

**SNI 03- 1726 - 2003**

**SNI** STANDAR NASIONAL INDONESIA

**Tata Cara  
Perencanaan Ketahanan Gempa  
untuk Bangunan Gedung**

**Bandung, Juli 2003**

## 1 Ruang lingkup

- 1.1 Standar ini dimaksudkan sebagai pengganti Standar Nasional Indonesia SNI 03-1726-1989 dan untuk selanjutnya menjadi persyaratan minimum perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung, kecuali untuk struktur bangunan gedung yang ditentukan dalam Pasal 1.2. Penggunaan ketentuan-ketentuan dari Standar yang lain diluar Standar ini dapat diijinkan selama hal ini dilakukan secara rasional dan konsisten serta tidak menghasilkan perencanaan yang lebih ringan daripada yang dipersyaratkan oleh Standar ini. Standar ini berlaku sejak diundangkannya pada ...
- 1.2 Syarat-syarat perencanaan struktur bangunan gedung tahan gempa yang ditetapkan dalam Standar ini tidak berlaku untuk bangunan sebagai berikut:  
 Gedung dengan sistem struktur yang tidak umum atau yang masih memerlukan pembuktian tentang kelayakannya.  
 Gedung dengan sistem isolasi landasan (*base isolation*) untuk meredam pengaruh gempa terhadap struktur atas.  
 Bangunan Teknik Sipil seperti jembatan, bangunan air, dinding dan dermaga pelabuhan, anjungan lepas pantai dan bangunan non-gedung lainnya.  
 Rumah tinggal satu tingkat dan gedung-gedung non-teknis lainnya.
- 1.3 Standar ini bertujuan agar ketahanan gempa suatu struktur bangunan gedung dapat berfungsi:
- membatasi kerusakan gedung akibat beban Gempa Sedang sesuai dengan ketentuan Pasal 4.1.3 sehingga masih dapat diperbaiki secara ekonomis;
  - menghindari terjadinya korban jiwa manusia oleh runtuhnya gedung akibat beban Gempa Kuat sesuai dengan ketentuan Pasal 4.1.4;
- 1.4 Standar ini berlaku bagi semua struktur bangunan gedung yang ijin penggunaan gedungnya diterbitkan setelah berlakunya Standar ini sesuai Pasal 1.1. Bagi semua struktur bangunan gedung yang ijin penggunaannya diterbitkan sebelum berlakunya Standar ini seperti tercantum pada Pasal 1.1 maka Faktor Keutamaan *I* pada Pasal 4.2 dapat dikalikan 80% dan ketentuan-ketentuan lainnya dalam Standar ini tetap berlaku. Keabsahan dari surat ijin penggunaan bangunan harus sesuai dengan perundang-undangan dan ketentuan-ketentuan lainnya yang berlaku.

## 2 Rujukan

Standar ini berhubungan dengan ketentuan-ketentuan pada Standar lainnya berikut ini:

- Peraturan Pembebanan Indonesia untuk Gedung, 1983, atau penggantinya;
- SNI 03-2847-2002 Tata Cara Perhitungan Struktur Beton Untuk Bangunan Gedung, atau penggantinya;
- SNI 03-1729-2000 Tata Cara Perencanaan Struktur Baja untuk Bangunan Gedung, atau penggantinya;
- Peraturan Konstruksi Kayu Indonesia, NI-5, PKKI 1961, atau penggantinya;

Standar ini juga merujuk pada rujukan-rujukan lainnya berikut ini:

- Pedoman Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Rumah dan Gedung, SKBI-1.3.53, 1987;
- UBC 1997, Volume 2, Division IV, *Earthquake Design*, ICBO, 1997.
- NEHRP 1997, *Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures*, Part 1: Provisions and Part 2: Commentary, FEMA 302, 1998.

### 3 Istilah dan notasi

#### 3.1 Istilah

Kecuali tidak sesuai atau tidak ada hubungannya dengan yang ditetapkan dalam Standar ini, maka dalam Standar ini berlaku beberapa pengertian sebagai berikut:

##### 3.1.1 Analisis

###### 3.1.1.1 Analisis beban dorong statik pada struktur bangunan gedung

Suatu cara analisis statik dua dimensi atau tiga dimensi linier dan non-linier, di mana pengaruh Gempa Rencana sesuai dengan ketentuan Pasal 4.1.1 terhadap struktur bangunan gedung dianggap sebagai beban-beban statik yang menangkap pada pusat massa masing-masing lantai, yang nilainya ditingkatkan secara berangsur-angsur sampai melampaui pembebanan yang menyebabkan terjadinya pelelehan (sendi plastis) pertama di dalam struktur bangunan gedung, kemudian dengan peningkatan beban lebih lanjut mengalami perubahan bentuk pasca-elastik yang besar sampai mencapai kondisi plastik.

###### 3.1.1.2 Analisis beban gempa statik ekuivalen pada struktur bangunan gedung beraturan

Suatu cara analisis statik tiga dimensi linier dengan meninjau beban-beban gempa statik ekuivalen, sehubungan dengan sifat struktur bangunan gedung beraturan yang praktis berperilaku sebagai struktur dua dimensi, sehingga respons dinamikanya praktis hanya ditentukan oleh respons ragam yang pertama dan dapat ditampilkan sebagai akibat dari beban gempa statik ekuivalen.

###### 3.1.1.3 Analisis beban gempa statik ekuivalen pada struktur bangunan gedung tidak beraturan

Suatu cara analisis statik tiga dimensi linier dengan meninjau beban-beban gempa statik ekuivalen yang telah dijabarkan dari pembagian gaya geser tingkat maksimum dinamik sepanjang tinggi struktur bangunan gedung yang telah diperoleh dari hasil analisis respons dinamik elastik linier tiga dimensi.

###### 3.1.1.4 Analisis perambatan gelombang

Suatu analisis untuk menentukan pembesaran gelombang gempa yang merambat dari kedalaman batuan dasar ke muka tanah, dengan data tanah di atas batuan dasar dan gerakan gempa masukan pada kedalaman batuan dasar sebagai data masukannya.

###### 3.1.1.5 Analisis ragam spektrum respons

Suatu cara analisis untuk menentukan respons dinamik struktur bangunan gedung tiga dimensi yang berperilaku elastik terhadap pengaruh suatu gempa melalui

suatu metoda analisis yang dikenal dengan analisis ragam spektrum respons, di mana respons dinamik total struktur bangunan gedung tersebut didapat sebagai superposisi dari respons dinamik maksimum masing-masing ragamnya yang didapat melalui spektrum respons Gempa Rencana.

#### 3.1.1.6 Analisis respons dinamik riwayat waktu linier

Suatu cara analisis untuk menentukan riwayat waktu respons dinamik struktur bangunan gedung tiga dimensi yang berperilaku elastik pada taraf pembebanan Gempa Nominal sebagai data masukan, di mana respons dinamik dalam setiap interval waktu dihitung dengan metoda integrasi langsung atau dapat juga melalui metoda analisis ragam.

#### 3.1.1.7 Analisis respons dinamik riwayat waktu non-linier

Suatu cara analisis untuk menentukan riwayat waktu respons dinamik struktur bangunan gedung tiga dimensi yang berperilaku elastik (linier) maupun pasca-elastik (non-linier) terhadap gerakan tanah akibat Gempa Rencana sebagai data masukan, di mana respons dinamik dalam setiap interval waktu dihitung dengan metoda integrasi langsung.

### 3.1.2 Daktilitas

#### 3.1.2.1 Daktilitas

Kemampuan suatu struktur bangunan gedung untuk mengalami simpangan pasca-elastik yang besar secara berulang kali dan siklik akibat beban gempa di atas beban gempa yang menyebabkan terjadinya pelelehan pertama, sambil mempertahankan kekuatan dan kekakuan yang cukup, sehingga struktur bangunan gedung tersebut tetap berdiri, walaupun sudah berada dalam kondisi plastik.

#### 3.1.2.2 Faktor daktilitas

Rasio antara simpangan maksimum struktur bangunan gedung pada saat mencapai kondisi plastik terhadap simpangan struktur bangunan gedung pada saat terjadinya pelelehan pertama.

#### 3.1.2.3 Daktil penuh

Suatu tingkat daktilitas struktur bangunan gedung, di mana strukturnya mampu mengalami simpangan plastik yang besar, yaitu dengan mencapai nilai faktor daktilitas sebesar 5,20.

#### 3.1.2.4 Daktil parsial

Seluruh tingkat daktilitas struktur bangunan gedung dengan nilai faktor daktilitas di antara struktur bangunan gedung yang elastik dan struktur bangunan gedung yang daktil penuh.

### 3.2 Notasi

$A$	Percepatan puncak Gempa Nominal sebagai gempa masukan untuk analisis respons dinamik linier riwayat waktu struktur bangunan gedung.
$A_m$	Spektrum percepatan maksimum atau Faktor Respons Gempa maksimum pada spektrum respons Gempa Rencana.
$A_o$	Percepatan puncak muka tanah akibat pengaruh Gempa Rencana yang bergantung pada Wilayah Gempa dan jenis tanah tempat struktur bangunan gedung berada.
$A_r$	Pembilang dalam persamaan hiperbola Faktor Respons Gempa $C$ pada

	spektrum respons Gempa Rencana.
<i>b</i>	Ukuran horisontal terbesar denah struktur bangunan gedung pada lantai tingkat yang ditinjau, diukur tegak lurus pada arah pembebanan gempa; dalam subskrip menunjukkan struktur bawah.
<i>c</i>	Dalam subskrip menunjukkan besaran beton.
<i>C</i>	Faktor Respons Gempa dinyatakan dalam percepatan gravitasi yang nilainya bergantung pada waktu getar alami struktur bangunan gedung dan kurvanya ditampilkan dalam spektrum respons Gempa Rencana.
<i>C<sub>v</sub></i>	Faktor Respons Gempa vertikal untuk mendapatkan beban gempa vertikal nominal statik ekuivalen pada unsur struktur bangunan gedung yang memiliki kepekaan yang tinggi terhadap beban gravitasi.
<i>C<sub>1</sub></i>	Nilai Faktor Respons Gempa yang didapat dari spektrum respons Gempa Rencana untuk waktu getar alami fundamental dari struktur bangunan gedung.
<i>d</i>	Dalam subskrip menunjukkan besaran desain atau dinding geser.
<i>d<sub>i</sub></i>	Simpangan horisontal lantai tingkat- <i>i</i> dari hasil analisis 3 dimensi struktur bangunan gedung akibat beban Gempa Nominal statik ekuivalen yang menangkap pada pusat massa pada taraf lantai-lantai tingkat.
<i>e</i>	Eksentrisitas teoritis antara pusat massa dan pusat rotasi lantai tingkat struktur bangunan gedung; dalam subskrip menunjukkan kondisi elastik.
<i>e<sub>d</sub></i>	Eksentrisitas rencana antara pusat massa dan pusat rotasi lantai tingkat struktur bangunan gedung.
<i>E<sub>c</sub></i>	Modulus elastisitas beton.
<i>E<sub>n</sub></i>	Beban Gempa Nominal yang nilainya ditentukan oleh besarnya probabilitas beban itu dilampaui dalam kurun waktu tertentu, oleh faktor daktilitas struktur bangunan gedung $\mu$ yang dimilikinya, dan oleh faktor tahanan lebih beban dan bahan $f_1$ yang terkandung di dalam struktur bangunan gedung tersebut.
<i>E<sub>s</sub></i>	Modulus elastisitas baja (= 200 GPa).
<i>f</i>	Faktor tahanan lebih total yang terkandung di dalam struktur bangunan gedung secara keseluruhan, rasio antara beban gempa maksimum akibat pengaruh Gempa Rencana yang dapat diserap oleh struktur bangunan gedung pada saat mencapai kondisi plastik terhadap beban Gempa Nominal.
<i>f<sub>1</sub></i>	Faktor tahanan lebih beban dan bahan yang terkandung di dalam suatu struktur bangunan gedung akibat selalu adanya pembebanan dan dimensi penampang serta tahanan bahan terpasang yang berlebihan dan nilainya ditetapkan sekitar 1,6.
<i>F<sub>b</sub></i>	Beban gempa horisontal nominal statik ekuivalen akibat gaya inersia sendiri yang menangkap pada pusat massa pada taraf masing-masing lantai besmen struktur bawah gedung.
<i>F<sub>i</sub></i>	Beban Gempa Nominal statik ekuivalen yang menangkap pada pusat massa pada taraf lantai tingkat ke- <i>i</i> struktur atas gedung.
<i>F<sub>p</sub></i>	Beban Gempa Nominal statik ekuivalen yang menangkap pada titik berat massa unsur sekunder, unsur arsitektur dan instalasi mesin dan listrik dalam arah gempa yang paling kritis.
<i>g</i>	Percepatan gravitasi; dalam subskrip menunjukkan momen guling.
<i>i</i>	Dalam subskrip menunjukkan nomor lantai tingkat atau nomor lapisan

	tanah.
$I$	Faktor Keutamaan gedung, faktor pengali dari pengaruh Gempa Rencana pada berbagai kategori gedung, untuk menyesuaikan perioda ulang gempa yang berkaitan dengan penyesuaian probabilitas dilampauinya pengaruh tersebut selama masa layan gedung itu.
$k$	Dalam subskrip menunjukkan kolom struktur bangunan gedung.
$K_p$	Nilai koefisien pembesaran respons unsur sekunder, unsur arsitektur atau instalasi mesin dan listrik, bergantung pada ketinggian tempat kedudukannya terhadap taraf penjepitan lateral.
$m$	Jumlah lapisan tanah yang ada di atas batuan dasar.
$M_{gm}$	Momen guling maksimum dari struktur atas suatu gedung yang bekerja pada struktur bawah pada taraf penjepitan lateral pada saat struktur atas berada dalam kondisi plastis akibat dikerahkannya faktor tahanan lebih total $f$ yang terkandung di dalam struktur atas, atau akibat pengaruh momen leleh akhir sendi-sendi plastis pada kaki semua kolom dan semua dinding geser.
$M_p$	Momen plastis pada ujung-ujung unsur struktur bangunan gedung, kaki kolom dan kaki dinding geser.
$M_{p,d}$	Momen plastis yang terjadi pada kaki dinding geser.
$M_{p,k}$	Momen plastis yang terjadi pada kaki kolom.
$n$	Nomor lantai tingkat paling atas (lantai puncak); jumlah lantai tingkat struktur bangunan gedung; dalam subskrip menunjukkan besaran nominal.
$N$	Nilai hasil Test Penetrasi Standar pada suatu lapisan tanah; gaya normal secara umum.
$N_i$	Nilai hasil Test Penetrasi Standar pada lapisan tanah ke- $i$ .
$\bar{N}$	Nilai rerata berbobot hasil Test Penetrasi Standar lapisan tanah di atas batuan dasar dengan tebal lapisan tanah sebagai besaran pembobotnya.
$p$	Dalam subskrip menunjukkan unsur sekunder, unsur arsitektur atau instalasi mesin dan listrik.
$P$	Faktor kinerja unsur, mencerminkan tingkat keutamaan unsur sekunder, unsur arsitektur atau instalasi mesin dan listrik dalam kinerjanya selama maupun setelah gempa berlangsung.
$PI$	Indeks Plastisitas tanah lempung.
$R$	Faktor reduksi gempa, rasio antara beban gempa maksimum akibat pengaruh Gempa Rencana pada struktur bangunan gedung elastik dan beban Gempa Nominal pada struktur bangunan gedung daktail; faktor reduksi gempa representatif struktur bangunan gedung tidak beraturan.
$R_m$	Faktor reduksi gempa maksimum yang dapat dikerahkan oleh suatu jenis sistem atau subsistem struktur bangunan gedung.
$\bar{R}_x$	Faktor reduksi gempa untuk pembebanan gempa dalam arah sumbu- $x$ pada struktur bangunan gedung tidak beraturan.
$R_y$	Faktor reduksi gempa untuk pembebanan gempa dalam arah sumbu- $y$ pada struktur bangunan gedung tidak beraturan.
$s$	Dalam subskrip menunjukkan besaran subsistem, struktur beton atau baja.
$S_u$	Kuat geser niralir lapisan tanah.
$S_{ui}$	Kuat geser niralir lapisan tanah ke- $i$ .
$\bar{S}_u$	Kuat geser niralir rerata berbobot dengan tebal lapisan tanah sebagai

	besaran pembobotnya.
$t_i$	Tebal lapisan tanah ke- $i$ .
$T$	Waktu getar alami struktur bangunan gedung dinyatakan dalam detik yang menentukan besarnya Faktor Respons Gempa struktur bangunan gedung dan kurvanya ditampilkan dalam spektrum respons Gempa Rencana.
$T_1$	Waktu getar alami fundamental struktur bangunan gedung beraturan maupun tidak beraturan dinyatakan dalam detik.
$T_c$	Waktu getar alami sudut, yaitu waktu getar alami pada titik perubahan diagram $C$ dari garis datar menjadi kurva hiperbola pada spektrum respons Gempa Rencana.
$v_s$	Kecepatan rambat gelombang geser.
$\bar{v}_s$	Kecepatan rambat rerata berbobot gelombang geser dengan tebal lapisan tanah sebagai besaran pembobotnya.
$v_{si}$	Kecepatan rambat gelombang geser di lapisan tanah ke- $i$ .
$V$	Beban (gaya) geser dasar nominal statik ekuivalen yang bekerja di tingkat dasar struktur bangunan gedung beraturan dengan tingkat daktilitas umum, dihitung berdasarkan waktu getar alami fundamental struktur bangunan gedung beraturan tersebut.
$V_e$	Pembebanan gempa maksimum akibat pengaruh Gempa Rencana yang dapat diserap oleh struktur bangunan gedung elastik.
$V_m$	Pembebanan gempa maksimum akibat pengaruh Gempa Rencana yang dapat diserap oleh struktur bangunan gedung dengan pengerahan faktor tahanan lebih total $f$ yang terkandung di dalam struktur bangunan gedung.
$V_n$	Pengaruh Gempa Nominal untuk struktur bangunan gedung dengan tingkat daktilitas umum; pengaruh Gempa Rencana pada saat di dalam struktur terjadi pelelehan pertama yang sudah direduksi dengan faktor tahanan lebih beban dan bahan $f_1$ .
$V_s$	Gaya geser dasar nominal akibat beban gempa yang dipikul oleh suatu jenis subsistem struktur bangunan gedung tertentu di tingkat dasar.
$V_t$	Gaya geser dasar nominal yang bekerja di tingkat dasar struktur bangunan gedung dan yang didapat dari hasil analisis ragam spektrum respons atau dari hasil analisis respons dinamik riwayat waktu.
$V_x^o$	Gaya geser dasar nominal yang bekerja dalam arah sumbu- $x$ di tingkat dasar struktur bangunan gedung tidak beraturan.
$V_y^o$	Gaya geser dasar nominal yang bekerja dalam arah sumbu- $y$ di tingkat dasar struktur bangunan gedung tidak beraturan.
$V_1$	Gaya geser dasar nominal yang bekerja di tingkat dasar struktur bangunan gedung tidak beraturan dengan tingkat daktilitas umum, dihitung berdasarkan waktu getar alami fundamental struktur bangunan gedung.
$w_n$	Kadar air alami tanah.
$W_b$	Berat lantai besmen struktur bawah suatu gedung, termasuk beban hidup yang sesuai.
$W_i$	Berat lantai tingkat ke- $i$ struktur atas suatu gedung, termasuk beban hidup yang sesuai.
$W_p$	Berat unsur sekunder, unsur arsitektur atau instalasi mesin dan listrik.

$W_t$	Berat total gedung, termasuk beban hidup yang sesuai.
$x$	Penunjuk arah sumbu koordinat (juga dalam subskrip).
$y$	Penunjuk arah sumbu koordinat (juga dalam subskrip); dalam subskrip menunjukkan pembebanan pada saat terjadinya pelelehan pertama di dalam struktur bangunan gedung atau momen leleh.
$z_i$	Ketinggian lantai tingkat ke- $i$ suatu struktur bangunan gedung terhadap taraf penjepitan lateral.
$z_n$	Ketinggian lantai tingkat puncak $n$ suatu struktur bangunan gedung terhadap taraf penjepitan lateral.
$z_p$	Ketinggian tempat kedudukan unsur sekunder, unsur arsitektur atau instalasi mesin dan listrik terhadap taraf penjepitan lateral.
$\delta_m$	Simpangan maksimum struktur bangunan gedung akibat pengaruh Gempa Rencana pada saat struktur bangunan gedung mencapai kondisi plastik.
$\delta_y$	Simpangan struktur bangunan gedung akibat pengaruh Gempa Rencana pada saat terjadinya pelelehan pertama.
$\zeta$	Koefisien pengali dari jumlah tingkat struktur bangunan gedung yang membatasi waktu getar alami fundamental struktur bangunan gedung, bergantung pada Wilayah Gempa dan jenis struktur.
$\mu$	Faktor daktilitas struktur bangunan gedung, rasio antara simpangan maksimum struktur bangunan gedung akibat pengaruh Gempa Rencana pada saat struktur bangunan gedung mencapai kondisi plastik dan simpangan struktur bangunan gedung pada saat terjadinya pelelehan pertama.
$\mu_m$	Nilai faktor daktilitas maksimum yang dapat dikerahkan oleh suatu sistem atau subsistem struktur bangunan gedung.
$\xi$	Faktor pengali dari simpangan struktur bangunan gedung akibat pengaruh Gempa Nominal untuk mendapatkan simpangan maksimum struktur bangunan gedung pada saat mencapai kondisi plastik.
$\Sigma$	Tanda penjumlahan.
$\psi$	Koefisien pengali dari percepatan puncak muka tanah (termasuk faktor keutamaannya) untuk mendapatkan faktor respons gempa vertikal, bergantung pada Wilayah Gempa.

## 4 Ketentuan umum

### 4.1 Klasifikasi beban gempa

#### 4.1.1 Beban Gempa Rencana

Beban Gempa Rencana adalah nilai beban gempa yang peluang dilampauinya dalam rentang masa layan gedung 50 tahun adalah 10% atau nilai beban gempa yang perioda ulangnya adalah 500 tahun.

#### 4.1.2 Beban Gempa Nominal

Nilai beban Gempa Nominal ditentukan oleh tiga hal, yaitu oleh besarnya Gempa Rencana, oleh tingkat daktilitas yang dimiliki struktur yang terkait, dan oleh tahanan lebih yang terkandung di dalam struktur tersebut. Menurut Standar ini, tingkat daktilitas struktur bangunan gedung dapat ditetapkan sesuai dengan



kebutuhan, sedangkan faktor tahanan lebih  $f_1$  untuk struktur bangunan gedung secara umum nilainya adalah sekitar 1,6. Dengan demikian, beban Gempa Nominal adalah beban akibat pengaruh Gempa Rencana yang direduksi dengan faktor daktilitas struktur dan faktor tahanan lebih  $f_1$ .

