

PERANCANGAN BEBAN GEMPA BERDASARKAN SPEKTRA TITIK LULUH

Yoyong Arfiadi¹

1 PENDAHULUAN

Akhir-akhir ini banyak proposal yang diajukan untuk melakukan analisis struktur dalam kondisi inelastik. Selain analisis dinamik nonlinier, metode analisis statik nonlinier melalui analisis beban dorong (*pushover analysis*) akhir-akhir ini banyak mendapat perhatian. Selain metode tersebut, metode spektra titik luluh (*yield point spectra*) dan distribusi beban lateral berdasarkan koefisien rasio geser tingkat terhadap geser dasar saat luluh juga menjadi perhatian, dan telah diperkenalkan dalam FEMA P-750 (Building Seismic Safety Council, 2009).

Metode spektra titik luluh (Aschheim dan Black, 2000) merupakan metode untuk mendapatkan koefisien geser tingkat saat luluh yang diperkirakan dari perpindahan saat luluh. Grafik-grafik yang menyatakan hubungan antara perpindahan saat luluh dan 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 dalam mendapatkan geser dasar dari suatu bangunan gedung.

2 HUBUNGAN DAKTILITAS, KOEFISIEN REDUKSI, DAN PERIODA

Untuk suatu struktur, pengurangan kuat perlu yang disebabkan oleh perilaku histeresis dapat didefinisikan sebagai rasio kuat perlu pada keadaan elastik terhadap kuat perlu inelastik menurut (Miranda dan Bertero, 1994):

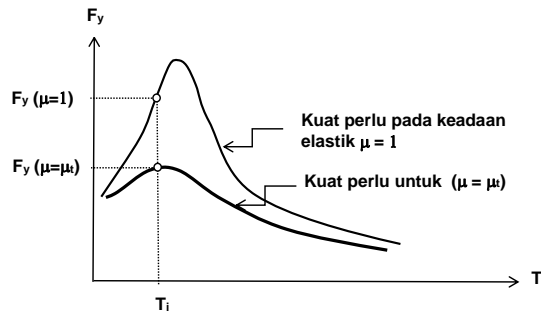
$$R_{\mu} = \frac{F_y(\mu = 1)}{F_y(\mu = \mu_t)} \quad (1)$$

dengan $F_y(\mu = 1)$ = kuat perlu pada keadaan elastik, dan $F_y(\mu = \mu_t)$ = kuat perlu untuk mempertahankan rasio daktilitas perpindahan perlu μ lebih kecil atau sama dengan target rasio daktilitas μ_t , jika dikenai oleh suatu guncangan tanah akibat gempa. Secara grafis pers. (1) ditunjukkan dengan Gambar 1. Dalam hal ini rasio daktilitas perpindahan dapat dinyatakan dengan:

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (2)$$

dengan Δ_u = perpindahan maksimum, dan Δ_y = perpindahan pada saat luluh.

¹ Anggota Staf Pengajar Program Studi Teknik Sipil, UAJY



Gambar 1. Respons Spektra pada Kondisi Elastik dan Inelastik

Beberapa proposal telah diajukan untuk menggambarkan hubungan antara koefisien reduksi kuat luluh (R_μ), daktilitas (μ) dan perioda struktur (T). Beberapa proposal yang pernah diajukan di antaranya adalah Newmark dan Hall (1982), Vidic dkk. (1994), Nassar dan Krawinkler (1991), dan FEMA 440 (Federal Emergency Management Agency, 2005). Uraian lengkap tentang hal ini dapat dilihat di antaranya pada Miranda dan Bertero (1994).

Dalam tulisan ini diuraikan hubungan $R_\mu - \mu - T$ berdasarkan Nassar dan Krawinkler (1991). Faktor reduksi kuat luluh dapat ditulis sebagai:

$$R_\mu = \{c(\mu - 1) + 1\}^{1/c} \quad (3)$$

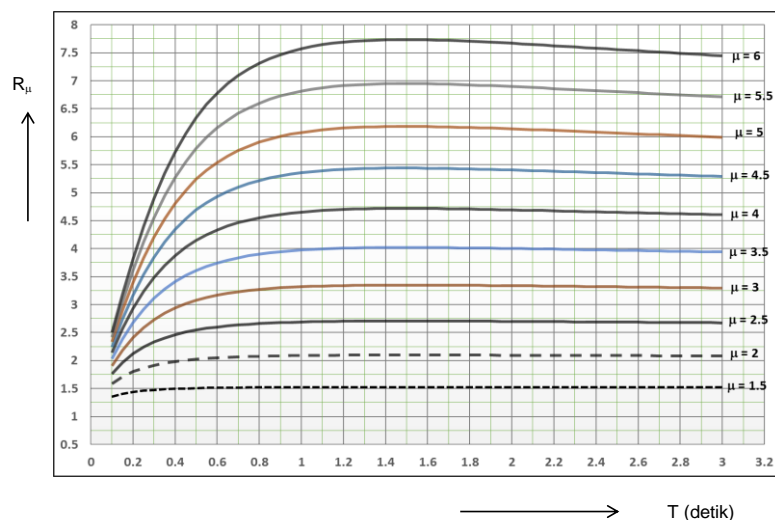
dengan

$$c = \frac{T^a}{T^a + 1} + \frac{b}{T} \quad (2)$$

Nilai a dan b tergantung dari nilai *strain hardening*, α , sebagai berikut:

$$\left. \begin{array}{l} \alpha = 0\%, \quad a = 1, \quad b = 0,42 \\ \alpha = 2\%, \quad a = 1,01, \quad b = 0,37 \\ \alpha = 10\%, \quad a = 0,8 \quad b = 0,29 \end{array} \right\} \quad (4)$$

Apabila digambarkan dalam suatu grafik diperoleh hubungan seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Hubungan $R_\mu - \mu - T$ untuk $\alpha = 10\%$

Nilai R_μ pada Gambar 2 dapat digunakan untuk memperoleh respons spektrum inelastik atau spektra titik luluh pada daktilitas konstan.

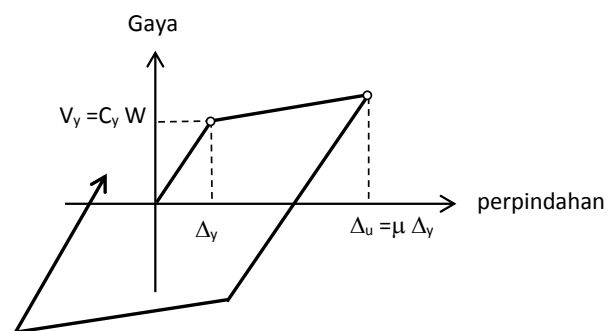
3 SPEKTRA TITIK LULUH

Penggunaan spektra titik luluh (*yield point spectra*) pertama kali diajukan oleh Aschheim dan Black (Aschheim, 1999; Black dan Aschheim, 2000; Aschheim dan Black, 2000), yang kemudian diadopsi dalam FEMA P-750 (Building Seismic Safety Council, 2009). Selanjutnya prosedur dalam bagian *resources paper* FEMA P-750 diikuti dalam tulisan ini.

Berbeda dengan grafik respons spektrum, yang menggambarkan hubungan antara perioda struktur dan perpindahan maksimum atau percepatan, spektra titik luluh menggambarkan hubungan antara perpindahan pada saat luluh dengan koefisien kuat luluh pada daktilitas konstan. Setiap titik pada kurva spektra titik luluh menggambarkan perpindahan pada saat luluh dan kuat luluh yang diperlukan untuk suatu daktilitas perpindahan tertentu. Spektra titik luluh dapat dibentuk berdasarkan respons spektrum dari suatu rekaman gempa tertentu atau berdasarkan respons spektrum menurut peraturan.

Secara sederhana hubungan antara perpindahan dan beban ditunjukkan pada Gambar 3 untuk sistem bilinear. Perpindahan saat luluh ditunjukkan dengan Δ_y , berkaitan dengan kuat luluh V_y , yang bertemu pada suatu titik luluh. Koefisien kuat geser ditentukan dengan membagi kuat luluh dengan berat bangunan menurut:

$$C_y = \frac{V_y}{W} \quad (5)$$



Gambar 3. Hubungan Beban-Perpindahan pada Sistem Bilinier

Hubungan antar perpindahan dan percepatan pada saat luluh dapat dinyatakan dengan:

$$\Delta_y = \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2 S_{ay} \quad (6)$$

dengan T = perioda alami, dan S_{ay} = spektra pseudo percepatan saat luluh.

Dari Gambar 3:

$$S_{ay} = C_y g \quad (7)$$

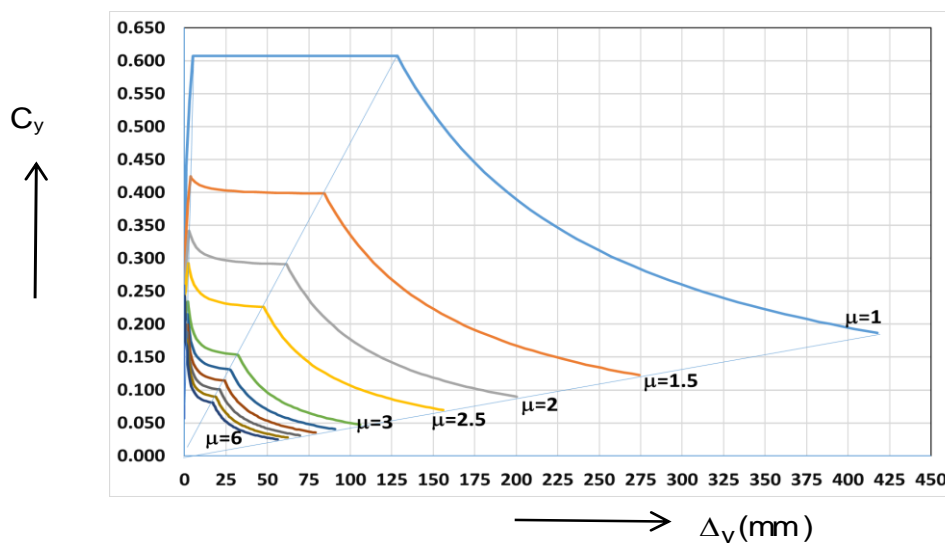
Dengan memperhatikan faktor reduksi kuat luluh pers. (1), pers. (6) dapat ditulis menjadi:

$$\Delta_y = \frac{1}{R_\mu} \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2 S_a \quad (8)$$

dengan S_a = spektrum respons percepatan.

Spektrum respons pada keadaan elastik dapat diperoleh baik untuk suatu guncangan tanah tertentu atau langsung dari spektrum respons berdasarkan peraturan. Pada Gambar 4 ditunjukkan spektra titik luluh (*yield point spectra*), yaitu hubungan antara perpindahan saat luluh, Δ_y , dengan koefisien kuat geser luluh, $C_y = S_a/R_\mu$, untuk kota Jakarta pada kondisi tanah lunak, dengan R_μ diambil menurut Nassar dan Krawinkler (1991).

Spektrum kota Jakarta diambil sesuai dengan SNI 1726-2012 (Badan Standardisasi Nasional, 2012). Untuk kondisi tanah yang lain, atau untuk spektra kota lain dapat diperoleh dengan cara yang sama.



Gambar 4. Spektra Titik Luluh untuk Kota Jakarta pada Kondisi Tanah Lunak

4 ESTIMASI PERPINDAHAN SAAT LULUH

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. Perkiraan nilai *yield drift ratio* menurut FEMA P-750 ditunjukkan pada Tabel 1. Nilai *yield drift ratio* digunakan sama seperti pada perkiraan perioda struktur dalam metode yang biasa digunakan. Walaupun demikian nilai *yield drift ratio* lebih stabil dibandingkan dengan perkiraan nilai perioda struktur (FEMA P-750).

Tabel 1. Perkiraan *Yield Drift Ratio* berdasarkan FEMA P-750

Sistem Penahan Beban Lateral	Perkiraan <i>yield drift ratio</i> , %
Bangunan Beton Bertulang:	
Rangka Momen	0,5 – 0,6
Dinding geser kantilever	0,10 h / l _w
Bangunan Baja:	
Rangka Momen	1 – 1,2
Special Truss Moment Frames	0,75
Rangka Bresing Konsentrik	0,3
Rangka Bresing Eksentrik	0,5
Rangka Bresing Tertahan Tekuk	0,3 – 0,5

Dengan menggunakan nilai pada Tabel 1, perpindahan pada saat luluh dapat dihitung dengan:

$$\Delta_y = \left(\frac{\Delta_y}{h} \right) h \quad (9)$$

dengan h = tinggi gedung.

5 PERPINDAHAN PUNCAK MAKSIMUM

Perpindahan puncak ditentukan berdasarkan pada dua hal, yaitu berdasarkan *story drift* yang diijinkan, dan berdasarkan batas daktilitas sistem.

Berdasarkan *story drift* ijin (Building Seismic Safety Council, 2009):

$$\Delta_{u,\Delta} = \left(\frac{\Delta_a}{h_{sx}} \right) \frac{h}{\alpha_{3,stat}} \quad (10)$$

dengan $\Delta_{u,\Delta}$ = perpindahan puncak berdasarkan *story drift*, Δ_a = *story drift* ijin, h_{sx} = tinggi tingkat yang ditinjau, dan $\alpha_{3,stat}$ = koefisien koreksi berdasarkan Tabel 2.

Tabel 2 Estimasi $\alpha_{3,stat}$ berdasarkan FEMA P-750

Jumlah tingkat	Rangka Momen	Sistem Ganda Dinding Geser dan Rangka Momen	Dinding Geser Kantilever Langsing dan Rangka Bresing
1	1	1	1
2	1.19	1	1.38
3	1.23	1	1.49
5	1.26	1	1.58
10	1.28	1	1.64
≥ 20	1.29	1	1.67

Berdasarkan batas daktilitas sistem, perpindahan puncak dapat dihitung dengan:

$$\Delta_{u,\mu} = \mu_d \Delta_y \quad (11)$$

dengan

$$\mu_d = \frac{\mu_c}{I} \quad (12)$$

μ_d = batas daktilitas rencana, μ_c = daktilitas sistem sesuai dengan Tabel 3, dan I = faktor kepentingan struktur.

