur, sehingga perkiraan *performance* dari struktur bisa didapatkan dengan cukup mudah.

Tabel 6. Perbandingan titik perpindahan untuk bangunan 4 lantai dengan beberapa metode

Variabel	Analisis Statik Dorong (ATC-40)	Metode Spektra Titik Luluh	FEMA 356	FEMA 440
δ_t (m)	0,2140	0,1943	0,2091	0,2095

Tabel 7. Perbandingan hasil antara metode spektra titik luluh dengan kurva kapasitas untuk bangunan 10 lantai

Variabel	Analisis statik dorong (Pushover Analysis)	Metode spektra titik luluh (Yield Point Spectra)
$V_{yield} (SDOF)$ (kN)	480,25	570,2482
$u_{yield} (SDOF)$ (m)	0,1189	0,1630
$u_{yield} (MDOF)$ (m)	0,1635	0,22
u_{max} (m)	0,5281	0,528
T	2,998	2,993
μ	3,2300	2,4

Tabel 8. Perbandingan titik perpindahan untuk bangunan 10 lantai dengan beberapa metode

Variabel	Analisis Statik Dorong (ATC-40)	Metode Spektra Titik Luluh	FEMA 356	FEMA 440
δ_t (m)	0,5080	0,4050	0,5306	0,4886

SIMPULAN

Berdasarkan kedua struktur rangka pemikul momen beton bertulang yang telah ditinjau (struktur 4 lantai dan struktur 10 lantai) dapat disimpulkan bahwa baik metode spektra titik luluh maupun metode analisis statik dorong memberikan hasil yang hampir sama (tidak terdapat perbedaan yang cukup signifikan) dalam memprediksi nilai perpindahan luluh, gaya geser lateral luluh, serta perpindahan maksimum dari struktur rangka momen beton bertulang. Sedangkan untuk estimasi titik perpindahan (target perpindahan), juga tidak terdapat perbedaan yang cukup signifikan jika dibandingkan dengan metode empiris yang dikemukakan pada dokumen FEMA-360 dan FEMA-440. Jadi, metode spektra titik luluh dapat menjadi suatu metode yang dapat diacu untuk memprediksi beberapa karakteristik struktur secara praktis, akan tetapi perlu adanya peninjauan lebih lanjut mengenai keberaturan dari struktur. Ini disebabkan oleh struktur yang ditinjau merupakan struktur dengan kategori struktur beraturan.

DAFTAR PUSTAKA

- American Society of Civil Engineers. 2000. *Prestandard and Commentary for Seismic Rehabilitation of Buildings, FEMA-356*. American Society of Civil Engineers. Reston, Virginia.
- Applied Technology Council. 1996. *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings. ATC-40, Volume 1, Report No. SSC 96-01*. Applied Technology Council, California.
- Arfiadi, Y. 2015. *Perancangan Beban Gempa Berdasarkan Spektra Titik Luluh. Seminar dan Pameran HAKI 2015: Challenges in the Future*.
- Badan Standardisasi Nasional. 2012. *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung*. BSN. Jakarta.
- Building Seismic Safety Council. 2009. *NEHRP Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures FEMA P-750*. National Institute of Building Science, Washington DC.
- Computer and Structures, Inc. 2006. *ETABS Nonlinear version 8.5.7 Manual*. Computer and Structures, Inc., Berkeley, CA.
- Cuesta, I., Aschheim, M., dan Fajfar, P. 2003. *Simplified R-Factor Relationships for Strong Ground Motions. Earthquake Spectra* 19, 1, p.25-45.
- Black, E. dan Aschheim, M. 2000. *Seismic Design and Evaluation of Multistory Buildings Using Yield Point Spectra*, Mid-America Earthquake Center.
- Federal Emergency Management Agency. 2005. *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedure, FEMA 440*. Federal Emergency Management Agency. Washington DC.
- MathWorks. 2013. *The Language of Technical Computing, MATLAB R2014A*.
- Miranda, E. dan Bertero, V.V. 1994. *Evaluation of Strength Reduction Factors for Earthquake Resistant Design. Earthquake Spectra* 10, 2, p.357-379.
- Nassar, A.A. dan Krawinkler, H. 1991. *Seismic Demands for SDOF and MDOF Systems, Report no 95. The John Blume Earthquake Engineering Center, Stanford University, CA*.