#### 4.1.3 Beban Gempa Sedang

Beban Gempa Sedang adalah nilai beban gempa yang peluang dilampauinya dalam rentang masa layan gedung 50 tahun adalah 50% atau nilai beban gempa yang perioda ulangnya adalah 75 tahun. Akibat beban Gempa Sedang tersebut struktur bangunan gedung tidak boleh mengalami kerusakan struktural namun dapat mengalami kerusakan non-struktural ringan.

#### 4.1.4 Beban Gempa Kuat

Beban Gempa Kuat adalah nilai beban gempa yang peluang dilampauinya dalam rentang masa layan gedung 50 tahun adalah 2% atau nilai beban gempa yang perioda ulangnya adalah 2.500 tahun. Akibat beban Gempa Kuat tersebut struktur bangunan gedung dapat mengalami kerusakan struktural yang berat namun harus tetap dapat berdiri sehingga korban jiwa dapat dihindarkan.

#### 4.2 Kategori gedung

Standar ini menentukan pengaruh Gempa Rencana yang harus ditinjau dalam perencanaan struktur bangunan gedung serta berbagai bagian dan peralatannya secara umum. Untuk berbagai kategori gedung, bergantung pada tingkat kepentingan gedung pasca gempa, pengaruh Gempa Rencana terhadapnya harus dikalikan dengan suatu Faktor Keutamaan  $I$  pada Table 1.

**Tabel 1 Faktor Keutamaan  $I$  untuk berbagai kategori gedung atau bangunan**

Kategori gedung atau bangunan	Faktor Keutamaan $I$
Gedung umum seperti untuk perumahan, perniagaan dan perkantoran	1
Monumen dan bangunan monumental	1
Gedung penting pasca gempa seperti rumah sakit, instalasi air bersih, pembangkit tenaga listrik, pusat penyelamatan dalam keadaan darurat, fasilitas radio dan televisi.	1,5
Gedung untuk menyimpan bahan berbahaya seperti gas, produk minyak bumi, asam, bahan beracun.	1,5
Cerobong, tangki di atas menara.	1,25

#### 4.3 Struktur bangunan gedung beraturan dan tidak beraturan

##### 4.3.1 Struktur bangunan gedung ditetapkan sebagai struktur bangunan gedung beraturan, apabila memenuhi ketentuan sebagai berikut:

- Tinggi struktur bangunan gedung diukur dari taraf penjepitan lateral tidak lebih dari 10 tingkat atau 40 m.
- Denah struktur bangunan gedung adalah persegi panjang tanpa tonjolan dan kalaupun mempunyai tonjolan, panjang tonjolan tersebut tidak lebih dari 25%

dari ukuran terbesar denah struktur bangunan gedung dalam arah tonjolan tersebut.

- Denah struktur bangunan gedung tidak menunjukkan coakan sudut dan walaupun mempunyai coakan sudut, panjang sisi coakan tersebut tidak lebih dari 15% dari ukuran terbesar denah struktur bangunan gedung dalam arah sisi coakan tersebut.
- Sistem struktur bangunan gedung terbentuk oleh subsistem-subsistem pemikul beban lateral yang arahnya saling tegak lurus dan sejajar dengan sumbu-sumbu utama ortogonal denah struktur bangunan gedung secara keseluruhan.
- Sistem struktur bangunan gedung tidak menunjukkan loncatan bidang muka dan walaupun mempunyai loncatan bidang muka, ukuran dari denah struktur bagian gedung yang menjulang dalam masing-masing arah, tidak kurang dari 75% dari ukuran terbesar denah struktur bagian gedung sebelah bawahnya. Dalam hal ini, struktur rumah atap yang tingginya tidak lebih dari dua tingkat tidak perlu dianggap menyebabkan adanya loncatan bidang muka.
- Sistem struktur bangunan gedung memiliki kekakuan lateral yang beraturan, tanpa adanya tingkat lunak. Tingkat lunak adalah suatu tingkat, di mana kekakuan lateralnya adalah kurang dari 70% kekakuan lateral tingkat di atasnya atau kurang dari 80% kekakuan lateral rerata tiga tingkat di atasnya. Dalam hal ini, yang dimaksud dengan kekakuan lateral suatu tingkat adalah gaya geser yang bila bekerja di tingkat itu menyebabkan satu satuan simpangan antar-tingkat.
- Sistem struktur bangunan gedung memiliki berat lantai tingkat yang beraturan, artinya setiap lantai tingkat memiliki berat yang tidak lebih dari 150% dari berat lantai tingkat di atasnya atau di bawahnya. Berat atap atau rumah atap tidak perlu memenuhi ketentuan ini.
- Sistem struktur bangunan gedung memiliki unsur-unsur vertikal dari sistem pemikul beban lateral yang menerus, tanpa perpindahan titik beratnya, kecuali bila perpindahan tersebut tidak lebih dari setengah ukuran unsur dalam arah perpindahan tersebut.
- Sistem struktur bangunan gedung memiliki lantai tingkat yang menerus, tanpa lubang atau bukaan yang luasnya lebih dari 50% luas seluruh lantai tingkat. Walaupun ada lantai tingkat dengan lubang atau bukaan seperti itu, jumlahnya tidak boleh melebihi 20% dari jumlah lantai tingkat seluruhnya.

Untuk struktur bangunan gedung beraturan, pengaruh Gempa Rencana dapat ditinjau sebagai pengaruh beban gempa statik ekuivalen, sehingga menurut Standar ini analisisnya dapat dilakukan berdasarkan analisis statik ekuivalen.

- 4.3.2 Struktur bangunan gedung yang tidak memenuhi ketentuan menurut Pasal 4.3.1, ditetapkan sebagai struktur bangunan gedung tidak beraturan. Untuk struktur bangunan gedung tidak beraturan, pengaruh Gempa Rencana harus ditinjau sebagai pengaruh pembebanan gempa dinamik, sehingga analisisnya harus dilakukan berdasarkan analisis respons dinamik.

#### 4.4 Daktilitas struktur bangunan gedung dan pembebanan Gempa Nominal

4.4.1 Faktor daktilitas struktur bangunan gedung  $\mu$  adalah rasio antara simpangan maksimum struktur bangunan gedung akibat pengaruh Gempa Rencana,  $\delta_m$ , dan simpangan struktur bangunan gedung pada saat terjadinya pelelehan pertama,  $\delta_y$ , yaitu:

$$1,4 \leq \mu = \frac{\delta_m}{\delta_y} \leq \mu_m \quad (1)$$

Dalam Pers. (1)  $\mu = 1,4$  adalah nilai faktor daktilitas untuk struktur bangunan gedung yang berperilaku elastik, sedangkan  $\mu_m$  adalah nilai faktor daktilitas maksimum yang dapat dikerahkan oleh sistem struktur bangunan gedung yang bersangkutan menurut Pasal 4.3.4.

4.4.2 Apabila  $V_e$  adalah pembebanan maksimum akibat pengaruh Gempa Rencana yang dapat diserap oleh struktur bangunan gedung elastik dan  $V_y$  adalah pembebanan yang menyebabkan pelelehan pertama di dalam struktur bangunan gedung, maka dengan asumsi bahwa struktur bangunan gedung daktil dan struktur bangunan gedung elastik akibat pengaruh Gempa Rencana menunjukkan simpangan maksimum  $\delta_m$  yang sama, maka berlaku hubungan sebagai berikut:

$$V_y = \frac{V_e}{\mu} \quad (2)$$

di mana  $\mu$  adalah faktor daktilitas struktur bangunan gedung.

4.4.3 Apabila  $V_n$  adalah pembebanan Gempa Nominal akibat pengaruh Gempa Rencana yang harus ditinjau dalam perencanaan struktur bangunan gedung, maka berlaku hubungan sebagai berikut:

$$V_n = \frac{V_y}{f_1} = \frac{V_e}{R} \quad (3)$$

di mana  $f_1$  adalah faktor tahanan lebih beban dan bahan yang terkandung di dalam struktur bangunan gedung dan nilainya ditetapkan sebesar:

$$f_1 \approx 1,6 \quad (4)$$

dan  $R$  disebut faktor reduksi gempa menurut persamaan:

$$2,2 \leq R = \mu f_1 \leq R_m \quad (5)$$

Dalam Pers. (5)  $R = 2,2$  adalah faktor reduksi gempa untuk struktur bangunan gedung yang berperilaku elastik, sedangkan  $R_m$  adalah faktor reduksi gempa maksimum yang dapat dikerahkan oleh sistem struktur yang bersangkutan menurut Pasal 4.3.4.

4.4.4 Nilai faktor daktilitas struktur bangunan gedung  $\mu$  di dalam perencanaan struktur bangunan gedung dapat dipilih menurut kebutuhan, tetapi tidak boleh diambil lebih besar dari nilai faktor daktilitas maksimum  $\mu_m$  yang dapat dikerahkan oleh masing-

masing sistem atau subsistem struktur bangunan gedung. Dalam Tabel 2 ditetapkan nilai  $\mu_m$  yang dapat dikerahkan oleh beberapa jenis sistem dan subsistem struktur bangunan gedung, berikut faktor reduksi maksimum  $R_m$  yang bersangkutan.

- 4.4.5 Apabila dalam arah pembebanan gempa akibat pengaruh Gempa Rencana sistem struktur bangunan gedung terdiri dari beberapa jenis subsistem struktur bangunan gedung yang berbeda, faktor reduksi gempa representatif dari struktur bangunan gedung itu untuk arah pembebanan gempa tersebut, dapat dihitung sebagai nilai rerata berbobot dengan gaya geser dasar yang dipikul oleh masing-masing jenis subsistem sebagai besaran pembobotnya menurut persamaan:

$$R = \frac{\sum V_s}{\sum V_s / R_s} \quad (6)$$

di mana  $R_s$  adalah nilai faktor reduksi gempa masing-masing jenis subsistem struktur bangunan gedung dan  $V_s$  adalah gaya geser dasar yang dipikul oleh masing-masing jenis subsistem struktur bangunan gedung tersebut, dengan penjumlahan meliputi seluruh jenis subsistem struktur bangunan gedung yang ada. Metoda ini hanya boleh dipakai, apabila rasio antara nilai-nilai faktor reduksi gempa dari jenis-jenis subsistem struktur bangunan gedung yang ada tidak lebih dari 1,5. Bila persyaratan tersebut tidak dipenuhi maka harus digunakan metode rasional lainnya yang dapat dipertanggungjawabkan.

- 4.4.6 Untuk jenis subsistem struktur bangunan gedung yang tidak tercantum dalam Tabel 2, nilai faktor daktilitasnya dan faktor reduksi gempanya harus ditentukan dengan cara-cara rasional, misalnya dengan menentukannya dari hasil analisis beban dorong statik (*static push-over analysis*).

**Tabel 2 Faktor daktilitas maksimum, faktor reduksi gempa maksimum dan faktor tahanan lebih total beberapa jenis sistem dan subsistem struktur bangunan gedung**

Sistem dan subsistem struktur bangunan gedung	Uraian sistem pemikul beban gempa	$\mu_m$	$R_m$ Pers. (5)	$f$
1. Sistem dinding penumpu (Sistem struktur yang tidak memiliki rangka ruang pemikul beban gravitasi secara lengkap. Dinding penumpu atau sistem bresing memikul hampir semua beban gravitasi. Beban lateral dipikul dinding geser atau rangka bresing).	1. Dinding geser beton bertulang	2,7	4,5	2,8
	2. Dinding penumpu dengan rangka baja ringan dan bresing tarik	1,8	2,8	2,2
	3. Rangka bresing di mana bresingnya memikul beban gravitasi			
	a. Baja	2,8	4,4	2,2
	b. Beton bertulang (tidak untuk Wilayah 5 & 6)	1,8	2,8	2,2
2. Sistem rangka gedung (Sistem struktur yang pada dasarnya memiliki rangka ruang pemikul beban gravitasi secara lengkap. Beban lateral dipikul dinding geser atau rangka bresing).	1. Rangka bresing eksentris baja (RBE)	4,3	7,0	2,8
	2. Dinding geser beton bertulang	3,3	5,5	2,8
	3. Rangka bresing biasa			
	a. Baja	3,6	5,6	2,2
	b. Beton bertulang (tidak untuk Wilayah 5 & 6)	3,6	5,6	2,2
	4. Rangka bresing konsentrik khusus			
	a. Baja	4,1	6,4	2,2
	5. Dinding geser beton bertulang berangkai daktail	4,0	6,5	2,8
3. Sistem rangka pemikul momen (Sistem struktur yang pada dasarnya memiliki rangka ruang pemikul beban gravitasi secara lengkap. Beban lateral dipikul rangka pemikul momen terutama melalui mekanisme lentur)	6. Dinding geser beton bertulang kantilever daktail penuh	3,6	6,0	2,8
	7. Dinding geser beton bertulang kantilever daktail parsial	3,3	5,5	2,8
	1. Rangka pemikul momen khusus (SRPMK)			
	a. Baja	5,2	8,5	2,8
	b. Beton bertulang	5,2	8,5	2,8
	2. Rangka pemikul momen menengah beton (SRPMM) (tidak untuk Wilayah 5 & 6)	3,3	5,5	2,8
	3. Rangka pemikul momen biasa (SRPMB)			
	a. Baja	2,7	4,5	2,8
	b. Beton bertulang	2,1	3,5	2,8
	4. Rangka batang baja pemikul momen khusus (SRBPMK)	4,0	6,5	2,8
4. Sistem ganda (Terdiri dari: 1) rangka ruang yang memikul seluruh beban gravitasi; 2) pemikul beban lateral berupa dinding geser atau rangka bresing dengan rangka pemikul momen. Rangka pemikul momen harus direncanakan secara terpisah mampu memikul sekurang-kurangnya 25% dari seluruh beban lateral; 3) kedua sistem harus direncanakan untuk memikul secara bersama-sama seluruh beban lateral dengan memperhatikan interaksi /sistem ganda)	1. Dinding geser			
	a. Beton bertulang dengan SRPMK beton bertulang	5,2	8,5	2,8
	b. Beton bertulang dengan SRPMB baja	2,6	4,2	2,8
	c. Beton bertulang dengan SRPMM beton bertulang	4,0	6,5	2,8
	2. RBE baja			
	a. Dengan SRPMK baja	5,2	8,5	2,8
	b. Dengan SRPMB baja	2,6	4,2	2,8
	3. Rangka bresing biasa			
	a. Baja dengan SRPMK baja	4,0	6,5	2,8
	b. Baja dengan SRPMB baja	2,6	4,2	2,8
	c. Beton bertulang dengan SRPMK beton bertulang (tidak untuk Wilayah 5 & 6)	4,0	6,5	2,8
	d. Beton bertulang dengan SRPMM beton bertulang (tidak untuk Wilayah 5 & 6)	2,6	4,2	2,8
	4. Rangka bresing konsentrik khusus			
	a. Baja dengan SRPMK baja	4,6	7,5	2,8
	b. Baja dengan SRPMB baja	2,6	4,2	2,8
	5. Sistem struktur bangunan gedung kolom kantilever: (Sistem struktur yang memanfaatkan kolom kantilever untuk memikul beban lateral)	Sistem struktur kolom kantilever	1,4	2,2
6. Sistem interaksi dinding geser dengan rangka	Beton bertulang menengah (tidak untuk Wilayah 3, 4, 5 & 6)	3,4	5,5	2,8
7. Subsistem tunggal (Subsistem struktur bidang yang membentuk struktur bangunan gedung secara keseluruhan)	1. Rangka terbuka baja	5,2	8,5	2,8
	2. Rangka terbuka beton bertulang	5,2	8,5	2,8
	3. Rangka terbuka beton bertulang dengan balok beton pratekan (bergantung pada indeks baja total)	3,3	5,5	2,8
	4. Dinding geser beton bertulang berangkai daktail penuh.	4,0	6,5	2,8
	5. Dinding geser beton bertulang kantilever daktail parsial	3,3	5,5	2,8

#### 4.5 Perencanaan kolom-kuat-balok-lemah

Struktur bangunan gedung berdaktilitas penuh harus memenuhi persyaratan “kolom kuat balok lemah”, artinya ketika struktur bangunan gedung memikul pengaruh Gempa Rencana, sendi-sendi plastis di dalam struktur bangunan gedung tersebut harus terbentuk demikian dapat dihindari terjadinya mekanisme tingkat (*story mechanism*). Implementasi persyaratan ini di dalam perencanaan struktur beton dan struktur baja ditetapkan dalam standar beton dan standar baja yang berlaku.

#### 4.6 Jenis tanah dan perambatan gelombang gempa

- 4.6.1 Kecuali bila lapisan tanah di atas batuan dasar memenuhi syarat-syarat yang ditetapkan dalam Pasal 4.6.3, pengaruh Gempa Rencana di muka tanah harus ditentukan dari hasil analisis perambatan gelombang gempa dari kedalaman batuan dasar ke muka tanah menggunakan gerakan gempa masukan dengan percepatan puncak untuk batuan dasar menurut Tabel 4. Akselerogram gempa masukan yang ditinjau dalam analisis ini, harus diambil dari rekaman gerakan tanah akibat gempa yang didapat di suatu lokasi yang mirip kondisi geologi, topografi dan seismotektoniknya dengan lokasi tempat struktur bangunan gedung yang ditinjau berada. Untuk mengurangi ketidak-pastian mengenai kondisi lokasi ini, paling sedikit harus ditinjau empat buah akselerogram dari empat gempa yang berbeda, salah satunya harus diambil Gempa El Centro N-S yang telah direkam pada tanggal 15 Mei 1940 di California. Perbedaan keempat akselerogram tersebut harus ditunjukkan dengan nilai maksimum absolut koefisien korelasi silang antara satu akselerogram terhadap lainnya yang lebih kecil daripada 10%.
- 4.6.2 Batuan dasar adalah lapisan batuan di bawah muka tanah yang memiliki nilai hasil Test Penetrasi Standar N paling rendah 60 dan tidak ada lapisan batuan lain di bawahnya yang memiliki nilai hasil Test Penetrasi Standar yang kurang dari itu, atau yang memiliki kecepatan rambat gelombang geser  $v_s$  yang mencapai 750 m/detik dan tidak ada lapisan batuan lain di bawahnya yang memiliki nilai kecepatan rambat gelombang geser yang kurang dari itu.
- 4.6.3 Jenis tanah ditetapkan sebagai Tanah Keras, Tanah Sedang dan Tanah Lunak, apabila untuk lapisan setebal maksimum 30 meter paling atas dipenuhi syarat-syarat yang tercantum dalam Tabel 3.

**Tabel 3 Jenis-jenis tanah dan klasifikasinya**

Jenis tanah	Kecepatan rambat gelombang geser rerata, $\bar{v}_s$ (m/det)	Nilai hasil Test Penetrasi Standar rerata $\bar{N}$	Kuat geser niralir rerata $\bar{S}_u$ (kPa)
Tanah Keras	$\bar{v}_s \geq 350$	$\bar{N} \geq 50$	$\bar{S}_u \geq 100$
Tanah Sedang	$175 \leq \bar{v}_s < 350$	$15 \leq \bar{N} < 50$	$50 \leq \bar{S}_u < 100$
Tanah Lunak	$\bar{v}_s < 175$	$\bar{N} < 15$	$\bar{S}_u < 50$
Tanah Khusus	atau, semua jenis tanah lempung lunak dengan tebal total lebih dari 3 meter dengan $PI > 20$ , $w_n \geq 40$ % dan $S_u < 25$ kPa		
Tanah Khusus	Diperlukan evaluasi khusus di setiap lokasi		

Dalam Tabel 3,  $\bar{v}_s$ ,  $\bar{N}$  dan  $\bar{S}_u$  adalah nilai rerata berbobot besaran itu dengan tebal lapisan tanah sebagai besaran pembobotnya yang harus dihitung menurut persamaan-persamaan sebagai berikut:

$$\bar{v}_s = \frac{\sum_{i=1}^m t_i}{\sum_{i=1}^m t_i / v_{si}} \quad (7)$$

$$\bar{N} = \frac{\sum_{i=1}^m t_i}{\sum_{i=1}^m t_i / N_i} \quad (8)$$

$$\bar{S}_u = \frac{\sum_{i=1}^m t_i}{\sum_{i=1}^m t_i / S_{ui}} \quad (9)$$

di mana  $t_i$  adalah tebal lapisan tanah ke- $i$  yang harus memenuhi ketentuan bahwa  $\sum t_i \leq 30$  meter,  $v_{si}$  adalah kecepatan rambat gelombang geser melalui lapisan tanah ke- $i$ ,  $N_i$  nilai hasil Test Penetrasi Standar lapisan tanah ke- $i$ ,  $S_{ui}$  adalah kuat geser niralir lapisan tanah ke- $i$  yang harus memenuhi ketentuan bahwa  $S_{ui} \leq 250$  kPa dan  $m$  adalah jumlah lapisan tanah yang ada di atas batuan dasar. Selanjutnya, dalam Tabel 3  $PI$  adalah Indeks Plastisitas tanah lempung,  $w_n$  adalah kadar air alami tanah dan  $S_u$  adalah kuat geser niralir lapisan tanah yang ditinjau.

- 4.6.4 Yang dimaksud dengan jenis Tanah Khusus dalam Tabel 3 adalah jenis tanah yang tidak memenuhi syarat-syarat yang tercantum dalam tabel tersebut. Di samping itu, yang termasuk dalam jenis Tanah Khusus adalah juga tanah yang memiliki potensi likuifaksi yang tinggi, lempung sangat peka, pasir yang tersementasi rendah yang rapuh, tanah gambut, tanah dengan kandungan bahan organik yang tinggi dengan ketebalan lebih dari 3 meter, lempung sangat lunak dengan  $PI$  lebih dari 75 dan ketebalan lebih dari 10 meter, lapisan lempung dengan  $25 \text{ kPa} < S_u < 50 \text{ kPa}$  dan ketebalan lebih dari 30 meter. Untuk jenis Tanah Khusus percepatan puncak muka tanah harus ditentukan dari hasil analisis perambatan gelombang gempa menurut Pasal 4.6.1.