Dari pers. (10) dan (11) target perpindahan pada puncak gedung ditentukan menurut:

$$\Delta_u = \min(\Delta_{u,\Delta}, \Delta_{u,\mu}) \quad (13)$$

Dengan diperolehnya target perpindahan puncak gedung, target kebutuhan daktilitas, μ_t , dihitung dengan:

$$\mu_t = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (14)$$

Tabel 3. Daktilitas Sistem, μ_t , untuk Gedung dengan Faktor Kepentingan Biasa 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
Bangunan Baja			
Rangka Momen	2,4	1,4	1,1
Rangka Momen Truss	2,1	-	-
Rangka Bressing Konsentrik	2,0	-	1,1
Rangka Bressing Tertahan Tekuk:			
Sambungan penahan momen pada kolom jauh dari link	3,2		
Sambungan non penahan momen pada kolom jauh dari link	2,8		
Rangka Bressing Eksentrik:			
Sambungan balok-kolom bukan penahan momen	2,8		
Sambungan balok-kolom dengan penahan momen	2,6		

6 GESER DASAR DAN SISTEM BERDERAJAT KEBEBASAN TUNGGAL EKIVALEN

Karena spektra titik luluh didasarkan pada sistem berderajat kebebasan tunggal, maka perlu ditentukan hubungan antara nilai-nilai yang ditetapkan berdasarkan sistem berderajat kebebasan majemuk dengan sistem berderajat kebebasan tunggal ekuivalen. Jika perpindahan puncak gedung pada saat luluh telah dihitung, perpindahan pada saat luluh untuk sistem berderajat kebebasan tunggal ekuivalen dihitung dengan persamaan:

$$\Delta_y^* = \frac{\Delta_y}{\Gamma_1} \quad (15)$$

dengan Δ_y = perpindahan pada saat luluh pada sistem berderajat kebebasan tunggal ekuivalen, dan Γ_1 = faktor partisipasi ragam pertama.

Faktor partisipasi ragam pertama dapat dihitung berdasarkan analisis dinamik berikut ini.

$$\Gamma_1 = \frac{\{\phi\}_1^T [W] \{1\}}{\{\phi\}_1^T [W] \{\phi\}_1} \quad (16)$$

dengan $\{\phi\}_1$ = vektor bentuk ragam pertama, $[W]$ = matriks diagonal berisi berat masing-masing lantai, dan $\{1\}$ = vektor berisi angka 1.

Dengan diketahuinya Δ_y dari pers. (15), kuat perlu dari sistem berderajat kebebasan tunggal ekuivalen untuk membatasi kebutuhan daktilitas sebesar μ_t dapat dihitung berdasarkan spektra titik luluh sebagai

$$V_y^* = C_y^* W^* \quad (17)$$

dengan $W^* = \{\phi\}_1^T [W] \{1\}$

Berdasarkan teori dalam analisis dinamik, geser dasar dapat diperoleh dengan:

$$V_y = V_y^* \Gamma_1 \quad (18)$$

Dengan mensubstitusikan pers. (17) pada pers. (18) diperoleh:

$$V_y = C_y^* W^* \Gamma_1 = C_y^* \{\phi\}_1^T [W] \{1\} \Gamma_1, \\ V_y = C_y^* \{\phi\}_1^T [W] \{1\} \left(\frac{W}{\{\phi\}_1^T [W] \{\phi\}_1} \right) \Gamma_1 = C_y^* \Gamma_1 \left(\frac{\{\phi\}_1^T [W] \{1\}}{\{\phi\}_1^T [W] \{\phi\}_1} \right) W$$

sehingga

$$V_y = C_y^* \alpha_1 W \quad (19)$$

dengan α_1 = koefisien massa ragam pertama, yaitu:

$$\alpha_1 = \Gamma_1 \left(\frac{\{\phi\}_1^T [W] \{1\}}{\{\phi\}_1^T [W] \{\phi\}_1} \right) \quad (20)$$

Koefisien kuat luluh C_y^* dapat diperoleh langsung dari spektra titik luluh. Pers. (19) dapat disederhanakan menjadi

$$V_y = C_y W \quad (21)$$

dengan

$$C_y = \alpha_1 C_y^* \quad (22)$$

Dalam praktek, faktor partisipasi ragam pertama Γ_1 , dan koefisien massa ragam pertama α_1 dapat diperkirakan menurut Tabel 4 (FEMA P-750). Dengan diketahuinya Δ_y^* dan C_y^* maka perioda yang sesuai dapat dihitung dengan

$$T^* = 2\pi \sqrt{\frac{\Delta y^*}{C_y^* g}} \quad (23)$$

Tabel 4. Koefisien massa ragam pertama α_1 berdasarkan FEMA P-750

Jumlah tingkat	Rangka Momen		Sistem Ganda Dinding Geser dan Rangka Momen		Dinding Geser Kantilever Langsing dan Rangka Bresing	
	Γ_1	α_1	Γ_1	α_1	Γ_1	α_1
1	1	1	1	1	1	1
2	1.21	0.94	1.24	0.89	1.24	0.76
3	1.27	0.90	1.33	0.85	1.35	0.70
5	1.32	0.86	1.4	0.82	1.46	0.66
10	1.35	0.82	1.45	0.79	1.54	0.63
≥ 20	1.37	0.80	1.48	0.77	1.59	0.62

