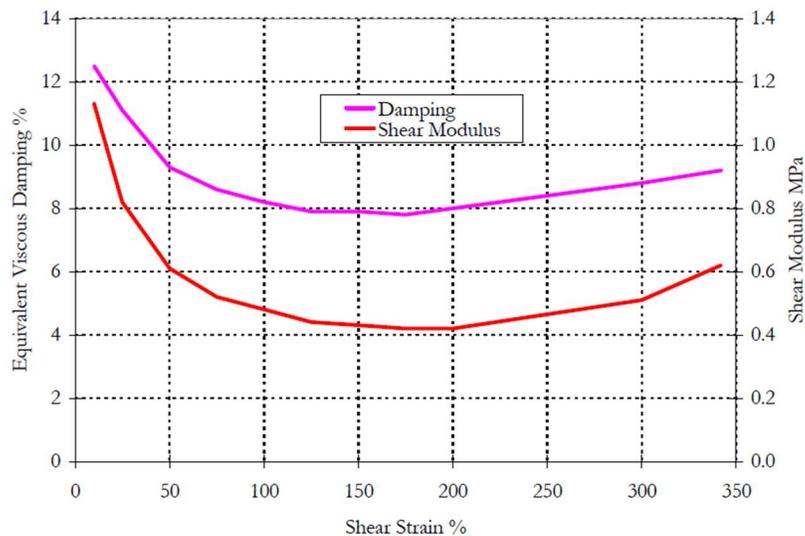


## BAB III

### LANDASAN TEORI

#### 3.1 Karakteristik *High Damping Rubber Bearings*

Nilai modulus geser awal yang tinggi merupakan karakteristik dari *High Damping Rubber* karena memungkinkan untuk menahan beban layanan seperti angin tanpa gerakan berlebihan. Modulus geser adalah fungsi dari regangan geser yang diterapkan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.2. Pada level regangan rendah, yaitu kurang dari 10%, modulus geser bernilai sekitar 1,2 MPa. Semakin tinggi level regangan geser, semakin berkurang nilai modulus gesernya, dalam hal ini mencapai nilai minimum 0,4 MPa berada pada tingkat regangan geser antara 150% dan 200% pada saat regangan geser terus dinaikan maka modulus geser akan meningkat lagi, nilai modulus geser mencapai 0,6 MPa pada tingkat regangan geser 340%.



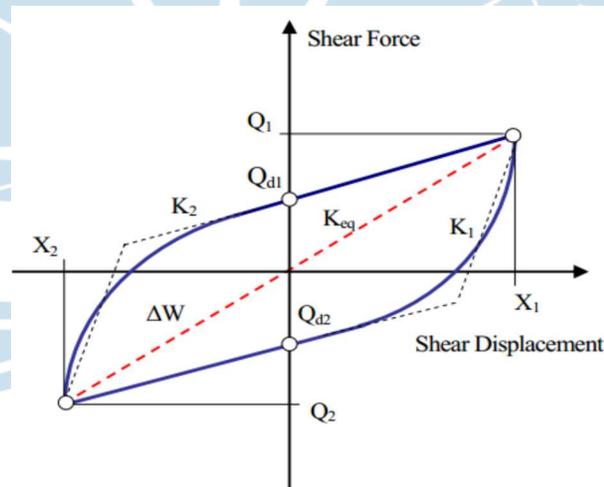
Gambar 3.1 Modulus Geser dan Redaman HDR (Skinner dkk, 2011)

Properti mekanis yang paling penting dari bantalan isolasi adalah *horizontal stiffness*, dengan persamaan sebagai berikut:

$$K_H = \frac{GA}{t_r} \quad (3-1)$$

Dimana  $G$  adalah modulus geser dari elastomer,  $A$  adalah luas penampang, dan  $t_r$  adalah total ketebalan *rubber*. *Displacement* horizontal maksimum  $D$  terkait dengan regangan geser maksimum  $\gamma$

$$\gamma = \frac{D}{t_r} \quad (3-2)$$



Gambar 3.2 Parameter horizontal dari HDR pada kurva hysteresis *shear force-shear displacement* (Setiadi, 2015)

Nilai parameter horizontal dari HDRB ditunjukkan pada kurva *hysteresis* Gambar 3.3. Nilai kekakuan lateral ekivalen ( $K_{eq}$ ) dan nilai redaman ekivalen ( $H_{eq}$ ) merupakan dua parameter penting yang digunakan dalam *trial* awal kebutuhan deformasi lateral *seismic isolation* dengan metode analisis statik ekivalen. Nilai ini

digunakan untuk mensimplifikasi respons nonlinear dari HDRB, namun tetap akan diverifikasi lagi dengan analisis dinamik. Karena nilai  $K_{eq}$  dan  $H_{eq}$  merupakan pendekatan linearitas maka nilai ini berubah-ubah bergantung pada regangan geser yang terjadi.