#### 4.7 Wilayah gempa dan spektrum respons

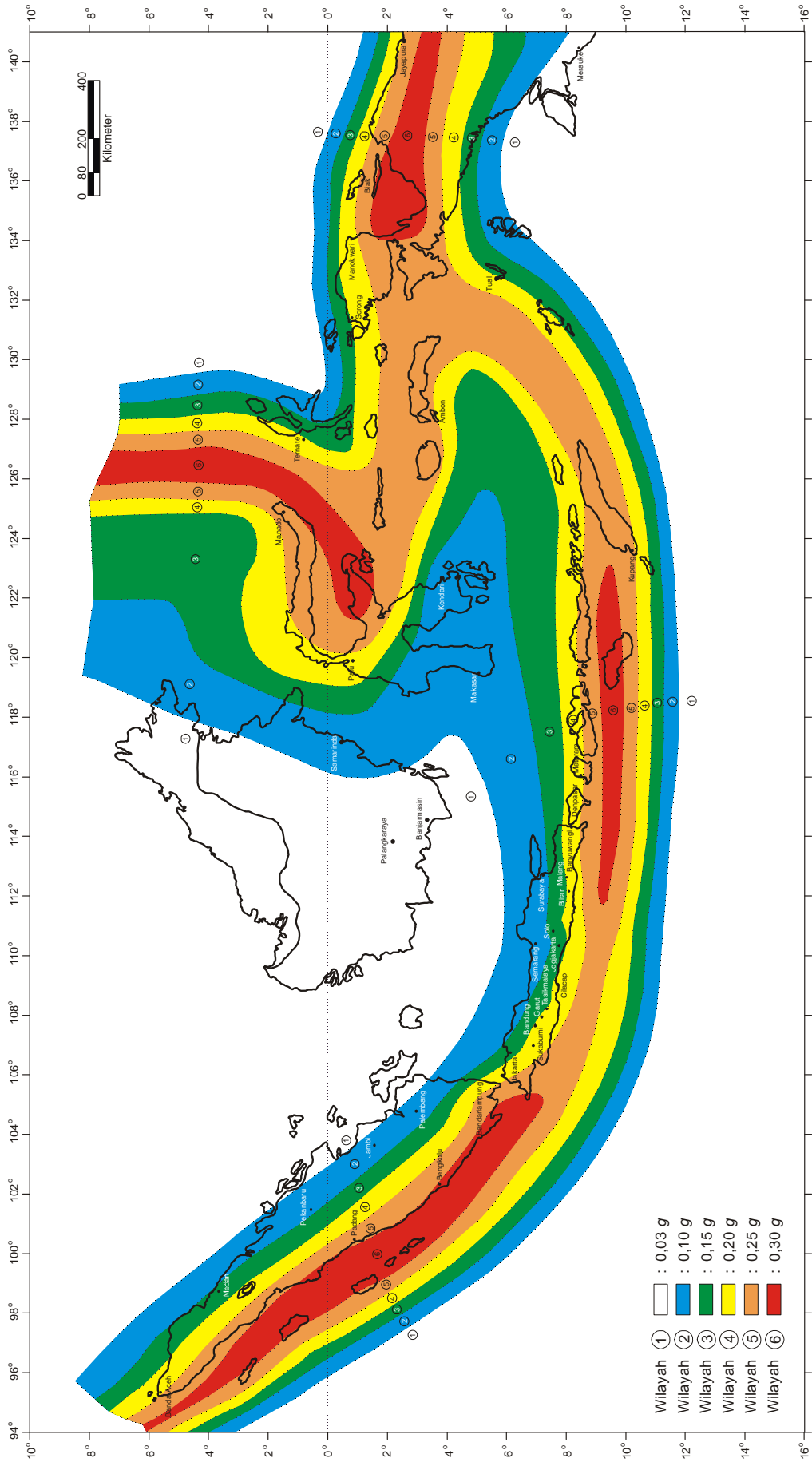
- 4.7.1 Indonesia ditetapkan terbagi dalam 6 Wilayah Gempa seperti ditunjukkan dalam Gambar 1, di mana Wilayah Gempa 1 adalah wilayah dengan kegempaan paling rendah dan Wilayah Gempa 6 dengan kegempaan paling tinggi. Pembagian Wilayah Gempa ini, didasarkan atas percepatan puncak batuan dasar akibat pengaruh Gempa Rencana dengan perioda ulang 500 tahun, yang nilai reratanya untuk setiap Wilayah Gempa ditetapkan dalam Gambar 1 dan Tabel 4. Selanjutnya yang dimaksud wilayah gempa ringan adalah Wilayah 1 dan 2, wilayah gempa sedang adalah Wilayah 3 dan 4, dan wilayah gempa berat adalah Wilayah 5 dan 6.
- 4.7.2 Apabila percepatan puncak muka tanah  $A_o$  tidak didapat dari hasil analisis perambatan gelombang seperti disebut dalam Pasal 4.6.1, percepatan puncak muka tanah tersebut untuk masing-masing Wilayah Gempa dan untuk masing-masing jenis tanah ditetapkan dalam Tabel 4.

**Tabel 4 Percepatan puncak batuan dasar dan percepatan puncak muka tanah untuk masing-masing Wilayah Gempa Indonesia.**

Wilayah Gempa	Percepatan puncak batuan dasar ('g')	Percepatan puncak muka tanah $A_o$ ('g')			
		Tanah Keras	Tanah Sedang	Tanah Lunak	Tanah Khusus
1	0,03	0,03	0,04	0,08	Diperlukan evaluasi khusus di setiap lokasi
2	0,10	0,12	0,15	0,23	
3	0,15	0,18	0,22	0,30	
4	0,20	0,24	0,28	0,34	
5	0,25	0,29	0,33	0,36	
6	0,30	0,33	0,36	0,36	

- 4.7.3 Percepatan puncak batuan dasar dan percepatan puncak muka tanah  $A_o$  untuk Wilayah Gempa 1 yang ditetapkan dalam Gambar 1 dan Tabel 4 ditetapkan juga sebagai percepatan puncak minimum yang harus diperhitungkan dalam perencanaan struktur bangunan gedung untuk menjamin kekekaran (*robustness*) minimum dari struktur bangunan gedung tersebut.
- 4.7.4 Untuk menentukan pengaruh Gempa Rencana pada struktur bangunan gedung, yaitu berupa beban geser dasar nominal statik ekuivalen pada struktur beraturan menurut Pasal 6.1.2, gaya geser dasar nominal sebagai respons dinamik ragam pertama pada struktur bangunan gedung tidak beraturan menurut Pasal 7.1.3 dan gaya geser dasar nominal sebagai respons dinamik seluruh ragam yang berpartisipasi pada struktur bangunan gedung tidak beraturan menurut Pasal 7.2.1, untuk masing-masing Wilayah Gempa ditetapkan spektrum respons Gempa Rencana  $C-T$  seperti ditunjukkan dalam Gambar 2. Dalam gambar tersebut  $C$  adalah Faktor Respons Gempa dinyatakan dalam percepatan gravitasi dan  $T$  adalah waktu getar alami struktur bangunan gedung dinyatakan dalam detik. Untuk  $T = 0$  nilai  $C$  tersebut menjadi sama dengan  $A_o$ , di mana  $A_o$  merupakan percepatan puncak muka tanah menurut Tabel 4.





**Gambar 1 Wilayah gempa Indonesia dengan percepatan puncak batuan dasar dengan periode ulang 500 tahun.**

4.7.5 Mengingat pada kisaran waktu getar alami pendek  $0 \leq T \leq 0,2$  detik terdapat ketidak-pastian, baik dalam karakteristik gerakan tanah maupun dalam tingkat daktilitas strukturnya, Faktor Respons Gempa  $C$  menurut spektrum respons Gempa Rencana yang ditetapkan dalam Pasal 4.7.4, dalam kisaran waktu getar alami pendek tersebut, nilainya tidak diambil kurang dari nilai maksimumnya untuk jenis tanah yang bersangkutan.

4.7.6 Dengan menetapkan spektrum percepatan maksimum  $A_m$  sebesar

$$A_m = 2,5 A_o \quad (10)$$

dan waktugetar alami sudut  $T_c$  sebesar  $T_c=0,5$  detik,  $T_c=0,6$  detik dan  $0,4 < T_c < 1,0$  detik untuk jenis tanah berturut-turut Tanah Keras, Tanah Sedang dan Tanah Lunak, maka dengan memperhatikan Pasal 4.7.4 dan Pasal 4.7.5, Faktor Respons Gempa  $C$  ditentukan oleh persamaan-persamaan sebagai berikut:

- untuk  $T \leq T_c$ :

$$C = A_m \quad (11)$$

- untuk  $T > T_c$ :

$$C = \frac{A_r}{T} \quad (12)$$

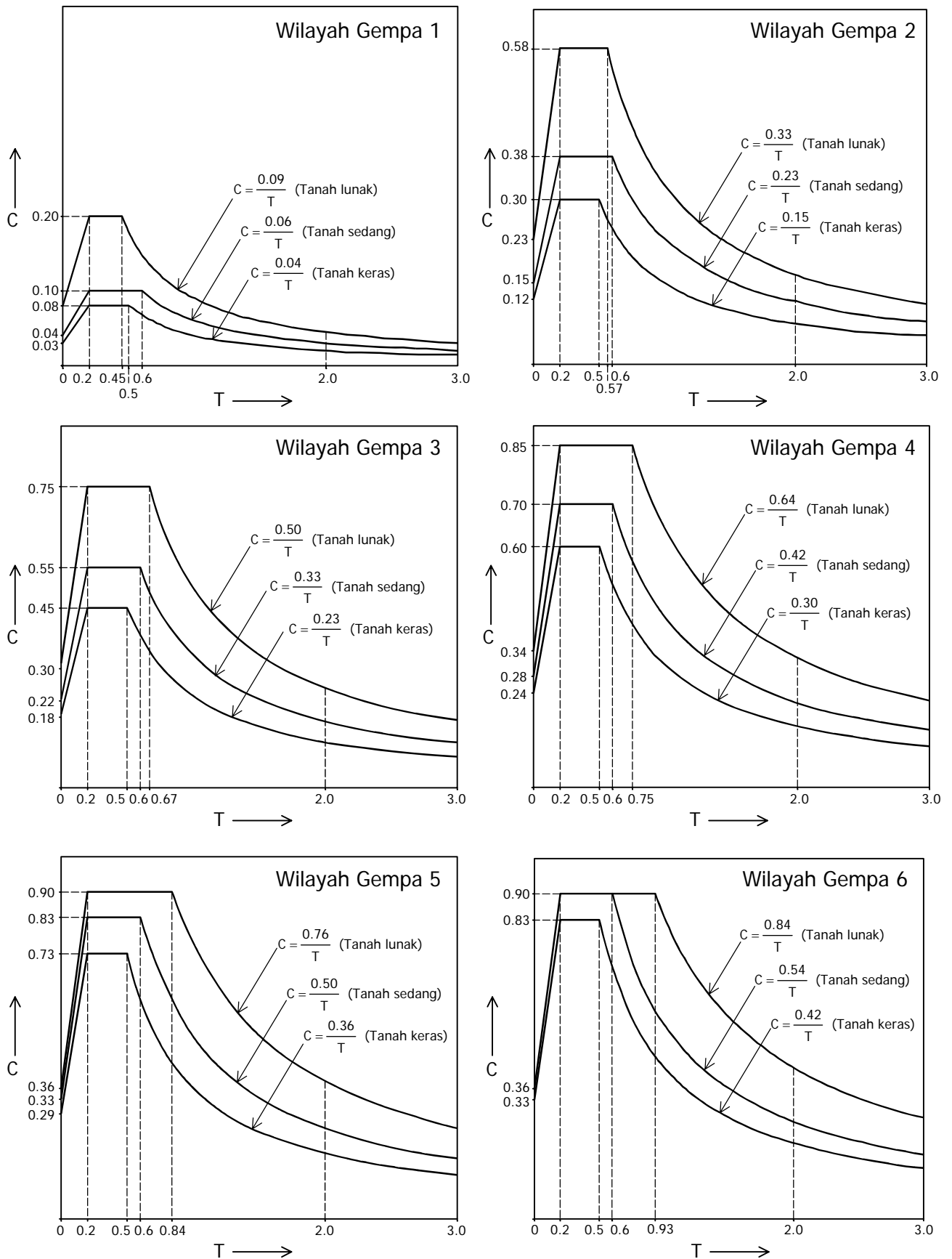
dengan

$$A_r = A_m T_c \quad (13)$$

Dalam Tabel 5, nilai-nilai  $A_m$  dan  $A_r$  dicantumkan untuk masing-masing Wilayah Gempa dan masing-masing jenis tanah.

**Tabel 5 Spektrum respons gempa rencana**

Wilayah Gempa	Tanah Keras $T_c = 0,5$ det.		Tanah Sedang $T_c = 0,6$ det.		Tanah Lunak $0,4 < T_c < 1,0$		
	$A_m$	$A_r$	$A_m$	$A_r$	$A_m$	$A_r$	$T_c$
	1	0,08	0,04	0,10	0,06	0,20	0,09
2	0,30	0,15	0,38	0,23	0,58	0,33	0,57
3	0,45	0,23	0,55	0,33	0,75	0,50	0,67
4	0,60	0,30	0,70	0,42	0,85	0,64	0,75
5	0,73	0,36	0,83	0,50	0,90	0,76	0,84
6	0,83	0,42	0,90	0,54	0,90	0,84	0,93



Gambar 2 Respons Spektrum Gempa Rencana

#### 4.8 Pengaruh gempa vertikal

4.8.1 Unsur-unsur struktur bangunan gedung yang memiliki kepekaan yang tinggi terhadap beban gravitasi seperti balkon, kanopi dan balok kantilever berbentang panjang, balok transfer pada struktur bangunan gedung tinggi yang memikul beban gravitasi dari dua atau lebih tingkat di atasnya serta balok beton pratekan berbentang panjang, harus diperhitungkan terhadap komponen vertikal gerakan tanah akibat pengaruh Gempa Rencana, berupa beban gempa vertikal nominal statik ekuivalen yang harus ditinjau bekerja ke atas atau ke bawah yang besarnya harus dihitung sebagai perkalian Faktor Respons Gempa vertikal  $C_v$  dan beban gravitasi, termasuk beban hidup yang sesuai.

4.8.2 Faktor Respons Gempa vertikal  $C_v$  yang disebut dalam Pasal 4.8.1 harus dihitung menurut persamaan:

$$C_v = \psi A_o I \quad (14)$$

di mana koefisien  $\psi$  bergantung pada Wilayah Gempa tempat struktur bangunan gedung berada dan ditetapkan menurut Tabel 6, dan  $A_o$  adalah percepatan puncak muka tanah menurut Tabel 4, sedangkan  $I$  adalah Faktor Keutamaan gedung menurut Tabel 1.

**Tabel 6 Koefisien  $\psi$  untuk menghitung faktor respons gempa vertikal  $C_v$**

Wilayah gempa	$\psi$
1	0,5
2	0,5
3	0,5
4	0,6
5	0,7
6	0,8

## 5 Perencanaan umum struktur bangunan gedung

### 5.1 Struktur atas dan struktur bawah

5.1.1 Struktur atas suatu gedung adalah seluruh bagian struktur bangunan gedung yang berada di atas muka tanah, sedangkan struktur bawah adalah seluruh bagian struktur bangunan gedung yang berada di bawah muka tanah, yang terdiri dari struktur besmen - kalau ada - dan/ atau struktur fondasinya. Seluruh struktur bawah harus diperhitungkan memikul pengaruh Gempa Rencana.

5.1.2 Apabila tidak dilakukan analisis interaksi tanah-struktur, struktur atas dan struktur bawah dari suatu struktur bangunan gedung dapat dianalisis terhadap pengaruh Gempa Rencana secara terpisah, di mana struktur atas dapat dianggap terjepit lateral pada taraf lantai dasar. Selanjutnya struktur bawah dapat dianggap sebagai struktur tersendiri yang berada di dalam tanah yang dibebani oleh kombinasi beban-beban gempa yang berasal dari struktur atas, beban gempa yang berasal dari gaya inersia sendiri dan beban gempa yang berasal dari tanah sekelilingnya.

- 5.1.3 Pada gedung tanpa besmen, taraf penjepitan lateral struktur atas dapat dianggap terjadi pada bidang telapak fondasi langsung, bidang telapak fondasi rakit dan bidang atas kepala (poer) fondasi tiang.
- 5.1.4 Apabila penjepitan tidak sempurna dari struktur atas gedung pada struktur bawah diperhitungkan, maka struktur atas gedung tersebut harus diperhitungkan terhadap pengaruh deformasi lateral maupun rotasional dari struktur bawahnya.
- 5.1.5 Dalam perencanaan struktur atas dan struktur bawah suatu gedung terhadap pengaruh Gempa Rencana, struktur bawah tidak boleh gagal lebih dahulu dari struktur atas. Untuk itu, terhadap pengaruh Gempa Rencana unsur-unsur struktur bawah harus tetap dapat memikul gaya yang menyebabkan gagalnya struktur atas.
- 5.2 Struktur pemikul beban gempa
- 5.2.1 Dalam perencanaan struktur bangunan gedung terhadap pengaruh Gempa Rencana, semua unsur struktur bangunan gedung, baik bagian dari subsistem struktur bangunan gedung maupun bagian dari sistem struktur bangunan gedung seperti rangka (portal), dinding geser, kolom, balok, lantai, lantai tanpa balok (lantai cendawan) dan kombinasinya, harus diperhitungkan memikul pengaruh Gempa Rencana.
- 5.2.2 Pengabaian pemikulan pengaruh Gempa Rencana oleh salah satu atau lebih kolom atau subsistem struktur bangunan gedung yang disebut dalam Pasal 5.2.1 hanya diperkenankan, bila partisipasi pemikulan pengaruh gempanya adalah kurang dari 10%. Dalam hal ini, unsur atau subsistem tersebut selain terhadap beban gravitasi, juga harus direncanakan terhadap simpangan sistem struktur bangunan gedung akibat pengaruh Gempa Rencana, yaitu sebesar  $0,7R$  kali simpangan akibat beban Gempa Nominal pada struktur bangunan gedung tersebut.
- 5.2.3 Dalam suatu sistem struktur yang terdiri dari kombinasi dinding-dinding geser dan rangka-rangka terbuka, beban geser dasar nominal yang dipikul oleh rangka-rangka terbuka tidak boleh kurang dari 25% dari beban geser nominal total yang bekerja dalam arah kerja beban gempa tersebut.
- 5.3 Lantai tingkat sebagai diafragma
- 5.3.1 Lantai tingkat, atap beton dan sistem lantai dengan ikatan suatu struktur bangunan gedung dapat dianggap sangat kaku dalam bidangnya dan karenanya dapat dianggap bekerja sebagai diafragma terhadap beban gempa horisontal.
- 5.3.2 Lantai tingkat, atap beton dan sistem lantai dengan ikatan suatu struktur bangunan gedung yang tidak kaku dalam bidangnya, karena mengandung lubang-lubang atau bukaan yang luasnya lebih dari 50% luas seluruh lantai tingkat, akan mengalami deformasi dalam bidangnya akibat beban gempa horisontal, yang harus diperhitungkan pengaruhnya terhadap pembagian beban gempa horisontal tersebut kepada seluruh sistem struktur tingkat yang ada.

#### 5.4 Eksentrisitas pusat massa terhadap pusat rotasi lantai tingkat

- 5.4.1 Pusat massa lantai tingkat suatu struktur bangunan gedung adalah titik tangkap resultante beban mati, berikut beban hidup yang sesuai, yang bekerja pada lantai tingkat itu. Pada perencanaan struktur bangunan gedung, pusat massa adalah titik tangkap beban gempa statik ekuivalen atau gaya gempa dinamik.
- 5.4.2 Pusat rotasi lantai tingkat suatu struktur bangunan gedung adalah suatu titik pada lantai tingkat itu yang bila suatu beban horisontal bekerja padanya, lantai tingkat tersebut tidak berotasi, tetapi hanya bertranslasi, sedangkan lantai-lantai tingkat lainnya yang tidak mengalami beban horisontal semuanya berotasi dan bertranslasi.
- 5.4.3 Antara pusat massa dan pusat rotasi lantai tingkat harus ditinjau suatu eksentrisitas rencana  $e_d$  diukur dari pusat rotasi lantai. Apabila ukuran horisontal terbesar denah struktur bangunan gedung pada lantai tingkat itu, diukur tegak lurus pada arah pembebanan gempa, dinyatakan dengan  $b$ , maka eksentrisitas rencana  $e_d$  harus ditentukan sebagai berikut:

untuk  $0 < e \leq 0,3 b$ :

$$e_d = 1,5 e + 0,05 b \quad (15)$$

atau

$$e_d = e - 0,05 b \quad (16)$$

dan dipilih di antara keduanya yang pengaruhnya paling menentukan untuk unsur atau subsistem struktur bangunan gedung yang ditinjau;

untuk  $e > 0,3 b$ :

$$e_d = 1,33 e + 0,1 b \quad (17)$$

atau

$$e_d = 1,17 e - 0,1 b \quad (18)$$

dan dipilih di antara keduanya yang pengaruhnya paling menentukan untuk unsur atau subsistem struktur bangunan gedung yang ditinjau.

- 5.4.4 Dalam perencanaan struktur bangunan gedung terhadap pengaruh Gempa Rencana, eksentrisitas rencana  $e_d$  antara pusat massa dan pusat rotasi lantai tingkat menurut Pasal 5.4.3. harus ditinjau baik dalam analisis statik, maupun dalam analisis dinamik tiga dimensi.

#### 5.5 Kekakuan struktur

- 5.5.1 Dalam perencanaan struktur bangunan gedung terhadap pengaruh Gempa Rencana, pengaruh peretakan beton pada unsur-unsur struktur dari beton bertulang, beton pratekan dan baja komposit harus diperhitungkan terhadap kekakuannya. Untuk itu, momen inersia penampang unsur struktur dapat ditentukan sebesar momen inersia penampang utuh dikalikan dengan suatu persentase efektifitas yang diatur dalam Standar SNI 03-2847-2002 Tata Cara Perhitungan Struktur Beton Untuk Bangunan Gedung.

- 5.5.2 Modulus elastisitas beton  $E_c$  harus ditetapkan sesuai dengan mutu (kuat tekan) beton yang dipakai, sedangkan modulus elastisitas baja ditetapkan sebesar  $E_s = 200$  GPa.
- 5.5.3 Dalam perencanaan struktur bangunan gedung terhadap pengaruh Gempa Rencana, kekakuan unsur struktur yang ditetapkan dalam Pasal 5.5.1 harus dipakai baik dalam analisis statik maupun dalam analisis dinamik tiga dimensi.
- 5.6 Pembatasan waktu getar alami fundamental  
Untuk mencegah penggunaan struktur bangunan gedung yang terlalu fleksibel, nilai waktu getar alami fundamental  $T_1$  dari struktur bangunan gedung harus dibatasi, bergantung pada koefisien  $\zeta$  untuk Wilayah Gempa dan jenis struktur bangunan gedung, menurut persamaan

$$T_1 < \zeta H^{3/4} \quad (19)$$

di mana  $H$  adalah tinggi total struktur dalam meter dan koefisien  $\zeta$  ditetapkan menurut Tabel 7.