7 DISTRIBUSI BEBAN LATERAL

Chao dkk. (2007) mengusulkan distribusi beban geser berdasarkan hasil pengamatan dari analisis dinamik nonlinier struktur. Berdasarkan usulan Chao dkk. (2007) yang dimodifikasi dalam FEMA P-750, beban lateral pada lantai dihitung dengan persamaan:

$$F_{i,\beta} = (\beta_i - \beta_{i+1})V_y \quad (24)$$

dengan $F_{i,\beta}$ = beban lateral pada lantai, β_i = rasio geser tingkat V_i terhadap geser dasar V_y yang dihitung berdasarkan:

$$\beta_i = \frac{V_i}{V_y} = \left(\frac{\sum_{j=i}^n w_j h_j}{\sum_{j=1}^n w_j h_j} \right)^{\alpha T^{-0.2}} \quad (25a)$$

$$\beta_{i+1} = 0 \text{ untuk } i = \text{puncak gedung (atap)} \quad (25b)$$

Selanjutnya FEMA P-750 menyarankan untuk mengoreksi gaya geser dasar berdasarkan:

$$V_{yc} = \left(\frac{h_{eff,l}}{h_{eff,\beta}} \right) V_y \quad (26)$$

dengan $h_{eff,l}$ = titik berat dari momen guling berdasarkan ragam ke 1, dan $h_{eff,\beta}$ = titik berat momen guling yang dihitung berdasarkan distribusi beban lateral yang bekerja.

Nilai rasio $\frac{h_{eff,1}}{h}$ berdasarkan FEMA P-750 dapat dilihat pada Tabel 5, sedangkan nilai $h_{eff,\beta}$ dapat diperoleh dari persamaan:

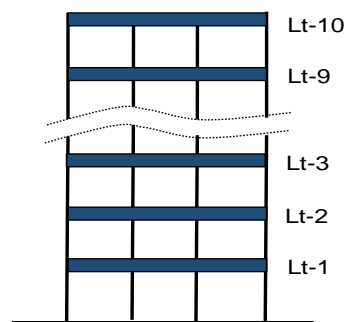
$$h_{eff,\beta} = \frac{\sum F_i h_i}{\sum F_i} \quad (27)$$

Tabel 5. Rasio $\frac{h_{eff,1}}{h}$ berdasarkan FEMA P-750

Jumlah tingkat	Rangka Momen	Sistem Ganda Dinding Geser dan Rangka Momen	Dinding Geser Kantilever Langsing dan Rangka Bresing
1	1	1	1
2	0.79	0.81	0.86
3	0.73	0.75	0.81
5	0.70	0.71	0.78
10	0.67	0.69	0.75
≥ 20	0.66	0.68	0.74

8 CONTOH PENGGUNAAN

Ditinjau suatu struktur rangka momen 10 lantai seperti ditunjukkan pada Gambar 5. Tinggi antar tingkat = 4 m. Massa lantai: $m_1 = m_2 = 528,8318$ ton, $m_3 = 523,5474$ ton, $m_4 = m_5 = m_6 = 518,263$ ton, $m_7 = 525,1458$, $m_8 = m_9 = 491,2538$ ton, dan $m_{10} = 471,682$ ton, $g = 9810$ mm/detik². Struktur direncanakan di Jakarta pada kondisi tanah lunak. Struktur direncanakan untuk kantor, sehingga faktor kepentingan $I = 1$.



Gambar 5. Struktur 10 lantai

Hitungan untuk mendapatkan geser dasar dan distribusi beban lateral pada setiap lantai dilakukan sebagai berikut ini.

- Berdasarkan Tabel 1 untuk rangka momen, *yield drift ratio* diperkirakan = 0,55%. *Yield drift* pada atap berdasarkan pers.(9):

$$\Delta_y = 0,55/100 \times 40 = 0,22 \text{ m} = 220 \text{ mm.}$$

- b. Dari Tabel 3, daktilitas ijin untuk sistem rangka momen $\mu_t = 2,4$.
Batas perpindahan puncak berdasarkan daktilitas ijin dihitung dengan pers. (11) dengan mengingat faktor kepentingan $I = 1$:

$$\Delta_{u,\mu} = \mu_d \Delta_y = 2,4 \times 220 = 528 \text{ mm}$$

Berdasarkan Tabel 16 SNI 1726-2012, simpangan antar lantai ijin

$$\begin{aligned} \Delta_a &= 0,020 h_{sx} \\ \Delta_a &= 0,020 \times 40 = 0,80 \text{ m} = 800 \text{ mm}. \end{aligned}$$

Dari Tabel 3 $\alpha_{3,stat} = 1,28$.