*Vertical stiffness* ( $K_V$ ) sangat dibutuhkan dalam perancangan komponen *bearing*. Frekuensi vertikal dari struktur yang terisolasi, yang mana sering dijadikan kriteria penting dalam desain, dikontrol oleh *vertical stiffness base isolation* yang tercakup dalam sistem. Nilai *vertical stiffness* bergantung pada area efektif untuk deformasi lateral yang terjadi. Semakin tinggi nilai deformasi lateral yang terjadi, nilai efektif area semakin rendah dan *vertical stiffness* semakin kecil. Persamaan dari *Vertical stiffness bearing* adalah sebagai berikut

$$K_V = \frac{E_c A}{t_r} \quad (3-3)$$

Nilai  $E_c$  adalah modulus kompresi dari komposit karet-baja di bawah level beban vertikal yang ditentukan. Modulus kompresi  $E_c$  untuk lapisan karet tunggal dikontrol oleh *Shape factor*  $S$

$$S = \frac{\Phi}{4t} \quad (3-4)$$

Persamaan untuk menentukan nilai *Shape factor* disesuaikan dengan bentuk dan dimensi dari bantalan terhadap rasio dari lapisan tunggal elastomer dimana  $\Phi$  adalah diameter bantalan dan  $t$  adalah ketebalan layer karet. Persamaan modulus kompresi adalah

$$E_c = \frac{6GS^2K}{6GS^2+K} \quad (3-5)$$

Dimana  $G$  adalah modulus geser,  $S$  adalah *Shape factor*, dan  $K$  adalah *bulk modulus*.

### 3.2 Perencanaan Gempa Menurut SNI-03-1726-2019

#### 3.2.1 Faktor Keutamaan

Struktur bangunan gedung dan nongedung dibagi menjadi beberapa kategori risiko, setiap kategori risiko akan dikalikan dengan suatu faktor keutamaan gempa  $I_e$  sesuai pengaruh gempa rencananya.

Tabel 3.1 - Faktor Keutamaan Gempa (SNI-03-1726-2019)

Kategori Risiko	Faktor Keutamaan Gempa ( $I_e$ )
I atau II	1,0
III	1,25
IV	1,5

#### 3.2.2 Parameter Respons Spektral Percepatan

Faktor amplifikasi seismik pada periode 0,2 detik dan periode 1 detik diperlukan untuk menentukan respons spektral percepatan gempa  $MCE_R$  di permukaan tanah. Faktor amplifikasi meliputi faktor amplifikasi getaran terkait percepatan pada getaran periode pendek ( $F_a$ ) dan faktor amplifikasi terkait percepatan yang mewakili getaran periode 1 detik ( $F_v$ ). Parameter respons spektral percepatan pada periode pendek ( $S_{MS}$ ) dan periode 1 detik ( $S_{M1}$ ) yang disesuaikan dengan pengaruh klasifikasi situs, dapat ditentukan dengan perumusan berikut ini:

$$S_{MS} = F_a S_s \quad (3-6)$$

$$S_{M1} = F_v S_1 \quad (3-7)$$

Keterangan:

$S_s$  = parameter respons spectral percepatan gempa  $MCE_R$  terpetakan untuk periode pendek.

$S_1$  = parameter respons spectral percepatan gempa  $MCE_R$  terpetakan untuk periode 1 detik.