**Tabel 7 Koefisien  $\zeta$  yang membatasi waktu getar alami struktur bangunan gedung**

Wilayah Gempa & Jenis Struktur	$\zeta$
Sedang & ringan; rangka baja	0,119
Sedang & ringan; rangka beton dan RBE	0,102
Sedang & ringan; bangunan lainnya	0,111
Berat; rangka baja	0,095
Berat; rangka beton dan RBE	0,063
Berat; bangunan lainnya	

- 5.7 Pengaruh P-Delta  
Struktur bangunan gedung yang tingginya diukur dari taraf penjepitan lateral adalah lebih dari 10 tingkat atau 40 meter, harus diperhitungkan terhadap pengaruh P-Delta, yaitu suatu gejala yang terjadi pada struktur bangunan gedung yang fleksibel, di mana simpangan lateral yang besar akibat beban gempa menimbulkan beban tambahan akibat momen guling yang terjadi oleh beban gravitasi yang titik tangkapnya menyimpang ke samping.
- 5.8 Arah pembebanan gempa
- 5.8.1 Dalam perencanaan struktur bangunan gedung, arah utama pengaruh Gempa Rencana harus ditentukan sedemikian rupa, sehingga memberi pengaruh terbesar terhadap unsur-unsur subsistem dan sistem struktur bangunan gedung secara keseluruhan.
- 5.8.2 Untuk mensimulasikan arah pengaruh Gempa Rencana yang sembarang terhadap struktur bangunan gedung, pengaruh pembebanan gempa dalam arah utama yang ditentukan menurut Pasal 5.8.1 harus dianggap efektif 100% dan harus dianggap

terjadi bersamaan dengan pengaruh pembebanan gempa dalam arah tegak lurus pada arah utama pembebanan tadi, tetapi dengan efektifitas hanya 30%.

## 6 Perencanaan struktur bangunan gedung beraturan

### 6.1 Beban Gempa Nominal statik ekuivalen

6.1.1 Struktur bangunan gedung beraturan dapat direncanakan terhadap pembebanan Gempa Nominal dalam arah masing-masing sumbu utama denah struktur tersebut, berupa beban Gempa Nominal statik ekuivalen, yang ditetapkan lebih lanjut dalam pasal-pasal berikut.

6.1.2 Apabila kategori gedung memiliki Faktor Keutamaan  $I$  menurut Tabel 1 dan strukturnya untuk suatu arah sumbu utama denah struktur dan sekaligus arah pembebanan Gempa Rencana memiliki faktor reduksi gempa  $R$  dan waktu getar alami fundamental  $T_1$ , maka beban geser dasar nominal statik ekuivalen  $V$  yang terjadi di tingkat dasar dapat dihitung menurut persamaan:

$$V = \frac{C_1 I}{R} W_t \quad (20)$$

di mana  $C_1$  adalah nilai Faktor Respons Gempa yang didapat dari spektrum respons Gempa Rencana menurut Gambar 2 untuk waktu getar alami fundamental  $T_1$ . Berat total struktur  $W_t$  ditetapkan sebagai jumlah dari beban-beban berikut ini:

- 1) Beban mati total dari struktur bangunan gedung;
- 2) Bila digunakan dinding partisi pada perencanaan lantai maka harus diperhitungkan tambahan beban sebesar 0,5 kPa;
- 3) Pada gudang-gudang dan tempat-tempat penyimpanan barang maka sekurang-kurangnya 25% dari beban hidup rencana harus diperhitungkan;
- 4) Beban tetap total dari seluruh peralatan dalam struktur bangunan gedung harus diperhitungkan.

6.1.3 Beban geser dasar nominal  $V$  menurut Pasal 6.1.2 harus dibagikan sepanjang tinggi struktur bangunan gedung menjadi beban-beban Gempa Nominal statik ekuivalen  $F_i$  yang menangkap pada pusat massa lantai tingkat ke- $i$  menurut persamaan:

$$F_i = \frac{W_i z_i}{\sum_{j=1}^n W_j z_j} V \quad (21)$$

di mana  $W_i$  adalah berat lantai tingkat ke- $i$ ,  $z_i$  adalah ketinggian lantai tingkat ke- $i$  diukur dari taraf penjepitan lateral menurut Pasal 5.1.2 dan Pasal 5.1.3, sedangkan  $n$  adalah nomor lantai tingkat paling atas.

6.1.4 Apabila rasio antara tinggi struktur bangunan gedung dan ukuran denahnya dalam arah pembebanan gempa sama dengan atau melebihi 3, maka  $0,1V$  harus dianggap sebagai beban horisontal terpusat yang menangkap pada pusat massa lantai tingkat paling atas, sedangkan  $0,9V$  sisanya harus dibagikan sepanjang tinggi struktur bangunan gedung menjadi beban-beban Gempa Nominal statik ekuivalen menurut Pasal 6.1.3.



6.1.5 Pada tangki di atas menara, beban Gempa Nominal statik ekuivalen sebesar  $V$  harus dianggap bekerja pada titik berat massa seluruh struktur menara dan tangki berikut isinya.

6.2 Waktu getar alami fundamental

6.2.1 Waktu getar alami fundamental struktur bangunan gedung beraturan dalam arah masing-masing sumbu utama dapat ditentukan dengan rumus Rayleigh sebagai berikut:

$$T_1 = 6,3 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n W_i d_i^2}{g \sum_{i=1}^n F_i d_i}} \quad (22)$$

di mana  $W_i$  dan  $F_i$  mempunyai arti yang sama dengan yang disebut dalam Pasal 6.1.3,  $d_i$  adalah simpangan horisontal lantai tingkat ke- $i$  akibat beban  $F_i$  yang dinyatakan dalam mm dan 'g' adalah percepatan gravitasi yang ditetapkan sebesar  $9.810 \text{ mm/det}^2$ .

6.2.2 Apabila waktu getar alami fundamental  $T_1$  struktur bangunan gedung untuk penentuan Faktor Respons Gempa  $C_1$  menurut Pasal 6.1.2 ditentukan dengan rumus-rumus empirik atau didapat dari hasil analisis vibrasi bebas tiga dimensi, nilainya tidak boleh menyimpang lebih dari 20% dari nilai yang dihitung menurut Pasal 6.2.1.

6.3 Analisis statik ekuivalen

Mengingat pada struktur bangunan gedung beraturan pembebanan Gempa Nominal dapat ditampilkan sebagai beban-beban Gempa Nominal statik ekuivalen  $F_i$  yang menangkap pada pusat massa lantai-lantai tingkat, maka pengaruh beban-beban Gempa Nominal statik ekuivalen tersebut dapat dianalisis dengan metoda analisis statik tiga dimensi biasa yang dalam hal ini disebut analisis statik ekuivalen tiga dimensi.

## 7 Perencanaan struktur bangunan gedung tidak beraturan

7.1 Ketentuan untuk analisis respons dinamik

7.1.1 Untuk struktur bangunan gedung tidak beraturan yang tidak memenuhi ketentuan yang disebut dalam Pasal 4.3.1, pengaruh Gempa Rencana terhadap struktur bangunan gedung tersebut harus ditentukan melalui analisis respons dinamik tiga dimensi. Untuk mencegah terjadinya respons struktur bangunan gedung terhadap pembebanan gempa yang dominan dalam rotasi, dari hasil analisis vibrasi bebas tiga dimensi, paling tidak gerak ragam pertama (fundamental) harus dominan dalam translasi.

- 7.1.2 Daktilitas struktur bangunan gedung tidak beraturan harus ditentukan yang representatif mewakili daktilitas struktur 3D. Tingkat daktilitas tersebut dapat dinyatakan dalam faktor reduksi gempa  $R$  representatif, yang nilainya dapat dihitung sebagai nilai rerata berbobot dari faktor reduksi gempa untuk 2 arah sumbu koordinat ortogonal dengan gaya geser dasar yang dipikul oleh struktur bangunan gedung dalam masing-masing arah tersebut sebagai besaran pembobotnya menurut persamaan:

$$R = \frac{V_x^o + V_y^o}{V_x^o / R_x + V_y^o / R_y} \quad (23)$$

di mana  $R_x$  dan  $V_x^o$  adalah faktor reduksi gempa dan gaya geser dasar untuk pembebanan gempa dalam arah sumbu- $x$ , sedangkan  $R_y$  dan  $V_y^o$  adalah faktor reduksi gempa dan gaya geser dasar untuk pembebanan gempa dalam arah sumbu- $y$ . Metoda ini hanya boleh dipakai, apabila rasio antara nilai-nilai faktor reduksi gempa untuk dua arah pembebanan gempa tersebut tidak lebih dari 1,5. Bila persyaratan tersebut tidak dipenuhi maka harus digunakan metode rasional lainnya yang dapat dipertanggungjawabkan.

- 7.1.3 Nilai akhir respons dinamik struktur bangunan gedung terhadap pembebanan Gempa Nominal dalam suatu arah tertentu, tidak boleh diambil kurang dari 80% nilai respons ragam yang pertama. Bila respons dinamik struktur bangunan gedung dinyatakan dalam gaya geser dasar nominal  $V_t$ , maka persyaratan tersebut dapat dinyatakan menurut persamaan berikut:

$$V_t \geq 0,8V_1 \quad (24)$$

di mana  $V_1$  adalah gaya geser dasar nominal sebagai respons ragam yang pertama terhadap pengaruh Gempa Rencana menurut persamaan:

$$V_1 = \frac{C_1 I}{R} W_t \quad (25)$$

dengan  $C_1$  adalah nilai Faktor Respons Gempa yang didapat dari spektrum respons Gempa Rencana menurut Gambar 2 untuk waktu getar alami pertama  $T_1$ ,  $I$  adalah Faktor Keutamaan menurut Tabel 1 dan  $R$  adalah faktor reduksi gempa representatif dari struktur bangunan gedung yang bersangkutan, sedangkan  $W_t$  adalah berat gedung.

## 7.2 Analisis ragam spektrum respons

- 7.2.1 Perhitungan respons dinamik struktur bangunan gedung tidak beraturan terhadap pembebanan Gempa Nominal, dapat dilakukan dengan metoda analisis ragam spektrum respons dengan memakai spektrum respons Gempa Rencana menurut Gambar 2 yang nilai ordinatnya dikalikan faktor koreksi  $I/R$ , di mana  $I$  adalah Faktor Keutamaan menurut Tabel 1, sedangkan  $R$  adalah faktor reduksi gempa representatif dari struktur bangunan gedung yang bersangkutan. Dalam hal ini, jumlah ragam vibrasi yang ditinjau dalam penjumlahan respons ragam menurut metoda ini harus sedemikian rupa, sehingga partisipasi massa ragam efektif dalam menghasilkan respons total harus mencapai sekurang-kurangnya 90%.

7.2.2 Penjumlahan respons ragam yang disebut dalam Pasal 7.2.1 untuk struktur bangunan gedung tidak beraturan yang memiliki waktu-waktu getar alami yang berdekatan, harus dilakukan dengan metoda yang dikenal dengan Kombinasi Kuadratik Lengkap (*Complete Quadratic Combination* atau *CQC*). Waktu getar alami harus dianggap berdekatan, apabila selisih nilainya kurang dari 15%. Untuk struktur bangunan gedung tidak beraturan yang memiliki waktu getar alami yang berjauhan, penjumlahan respons ragam tersebut dapat dilakukan dengan metoda yang dikenal dengan Akar Jumlah Kuadrat (*Square Root of the Sum of the Squares* atau *SRSS*).

7.2.3 Untuk memenuhi persyaratan menurut Pasal 7.1.3, maka gaya geser tingkat nominal sepanjang tinggi struktur bangunan gedung hasil analisis ragam spektrum respons dalam suatu arah tertentu, harus dikalikan nilainya dengan suatu Faktor Skala:

$$\text{Faktor Skala} = \frac{0,8 V_1}{V_i} \geq 1 \quad (26)$$

di mana  $V_1$  adalah gaya geser dasar nominal sebagai respons dinamik ragam yang pertama saja dan  $V_i$  adalah gaya geser dasar nominal yang didapat dari hasil analisis ragam spektrum respons yang telah dilakukan.

7.2.4 Bila diperlukan, dari diagram atau kurva gaya geser tingkat nominal sepanjang tinggi struktur bangunan gedung yang telah disesuaikan nilainya menurut Pasal 7.2.3 dapat ditentukan beban-beban Gempa Nominal statik ekuivalen yang bersangkutan (selisih gaya geser tingkat dari 2 tingkat berturut-turut), yang bila perlu diagram atau kurvanya dimodifikasi terlebih dulu secara konservatif untuk mendapatkan pembagian beban-beban Gempa Nominal statik ekuivalen yang lebih baik sepanjang tinggi struktur bangunan gedung. Beban-beban Gempa Nominal statik ekuivalen ini kemudian dapat dipakai dalam suatu analisis statik ekuivalen tiga dimensi biasa.

### 7.3 Analisis respons dinamik riwayat waktu

7.3.1 Bila diperlukan, perhitungan respons dinamik struktur bangunan gedung tidak beraturan terhadap pengaruh Gempa Rencana, dapat dilakukan dengan metoda analisis dinamik tiga dimensi berupa analisis respons dinamik linier dan non-linier riwayat waktu dengan suatu akselerogram gempa yang dianggakan sebagai gerakan tanah masukan.

7.3.2 Untuk perencanaan struktur bangunan gedung melalui analisis dinamik linier riwayat waktu terhadap pengaruh pembebanan Gempa Nominal, percepatan muka tanah asli dari gempa masukan harus diskalakan ke taraf pembebanan Gempa Nominal tersebut, sehingga nilai percepatan puncak  $A$  menjadi:

$$A = \frac{A_o I}{R} \quad (27)$$

di mana  $A_o$  adalah percepatan puncak muka tanah menurut Tabel 4,  $R$  adalah faktor reduksi gempa representatif dari struktur bangunan gedung yang bersangkutan, sedangkan  $I$  adalah Faktor Keutamaan menurut Tabel 1. Selanjutnya harus dipenuhi juga persyaratan menurut Pasal 7.1.3 dan untuk itu Faktor Skala yang dipakai adalah sama dengan yang ditentukan dalam Pasal 7.2.3, hanya  $V_i$  di sini merupakan

gaya geser dasar maksimum yang terjadi di tingkat dasar yang didapat dari hasil analisis respons dinamik riwayat waktu yang telah dilakukan. Dalam analisis ini redaman struktur yang harus diperhitungkan dapat dianggap 5% dari redaman kritis.

- 7.3.3 Untuk mengkaji perilaku pasca-elastik struktur bangunan gedung terhadap pengaruh Gempa Rencana, harus dilakukan analisis respons dinamik non-linier riwayat waktu, di mana percepatan muka tanah asli dari gempa masukan harus diskalakan, sehingga nilai percepatan puncaknya menjadi sama dengan  $A_o I$ , di mana  $A_o$  adalah percepatan puncak muka tanah menurut Tabel 4 dan  $I$  adalah Faktor Keutamaan menurut Tabel 1.
- 7.3.4 Akselerogram gempa masukan yang ditinjau dalam analisis respons dinamik linier dan non-linier riwayat waktu, harus diambil dari rekaman gerakan tanah akibat gempa yang didapat di suatu lokasi yang mirip kondisi geologi, topografi dan seismotektoniknya dengan lokasi tempat struktur bangunan gedung yang ditinjau berada. Untuk mengurangi ketidak-pastian mengenai kondisi lokasi ini, paling sedikit harus ditinjau empat buah akselerogram dari empat gempa yang berbeda, salah satunya harus diambil akselerogram Gempa El Centro N-S yang telah direkam pada tanggal 15 Mei 1940 di California. Perbedaan keempat akselerogram tersebut harus ditunjukkan dengan nilai maksimum absolut koefisien korelasi silang antara satu akselerogram terhadap lainnya yang lebih kecil daripada 10%.
- 7.3.5 Berhubung gerakan tanah akibat gempa pada suatu lokasi tidak mungkin dapat diperkirakan dengan tepat, maka sebagai gempa masukan dapat juga dipakai gerakan tanah yang disimulasikan. Parameter-parameter yang menentukan gerakan tanah yang disimulasikan ini antara lain terdiri dari waktu getar dominan tanah, konfigurasi spektrum respons, jangka waktu gerakan dan intensitas gempanya.

## 8 Kinerja struktur bangunan gedung

### 8.1 Kinerja batas layan

- 8.1.1 Kinerja batas layan struktur bangunan gedung ditentukan oleh simpangan antar-tingkat akibat pengaruh Gempa Nominal, yaitu untuk membatasi terjadinya pelelehan baja dan peretakan beton yang berlebihan, di samping untuk mencegah kerusakan non-struktur. Simpangan antar-tingkat ini harus dihitung dari simpangan struktur bangunan gedung tersebut akibat pengaruh Gempa Nominal yang telah dikalikan dengan Faktor Skala.
- 8.1.2 Untuk memenuhi persyaratan kinerja batas layan struktur bangunan gedung, dalam segala hal simpangan antar-tingkat yang dihitung dari simpangan struktur bangunan gedung menurut Pasal 8.1.1 tidak boleh melampaui  $0,03/R$  kali tinggi tingkat yang bersangkutan atau 30 mm, bergantung yang mana yang nilainya terkecil.

### 8.2 Kinerja batas ultimit

- 8.2.1 Kinerja batas ultimit struktur bangunan gedung ditentukan oleh simpangan dan simpangan antar-tingkat maksimum struktur bangunan gedung akibat pengaruh Gempa Rencana, yaitu untuk membatasi kemungkinan terjadinya keruntuhan

struktur bangunan gedung yang dapat menimbulkan korban jiwa manusia dan untuk mencegah benturan berbahaya antar-gedung atau antar bagian struktur bangunan gedung yang dipisah dengan sela pemisah (sela dilatasi). Sesuai Pasal 4.4.3 simpangan dan simpangan antar-tingkat ini harus dihitung dari simpangan struktur bangunan gedung akibat pembebanan Gempa Nominal, dikalikan dengan suatu faktor pengali  $\xi$  sebagai berikut:

- untuk struktur bangunan gedung beraturan:

$$\xi = 0,7R \quad (28)$$

- untuk struktur bangunan gedung tidak beraturan:

$$\xi = 0,7R * \text{Faktor Skala} \quad (29)$$

di mana  $R$  adalah faktor reduksi gempa struktur bangunan gedung tersebut dan Faktor Skala adalah seperti yang ditetapkan dalam Pasal 7.2.3.

- 8.2.2 Untuk memenuhi persyaratan kinerja batas ultimit struktur bangunan gedung, dalam segala hal simpangan antar-tingkat yang dihitung dari simpangan struktur bangunan gedung menurut Pasal 8.2.1 tidak boleh melampaui 0,02 kali tinggi tingkat yang bersangkutan.
- 8.2.3 Jarak pemisah antar-gedung harus ditentukan paling sedikit sama dengan jumlah simpangan maksimum masing-masing struktur bangunan gedung pada taraf itu yang dihitung dengan cara yang disebut dalam Pasal 8.2.1. Dalam segala hal masing-masing jarak tersebut tidak boleh kurang dari 0,025 kali ketinggian taraf itu diukur dari taraf penjepitan lateral.
- 8.2.4 Dua bagian struktur bangunan gedung yang tidak direncanakan untuk bekerja sama sebagai satu kesatuan dalam mengatasi pengaruh Gempa Rencana, harus dipisahkan yang satu terhadap yang lainnya dengan suatu sela pemisah (sela dilatasi) yang lebarnya paling sedikit harus sama dengan jumlah simpangan masing-masing bagian struktur bangunan gedung pada taraf itu yang dihitung dengan cara yang disebut dalam Pasal 8.2.1. Dalam segala hal lebar sela pemisah tidak boleh ditetapkan kurang dari 75 mm.
- 8.2.5 Sela pemisah yang disebut dalam Pasal 8.2.4 harus direncanakan detailnya dan dilaksanakan sedemikian rupa, sehingga senantiasa bebas dari kotoran atau benda-benda penghalang. Lebar sela pemisah juga harus memenuhi semua toleransi pelaksanaan.

## 9 Pengaruh gempa pada struktur bawah

### 9.1 Pembebanan gempa dari struktur atas

- 9.1.1 Berhubung sesuai Pasal 5.1.5 akibat pengaruh Gempa Rencana struktur bawah tidak boleh gagal lebih dulu dari struktur atas, maka struktur bawah harus dapat memikul pembebanan gempa maksimum akibat pengaruh Gempa Rencana,  $V_m$ , menurut persamaan:

$$V_m = f V_n \quad (30)$$

di mana  $V_n$  adalah bebanan Gempa Nominal dan  $f$  adalah faktor tahanan lebih total seperti ditentukan pada Tabel 2.

- 9.1.2 Akibat beban Gempa Nominal, gaya statik ekuivalen nominal  $F_i$  pada suatu struktur bangunan gedung menangkap pada pusat massa lantai tingkat ke- $i$  dan pada ketinggian  $z_i$  diukur dari taraf penjepitan lateral menurut Pasal 5.1.2 dan Pasal 5.1.3, maka pembebanan momen guling nominal maksimum dari struktur atas pada struktur bawah sesuai dengan Pasal 9.1.1 harus dihitung menurut persamaan:

$$M_{gm} = f \sum_{i=1}^n F_i z_i \quad (31)$$

Dalam Pers. (31)  $n$  adalah nomor lantai tingkat paling atas. Momen guling nominal maksimum ini bekerja pada struktur bawah bersamaan dengan beban normal (vertikal) dan beban geser (horisontal) yang bersangkutan.