Berdasarkan pers. (10):

$$\begin{aligned} \Delta_{u,\Delta} &= \left(\frac{\Delta_a}{h_{sx}} \right) \frac{h}{\alpha_{3,stat}} \\ \Delta_{u,\Delta} &= (0,020) \frac{40}{1,28} = 0,625 \text{ m} = 625 \text{ mm} \end{aligned}$$

Δ_u ditentukan dari $\Delta_u = \min(\Delta_{u,\mu}, \Delta_{u,\Delta})$

$$\Delta_u = \min(528, 625) = 528 \text{ mm}.$$

Dalam hal ini $\mu_t = 528 / 220 = 2,4$.

- c. Berdasarkan Tabel 4, faktor partisipasi ragam ke 1 $\Gamma_1 = 1,35$, sehingga *yield drift* dari sistem berderajat kebebasan tunggal ekuivalen menjadi:

$$\Delta_y^* = \frac{\Delta_y}{\Gamma_1} = \frac{220}{1,35} = 162,96 \text{ mm} \approx 163 \text{ mm}.$$

Dengan daktilitas $\mu_t = 2,4$ selanjutnya digambarkan pada grafik spektra titik luluh untuk kota Jakarta pada kondisi tanah lunak untuk mendapatkan koefisien geser dasar pada saat luluh C_y^* . Nilai C_y^* dapat diperoleh juga berdasarkan Gambar 6 dan Tabel 6. Nilai R_μ dalam tulisan ini diambil berdasarkan Nassar dan Krawinkler (1991).

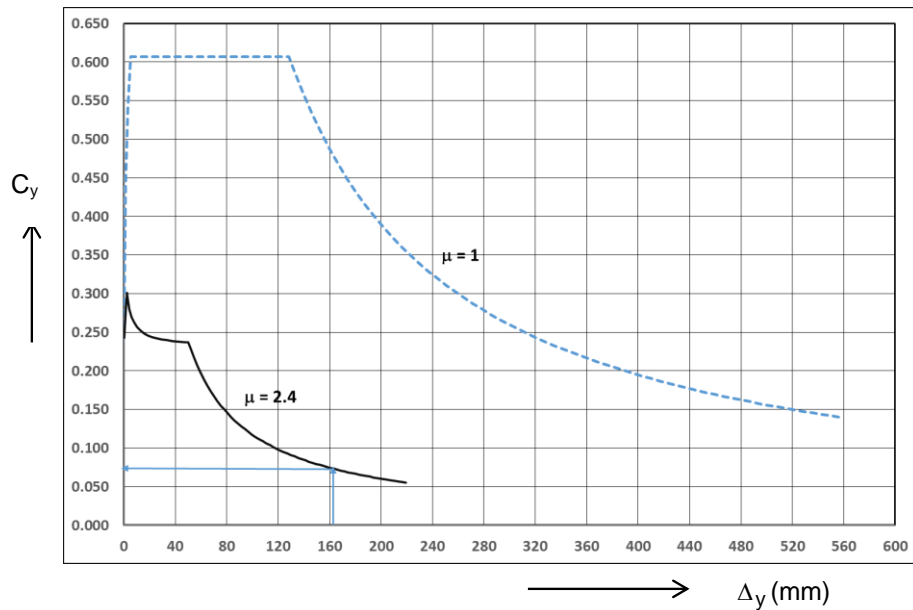
Dari Gambar 6 dan Tabel 6 untuk $\Delta_y = 163 \text{ mm}$ diperoleh $C_y^* \approx 0,0732$.

Dari Tabel 4 $\alpha_1 = 0,82$, sehingga nilai koefisien kuat geser minimum menjadi:

$$C_y = \alpha_1 C_y^* = 0,82 \times 0,0732 = 0,06.$$

Geser dasar menjadi:

$$V_y = C_y W = 0,06 \times 50181,44 = 3012,09 \text{ kN}$$



Gambar 6. Spektra titik luluh Jakarta tanah lunak $\mu = 1$ dan $\mu = 2,4$

Tabel 6. Koefisien-koefisien untuk $\mu_t = 2,4$

T (detik)	R_μ	C_y	Δ_y (mm)
2.85	2.5583	0.0768	155.02
2.9	2.5573	0.0755	157.80
2.95	2.5562	0.0743	160.59
3	2.5552	0.0731	163.38
3.05	2.5542	0.0719	166.17
3.1	2.5532	0.0708	168.96
3.15	2.5522	0.0697	171.75

- d. Distribusi beban lateral menurut Chao dkk. (2007) dan Building Seismic Safety (2009) dihitung berdasarkan pers. (24) dan (25):

$$F_{i,\beta} = (\beta_i - \beta_{i+1})V_y$$

$$\beta_i = \frac{V_i}{V_y} = \left(\frac{\sum_{j=i}^n w_j h_j}{\sum_{j=1}^n w_j h_j} \right)^{\alpha T^{-0.2}}$$

dengan $\alpha = 0,75$ dan T_e dihitung dengan pers. (22):

$$T = T_e = 2\pi \sqrt{\frac{\Delta_y^*}{C_y g}} = 2\pi \sqrt{\frac{163}{0,0732 \times 9810}} = 2,99 \text{ detik}$$