Tabel 3.2 - Koefisien situs,  $F_a$  (SNI-03-1726-2019)

Kelas situs	Parameter respons spectral percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget ( $MCE_R$ ) terpetakan pada periode pendek, $T = 0,2$ detik, $S_s$					
	$S_s \leq 0,25$	$S_s = 0,5$	$S_s = 0,75$	$S_s = 1,0$	$S_s = 1,25$	$S_s \geq 1,5$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
SC	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2
SD	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0	1,0
SE	2,4	1,7	1,3	1,1	0,9	0,8
SF	$SS^{(a)}$					

Tabel 3.3 - Koefisien situs,  $F_v$  (SNI-03-1726-2019)

Kelas situs	Parameter respons spectral percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget ( $MCE_R$ ) terpetakan pada periode 1 detik, $S_1$					
	$S_s \leq 0,1$	$S_s = 0,$	$S_s = 0,2$	$S_s = 0,3$	$S_s = 0,5$	$S_s \geq 0,6$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SC	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4
SD	2,4	2,2	2,0	1,9	1,8	1,7
SE	4,2	3,3	2,8	2,4	2,2	2,0
SF	$SS^{(a)}$					

CATATAN:

- (a) SS = situs yang memerlukan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons situs-spesifik

### 3.2.3 Parameter Percepatan Spektral Desain

Parameter percepatan spektral desain untuk periode pendek,  $S_{DS}$  dan pada periode 1 detik,  $S_{D1}$ , harus ditentukan melalui perumusan berikut ini:

$$S_{DS} = \frac{2}{3} S_{MS} \quad (3-8)$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} S_{M1} \quad (3-9)$$

Beberapa parameter yang digunakan dalam sistem struktur penahan gaya seismik adalah nilai Faktor koefisien modifikasi respons ( $R$ ), Faktor kuat lebih sistem ( $\Omega_0$ ), Faktor pembesaran defleksi ( $C_d$ ) dan tinggi bangunan. Parameter-parameter tersebut harus diterapkan pada sistem, termasuk batasan sistem struktur yang termuat dalam Tabel 12 SNI-03-1726-2019.

### 3.2.4 Penentuan Periode Fundamental Struktur

Penentuan periode fundamental struktur ( $T$ ) harus di dahului dengan menentukan periode fundamental pendekatan ( $T_a$ ), ditentukan dari persamaan berikut:

$$T_a = C_t h_n^x \quad (3-15)$$

Keterangan:

$h_n$  adalah ketinggian struktur (m), di atas dasar sampai tingkat tertinggi struktur, dan  $C_t$  dan  $x$  ditentukan dari Tabel 3.6.

Tabel 3.4 - Nilai Parameter Periode Pendekatan  $C_t$  dan  $x$ 

Tipe struktur	$C_t$	$x$
Sistem rangka pemikul momen di mana rangka pemikul 100% gaya seismik yang diisyaratkan dan tidak dilingkupi atau dihubungkan dengan komponen yang lebih kaku dan akan mencegah rangka dari defleksi jika dikenai gaya seismic:		
• Rangka baja pemikul momen	0,0724	0,8
• Rangka beton pemikul momen	0,0466	0,9
Rangka baja dengan bresing eksentris	0,0731	0,75
Rangka baja dengan bresing terkekang terhadap tekuk	0,0731	0,75
Semua sistem struktur lainnya	0,0488	0,75

Menurut SNI-03-1726-2019 Pasal 7.8.2, periode fundamental struktur yang digunakan adalah:

- Jika  $T_c > C_u T_a$ , maka digunakan  $T = C_u T_a$
- Jika  $T_a < T_c < C_u T_a$ , maka digunakan  $T = T_c$
- Jika  $T_c < T_a$ , maka digunakan  $T = T_a$

Dimana  $T_c$  adalah periode fundamental yang diperoleh dari program analisa struktur. Koefisien batasan atas pada periode yang dihitung ( $C_u$ ) dapat ditentukan dari nilai  $S_{DI}$  pada Tabel 3.7

Tabel 3.5 - Koefisien untuk batas atas pada periode yang dihitung

Parameter percepatan respons spektral desain pada 1 detik, $S_{DI}$	Koefisien $C_u$
$\geq 0,4$	1,4
0,3	1,4
0,2	1,5
0,15	1,6
$\leq 0,1$	1,7

Gaya geser dasar seismik,  $V$ , dalam arah yang ditetapkan harus ditentukan sesuai dengan persamaan berikut:

$$V = C_s W \quad (3-10)$$

Keterangan:

$C_s$  = koefisien respons seismik yang ditentukan sesuai dengan persamaan (3-11)

$W$  = berat seismik efektif menurut pasal 7.7.2 (SNI-03-1726-2019)

Koefisien respon seismik dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$C_s = \frac{S_{DS}}{\left(\frac{R}{I_e}\right)} \quad (3-11)$$

Nilai  $C_s$  pada persamaan di atas tidak perlu melebihi berikut ini:

Untuk  $T \leq T_L$

$$C_s = \frac{S_{D1}}{T \left(\frac{R}{I_e}\right)} \quad (3-12)$$

Untuk  $T > T_L$

$$C_s = \frac{S_{D1} T}{T^2 \left(\frac{R}{I_e}\right)} \quad (3-13)$$

$C_s$  harus tidak kurang dari

$$C_s = 0,044 S_{DS} I_e \geq 0,01 \quad (3-14)$$

Jika struktur berada di daerah di mana  $S_I \geq 0,6g$ , maka  $C_s$  harus tidak kurang dari:

$$C_s = \frac{0,5S_1}{\left(\frac{R}{I_e}\right)} \quad (3-15)$$

Keterangan:

$S_{DS}$  = parameter percepatan respons spektral desain dalam rentang periode pendek

$R$  = koefisien modifikasi respons dalam Tabel 12 SNI-03-1726-2019

$I_e$  = faktor keutamaan gempa

### 3.2.5 Simpangan Antar Tingkat

Gaya geser tingkat desain seismik di semua tingkat dapat ditentukan dari persamaan berikut:

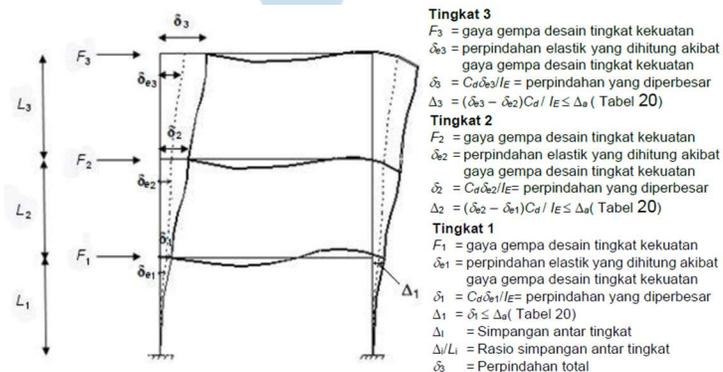
$$\delta_x = \frac{C_d \delta_{xe}}{I_e} \quad (3-16)$$

Keterangan:

$C_d$  = faktor pembesaran simpangan lateral dalam Tabel 12 SNI-03-1726-2019

$\delta_{xe}$  = simpangan di tingkat-x

$I_e$  = faktor keutamaan gempa



Gambar 3.3 Penentuan Simpangan Antar Tingkat (SNI-03-1726-2019)

### 3.2.6 Kombinasi Beban untuk Metode Ultimit

Kombinasi pembebanan dasar:

1.  $1,4D$
2.  $1,2D + 1,6L + 0,5 (L_r \text{ atau } R)$
3.  $1,2D + 1,6(L_r \text{ atau } R) + (L \text{ atau } 0,5 W)$
4.  $1,2D + 1,0W + L + 0,5 (L_r \text{ atau } R)$
5.  $0,9D + 1,0W$
6.  $1,2D + E_v + E_h + L$
7.  $0,9D - E_v + E_h$

Faktor beban untuk  $L$  pada kombinasi 6 diizinkan diambil sama dengan 0,5 untuk semua fungsi ruang apabila  $L_0$  dalam SNI 1727, lebih kecil atau sama dengan  $4,78 \text{ kN/m}^2$ , kecuali garasi atau ruang pertemuan publik. Pengaruh beban seismik,  $E$ , harus ditentukan sesuai dengan berikut ini:

1. Untuk penggunaan dalam kombinasi beban 6,  $E$  harus ditentukan sesuai dengan persamaan berikut:

$$E = E_h + E_v \quad (3-17)$$

2. Untuk penggunaan dalam kombinasi beban 7,  $E$  harus ditentukan sesuai dengan persamaan berikut:

$$E = E_h - E_v \quad (3-18)$$

Pengaruh beban seismik horizontal,  $E_h$ , dan pengaruh beban seismik vertikal harus ditentukan sesuai dengan persamaan berikut:

$$E_h = \rho Q_E \quad (3-19)$$

$$E_v = 0,2 S_{DS} D \quad (3-20)$$

Keterangan:

$E$  = pengaruh beban seismik

$E_h$  = pengaruh beban seismik horizontal

$E_v$  = pengaruh beban seismik vertikal

$Q_E$  = pengaruh gaya seismik horizontal dari  $V$  atau  $F_p$

$\rho$  = faktor redudansi

$S_{DS}$  = parameter percepatan respons spectral desain pada periode pendek

$D$  = pengaruh beban mati

$L$  = pengaruh beban hidup

$L_r$  = pengaruh beban hidup pada atap

$R$  = pengaruh beban hujan

$W$  = pengaruh beban angin

### 3.3 Struktur dengan *Base Isolation* Menurut SNI-03-1726-2019

Perencanaan struktur dengan *base isolation* mengikuti persyaratan-persyaratan dan prosedur analisa dinamik yang tercantum pada Pasal 12 SNI-03-1726-2019 atau ASCE 7-16 sebagai acuannya.