- 9.1.3 Berhubung pada struktur atas gedung yang akibat pengaruh Gempa Rencana terdapat kemungkinan terjadinya sendi plastis pada kaki semua kolom dan pada semua kaki dinding geser, maka momen guling yang dikerjakan oleh momen leleh akhir dari semua sendi plastis tersebut, harus ditinjau sebagai kemungkinan pembebanan momen guling dari struktur atas pada struktur bawah. Dalam hal ini, apabila  $M_{p,k}$  adalah momen plastis pada kaki kolom dan  $M_{p,d}$  adalah momen plastis pada kaki dinding geser, masing-masing dihitung untuk gaya normal yang bersangkutan, di mana diagram interaksinya  $N$ - $M$  untuk menghitung momen leleh masing-masing dihitung berdasarkan dimensi penampang dan tahanan terpasang, maka pembebanan momen guling nominal maksimum dari struktur atas pada struktur bawah harus dihitung dari persamaan:

$$M_{gm} = \left( \sum_{kolom} (N_k * e_{gk} + M_{p,k}) + \sum_{dinding} (N_d * e_{gd} + M_{p,d}) \right) \quad (32)$$

dimana  $N_k$ ,  $N_d$  adalah gaya axial pada kolom dan pada dinding saat terjadinya  $M_{p,k}$ ,  $M_{p,d}$ , serta  $e_{gk}$ ,  $e_{gd}$  adalah lengan guling kolom dan dinding dihitung dari titik pusat guling. Dalam Pers. (32) penjumlahan harus dilakukan meliputi seluruh kolom dan seluruh dinding geser yang ada dalam struktur atas gedung. Momen guling maksimum menurut Pers. (32) bekerja pada struktur bawah bersamaan dengan beban gravitasi (vertikal) dan beban geser (horisontal) yang bersangkutan.

- 9.1.4 Momen guling maksimum dari struktur atas pada struktur bawah yang menentukan adalah yang nilainya terkecil di antara yang dihitung menurut Pers. (31) dan Pers. (32).
- 9.1.5 Disamping ketentuan pada Pasal 9.1.2 dan 9.1.3, kegagalan lokal akibat beban Gempa Rencana pada setiap komponen struktur penjepit lateral seperti dijelaskan pada Pasal 5.1.3 harus diperiksa dan dihindarkan. Prinsip perhitungan pada Pasal 9.1.3 tetap dapat digunakan untuk tujuan tersebut.
- 9.1.6 Berhubung struktur atas suatu gedung dalam keadaan sesungguhnya akibat pengaruh interaksi tanah-struktur tidak sepenuhnya terjepit pada taraf penjepitan lateral, maka bila diinginkan pengaruh penjepitan tidak sempurna ini boleh diperhitungkan dengan cara yang rasional, yang bergantung pada jenis tanah dan

keberadaan besmen.

## 9.2 Pembebanan gempa dari gaya inersia

9.2.1 Berhubung dalam keadaan sesungguhnya akibat pengaruh interaksi tanah-struktur oleh pengaruh Gempa Rencana antara struktur bawah dan tanah sekelilingnya terdapat interaksi kinematik dan inersial, maka massa lantai-lantai besmen mengalami percepatan, sehingga mengalami gaya inersia sendiri yang bekerja sebagai beban gempa horisontal pada taraf lantai besmen tersebut, yang harus diperhitungkan membebani struktur besmen secara keseluruhan.

9.2.2 Apabila tidak ditentukan dengan cara yang lebih rasional, maka sehubungan dengan Pasal 9.2.1 beban gempa horisontal nominal statik ekuivalen akibat gaya inersia sendiri  $F_b$  yang menangkap pada pusat massa lantai besmen dari struktur bawah dapat dihitung dari persamaan:

$$F_b = 0,10 A_o I W_b \quad (33)$$

di mana  $A_o$  adalah percepatan puncak muka tanah akibat pengaruh Gempa Rencana menurut Tabel 4,  $I$  adalah Faktor Keutamaan gedung yang bersangkutan menurut Tabel 1 dan  $W_b$  adalah berat lantai besmen, termasuk beban hidup yang sesuai.

## 9.3 Pembebanan gempa dari tanah sekelilingnya

9.3.1 Apabila tidak ditentukan dengan cara yang lebih rasional, dinding besmen dan komponen lain struktur bawah harus diperhitungkan terhadap tekanan tanah dari tanah depan akibat pengaruh Gempa Rencana, yang nilainya dapat dianggap mencapai nilai maksimum sebesar nilai tekanan leleh tanah sepanjang kedalaman besmen. Tekanan leleh tanah tersebut yang bekerja pada struktur bawah harus dijadikan tekanan tanah nominal.

9.3.2 Dalam perhitungan struktur bawah suatu gedung sebagai struktur tiga dimensi, harus ditinjau keberadaan tanah belakang dengan memodelkannya sebagai pegas-pegas tekan dan bila diinginkan keberadaan tanah samping dan tanah bawah (fondasi) dapat ditinjau dengan memodelkannya sebagai pegas-pegas geser. Sifat-sifat pegas tekan dan pegas geser harus dijabarkan secara rasional dari data tanah dan fondasi yang bersangkutan.

## 10 Pengaruh gempa pada unsur sekunder, unsur arsitektur dan instalasi mesin dan listrik

### 10.1 Ruang lingkup pengamanan

10.1.1 Unsur sekunder, unsur arsitektur dan instalasi mesin dan listrik harus diamankan terhadap pengaruh Gempa Rencana, karena unsur-unsur tersebut dapat menimbulkan bahaya pada manusia jika mengalami kegagalan, sedangkan instalasi mesin dan listrik harus tetap dapat berfungsi setelah gempa berlangsung.

10.1.2 Benda-benda yang disimpan dalam museum dan barang-barang sejenis yang mempunyai nilai sejarah atau nilai budaya yang tinggi, yang tidak merupakan unsur-unsur struktur, harus ditambat dan diamankan terhadap pengaruh Gempa Rencana. Untuk detail dari penambatan ini harus dimintakan nasehatnya dari ahli

yang khusus.

## 10.2 Tambatan

10.2.1 Setiap unsur sekunder, unsur arsitektur seperti ornamen, panel beton pracetak dan penutup luar gedung, serta instalasi mesin dan listrik, harus ditambat erat kepada struktur bangunan gedungnya agar tahan terhadap pengaruh Gempa Rencana. Tahanan gesek akibat pengaruh gravitasi tidak boleh diperhitungkan dalam merencanakan ketahanan geser suatu unsur atau instalasi terhadap gaya gempa horisontal.

10.2.2 Alat-alat penambat, termasuk baut-baut jangkar, harus tahan karat, mempunyai daktilitas serta dayaambat yang cukup. Dalam hal panel-panel beton pracetak, jangkar-jangkarnya harus dilas atau dikaitkan kepada penulangan panel.

## 10.3 Hubungan Antar-Unsur

10.3.1 Pengaruh satu unsur terhadap unsur lainnya yang saling berhubungan harus diperhitungkan. Kegagalan satu unsur sekunder, unsur arsitektur atau instalasi mesin dan listrik yang direncanakan terhadap pengaruh suatu beban gempa tertentu, tidak boleh menyebabkan kegagalan pada unsur lain yang berhubungan dan yang direncanakan terhadap pengaruh beban gempa yang lebih tinggi.

10.3.2 Interaksi di antara unsur sekunder, unsur arsitektur serta instalasi mesin dan listrik harus dicegah dengan mengadakan jarak pemisah menurut Pasal 8.2.4.

## 10.4 Pemutusan otomatis operasi mesin dan alat

Jika pelanjutan operasi suatu mesin atau alat selama gerakan gempa berlangsung dapat mengakibatkan bahaya yang berarti, maka harus diadakan suatu sistem yang memutuskan secara otomatis operasi suatu mesin atau alat, jika suatu percepatan muka tanah tertentu yang ditetapkan mulai bekerja.

## 10.5 Pengaruh Gempa Rencana

10.5.1 Setiap unsur sekunder, unsur arsitektur dan instalasi mesin dan listrik harus direncanakan terhadap suatu beban Gempa Nominal statik ekuivalen  $F_p$ , yang bekerja dalam arah yang paling berbahaya dan yang besarnya ditentukan menurut persamaan:

$$F_p = \frac{C_1}{R} K_p P W_p \quad (34)$$

di mana  $C_1$  adalah Faktor Respons Gempa yang didapat dari spektrum respons Gempa Rencana menurut Gambar 2 untuk waktu getar alami fundamental dari struktur bangunan gedung yang memikul unsur sekunder, unsur arsitektur dan instalasi mesin dan listrik tersebut, yang beratnya masing-masing adalah  $W_p$ , sedangkan  $R$  adalah faktor reduksi gempa struktur pemikul tersebut dan  $K_p$  dan  $P$  adalah berturut-turut koefisien pembesaran respons dan faktor kinerja unsur yang ditentukan dalam ayat-ayat berikut.

10.5.2 Koefisien pembesaran respons mencerminkan pembesaran respons unsur atau instalasi terhadap respons struktur bangunan gedung yang memikulnya, yang bergantung pada ketinggian tempat kedudukannya pada struktur bangunan gedung.



Apabila tidak dihitung dengan cara yang lebih rasional, koefisien pembesaran respons  $K_p$  dapat dihitung menurut persamaan:

$$K_p = 1 + \frac{z_p}{z_n} \quad (35)$$

di mana  $z_p$  adalah ketinggian tempat kedudukan unsur atau instalasi dan  $z_n$  adalah ketinggian lantai puncak gedung, keduanya diukur dari taraf penjepitan lateral menurut Pasal 5.1.2 dan Pasal 5.1.3.

- 10.5.3 Faktor kinerja unsur  $P$  mencerminkan tingkat keutamaan unsur atau instalasi tersebut dalam kinerjanya selama maupun setelah gempa berlangsung. Jika tidak ditentukan dengan cara yang lebih rasional, faktor kinerja unsur  $P$  ditetapkan dalam Tabel 8 dan Tabel 9.
- 10.5.4 Waktu getar alami unsur sekunder, unsur arsitektur dan instalasi mesin dan listrik yang nilainya berdekatan dengan waktu getar alami struktur bangunan gedung yang memikinya harus dihindari, sebab dapat menimbulkan gejala resonansi yang berbahaya. Apabila rasio waktu getar alami antara ke duanya adalah antara 0,6 dan 1,4, maka nilai faktor kinerja unsur  $P$  harus dikalikan 2, kecuali jika dilakukan suatu analisis khusus.

**Tabel 8 Faktor kinerja unsur untuk unsur sekunder dan unsur arsitektur**

<b>Unsur sekunder dan unsur arsitektur</b>	<b>Faktor kinerja unsur <i>P</i></b>
1. Dinding dan sekat pemisah <ul style="list-style-type: none"> <li>- Dinding yang berbatasan dengan jalan keluar atau tempat umum atau yang disyaratkan memiliki ketahanan tertentu terhadap kebakaran:</li> <li>- Dinding kantilever dan sandaran (parapet):</li> <li>- Dinding dan sekat pemisah ruangan:</li> </ul>	  4 4 2,5
2. Ornamen, panel beton pracetak dan penutup luar gedung, berikut alat penambatnya:	8
3. Sistem langit-langit yang digantung pada struktur bangunan gedung dengan lempengan penutup yang beratnya melampaui 20 N per buah: <ul style="list-style-type: none"> <li>- di atas ruang penting (ruang bedah di rumah sakit), jalan keluar dan tempat umum atau yang disyaratkan memiliki ketahanan tertentu terhadap kebakaran:</li> <li>- di atas ruang kerja dan penghunian biasa:</li> </ul>	  3 2
4. Perlengkapan ruang pada jalan keluar atau yang dapat membahayakan jika mengalami pengaruh gempa:	2
5. Tangki air bersih dan cerobong yang menyatu dengan gedung dengan berat tidak lebih dari 10% dari berat gedung:	2,5
6. Struktur rumah atap atau ruang mesin pada puncak gedung:	2,5

**Tabel 9 Faktor kinerja unsur untuk instalasi mesin dan listrik**

<b>Instalasi mesin dan listrik</b>	<b>Faktor kinerja unsur <i>P</i></b>
1. Tangki tekanan tinggi, ketel uap, tungku, pembakar, pemanas air atau alat-alat lain yang memakai sumber energi pembakaran dengan suhu tinggi:	6
2. Tangki cairan atau gas di atas menara untuk: - cairan dan gas beracun, alkohol, asam, alkali, logam pijar atau bahan-bahan lain yang berbahaya - sistem penyemprot air kebakaran	6 6
3. Pengatur roda gigi ( <i>switchgear</i> ), transformator, gardu listrik, alat kontrol motor listrik.	6
4. Gantungan dan tambatan lampu: - tambatan erat - tambatan ayunan (bandul)	2,5 3,5
5. Sistem pipa distribusi berikut isinya: - yang ditambat erat untuk cairan beracun dan berbahaya - yang ditambat erat untuk air bersih - yang ditambat fleksibel untuk cairan beracun dan berbahaya - yang ditambat fleksibel untuk air bersih	6 3 8 5
6. Rak-rak untuk menyimpan batere dan barang-barang berbahaya	4
7. Mesin lift, rel pengarah	3
8. Peralatan siap jalan pada keadaan darurat, yang harus segera berfungsi setelah gempa terjadi:	6

## **Lampiran A PENJELASAN**

### **A.1 Ruang lingkup**

- A.1.1 Dengan berlakunya Standar ini, pasal ini menekankan tidak berlakunya lagi standar yang lama SNI 03-1726-1989. Hal ini adalah penting, karena menurut Standar ini Gempa Rencana mempunyai perioda ulang 500 tahun, sedangkan menurut standar yang lama perioda ulang tersebut hanya 200 tahun. Seperti diketahui, makin panjang perioda ulang suatu gempa, makin besar juga pengaruh gempa tersebut pada struktur bangunan. Di samping itu, di dalam Standar ini diberikan definisi baru mengenai jenis tanah yang berbeda dengan menurut standar yang lama. Dengan demikian, jelas standar yang lama tidak dapat dipakai lagi. Namun demikian, struktur bangunan gedung yang sudah ada yang ketahanan gempanya telah direncanakan berdasarkan standar lama, ketahanan tersebut pada umumnya masih memadai. Untuk itu dapat dikemukakan beberapa alasan. Pertama, faktor reduksi gempa  $R$  menurut standar lama adalah relatif lebih kecil daripada menurut Standar ini. Misalnya untuk struktur daktail penuh menurut standar lama  $R = 6$ , sedangkan menurut Standar ini  $R = 8,5$ , sehingga beban gempa yang harus diperhitungkan menurut standar lama dan Standar ini saling mendekati. Kedua, dengan definisi jenis tanah yang baru, banyak jenis tanah yang menurut standar lama termasuk jenis Tanah Lunak, menurut Standar ini termasuk jenis Tanah Sedang, sehingga beban gempa yang perlu diperhitungkan lebih saling mendekati lagi. Ketiga, gedung yang sudah ada telah menjalani sebagian dari umurnya, sehingga dengan risiko yang sama terjadinya keruntuhan struktur bangunan gedung dalam sisa umurnya, beban gempa yang harus diperhitungkan menjadi relatif lebih rendah daripada menurut Standar ini untuk gedung baru. Namun demikian, bila ternyata tahanan dari struktur bangunan gedung yang telah berdiri sebelum diundangkannya Standar ini dinilai tidak memadai maka Faktor Keutamaan untuk struktur bangunan gedung tersebut dapat dikalikan 80%, dengan ketentuan-ketentuan lainnya pada Standar ini tetap berlaku.
- A.1.2 Pasal ini menyatakan, bahwa Standar ini tidak berlaku untuk bangunan-bangunan yang disebut dalam pasal tersebut. Namun demikian, prinsip-prinsip pokok yang ditetapkan dalam Standar ini berlaku juga untuk bangunan-bangunan tersebut, asal disesuaikan tingkat daktilitasnya serta perilaku spesifik lainnya; yang jelas, definisi jenis tanah, peta wilayah gempa Indonesia dan spektrum respons berlaku umum.
- A.1.3 Pasal ini secara singkat mengungkapkan falsafah perencanaan ketahanan gempa dari suatu struktur bangunan gedung, yaitu bahwa akibat gempa yang kuat struktur dapat mengalami kerusakan struktural yang berat, tetapi karena tidak boleh runtuh maka dapat mencegah jatuhnya korban manusia; sedangkan akibat gempa sedang kerusakan non-struktural yang terjadi diharapkan masih dapat diperbaiki secara ekonomis.

### **A.3 Istilah dan notasi**

- A.3.1 Istilah  
Dalam pasal ini ditetapkan pengertian berbagai jenis analisis yang dihadapi dalam perencanaan ketahanan gempa struktur bangunan gedung, sehingga

tidak ada interpretasi lain mengenai analisis tersebut daripada yang ditetapkan dalam pasal ini. Kemudian, di dalam pasal ini ditetapkan juga pengertian daktilitas struktur yang sangat penting untuk difahami, mengingat nilai faktor daktilitas struktur yang menentukan besarnya beban gempa yang bekerja pada struktur tersebut untuk perencanaan dapat dipilih sendiri oleh perencana atau pemilik gedung.

#### A.3.2 Notasi

Dalam pasal ini semua notasi penting yang dipakai dalam Standar ini dijelaskan, sehingga melalui pasal ini para pemakai Standar ini dengan mudah dapat menemukan arti dari sesuatu notasi, tanpa harus mencari pasal yang pertama kali mencantumkan notasi tersebut.

### A.4 **Ketentuan umum**

#### A.4.1 Klasifikasi beban gempa

Pasal ini memberikan definisi dari beban-beban gempa, yaitu beban Gempa Sedang, Rencana, dan Kuat. Dengan probabilitas terjadinya masing-masing adalah 50%, 10%, dan 2% dalam rentang masa layan gedung 50 tahun, menurut teori probabilitas beban-beban gempa tersebut masing-masing mempunyai perioda ulang 75, 500, dan 2.500 tahun. Beban Gempa Kuat ini menyebabkan struktur bangunan gedung mencapai kondisi di ambang keruntuhan, tetapi masih dapat berdiri sehingga dapat mencegah jatuhnya korban manusia. Hal ini mencerminkan butir pertama dari falsafah perencanaan struktur bangunan gedung menurut Pasal 1.

#### A.4.2 Kategori gedung

Pasal ini mengakomodasi tingkat kepentingan struktur bangunan gedung. Struktur bangunan gedung biasa yang tidak terlalu penting sehubungan dengan pasca gempa diberikan tingkat kepentingan  $I=1$ . Struktur-struktur lainnya yang berbahaya terhadap lingkungan atau yang lebih penting dan tetap harus dapat menjalankan fungsinya sesaat setelah terjadinya gempa diberikan tingkat kepentingan yang lebih tinggi dan karenanya diberikan nilai  $I=1,5$ . Hal ini juga dapat dilihat sebagai upaya menyesuaikan perioda ulang gempa yang menyebabkan struktur bangunan gedung tersebut lebih tahan terhadap beban-beban gempa dengan periode ulang yang lebih besar. Contoh dari gedung-gedung penting pasca gempa adalah rumah sakit, instalasi air bersih, pembangkit tenaga listrik, pusat penyelamatan dalam keadaan darurat dan fasilitas radio dan televisi; dan contoh gedung-gedung yang membahayakan lingkungan bila rusak berat akibat gempa adalah tempat penyimpanan bahan berbahaya.

#### A.4.3 Struktur bangunan gedung beraturan dan tidak beraturan

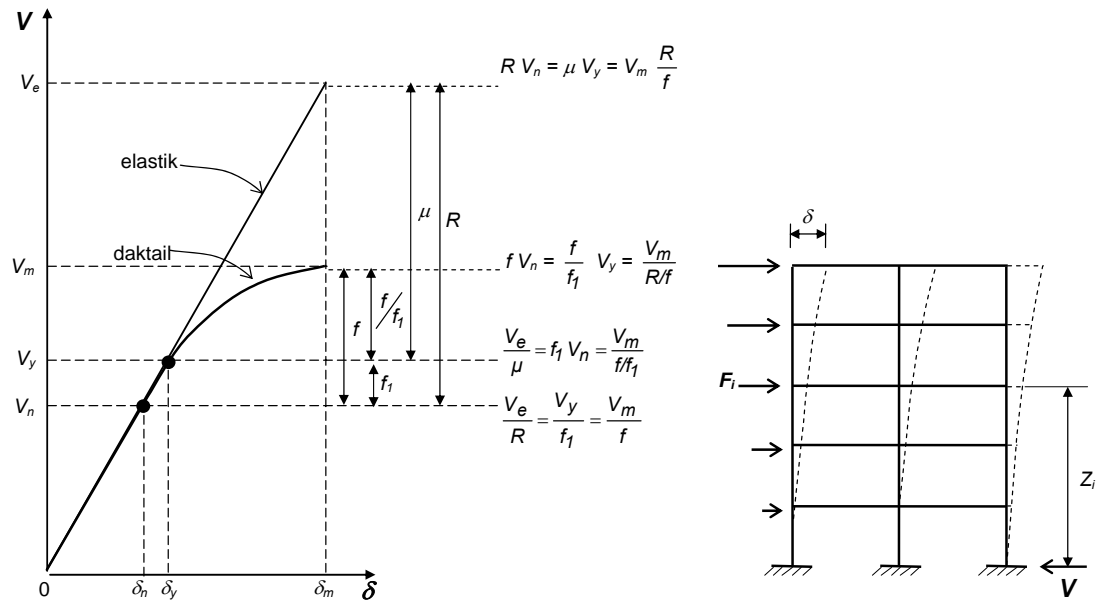
A.4.3.1 Struktur bangunan gedung dapat digolongkan ke dalam struktur bangunan gedung beraturan, bila memenuhi ketentuan-ketentuan yang diberikan dalam pasal ini. Struktur bangunan gedung beraturan ini pada umumnya simetris dalam denah dengan sistem struktur yang terbentuk oleh subsistem-subsistem pemikul beban lateral yang arahnya saling tegak lurus dan sejajar dengan sumbu-sumbu utama ortogonal denah tersebut. Apabila untuk analisis 3D sumbu-sumbu koordinat diambil sejajar dengan arah sumbu-sumbu utama denah struktur, kemudian dilakukan analisis vibrasi bebas, maka pada struktur bangunan gedung beraturan gerak ragam pertama akan dominan dalam

translasi dalam arah salah satu sumbu utamanya, sedangkan gerak ragam kedua akan dominan dalam translasi dalam arah sumbu utama lainnya. Dengan demikian, struktur 3D gedung beraturan praktis berperilaku sebagai struktur 2D dalam masing-masing arah sumbu utamanya. Akan dijelaskan nanti (lihat A.6.1.1), bahwa pengaruh gempa pada struktur bangunan gedung beraturan dengan menerapkan metoda analisis ragam dapat dianggap seolah-olah berupa beban gempa statik ekuivalen yang dihitung sebagai respons dinamik ragam fundamentalnya saja.