Hasil selanjutnya disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7. Distribusi beban lateral

Lt	hi (m)	W _i (kN)	W _i h _i (kNm)	∑ W _i h _i (kNm)	β _i = $\frac{V_i}{V_y}$	F _{i,β} / V _y	F _{i,β} (kN)	F _{i,β} × h _i (kNm)
10	40	4627.2	185088	185088.00	0.344	0.344	1037.58	41503.33
9	36	4819.2	173491.2	358579.20	0.513	0.169	507.71	18277.73
8	32	4819.2	154214.4	512793.60	0.636	0.123	371.55	11889.45
7	28	5151.68	144247.04	657040.64	0.739	0.102	308.65	8642.119
6	24	5084.16	122019.84	779060.48	0.819	0.080	240.46	5771.054
5	20	5084.16	101683.2	880743.68	0.881	0.063	189.11	3782.244
4	16	5084.16	81346.56	962090.24	0.930	0.048	145.10	2321.615
3	12	5136	61632	1023722.24	0.965	0.035	106.71	1280.481
2	8	5187.84	41502.72	1065224.96	0.988	0.023	70.42	563.3582
1	4	5187.84	20751.36	1085976.32	1.000	0.012	34.80	139.2004
	∑	50181.4	1085976.32			1	3012.09	94170.58

e. Tinggi efektif dari resultan gaya lateral dihitung dengan:

$$h_{\text{eff},\beta} = \frac{\sum F_i h_i}{\sum F_i} = \frac{94170,58}{3012,09} = 31,284 \text{ m}$$

$$\frac{h_{\text{eff},\beta}}{h} = \frac{31,284}{40} = 0,7816$$

Dari Tabel 5:

$$\frac{h_{\text{eff},1}}{h} = 0,67.$$

Geser dasar disesuaikan menjadi

$$V_{yc} = \left(\frac{h_{\text{eff},1}}{h_{\text{eff},\beta}} \right) V_y = \frac{0,67}{0,7816} V_y = 0,8572 V_y$$

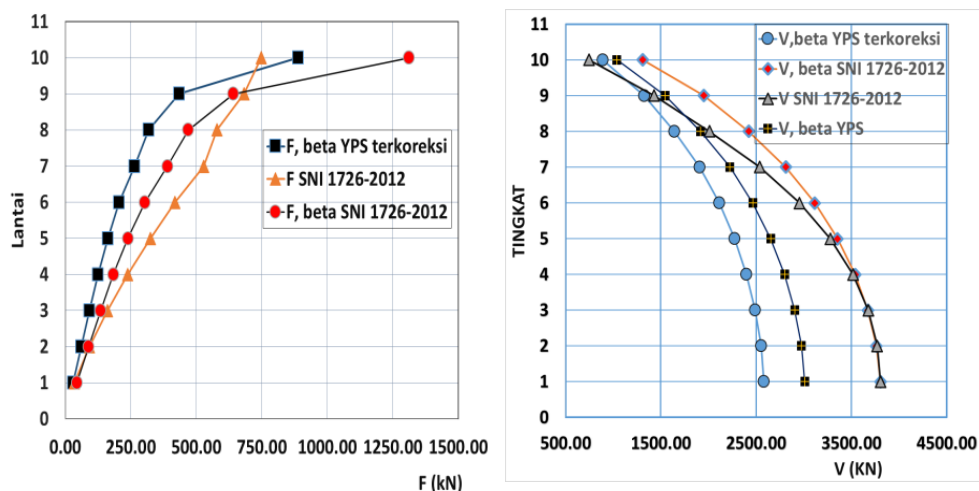
$$V_{yc} = 2582 \text{ kN}$$

Distribusi beban lateral selanjutnya dapat dilakukan seperti pada Tabel 7 dengan $V_y = 2582 \text{ kN}$.

Selanjutnya gaya terkoreksi disajikan pada Tabel 8 (kolom2). Pada Tabel 8 disajikan pula perbandingan dengan gaya-gaya lateral yang diperoleh berdasarkan SNI 1726-2012 (kolom 3), dan gaya lateral berdasarkan rasio geser tingkat, tetapi geser tingkat menggunakan V SNI 1726-2012 (kolom 4). Pada Tabel 8 disajikan juga geser tingkat berdasarkan: (a) spektra titik luluh dengan distribusi berdasarkan rasio geser, (b) SNI 1726 2012, dan (c) SNI 1726 tetapi distribusi berdasarkan rasio geser, yaitu berturut-turut pada kolom 5, 6 dan 7. Perbandingan gaya-gaya disajikan juga pada Gambar 7.