- Faktor keutamaan gempa ( $I_e$ )

Faktor keutamaan gempa harus diambil sebesar 1,0 untuk struktur dengan isolasi seismik, tanpa membedakan kategori risiko yang diterapkan.

- Konfigurasi

Struktur dengan isolasi dasar harus ditetapkan memiliki ketidakberaturan struktur jika konfigurasi struktur di atas sistem isolasi memiliki ketidakberaturan horizontal Tipe 1b seperti dijelaskan pada Tabel 13 SNI-03-1726-2019, atau ketidakberaturan vertikal Tipe 1a, 1b, 5a, 5b seperti dijelaskan pada Tabel 14 SNI 1726:2019.

- Redudansi

Nilai faktor redudansi pada struktur di atas sistem isolasi adalah sama dengan 1,0 jika struktur tidak memiliki ketidakberaturan struktur, seperti yang tercantum pada Pasal 7.3.2 SNI-03-1726-2019.

### 3.3.1 Prosedur Analisis Spektrum Respons

Struktur yang akan dirancang dengan isolasi seismik harus memenuhi kriteria-kriteria berikut ini:

- Struktur terletak pada kelas situs *SA*, *SB*, *SC*, atau *SD*.
- Periode efektif struktur pada perpindahan maksimum,  $D_M$ , kurang atau sama dengan 5 detik.
- Tinggi struktur di atas pemisah isolasi kurang atau sama dengan 4 lantai, atau 19,8 m dari tinggi struktur,  $h_n$ , diukur dari dasar.
- Struktur di atas sistem isolasi tidak memiliki ketidakberaturan struktur seperti yang dijelaskan pada SNI-03-1726-2019 pasal 12.2.2 tentang konfigurasi.

### 3.3.2 Perpindahan Maksimum

Sistem isolasi disyaratkan harus mampu untuk menahan perpindahan maksimum,  $D_M$ , ditentukan sesuai dengan persamaan berikut:

$$D_M = \frac{g S_{M1} T_M}{4\pi^2 B_M} \quad (3-21)$$

Keterangan:

$g$  = percepatan gravitasi

$S_{MI}$  = parameter percepatan spektral gempa maksimum yang dipertimbangkan dengan redaman 5% pada periode 1 detik dengan satuan g

$T_M$  = periode efektif struktur dengan isolasi seismik, dalam detik, pada perpindahan maksimum dalam arah yang ditinjau

$B_M$  = koefisien numerik terkait dengan redaman efektif sistem isolasi pada perpindahan maksimum,  $\beta_M$ , seperti yang diatur dalam Tabel 3.8

Tabel 3.6 - Faktor Redaman,  $B_M$

Redaman efektif, $\beta_M$ (Persentase dari redaman kritis) <sup>a,b</sup>	Faktor $B_M$
$\leq 2$	0,8
5	1,0
10	1,2
20	1,5
30	1,7
40	1,9
$\geq 50$	2,0

### 3.3.3 Periode Efektif pada Perpindahan Maksimum

Periode efektif struktur yang diisolasi pada perpindahan maksimum,  $T_M$ , harus ditentukan dengan persamaan berikut:

$$T_M = 2\pi \sqrt{\frac{W}{k_{M \min} g}} \quad (3-22)$$

Keterangan:

$W$  = berat seismik efektif struktur di atas pemisah isolasi

$k_M$  = kekakuan efektif minimum sistem isolasi (kN/mm) pada perpindahan rencana di arah horizontal yang ditinjau

$g$  = percepatan gravitasi

### 3.3.4 Perpindahan Maksimum Total

Perpindahan maksimum total,  $D_{TM}$ , dari elemen-elemen sistem isolasi harus menyertakan perpindahan tambahan akibat torsi sesungguhnya dan torsi tak terduga

$$D_{TM} = D_M \left( 1 + \left( \frac{y}{P_T^2} \right) \frac{12e}{b^2 + d^2} \right) \quad (3-23)$$

Keterangan:

$D_M$  = perpindahan maksimum di titik pusat kekakuan sistem isolasi.