- A.4.3.2 Apabila suatu struktur bangunan gedung tidak memenuhi ketentuan-ketentuan yang ditetapkan dalam Pasal 4.3.1, maka kita menghadapi struktur bangunan gedung tidak beraturan. Untuk struktur bangunan gedung tidak beraturan pengaruh gempa terhadapnya harus dianalisis secara dinamik. Dengan menerapkan metoda analisis ragam dimana respons terhadap gempa dinamik merupakan superposisi dari respons dinamik sejumlah ragamnya yang berpartisipasi.
- A.4.4 Daktilitas struktur bangunan gedung dan pembebanan Gempa Nominal
- A.4.4.1 Dari pasal ini terlihat, bahwa pada struktur yang elastik, kondisi struktur di ambang keruntuhan tercapai bersamaan dengan pelelehan pertama di dalam struktur ( $\delta_y$ ). Selanjutnya pasal ini menentukan, bahwa tidak semua jenis sistem struktur bangunan gedung mampu berperilaku daktail penuh dengan mencapai  $\mu = 5,2$ . Faktor daktilitas maksimum  $\mu_m$  yang dapat dicapai oleh berbagai jenis sistem struktur bangunan gedung ditetapkan dalam Tabel 2. Untuk perencanaan suatu struktur bangunan gedung nilai  $\mu$  dapat dipilih sendiri oleh perencana atau pemilik gedung, asal memenuhi  $1,4 \leq \mu \leq \mu_m$ . Untuk selanjutnya lihat A.4.4.4.
- A.4.4.2 Asumsi yang dianut dalam pasal ini, yaitu bahwa struktur bangunan gedung daktail dan struktur bangunan gedung elastik akibat pengaruh Gempa Rencana menunjukkan simpangan maksimum  $\delta_m$  yang sama dalam kondisi di ambang keruntuhan (*constant maximum displacement rule*), sudah biasa dianut dalam standar-standar perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung, agar terdapat hubungan yang sederhana antara  $V_y$  dan  $V_e$  melalui  $\mu$ . Asumsi ini adalah konservatif, karena dalam keadaan sesungguhnya struktur bangunan gedung yang daktail memiliki  $\delta_m$  yang relatif lebih besar daripada struktur bangunan gedung yang elastik, sehingga memiliki  $\mu$  yang relatif lebih besar daripada yang diasumsikan. Asumsi yang dianut divisualisasikan dalam diagram beban-simpangan (diagram  $V-\delta$ ) yang ditunjukkan dalam Gambar L.1.
- A.4.4.3 Dalam pasal ini ditetapkan pembebanan Gempa Nominal,  $V_n$ , yang harus ditinjau dalam perencanaan struktur bangunan gedung. Nilai  $V_n$  lebih rendah dari nilai  $V_y$ , sedemikian rupa sehingga rasio  $V_y/V_n$  merepresentasikan faktor tahanan lebih beban dan bahan  $f_1$  yang terkandung di dalam struktur bangunan gedung. Untuk struktur bangunan gedung secara umum, menurut berbagai penelitian nilai  $f_1$  yang representatif ternyata adalah sekitar  $f_1 \approx 1,6$ . Adapun faktor reduksi gempa  $R$  nilainya tentu berubah-ubah mengikuti perubahan nilai  $\mu$  seperti pada Tabel 2. Secara visual hubungan antara  $V_e$ ,  $V_m$ ,  $V_y$ ,  $V_n$ ,  $\mu$  dan  $R$  ditunjukkan dalam Gambar L.1.

Pers. (3) adalah persamaan dasar untuk menentukan pembebanan Gempa

Nominal pada struktur bangunan gedung. Bila  $V_y$  diketahui, misalnya dihitung dari kapasitas penampang unsur-unsur terpasang atau dari hasil analisis beban dorong statik dari struktur secara keseluruhan, maka  $V_n = V_y/f_1$ . Bila  $V_e$  diketahui, misalnya dari perhitungan analitik melalui analisis respons dinamik spektrum respons, maka  $V_n = V_e/R$ . Untuk yang terakhir ini tentu  $\mu$  harus diketahui terlebih dahulu (lihat A.4.4.6).



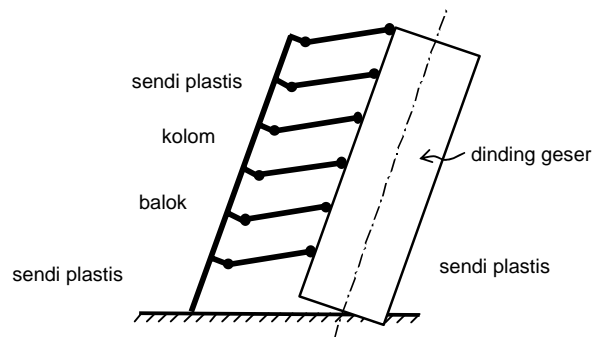
**Gambar L.1** Diagram beban-simpangan (diagram  $V-\delta$ ) struktur bangunan gedung.

- A.4.4.4 Dalam pasal ini ditetapkan Tabel 2 yang memuat nilai-nilai faktor daktilitas maksimum  $\mu_m$  yang dapat dikerahkan oleh sejumlah jenis sistem atau subsistem struktur bangunan gedung dari hasil berbagai penelitian, berikut nilai  $R_m$  yang bersangkutan. Untuk setiap sistem atau subsistem yang tercantum dalam Tabel 2 tentu dapat dipilih nilai  $\mu$  yang lebih rendah dari nilai  $\mu_m$ -nya. Semakin rendah nilai  $\mu$  yang dipilih semakin tinggi beban gempa yang akan diserap oleh struktur bangunan gedung tersebut, tetapi semakin sederhana (ringan) pendetailan yang diperlukan dalam hubungan-hubungan antar-unsur dari struktur tersebut.
- A.4.4.5 Pasal ini memberi kesempatan kepada perencana untuk merakit jenis sistem struktur secara keseluruhan dari jenis-jenis subsistem tertentu yang diketahui nilai  $R$ -nya. Nilai  $R$  struktur secara keseluruhan yang representatif kemudian dihitung dari Pers. (6), yang menunjukkan nilai rerata berbobot dengan gaya geser dasar yang dipikul oleh masing-masing jenis subsistem sebagai besaran pembobotnya. Untuk itu diperlukan suatu analisis pendahuluan dari struktur bangunan gedung itu berdasarkan beban gempa sembarang ( $R$  sembarang) untuk mendapatkan rasio dari gaya geser dasar yang dipikul oleh masing-masing subsistem.
- A.4.4.6 Untuk jenis-jenis sistem struktur yang tidak umum, pada umumnya belum diketahui nilai  $\mu$ -nya, sehingga harus ditentukan terlebih dahulu dengan cara-cara rasional, misalnya melalui analisis beban dorong statik. Dari analisis ini

dapat diketahui  $\delta_y$  dan  $\delta_m$ , sehingga  $\mu$  dapat dihitung. Di samping itu dari analisis tersebut  $V_y$  juga diketahui, sehingga  $V_n$  dapat dihitung dengan membaginya dengan  $f_1$ .

#### A.4.5 Perencanaan kolom-kuat-balok-lemah

Faktor daktilitas suatu struktur bangunan gedung merupakan dasar bagi penentuan beban gempa yang bekerja pada struktur bangunan gedung. Karena itu, tercapainya tingkat daktilitas yang diharapkan harus terjamin dengan baik. Hal ini dapat tercapai dengan menetapkan suatu persyaratan yang disebut “kolom kuat balok lemah” seperti ditetapkan dalam pasal ini. Hal ini berarti, bahwa akibat pengaruh Gempa Rencana, sendi-sendi plastis di dalam struktur bangunan gedung berdaktilitas penuh hanya boleh terjadi demikian sehingga dapat dihindari mekanisme keruntuhan tingkat. (Lihat juga Gambar L.2).



**Gambar L.2** Mekanisme keruntuhan ideal suatu struktur gedung dengan sendi plastis terbentuk pada ujung-ujung balok, kaki kolom dan kaki dinding geser.

#### A.4.6 Jenis tanah dan perambatan gelombang gempa

**A.4.6.1** Gelombang gempa merambat melalui batuan dasar di bawah muka tanah. Dari kedalaman batuan dasar ini gelombang gempa tersebut kemudian merambat ke muka tanah sambil mengalami pembesaran, bergantung pada jenis lapisan tanah yang berada di atas batuan dasar tersebut. Pembesaran gerakan tanah inilah yang harus ditentukan dengan melakukan analisis perambatan gelombang gempa yang disebut dalam pasal ini. Selanjutnya pasal ini menegaskan, bahwa setiap akselerogram mengandung ketidakpastian untuk dipakai di suatu lokasi. Karena itu harus ditinjau sedikitnya 4 buah akselerogram gempa yang berbeda. Gempa El Centro dianggap sebagai standar, karena akselerogramnya mengandung frekuensi yang lebar, tercatat pada jarak sedang dari pusat gempa dengan magnitudo yang sedang pula (bukan ekstrim). Catatan gempa lainnya harus dipilih sehingga karakteristiknya saling berbeda satu terhadap lainnya. Salah satu metode dalam memilih catatan gempa tersebut adalah dengan cara menghitung nilai korelasi silang antara satu catatan terhadap lainnya dan nilai-nilai tersebut harus nihil.

**A.4.6.2** Pasal ini memberikan definisi mengenai batuan dasar berdasarkan dua kriteria, yaitu nilai hasil Test Penetrasi Standar  $N$  dan kecepatan rambat gelombang geser  $v_s$ . Dalam praktek definisi yang pertama yang umumnya dipakai,



mengingat data nilai  $N$  merupakan data standar yang selalu ditemukan dalam laporan hasil penyelidikan geoteknik suatu lokasi, sedangkan untuk mendapatkan nilai  $v_s$  diperlukan percobaan-percobaan khusus di lapangan. Apabila tersedia kedua kriteria tersebut, maka kriteria yang menentukan adalah yang menghasilkan jenis batuan yang lebih lunak.

A.4.6.3 Di dalam pasal ini diberikan definisi mengenai jenis Tanah Keras, Tanah Sedang dan Tanah Lunak berdasarkan tiga kriteria, yaitu kecepatan rambat gelombang geser  $v_s$ , nilai hasil Test Penetrasi Standar  $N$  dan kuat geser niralir  $S_u$ . Untuk menetapkan jenis tanah yang dihadapi, paling tidak harus tersedia 2 dari 3 kriteria tersebut, di mana kriteria yang menghasilkan jenis tanah yang lebih lunak adalah yang menentukan. Apabila tersedia ke 3 kriteria tersebut, maka jenis suatu tanah yang dihadapi harus didukung paling tidak oleh 2 kriteria tadi. Dari berbagai penelitian ternyata, bahwa hanya lapisan setebal 30 meter paling atas yang menentukan pembesaran gerakan tanah di muka tanah. Karena itu, nilai rerata berbobot dari ke 3 kriteria tersebut harus dihitung sampai kedalaman tidak lebih dari 30 meter. Penetapan batas kedalaman ini juga penting untuk menstandarkan perhitungan nilai rerata menurut Pers. (7), (8) dan (9), mengingat semakin besar kedalaman tersebut pada umumnya semakin tinggi nilai rerata yang didapat.

A.4.6.4 Pasal ini memberi petunjuk jenis-jenis tanah apa saja yang tergolong ke dalam jenis Tanah Khusus. Karena sifat-sifat dari jenis-jenis tanah ini tidak dapat dirumuskan secara umum, maka segala sifatnya harus dievaluasi secara khusus di setiap lokasi tempat jenis-jenis tanah tersebut ditemukan. Pasal ini menegaskan, bahwa pada jenis Tanah Khusus gerakan gempa di muka tanah harus ditentukan dari hasil analisis perambatan gelombang gempa.

A.4.7 Wilayah gempa dan spektrum respons

A.4.7.1 Peta Wilayah Gempa Indonesia yang dimuat dalam pasal ini adalah hasil analisis probabilistik bahaya gempa (*probabilistic seismic hazard analysis*) yang telah dilakukan untuk seluruh wilayah Indonesia berdasarkan data seismotektonik mutakhir yang tersedia saat ini. Data masukan untuk analisis ini adalah lokasi sumber gempanya, distribusi magnitudo gempa di daerah sumber gempa, fungsi atenuasi yang memberi hubungan antara gerakan tanah setempat, magnitudo gempa di sumber gempa dan jarak dari tempat yang ditinjau sampai sumber gempa, magnitudo minimum dan maksimum serta frekuensi kejadian gempa per tahun di daerah sumber gempa, dan model matematik kejadian gempa. Sebagai daerah sumber gempanya, telah ditinjau semua sumber gempa yang telah tercatat dalam sejarah kegempaan Indonesia, baik sumber gempa pada zona subduksi, sumber gempa dangkal pada lempeng bumi, maupun sumber gempa pada sesar-sesar aktif yang sudah teridentifikasi. Mengenai distribusi magnitudo gempa di daerah gempa, hal ini telah dihitung berdasarkan data kegempaan yang tersedia. Distribusi ini lebih dikenal sebagai diagram frekuensi magnitudo Gutenberg-Richter. Sebagai fungsi atenuasi telah ditinjau beberapa macam fungsi, yaitu yang diusulkan oleh Fukushima & Tanaka (1990), Youngs (1997), Joyner & Boore (1997) dan Crouse (1991), dengan gerakan tanah setempat yang ditinjau berupa percepatan puncak batuan dasar. Kejadian gempanya secara matematik dimodelkan mengikuti fungsi Poisson. Dalam analisis probabilistik bahaya gempa ini, percepatan puncak batuan dasar diperoleh melalui proses perhitungan berturut-turut sebagai berikut: (1) probabilitas total dengan meninjau semua kemungkinan magnitudo

dan jarak, (2) probabilitas total dalam satu tahun, (3) probabilitas satu kejadian dalam satu tahun (fungsi Poisson) dan (4) perioda ulang (yang merupakan kebalikan dari probabilitas dalam satu tahun). Hasil analisis probabilistik bahaya gempa ini, telah diplot pada peta Indonesia berupa garis-garis kontur percepatan puncak batuan dasar dengan perioda ulang 500 tahun (perioda ulang Gempa Rencana), yang kemudian menjadi dasar bagi penentuan batas-batas wilayah gempa. Studi ini telah dilakukan oleh beberapa kelompok peneliti secara independen, yang masing-masing hasilnya ternyata agak berbeda yang satu dari yang lainnya. Peta wilayah gempa yang ditetapkan dalam pasal ini adalah perataan dari hasil studi semua kelompok peneliti tadi dengan koefisien variasi  $\leq 0,45$ .

- A.4.7.2 Percepatan puncak batuan dasar rerata untuk Wilayah Gempa 1 s/d 6, telah ditetapkan berturut-turut sebesar 0,03 g, 0,10 g, 0,15 g, 0,20 g, 0,25 g dan 0,30 g. Dengan percepatan batuan dasar seperti itu, maka ditetapkanlah percepatan puncak muka tanah ( $A_o$ ) untuk Tanah Keras, Tanah Sedang dan Tanah Lunak menurut Tabel 4, satu dan lain sebagai hasil studi banding dengan standar di luar negeri, a.l. National Earthquake Hazards Reduction Program 1997 (NEHRP 1997) dan Uniform Building Code 1997 (UBC 1997). Apabila kita tinjau NEHRP 1997 misalnya, batuan dasar adalah kira-kira ekuivalen dengan  $S_B$ , sedangkan Tanah Keras, Tanah Sedang dan Tanah Lunak adalah kira-kira ekuivalen dengan berturut-turut  $S_C$ ,  $S_D$  dan  $S_E$ .
- A.4.7.3 Pasal ini dimaksudkan untuk memberi struktur bangunan gedung di Wilayah Gempa 1 suatu kekekaran minimum. Jadi, beban gempa yang disyaratkan tersebut merupakan pengaruh dari gempa yang bukan Gempa Rencana. Di dalam peraturan bangunan negara tetangga kita Singapura yang berbatasan dengan Wilayah Gempa 1, terdapat suatu ketentuan yang berkaitan dengan kekekaran struktur bangunan gedung, yaitu bahwa setiap struktur bangunan gedung harus diperhitungkan terhadap beban-beban horisontal nominal pada taraf masing-masing lantai tingkat sebesar 1,5% dari beban mati nominal lantai tingkat tersebut. Menurut Pasal 4.7.3 ini, suatu struktur bangunan gedung rendah ( $T$  pendek) di Wilayah Gempa 1 di atas Tanah Sedang dengan faktor reduksi gempa misalnya sekitar  $R = 7$  (daktail parsial), harus diperhitungkan terhadap faktor respons gempa sebesar  $0,13 I/R = 0,13 \times 0,8/7 = 0,015$ , jadi selaras dengan yang ditetapkan di Singapura. Dengan demikian, pasal ini boleh dikatakan memelihara kontinuitas kegempaan regional lintas batas negara, jadi tidak lagi seperti menurut standar yang lama, di mana Wilayah Gempa 1 adalah bebas gempa sama sekali.
- A.4.7.4 Secara umum spektrum respons adalah suatu diagram yang memberi hubungan antara percepatan respons maksimum suatu sistem Satu Derajat Kebebasan (SDK) akibat suatu gempa masukan tertentu, sebagai fungsi dari faktor redaman dan waktu getar alami sistem SDK tersebut. Spektrum Respons  $C-T$  yang ditetapkan dalam pasal ini untuk masing-masing Wilayah Gempa, adalah suatu diagram yang memberi hubungan antara percepatan respons maksimum (= Faktor Respons Gempa)  $C$  dan waktu getar alami  $T$  sistem SDK akibat Gempa Rencana, di mana sistem SDK tersebut dianggap memiliki fraksi redaman kritis 5%. Kondisi  $T = 0$  mengandung arti, bahwa sistem SDK tersebut adalah sangat kaku dan karenanya mengikuti sepenuhnya gerakan tanah. Dengan demikian, untuk  $T = 0$  respons percepatan maksimum menjadi identik dengan percepatan puncak muka tanah ( $C=A_o$ ). Bentuk spektrum

respons yang sesungguhnya menunjukkan suatu fungsi acak yang untuk  $T$  meningkat menunjukkan nilai yang mula-mula meningkat dulu sampai mencapai suatu nilai maksimum, kemudian turun lagi secara asimtotik mendekati sumbu- $T$ . Di dalam pasal ini bentuk tersebut distandarkan (diidealisasikan) sebagai berikut: untuk  $0 \leq T \leq 0,2$  detik,  $C$  meningkat secara linier dari  $A_o$  sampai  $A_m$ ; untuk  $0,2$  detik  $\leq T \leq T_c$ ,  $C$  bernilai tetap  $C = A_m$ ; untuk  $T > T_c$ ,  $C$  mengikuti fungsi hiperbola  $C = A_m/T$ . Dalam hal ini  $T_c$  disebut waktu getar alami sudut. Idealisasi fungsi hiperbola ini mengandung arti, bahwa untuk  $T > T_c$  kecepatan respons maksimum yang bersangkutan bernilai tetap.

- A.4.7.5 Dari berbagai hasil penelitian ternyata, bahwa untuk  $0 \leq T \leq 0,2$  detik terdapat berbagai ketidakpastian, baik dalam karakteristik gerakan tanahnya sendiri maupun dalam sifat-sifat daktilitas sistem SDK yang bersangkutan. Karena itu untuk  $0 \leq T \leq 0,2$  detik  $C$  ditetapkan harus diambil sama dengan  $A_m$ . Dengan demikian, untuk  $T \leq T_c$  spektrum respons berkaitan dengan respons percepatan maksimum yang bernilai tetap, sedangkan untuk  $T > T_c$  berkaitan dengan respons kecepatan maksimum yang bernilai tetap.
- A.4.7.6 Berbagai hasil penelitian menunjukkan, bahwa  $A_m$  berkisar antara  $2 A_o$  dan  $3 A_o$ , sehingga  $A_m = 2,5 A_o$  merupakan nilai rerata yang dianggap layak untuk perencanaan. Selanjutnya, dari berbagai hasil penelitian juga ternyata, bahwa sebagai pendekatan yang baik waktu getar alami sudut  $T_c$  untuk jenis-jenis Tanah Keras, Tanah Sedang dan Tanah Lunak dapat diambil sebesar berturut-turut 0,5 detik, 0,6 detik dan  $0,4 < T_c < 1,0$  detik.
- A.4.8 Pengaruh gempa vertical
- A.4.8.1 Pengalaman dari Gempa Northridge (1994) dan Gempa Kobe (1995) telah menunjukkan, bahwa banyak unsur-unsur bangunan yang memiliki kepekaan yang tinggi terhadap beban gravitasi, mengalami kerusakan berat akibat percepatan vertikal gerakan tanah. Pasal ini menyebutkan unsur-unsur apa saja yang harus ditinjau terhadap pengaruh percepatan vertikal gerakan tanah tersebut. Analisis respons dinamik yang sesungguhnya dari unsur-unsur tersebut terhadap gerakan vertikal tanah akibat gempa sangat rumit, karena terjadi interaksi antara respons unsur dan respons struktur secara keseluruhan. Karena itu, di dalam pasal ini masalahnya disederhanakan dengan meninjau pengaruh percepatan vertikal gerakan tanah akibat gempa sebagai beban gempa vertikal nominal statik ekuivalen.
- A.4.8.2 Dapat dimengerti, bahwa komponen vertikal gerakan tanah akibat gempa akan relatif semakin besar, semakin dekat letak pusat gempa dari lokasi yang ditinjau. Dalam pasal ini percepatan puncak vertikal gerakan tanah ditetapkan sebagai perkalian suatu koefisien  $\psi$  dengan percepatan puncak muka tanah  $A_o$ . Karena semakin tinggi kegempaan suatu wilayah gempa, semakin dekat wilayah itu letaknya terhadap daerah sumber gempa, maka koefisien  $\psi$  nilainya meningkat dari 0,5 sampai 0,8 untuk Wilayah Gempa yang meningkat dari 1 sampai 6, sesuai Tabel 6. Pers. (14) menunjukkan, bahwa dalam arah vertikal struktur dianggap sepenuhnya mengikuti gerakan vertikal dari tanah, tak bergantung pada waktu getar alami dan tingkat daktilitasnya. Dalam persamaan ini faktor reduksi gempa dianggap sudah diperhitungkan. Selanjutnya faktor  $I$  adalah untuk memperhitungkan kategori gedung yang dihadapi.

## **A.5 Perencanaan umum struktur bangunan gedung**

### **A.5.1 Struktur atas dan struktur bawah**

**A.5.1.1** Pada perencanaan struktur bangunan gedung dengan besmen dalam yang terdiri dari banyak lapis, dihadapi masalah interaksi tanah-struktur yang rumit. Masalahnya akan lebih rumit lagi, apabila beberapa gedung tinggi memiliki satu besmen bersama. Karena itu, pasal ini menyederhanakan masalahnya dengan memisahkan peninjauan struktur atas dari struktur bawah.