Tabel 8. Perbandingan gaya-gaya

Level	$F_{i,\beta}$ YPS terkoreksi (kN)	F_i SNI 1726-2012 (kN)	$F_{i,\beta}$ SNI 1726-2012 (kN)	$V_{i,\beta}$ YPS terkoreksi (kN)	V_i SNI 1726-2012 (kN)	$V_{i,\beta}$ SNI 1726-2012 (kN)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
10	889.43	747.63	1311.59	889.43	747.63	1311.59
9	435.22	683.10	641.79	1324.65	1430.72	1953.38
8	318.49	579.60	469.66	1643.14	2010.32	2423.04
7	264.58	528.01	390.15	1907.71	2538.34	2813.19
6	206.13	418.08	303.96	2113.84	2956.42	3117.15
5	162.11	324.19	239.05	2275.95	3280.61	3356.21
4	124.38	237.47	183.42	2400.33	3518.08	3539.62
3	91.47	161.24	134.89	2491.80	3679.32	3674.51
2	60.36	92.88	89.02	2552.17	3772.20	3763.53
1	29.83	35.32	43.99	2582.00	3807.52	3807.52



Gambar 7. Perbandingan gaya lateral dan geser tingkat

Dari Tabel 8 dan Gambar 7 tampak bahwa geser dasar tingkat berdasarkan spektra titik luluh lebih kecil daripada geser tingkat berdasarkan SNI 1726-2012. Dari Gambar 7, tampak bahwa secara umum geser tingkat pada tingkat-tingkat atas yang dihitung berdasarkan rasio geser yang diusulkan Chao dkk (2007) dan Building Seismic Safety Council (2009) nilainya lebih besar daripada geser tingkat yang dihitung berdasarkan SNI 1726-2012.

Walaupun metode berdasarkan spektra titik luluh, target *drift* dan daktilitas diusulkan sebagai metode alternatif dalam Building Seismic Safety Council (2009), namun perlu pengkajian yang lebih mendalam sebelum metode ini digunakan sebagai cara untuk menghitung beban geser dan distribusi beban lateral akibat gempa pada struktur.

9 KESIMPULAN

Penentuan geser dasar pada gedung berdasarkan spektra titik luluh telah dibahas dalam tulisan ini. Spektra titik luluh dengan daktilitas konstan diturunkan berdasarkan koefisien reduksi kuat luluh R_{μ} . Dengan menggunakan R_{μ} , spektra titik luluh yang menggambarkan hubungan perpindahan saat luluh dan koefisien geser dasar dengan daktilitas konstan dapat digambarkan dalam suatu grafik. Selanjutnya distribusi beban lateral ditentukan berdasarkan rasio geser tingkat terhadap geser dasar pada kondisi luluh. Dari hasil analisis terhadap contoh struktur yang ditinjau diperoleh bahwa geser dasar tingkat yang dihitung berdasarkan spektra titik luluh nilainya lebih kecil dibandingkan dengan geser dasar tingkat yang diperoleh berdasarkan SNI 1726-2012. Nilai geser tingkat berdasarkan rasio geser menunjukkan bahwa nilai geser tingkat pada tingkat-tingkat atas lebih besar dibandingkan dengan geser tingkat yang dihitung berdasarkan SNI 1726-2012. Jika metode berdasarkan spektra titik luluh akan digunakan sebagai alternatif dalam penentuan beban gempa, perlu pengkajian yang lebih mendalam untuk memastikan bahwa struktur yang dihitung dengan metode ini mempunyai perilaku yang lebih baik dibandingkan dengan metode yang sudah ada.

10 REFERENSI

- Aschheim, M. (1999). "Yield Point Spectra: A Simple Alternative to The Capacity Spectrum Method", SEAOC 1999 Convention, 373-379.
- Aschheim, M dan Black, E. (2000). "Yield Point Spectra for Seismic Design and Rehabilitation", Earthquake Spectra, 16(2):317-336.
- Black, E dan Aschheim, M (2000). "Seismic Design and Evaluation of Multistory Buildings Using Yield Point Spectra", Mid-America Earthquake Center.
- 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, Washingtn DC.
- Chao, S.H., Goel, S.C. dan Lee, S.S. (2007). "A seismic design lateral force distribution based on inelastic state of structures", Earthquake Spectra, 23(3), 547-569.
- Federal Emergency Management Agency (2005). "Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedure, FEMA 440", Federal Emergency Management Agency, 2005, Washington DC.

- Miranda, E and Bertero, V. V. (1994). "*Evaluation of Strength Reduction Factors for Earthquake-Resistant Design*", *Earthquake Spectra*, 10(2), 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.
- Newmark, N.M, dan Hall, W.J. (1982). "*Earthquake Spectra and Design*", Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, CA.
- Vidic, T., Fayfar, P, dan Fischinger, M (1994). "*Consistent Inelastic Design Spectra: Strength and Displacement*", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 23(5), 507-521.