$y$  = jarak antara titik pusat kekakuan sistem isolasi dan elemen yang diinginkan, diukur tegak lurus terhadap arah beban seismik yang ditinjau.

$e$  = eksentrisitas sesungguhnya diukur dari denah antara titik pusat massa struktur di atas batas pemisah isolasi dan titik pusat kekakuan sistem isolasi, ditambah dengan eksentrisitas tak terduga, dalam mm, diambil sebesar 5% dari ukuran maksimum bangunan tegak lurus untuk arah gaya yang ditinjau

$b$  = ukuran denah struktur terpendek diukur tegak lurus terhadap  $d$

$d$  = ukuran terpanjang denah struktur

$P_T$  = rasio dari periode translasi efektif sistem isolasi terhadap periode torsional efektif sistem isolasi, yang dihitung dengan analisis dinamik atau sesuai Persamaan (3-36) tetapi tidak perlu kurang dari 1,0.

$$P_T = \frac{1}{r_1} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i^2 + y_i^2)}{N}} \quad (3-24)$$

Keterangan:

$x_i, y_i$  = jarak horizontal (mm) antara pusat massa terhadap unit isolasi ke-I dalam sumbu horizontal sistem isolasi.

$N$  = jumlah unit isolasi.

$r_i$  = jari-jari girasi dari sistem isolasi (mm) yang sama dengan  $((b^2 + d^2)/12)^{1/2}$  untuk sistem isolasi dengan ukuran denah persegi  $b \times d$ .

perpindahan maksimum total,  $D_{TM}$ , tidak boleh diambil kurang dari 1,15 kali  $D_M$ .

### 3.3.5 Gaya Lateral Minimum untuk Desain

Seluruh elemen struktural dan sistem isolasi di bawah dan di atas tingkat dasar harus mampu menahan gaya seismik minimum,  $V_b$  dan  $V_s$ , ditentukan dengan persamaan-persamaan berikut:

$$V_b = k_M D_M \quad (3-25)$$

$$V_s = \frac{V_{st}}{R_I} \quad (3-26)$$

$$V_{st} = V_b \left( \frac{W_s}{W} \right)^{1-2,5\beta_m} \quad (3-27)$$

Keterangan:

$k_M$  = kekakuan efektif (kN/mm) dari sistem isolasi pada perpindahan maksimum  $D_M$

$D_M$  = perpindahan maksimum (mm) di titik pisat kekakuan sistem isolasi di arah yang ditinjau

$R_I$  = koefisien numerik yang berhubungan dengan tipe sistem pemikul gaya seismik di atas sistem isolasi

$V_{st}$  = gaya rencana seismik lateral tak tereduksi atau geser pada elemen-elemen di atas tingkat dasar

$W$  = berat seismik efektif (kN) dari struktur di atas pemisah isolasi

$W_s$  = berat seismik efektif (kN) dari struktur di atas pemisah isolasi, tidak termasuk berat seismik efektif pada tingkat dasar.

### 3.3.6 Distribusi Vertikal Gaya

Gaya geser  $V_s$  harus didistribusikan ke seluruh tinggi struktur di atas tingkat dasar dengan persamaan berikut:

$$F_1 = \frac{(V_b - V_s)}{R_I} \quad (3-28)$$

$$F_x = C_{vx} V_s \quad (3-29)$$

$$C_{vs} = \frac{w_x h_x^k}{\sum_{i=2}^n w_i h_i^k} \quad (3-30)$$

$$k = 14 \beta m T_{fb} \quad (3-31)$$

Keterangan:

- $F_1$  = gaya seismik lateral yang bekerja di tingkat 1
- $F_x$  = gaya seismik lateral yang bekerja di tingkat x.  $x > 1$
- $C_{vs}$  = faktor distribusi vertikal
- $V_s$  = gaya seismik lateral rencana total atau geser dari elemen-elemen di atas tingkat dasar
- $w_i, w_x$  = bagian dari  $W_s$  yang ditempatkan/dipasang di tingkat-i atau x
- $h_i, h_x$  = tinggi tingkat-i atau x dari pemisah isolasi.
- $T_{fb}$  = periode utama struktur di atas pemisah isolasi (detik)