**A.5.1.2** Dengan memisahkan peninjauan struktur atas dari struktur bawah, maka struktur atas dapat dianggap terjepit pada taraf lantai dasar, sedangkan struktur bawah dapat ditinjau sebagai struktur 3D tersendiri di dalam tanah yang mengalami pembebanan dari struktur atas, dari gaya inersianya sendiri dan dari tanah sekelilingnya.

**A.5.1.3** Pasal ini menetapkan taraf penjepitan lateral struktur atas, apabila tidak ada besmen.

**A.5.1.4** Walaupun interaksi tanah-struktur tidak ditinjau, tetapi kadang-kadang penjepitan yang tidak sempurna pada kaki kolom dan kaki dinding geser diperhitungkan. Jepitan tidak sempurna ini berupa deformasi lateral dan rotasional pada taraf penjepitan, yang kedua-duanya tentu harus diperhitungkan pengaruhnya terhadap struktur atas.

**A.5.1.5** Dalam setiap peristiwa gempa, struktur atas gedung tidak mungkin dapat menunjukkan perilaku yang baik apabila struktur bawahnya sudah gagal secara dini. Untuk mencegah terjadinya gejala seperti itu, struktur bawah harus direncanakan untuk setiap saat tetap tahan dalam memikul struktur atas hingga menjelang keruntuhannya. Karena itu, beban nominal pada struktur bawah sebagai pengaruh Gempa Rencana, harus ditentukan atas dasar faktor tahanan lebih struktur total,  $f$ .

### **A.5.2 Struktur pemikul beban gempa**

**A.5.2.1** Dalam pasal ini ditegaskan, bahwa semua unsur struktur, baik bagian dari subsistem maupun bagian dari sistem struktur secara keseluruhan, harus diperhitungkan memikul pengaruh Gempa Rencana. Pada dasarnya tidak boleh ada unsur-unsur struktur yang diabaikan partisipasinya dalam memikul pengaruh gempa, kecuali bila memenuhi Pasal 5.2.2.

**A.5.2.2** Setelah dibuktikan, bahwa partisipasi pemikulan beban gempa suatu unsur atau sistem struktur adalah kurang dari 10%, maka partisipasi tadi boleh diabaikan. Tetapi, unsur atau sistem struktur tersebut harus diperhitungkan terhadap simpangan struktur bangunan gedung pada saat menjelang keruntuhannya.

**A.5.2.3** Pasal ini mengulangi ketentuan yang dimuat dalam Tabel 2 untuk sistem ganda. Maksudnya adalah, agar portal-portal terbuka yang memiliki kekakuan lateral yang relatif kecil, tetap memiliki suatu tahanan terpasang minimum tertentu, untuk lebih memastikan ketahannya terhadap pengaruh gempa.

### **A.5.3 Lantai tingkat sebagai diafragma**

**A.5.3.1** Dengan anggapan lantai tingkat (juga atap beton dan lantai dengan ikatan) bekerja sebagai diafragma, artinya memiliki kekakuan yang cukup besar dalam bidangnya, maka terhadap beban gempa setiap lantai tingkat itu memiliki tiga derajat kebebasan, yaitu translasi dalam arah masing-masing sumbu koordinat dan rotasi melalui pusat rotasi lantai tingkat itu. Ke tiga derajat kebebasan ini menentukan pembagian beban gempa horisontal kepada seluruh sistem struktur

- tingkat, sebagaimana halnya pada struktur 3D secara umum.
- A.5.3.2 Lubang atau bukaan besar pada lantai terjadi pada lubang tangga yang lebar atau pada gedung yang memiliki suatu atrium. Apabila luas lubang melebihi 50% dari luas lantai, maka lantai tersebut tidak lagi dapat dianggap bekerja sebagai diafragma terhadap beban gempa. Dalam hal ini, pengaruh fleksibilitas lantai tingkat di dalam bidangnya harus diperhitungkan terhadap pembagian beban gempa horisontal kepada seluruh sistem struktur tingkat.
- A.5.4 Eksentrisitas pusat massa terhadap pusat rotasi lantai tingkat
- A.5.4.1 Pusat massa lantai tingkat sebagai titik tangkap beban gempa statik ekuivalen atau gaya gempa dinamik menurut pasal ini jelas menunjukkan, bahwa massa tersebut adalah dari lantai tingkat itu saja, bukan berikut jumlah kumulatif massa lantai-lantai tingkat di atasnya.
- A.5.4.2 Pusat rotasi lantai tingkat menurut pasal ini adalah unik untuk setiap struktur bangunan gedung dan tidak bergantung pada pembagian beban gempa sepanjang tinggi struktur bangunan gedung. Akibat beban gempa yang menangkap pada pusat massa yang letaknya eksentris terhadap pusat rotasi lantai tingkat, lantai tingkat tersebut menunjukkan tiga macam simpangan, yaitu translasi dalam arah masing-masing sumbu koordinat dan rotasi melalui pusat rotasi lantai tingkat itu, sesuai dengan derajat kebebasan yang dimilikinya (lihat A.5.3.1). Karena itu, pengaruh Gempa Rencana pada struktur bangunan gedung harus dianalisis secara 3D, baik dalam analisis statik maupun analisis dinamik.
- A.5.4.3 Pasal ini menetapkan suatu eksentrisitas rencana antara pusat massa dan pusat rotasi pada tiap-tiap lantai tingkat, mengingat dalam kenyataannya eksentrisitas tersebut dapat menyimpang jauh dari yang dihitung secara teoretis. Ada dua sumber penyebab dari penyimpangan ini. Sumber penyebab pertama adalah adanya pembesaran dinamik akibat perilaku struktur yang non-linier pada tahap pembebanan gempa pasca elastik. Sumber penyebab kedua adalah adanya komponen rotasi dari gerakan tanah melalui suatu sumbu vertikal, perbedaan dalam nilai kekakuan struktur, nilai kuat leleh baja, nilai beban mati serta nilai dan distribusi beban hidup, antara yang dihitung secara teoretis dan kenyataan sesungguhnya. Sehubungan dengan adanya dua sumber penyebab penyimpangan di atas, maka eksentrisitas rencana  $e_d$  terdiri dari dua suku. Suku pertama yang merupakan fungsi dari eksentrisitas teoretis  $e$  adalah untuk mengatasi pengaruh sumber penyebab pertama. Suku kedua yang merupakan fungsi dari ukuran horisontal terbesar denah struktur bangunan gedung tegak lurus pada arah beban gempa  $b$  adalah untuk mengatasi sumber pengaruh penyebab kedua. Pengaruh sumber penyebab pertama adalah lebih dominan pada eksentrisitas yang kecil ( $0 < e \leq 0,3 b$ ), sedangkan sumber penyebab kedua adalah yang lebih dominan pada eksentrisitas yang besar ( $e > 0,3 b$ ). Pada keadaan perbatasan  $e = 0,3 b$  tentu didapat eksentrisitas rencana  $e_d$  yang sama.
- A.5.4.4 Pasal ini menegaskan, bahwa eksentrisitas rencana antara pusat massa dan pusat rotasi harus ditinjau baik dalam analisis statik, maupun analisis dinamik. Dianggap tidak beralasan, untuk membedakan eksentrisitas tersebut dalam ke dua macam analisis tersebut.

#### A.5.5 Kekakuan struktur

A.5.5.1 Dalam pasal ini dibakukan cara penentuan momen inersia efektif penampang unsur struktur, di mana persentase efektifitas penampang yang ditetapkan itu didasarkan atas hasil berbagai penelitian. Dengan demikian, kekakuan struktur secara keseluruhan dihitung melalui kaidah yang seragam, sehingga perilaku struktur (simpangan, waktu getar alami) dapat dikaji melalui kriteria yang seragam pula.

A.5.5.2 Pasal ini memberi ketentuan mengenai modulus elastisitas beton  $E_c$  dan modulus elastisitas baja  $E_s$ .

A.5.5.3 Pasal ini menegaskan, bahwa momen inersia efektif yang ditetapkan dalam Pasal 5.5.1 berlaku baik dalam analisis statik, maupun analisis dinamik untuk menghitung simpangan dan waktu getar alami struktur bangunan gedung. Dianggap tidak beralasan untuk membedakan perhitungan kekakuan struktur dalam ke dua macam analisis tersebut.

#### A.5.6 Pembatasan waktu getar alami fundamental

Pemakaian struktur bangunan gedung yang terlalu fleksibel seyogyanya dicegah. Dalam pasal ini hal itu dilakukan dengan membatasi nilai waktu getar fundamentalnya. Ada 4 alasan untuk membatasi waktu getar fundamental suatu struktur bangunan gedung, yaitu:

- untuk mencegah pengaruh P-Delta yang berlebihan;
- untuk mencegah simpangan antar-tingkat yang berlebihan pada taraf pembebanan Gempa Nominal, yaitu untuk membatasi kemungkinan terjadinya kerusakan struktur akibat pelelehan baja dan peretakan beton yang berlebihan, maupun kerusakan non-struktur.
- untuk mencegah simpangan antar-tingkat yang berlebihan pada taraf pembebanan Gempa Kuat, yaitu untuk membatasi kemungkinan terjadinya keruntuhan struktur yang menelan korban jiwa manusia.
- untuk mencegah tahanan (kapasitas) struktur terpasang yang terlalu rendah, mengingat struktur bangunan gedung dengan waktu getar fundamental yang panjang menyerap beban gempa yang rendah (terlihat dari spektrum respons  $C-T$ ), sehingga gaya internal yang terjadi di dalam unsur-unsur struktur menghasilkan tahanan terpasang yang rendah.

Dalam pasal ini, nilai batas waktu getar fundamental suatu struktur bangunan gedung ditetapkan sebagai perkalian suatu koefisien  $\xi$  dan tinggi tingkat yang dimiliki gedung tersebut. Dalam Tabel 7 koefisien  $\xi$  ditetapkan sebagai fungsi dari kegempaan wilayah gempa tempat struktur bangunan gedung berada dan jenis struktur yang ditinjau. Hal ini adalah mengingat semakin rendah kegempaan tersebut, semakin tidak menentukan beban gempa terhadap beban gravitasi, sehingga pembatasan waktu getar fundamental semakin kurang maknanya. Memberi penalti pada struktur bangunan gedung yang sangat fleksibel dengan mensyaratkan suatu nilai  $C$  minimum pada spektrum respons  $C-T$ , memang dapat menambah keamanan, tetapi tidak dapat merubah perilakunya.

#### A.5.7 Pengaruh P-Delta

Struktur bangunan gedung tinggi pada umumnya adalah relatif fleksibel, sehingga akibat beban gempa mengalami simpangan yang relatif besar yang

dapat menimbulkan pengaruh P-Delta yang cukup berarti. Menurut pasal ini pengaruh P-Delta harus ditinjau bila tinggi gedung adalah lebih dari 10 tingkat atau 40 m.

A.5.8 Arah pembebanan gempa

A.5.8.1 Pada struktur bangunan gedung beraturan, di mana sistem strukturnya terbentuk oleh subsistem-subsistem pemikul beban lateral yang saling tegak lurus dan sejajar dengan sumbu-sumbu utama ortogonal denah struktur bangunan gedung, arah utama pembebanan gempa yang menentukan adalah yang searah dengan sumbu-sumbu utama tersebut. Tetapi pada struktur bangunan gedung tidak beraturan, seringkali arah utama pembebanan gempa yang menentukan tidak dapat dipastikan sebelumnya. Untuk itu arah utama pembebanan gempa harus dicari dengan cara coba-coba dengan meninjau beberapa kemungkinan.

A.5.8.2 Arah pembebanan gempa pada setiap struktur bangunan gedung dalam kenyataannya adalah sembarang, sehingga pada umumnya selalu terdapat dua komponen beban gempa dalam arah masing-masing sumbu koordinat ortogonal yang bekerja bersamaan. Pembebanan gempa tidak penuh tetapi biaksial dapat menimbulkan pengaruh yang lebih rumit terhadap struktur bangunan gedung ketimbang pembebanan gempa penuh tetapi uniaksial. Kondisi ini diantisipasi dalam pasal ini dengan menetapkan, bahwa pembebanan gempa dalam arah utama yang ditinjau 100%, harus dianggap bekerja bersamaan dengan pembebanan gempa dalam arah tegak lurusnya tetapi ditinjau 30%.

## **A.6 Perencanaan struktur bangunan gedung beraturan**

A.6.1 Beban Gempa Nominal statik ekuivalen

A.6.1.1 Dalam analisis respons dinamik terhadap pengaruh gempa, suatu struktur bangunan gedung dimodelkan sebagai suatu sistem Banyak Derajat Kebebasan (BDK). Dengan menerapkan metoda analisis ragam, persamaan-persamaan gerak sistem BDK tersebut yang berupa persamaan-persamaan diferensial orde dua simultan yang saling terikat, dapat dilepaskan saling keterikatannya sehingga menjadi persamaan-persamaan terlepas, masing-masing berbentuk persamaan-persamaan gerak sistem SDK. Hal ini dilakukan melalui suatu transformasi koordinat dengan matriks eigenvektor sebagai matriks transformasinya. Respons dinamik total dari sistem BDK tersebut selanjutnya menampilkan diri sebagai superposisi dari respons dinamik masing-masing ragamnya. Respons dinamik masing-masing ragamnya ini berbentuk respons dinamik suatu sistem SDK, di mana ragam yang semakin tinggi memberikan sumbangan respons dinamik yang semakin kecil dalam menghasilkan respons dinamik total. Pada struktur bangunan gedung beraturan, yang seperti telah dijelaskan dalam A.4.3.1 berperilaku sebagai struktur 2D, respons dinamik ragam fundamentalnya adalah sangat dominan, sehingga respons dinamik ragam-ragam lainnya dianggap dapat diabaikan. Kemudian, berhubung struktur bangunan gedung tidak seberapa tinggi (kurang dari 10 tingkat atau 40 m), bentuk ragam fundamental dapat dianggap mengikuti garis lurus (tidak lagi garis lengkung). Dengan dua anggapan penyederhanaan tadi, dari penjabaran lebih lanjut dalam analisis ragam, respons dinamik struktur bangunan gedung beraturan dapat ditampilkan seolah-olah sebagai akibat dari suatu beban gempa

- statik ekuivalen, seperti yang ditetapkan dalam pasal ini.
- A.6.1.2 Pasal ini menetapkan bagaimana menentukan beban geser dasar statik ekuivalen  $V$ , berkaitan dengan beban gempa statik ekuivalen yang disebut dalam A.6.1.1. Seperti terlihat dari penjabarannya, beban geser dasar statik ekuivalen ini dapat dinyatakan dalam respons dinamik sistem SDK yang berkaitan dengan ragam fundamentalnya saja, sehingga dapat ditentukan dengan perantaraan spektrum respons Gempa Rencana  $C-T$  yang ditetapkan dalam Pasal 4.7.4 (Gambar 2), seperti dinyatakan oleh Pers. (20). Di dalam persamaan ini faktor  $I$  adalah untuk memperhitungkan kategori gedung yang dihadapi, sedangkan  $R$  adalah untuk menjadikan beban gempa tersebut menjadi beban Gempa Nominal sesuai dengan faktor daktilitas yang dipilih untuk struktur bangunan gedung tersebut.
- A.6.1.3 Pers. (21) merupakan bagian dari hasil penjabaran beban gempa statik ekuivalen yang disebut dalam A.6.1.1, sekaligus memberi ketentuan bagaimana membagikan beban geser dasar nominal  $V$  sepanjang tinggi struktur bangunan gedung menjadi beban-beban Gempa Nominal statik ekuivalen  $F_i$ .
- A.6.1.4 Pasal ini menyangkut struktur bangunan gedung yang relatif sangat fleksibel dalam arah beban gempa (gedung “tipis”), yang seringkali menunjukkan adanya efek cambuk. Beban terpusat  $0,1V$  yang dipasang pada taraf lantai puncak mensimulasikan efek cambuk ini.
- A.6.1.5 Dengan ketentuan dalam pasal ini, perhitungan tangki di atas menara adalah konservatif. Untuk perhitungan yang lebih akurat, penyebaran massa strukturnya tentu dapat diperhitungkan.
- A.6.2 Waktu getar alami fundamental
- A.6.2.1 Berhubung struktur bangunan gedung beraturan dalam arah masing-masing sumbu utama denah struktur praktis berperilaku sebagai struktur 2D, maka waktu getar alami fundamentalnya dalam arah masing-masing sumbu utama tersebut dapat dihitung dengan rumus Rayleigh sesuai Pers. (22) yang berlaku untuk struktur 2D. Rumus ini diturunkan dari hukum kekekalan energi pada suatu struktur 2D yang dalam keadaan melendut sewaktu bervibrasi, disamakan energi potensialnya dengan energi kinetiknya.
- A.6.2.2 Untuk menentukan beban Gempa Nominal statik ekuivalen, waktu getar alami fundamental yang dihitung dengan rumus Rayleigh ditetapkan sebagai standar. Waktu getar alami boleh saja ditentukan dengan cara lain, asal hasilnya tidak menyimpang (ke atas atau ke bawah) lebih dari 20% dari nilai yang dihitung dengan rumus Rayleigh.
- A.6.3 Analisis statik ekuivalen
- Pasal ini hanya menegaskan, bahwa berhubung pembebanan gempa pada struktur bangunan gedung beraturan berwujud sebagai beban gempa statik ekuivalen, analisis struktur bangunan gedung terhadapnya dengan sendirinya dilakukan dengan analisis statik 3D biasa. Pada struktur bangunan gedung tidak beraturan, dari hasil analisis respons dinamik dapat juga dijabarkan beban gempa statik ekuivalennya, sehingga analisis selanjutnya dapat dilakukan dengan analisis statik 3D biasa (lihat A.7.2.4).
- A.7 Perencanaan struktur bangunan gedung tidak beraturan**
- A.7.1 Ketentuan untuk analisis respons dinamik
- A.7.1.1 Dalam praktek tidak jarang dihadapi struktur-struktur bangunan gedung yang

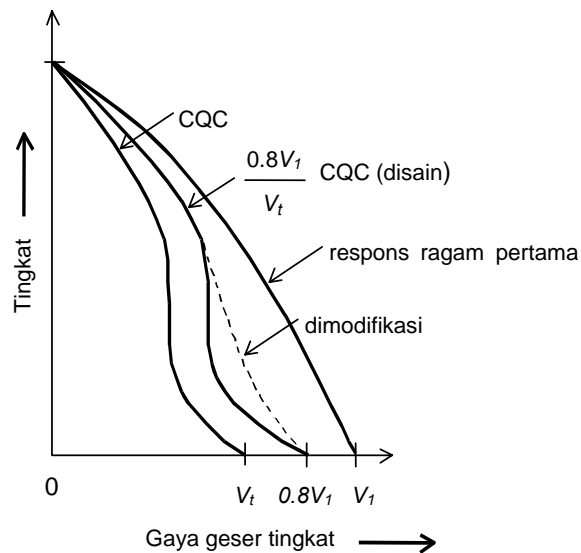


sangat tidak beraturan. Dari segi analisis hal ini tidak menjadi masalah, dengan tersedianya berbagai program komputer canggih saat ini. Kemampuan tinggi menganalisis struktur rumit, seyogyanya dipakai juga untuk mengontrol perilaku struktur tersebut dalam responsnya terhadap gempa. Dengan melakukan analisis vibrasi bebas 3D dapat dilihat, bagaimana kecenderungan perilaku struktur terhadap gempa. Apabila gerak ragam pertama sudah dominan dalam rotasi, hal ini menunjukkan perilaku yang buruk dan sangat tidak nyaman bagi penghuni ketika terjadi gempa. Sistem struktur demikian harus diperbaiki dan disusun kembali dengan menempatkan unsur-unsur yang lebih kaku pada keliling denah untuk memperbesar kekakuan rotasi (torsi) sistem struktur secara keseluruhan, sehingga gerak ragam pertama menjadi dominan dalam translasi. Memberi penalti pada struktur yang memuntir dengan menambah beban gempanya memang dapat menambah keamanan, tetapi tidak dapat merubah perilakunya.

- A.7.1.2 Struktur bangunan gedung tidak beraturan benar-benar berperilaku sebagai struktur 3D, sehingga besaran-besaran daktilitas yang representatif mewakilinya perlu diketahui. Hal ini adalah sehubungan dengan Tabel 2 yang lebih mencerminkan sifat-sifat daktilitas sistem 2D. Pasal ini memberi ketentuan, bagaimana menentukan faktor reduksi gempa yang representatif  $R$  melalui suatu analisis pendahuluan untuk beban gempa dalam arah masing-masing sumbu koordinat yang dipilih.
- A.7.1.3 Pada struktur-struktur bangunan gedung tertentu kadang-kadang terjadi, bahwa respons total terhadap gempa adalah lebih kecil dari respons ragamnya yang pertama. Hal ini disebabkan oleh respons ragam yang lebih tinggi yang mengurangi respons ragam yang pertama tadi. Untuk menjamin adanya tahanan (kapasitas) minimum struktur terpasang yang cukup, pasal ini menetapkan bahwa nilai akhir respons setiap struktur bangunan gedung tidak boleh diambil kurang dari 80% nilai respons ragamnya yang pertama.
- A.7.2 Analisis ragam spektrum respons
- A.7.2.1 Seperti telah dijelaskan dalam A.6.1.1, di dalam metoda analisis ragam respons dinamik total dari sistem BDK merupakan superposisi dari respons dinamik sejumlah ragamnya, yang masing-masing berbentuk respons dinamik sistem SDK, di mana ragam yang semakin tinggi memberikan partisipasi respons dinamik yang semakin kecil terhadap respons dinamik total. Kenyataan inilah yang memungkinkan kita untuk menggunakan spektrum respons Gempa Rencana menurut Gambar 2 sebagai dasar untuk menentukan respons masing-masing ragamnya tadi. Hanya saja ordinat spektrum respons tersebut harus dikoreksi dengan faktor koreksi  $I/R$  untuk memperhitungkan kategori gedung yang dihadapi dan untuk menjadikan beban gempa menjadi beban Gempa Nominal, sesuai dengan faktor daktilitas yang dipilih untuk struktur bangunan gedung tersebut. Selanjutnya, jumlah respons ragam yang disuperposisikan dapat dibatasi, asal partisipasi massa ragam efektif yang menghasilkan respons total mencapai sedikit-dikitnya 90%.
- A.7.2.2 Respons masing-masing ragam yang ditentukan melalui spektrum respons Gempa Rencana merupakan respons maksimum. Pada umumnya respons masing-masing ragam mencapai nilai maksimum pada saat yang berbeda, sehingga respons maksimum ragam-ragam tersebut tidak dapat dijumlahkan begitu saja. Pasal ini menetapkan bagaimana cara mensuperposisikan respons maksimum ragam-ragam tersebut berdasarkan hasil berbagai penelitian. Ada

dua cara superposisi ditetapkan dalam pasal ini, yaitu cara-cara yang dikenal dengan Kombinasi Kuadratik Lengkap (*Complete Quadratic Combination* atau *CQC*) dan Akar Jumlah Kuadrat (*Square Root of the Sum of Squares* atau *SRSS*) berikut syarat pemakaiannya.

- A.7.2.3 Pasal ini memberi pembatasan seperti diuraikan dalam A.7.1.3, sehingga tidak perlu dijelaskan lagi di sini.
- A.7.2.4 Dengan menggunakan pasal ini, analisis ragam spektrum respons hanya dipakai untuk menentukan gaya geser tingkat nominal dinamik akibat pengaruh Gempa Nominal. Gaya-gaya internal di dalam unsur-unsur struktur bangunan gedung didapat dari analisis statik 3D biasa berdasarkan beban-beban gempa statik ekuivalen yang dijabarkan dari pembagian gaya geser tingkat nominal yang telah didapat dari analisis respons dinamik sebelumnya, yang bila perlu dimodifikasi terlebih dulu secara konservatif untuk mendapatkan pembagian beban Gempa Nominal sepanjang tinggi struktur bangunan gedung yang lebih baik (lihat Gambar L.3). Dengan menempuh cara ini didapat kepastian mengenai tanda (arah kerja) gaya-gaya internal di dalam unsur-unsur struktur bangunan gedung.



**Gambar L.3** Diagram gaya geser tingkat nominal sepanjang tinggi struktur bangunan gedung.

- A.7.3 Analisis respons dinamik riwayat waktu
- A.7.3.1 Pasal ini menetapkan, bahwa untuk mempelajari perilaku struktur bangunan gedung dari detik ke detik selama gempa bekerja, baik dalam keadaan elastik maupun pasca-elastik, dapat dilakukan analisis respons dinamik linier dan non-linier riwayat waktu.
- A.7.3.2 Untuk taraf pembebanan Gempa Nominal, di mana respons struktur masih bersifat elastik, percepatan puncak gempa masukan harus diskalakan menjadi  $A$  seperti menurut Pers. (27). Dalam persamaan ini faktor  $I$  adalah untuk memperhitungkan kategori gedung yang dihadapi, sedangkan faktor  $R$  adalah untuk menjadikan pembebanan gempa tersebut menjadi pembebanan Gempa Nominal.

- A.7.3.3 Untuk taraf pembebanan penuh, di mana respons struktur sudah memasuki taraf pasca-elastik, percepatan puncak gempa masukan adalah sepenuhnya sama dengan  $A_0$ . Faktor  $I$  kembali adalah untuk memperhitungkan kategori gedung yang dihadapi.
- A.7.3.4 Pasal ini menegaskan, bahwa setiap akselerogram mengandung ketidakpastian untuk dipakai di suatu lokasi. Karena itu harus ditinjau sedikitnya 4 buah akselerogram gempa yang berbeda. Gempa El Centro dianggap sebagai standar, karena akselerogramnya mengandung frekuensi yang lebar, tercatat pada jarak sedang dari pusat gempa dengan magnitudo yang sedang pula (bukan ekstrim). Catatan gempa lainnya harus dipilih sehingga karakteristiknya saling berbeda satu terhadap lainnya. Salah satu metode dalam memilih catatan gempa tersebut adalah dengan cara menghitung nilai korelasi silang antara satu catatan terhadap lainnya dan nilai-nilai tersebut harus nihil.
- A.7.3.5 Sebagai alternatif, pasal ini membolehkan digunakannya percepatan tanah yang disimulasikan sebagai gerakan gempa masukan dalam analisis respons dinamik riwayat waktu.

## **A.8 Kinerja struktur bangunan gedung**

- A.8.1 Kinerja batas layan
- A.8.1.1 Simpangan struktur bangunan gedung akibat beban Gempa Nominal dihitung dari hasil analisis struktur. Untuk struktur bangunan gedung tidak beraturan, Faktor Skala harus dihapuskan pengaruhnya, karena simpangan yang sesungguhnya memang tidak terpengaruh olehnya.
- A.8.1.2 Pasal ini menetapkan secara kuantitatif batasan kriteria kinerja batas layan struktur bangunan gedung.
- A.8.2 Kinerja batas ultimit
- A.8.2.1 Karena Standar ini menganut azas simpangan maksimum yang tetap seperti diuraikan dalam A.4.4.2, maka setelah simpangan struktur bangunan gedung akibat beban Gempa Nominal diketahui dari hasil analisis struktur, simpangan struktur dalam kondisi di ambang keruntuhan didapat dengan mengalikan simpangan akibat beban Gempa Nominal tersebut dengan faktor  $\xi$ . Dari Gambar L.1 jelas terlihat, bahwa untuk struktur bangunan gedung beraturan  $\xi = 0,7R$  seperti menurut Pers. (28). Untuk struktur bangunan gedung tidak beraturan, Faktor Skala harus dihapuskan pengaruhnya, karena simpangan yang sesungguhnya memang tidak terpengaruh olehnya. Hal itu tercerminkan oleh Pers. (29). Rumus sederhana untuk menghitung simpangan struktur dalam kondisi di ambang keruntuhan dimungkinkan, berkat azas simpangan maksimum yang tetap yang dianut dalam Standar ini seperti sudah disebut di atas.
- A.8.2.2 Pasal ini menetapkan secara kuantitatif batasan kriteria kinerja batas ultimit struktur bangunan gedung.
- A.8.2.3 Pasal ini dimaksudkan untuk mencegah benturan antara dua gedung yang berdekatan. Dari pengalaman dengan berbagai peristiwa gempa kuat di waktu yang lalu, banyak kerusakan berat gedung terjadi karena gedung-gedung berdekatan saling berbenturan. Hal ini harus dicegah dengan memberi jarak antara yang cukup, seperti ditetapkan dalam pasal ini.
- A.8.2.4 Pasal ini dimaksudkan untuk mencegah benturan antara dua bagian struktur bangunan gedung yang dipisahkan dengan sela delatasi. Lebar sela dengan

sendirinya harus cukup untuk mencegah terjadinya benturan antar-bagian yang tidak saja dapat menimbulkan kerusakan yang berat, tetapi juga dapat merubah respons struktur yang diperhitungkan.

A.8.2.5 Lebar sela pemisah harus dipelihara agar fungsinya tetap terjamin setiap saat.

## A.9 Pengaruh gempa pada struktur bawah

A.9.1 Pembebanan gempa dari struktur atas

A.9.1.1 Dari falsafah perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung sudah jelas (lihat A.1.3), bahwa akibat pengaruh Gempa Kuat struktur atas boleh rusak berat, tetapi masih harus tetap berdiri dan tidak runtuh, sehingga jatuhnya korban jiwa manusia dapat dicegah. Akan tetapi, hal ini hanya dapat terjadi kalau struktur bawah tidak gagal lebih dahulu. Karena itu, struktur bawah harus dapat memikul dengan baik beban-beban yang dikerjakan oleh struktur atas pada saat struktur atas berada di ambang keruntuhan. Beban maksimum  $V_m$  inilah yang ditetapkan dalam pasal ini. Beban maksimum ini termobilisasi di atas beban gempa yang menyebabkan pelelehan pertama  $V_y$ , berkat adanya faktor tahanan lebih struktur  $f/f_1$  (lihat Gambar L.1). Karena kehiperstatikan struktur dan pembentukan sendi-sendi plastis yang tidak terjadi serempak bersamaan, maka terjadilah proses redistribusi gaya-gaya, yang menghasilkan faktor tahanan lebih struktur tadi. Pada struktur yang daktail penuh ( $\mu = 5,2$ ), di mana terjadi redistribusi gaya-gaya secara luas, faktor tahanan lebih struktur menurut berbagai penelitian dapat mencapai  $f/f_1=1,70$ . Pada struktur yang elastik ( $\mu=1,4$ ), tidak terjadi redistribusi gaya-gaya sama sekali (tidak terbentuk sendi plastis), sehingga  $f/f_1 = 1,25$ .

A.9.1.2 Beban yang sangat dominan dikerjakan oleh struktur atas pada struktur bawah adalah momen guling, disertai beban normal (vertikal) dan beban geser (horisontal) yang bersangkutan. Momen guling nominal maksimum dari struktur atas pada struktur bawah didapat dari momen guling maksimum akibat Gempa Nominal dengan mengalikannya dengan faktor tahanan lebih total struktur,  $f$ .

A.9.1.3 Kemungkinan lain adalah terjadinya momen guling yang dikerjakan oleh momen leleh yang terjadi pada sendi plastis pada kaki semua kolom dan pada kaki semua dinding geser. Sejak saat struktur bangunan gedung akibat pengaruh Gempa Nominal sampai saat mencapai kondisi di ambang keruntuhan, sendi-sendi plastis khususnya pada kaki kolom dan kaki dinding geser mengalami rotasi, sambil momen lelehnya meningkat dari momen leleh awal  $M_y$  menjadi momen leleh akhir  $f_o M_y$  akibat pengerasan regangan baja, dengan  $f_o$  sebagai faktor pengerasan regangannya. Proses ini divisualisasikan dalam diagram momen-simpangan dari suatu sendi plastis di kaki kolom atau kaki dinding geser seperti ditunjukkan dalam Gambar L.4. Untuk struktur bangunan gedung yang daktail penuh ( $\mu=5,2$ ) menurut berbagai penelitian  $f_o=1,25$ .

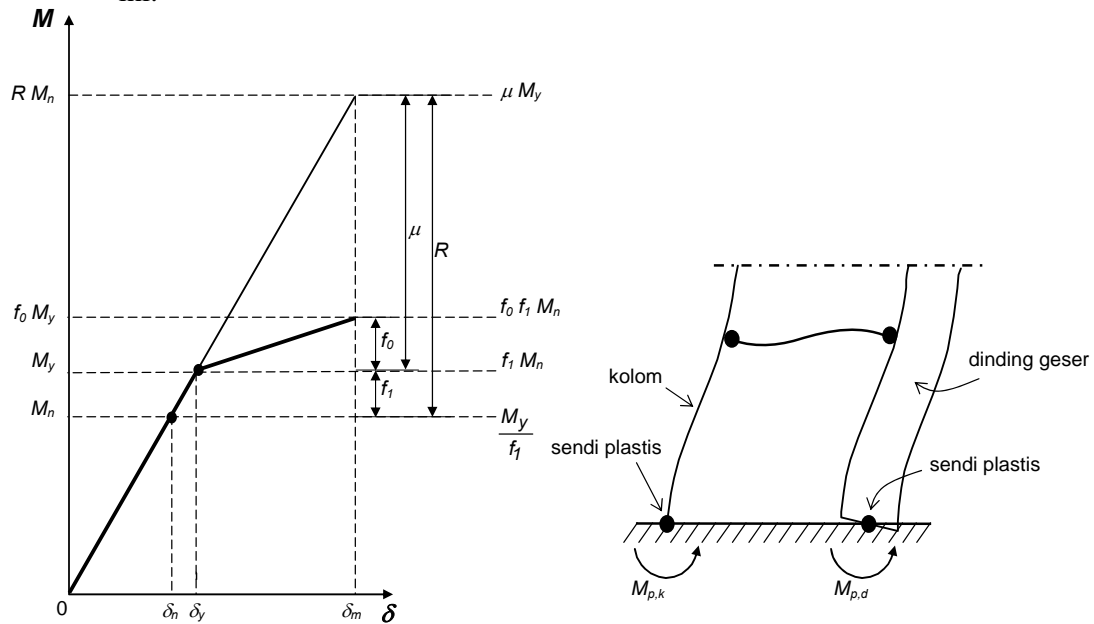
A.9.1.4 Dari dua kemungkinan momen guling nominal di atas, yang menentukan adalah yang nilainya terkecil, karena dengan terbentuknya sendi plastis pada semua kaki kolom dan semua dinding geser, momen guling nominal menurut Pers. (31) tidak akan termobilisasi sepenuhnya.

A.9.1.5 Pada struktur bangunan gedung sering kali dijumpai poer kolom atau fondasi rakit khusus untuk dinding geser. Bila dijumpai hal ini maka Pers. (32) harus diaplikasi secara tersendiri untuk poer atau fondasi rakit secara individu.

A.9.1.6 Penjepitan tidak sempurna pada kaki kolom dan kaki dinding geser boleh diperhitungkan. Bagaimana caranya diserahkan kepada perencana, asal secara rasional dapat dipertanggung jawabkan.

A.9.2 Pembebanan gempa dari gaya inersia

A.9.2.1 Apabila struktur bawah bergerak tepat bersamaan dengan tanah sekelilingnya ketika terjadi gempa, struktur bawah tersebut tidak akan mengalami gaya inersia apapun. Tetapi berhubung interaksi tanah-struktur selalu terjadi yang selalu menyebabkan adanya selisih pergerakan, maka terjadilah interaksi kinematik dan inersial antara struktur bawah dan tanah sekelilingnya yang menyebabkan timbulnya gaya inersia itu. Hal ini yang dinyatakan dalam pasal ini.



**Gambar L.4** Diagram momen-simpangan dari suatu sendi plastis pada kaki kolom atau kaki dinding geser.

A.9.2.2 Perhitungan gaya inersia berdasarkan analisis interaksi tanah-struktur merupakan hal yang rumit. Karena itu, setiap cara rasional yang dapat dipertanggung jawabkan dapat dipakai. Untuk perencanaan yang praktis, pasal ini memberi ketentuan, bagaimana secara pendekatan tetapi konservatif, beban gempa horisontal statik ekuivalen akibat gaya inersia tersebut yang bekerja pada struktur bawah dapat dihitung, yaitu dengan Pers. (33). Dalam persamaan ini faktor reduksi gempa untuk struktur elastik sudah diperhitungkan. Faktor  $I$  di dalam Pers. (33) adalah untuk memperhitungkan kategori gedung yang dihadapi.

A.9.3 Pembebanan gempa dari tanah sekelilingnya

A.9.3.1 Akibat pengaruh interaksi tanah-struktur, antara struktur bawah dan tanah sekelilingnya terjadi selisih pergerakan yang berubah-ubah selama gempa bekerja. Karena itu, tekanan tanah pada dinding besmen dan komponen lain struktur bawah juga berubah-ubah nilainya. Perhitungan tekanan tanah ini berdasarkan analisis interaksi tanah-struktur merupakan hal yang rumit. Karena

itu, setiap cara rasional yang dapat dipertanggung jawabkan dapat dipakai. Untuk perencanaan yang praktis, pasal ini memberi ketentuan yang sederhana tetapi konservatif, yaitu bahwa tekanan tanah dari tanah depan dapat dianggap mencapai nilai maksimum sebesar nilai tekanan leleh tanah (identik dengan tekanan pasif) sepanjang kedalaman besmen. Tekanan tanah tersebut yang bekerja pada struktur bawah harus dijadikan tekanan tanah nominal.

A.9.3.2 Pasal ini memberi petunjuk bagaimana interaksi tanah-struktur secara terbatas harus ditinjau. Bagian kritis dalam analisis ini adalah penentuan sifat-sifat kuantitatif pegas tekan dan pegas geser, yang merepresentasikan tanah belakang, samping dan bawah (fondasi).

## **A.10 Pengaruh gempa pada unsur sekunder, unsur arsitektur dan instalasi mesin dan listrik**

A.10.1 Ruang lingkup pengamanan

A.10.1.1 Perilaku yang memuaskan dari unsur-unsur non-struktur terhadap pengaruh gempa adalah sama pentingnya dengan perilaku struktur pemikulnya itu sendiri. Di samping unsur-unsur non-struktur yang mengisi suatu gedung dapat merupakan bagian yang penting dari nilai ekonomi gedung itu hingga layak untuk diamankan dari kerusakan, juga dalam hal gagal atau runtuh dapat merupakan bahaya langsung terhadap keselamatan penghuni gedung atau dapat menghambat usaha pengungsian penghuni dari gedung itu atau menghalang-halangi usaha pemadaman kebakaran segera setelah gempa terjadi.

A.10.1.2 Benda-benda sejarah jelas harus diamankan dari kerusakan untuk kepentingan generasi yang akan datang.

A.10.2 Tambatan

A.10.2.1 Kekurangan utama dalam pemasangan unsur-unsur non-struktur di dalam gedung terletak pada kurang memadainya detail-detail tambatan, yang harus diperhitungkan tidak saja terhadap gaya-gaya yang langsung diakibatkan oleh gempa (gaya inersia), tetapi juga terhadap pengaruh interaksi dengan unsur-unsur lain dari struktur pemikul. Gesekan tidak boleh diandalkan untuk memikul gaya lateral akibat gempa, karena komponen gerakan tanah yang berarah vertikal ke bawah dapat menghapuskan tahanan gesekan, sehingga unsur yang ditinjau dapat bergerak ke samping oleh pengaruh komponen gerakan tanah yang berarah horisontal.

A.10.2.2 Alat-alat penambat ornamen, panel-panel luar dan benda-benda tambahan harus dibuat daktail yang memungkinkan unsur-unsur tersebut untuk mengikuti pergerakan struktur pemikul tanpa saling bertabrakan.

A.10.3 Hubungan antar-unsur

A.10.3.1 Apabila suatu unsur penting direncanakan untuk tahan terhadap gempa yang relatif kuat, maka perlu diperhatikan perencanaan unsur-unsur yang berhubungan yang dapat gagal oleh gempa yang lebih ringan, sehingga menyebabkan gagalnya fungsi unsur penting tersebut. Sebagai contoh, sebuah dinding yang berdiri di samping sebuah alat siap jalan dalam keadaan darurat dapat sudah roboh pada taraf gempa yang jauh lebih rendah daripada yang disyaratkan untuk alat tersebut, sehingga menghalang-halangi operasi dari alat itu ketika gempa yang lebih ringan ini terjadi.

A.10.3.2 Pasal ini menekankan pentingnya pemeliharaan sela pemisah antara unsur-unsur non-struktur dan peralatan untuk mencegah interaksi di antaranya yang

membahayakan atau menimbulkan kerugian besar.

- A.10.4 **Pemutusan Otomatis Operasi Mesin dan Alat**  
 Beberapa proses industri seperti yang terdapat pada proses kimia atau yang menggunakan aliran gas atau arus listrik tegangan tinggi, dapat menimbulkan bahaya yang berarti kepada masyarakat umum, apabila tidak dihentikan dalam gempa-gempa kuat. Otoritas pembangunan bersama-sama dengan pemilik gedung hendaknya menetapkan suatu taraf intensitas gempa yang menyebabkan suatu mesin secara otomatis berhenti operasinya. Sebagai pedoman, pemutusan operasi mesin secara otomatis hendaknya terjadi pada percepatan puncak muka tanah  $A_o$  yang berlaku bagi wilayah gempa tempat mesin itu berada. Pemutusan operasi mesin otomatis juga harus terjadi, apabila di dalam sistem terjadi suatu kelainan yang berbahaya, misalnya terjadinya tekanan cairan atau tekanan gas yang membumbung tinggi di luar batas di dalam suatu proses.
- A.10.5 **Pengaruh gempa rencana**
- A.10.5.1 **Beban gempa yang harus diperhitungkan bekerja pada unsur non-struktur** adalah beban Gempa Nominal statik ekuivalen, yang pada dasarnya didapat dengan mengalikan berat unsur dengan beberapa faktor (Pers. (34)) yang tidak banyak bergantung pada data yang didapat dari analisis struktur pemikul unsur tersebut. Hal ini adalah untuk memungkinkan dilakukannya perencanaan langsung oleh para perencana instalasi mesin dan listrik serta produsen panel-panel beton pracetak. Data struktur pemikul yang diperlukan hanyalah waktu getar alami fundamental  $T_1$  untuk menentukan Faktor Respons Gempa  $C_1$  dan faktor reduksi gempa  $R$ . Faktor-faktor lainnya tinggal dihitung dengan rumus sederhana (Pers. (35)) dan data yang dapat dibaca dalam tabel (Tabel 8 dan 9).
- A.10.5.2 **Koefisien pembesaran respons  $K_p$**  dimaksudkan untuk memperhitungkan pembesaran gerakan tanah oleh struktur pemikul, yang bergantung pada respons struktur pemikul itu sendiri. Untuk itu, rumus yang diberikan dalam pasal ini (Pers. (35)) dianggap memberikan hasil yang cukup memadai. Perlu disadari, bahwa benda-benda berat di puncak sebuah struktur bangunan gedung dapat mengalami percepatan-percepatan yang besar, sehingga bila mungkin benda-benda demikian hendaknya ditempatkan di tingkat lebih bawah.
- A.10.5.3 **Faktor kinerja  $P$  unsur non-struktur mencerminkan keutamaan unsur tersebut**, identik dengan Faktor Keutamaan  $I$  untuk gedungnya itu sendiri. Dengan demikian, faktor kinerja tersebut adalah untuk memperpanjang perioda ulang gempa yang menyebabkan kerusakan pada unsur tersebut, sehingga masih utuh ketika Gempa Rencana bekerja. Hal ini penting diperhatikan pada alat-alat yang dapat membahayakan seperti ketel uap dan tangki tekanan tinggi.
- A.10.5.4 **Suatu unsur non-struktur yang dipasang pada suatu struktur pemikul yang waktu getar alaminya mendekati waktu getar alami struktur pemikulnya**, harus dihindari, karena dapat menghasilkan pembesaran yang sangat kuat. Pada sekitar titik resonansi, pembesaran tersebut dapat mencapai 25 kali. Akan tetapi dalam pasal ini pembesaran yang ditinjau hanya sampai 2 kali, karena dalam praktek selalu ada redaman yang memperkecil pembesaran tersebut.

## Lampiran B

### B.1 Perencanaan Tahanan dan Beban Terfaktor untuk fondasi

**B.1.1** Fondasi adalah bagian dari struktur bawah gedung yang tahanannya ditentukan oleh tahanan tanah yang mendukungnya, seperti fondasi telapak, rakit, tiang pancang dan tiang bor.

**B.1.2** Selaras dengan perencanaan tahanan unsur struktur atas dan struktur bawah, tahanan fondasi gedung dapat direncanakan berdasarkan cara Perencanaan Tahanan dan Beban Terfaktor.

**B.1.3** Beban nominal  $Q_n$  yang bekerja pada fondasi adalah beban nominal yang bekerja pada struktur bawah, yang diteruskan langsung ke tanah pendukung seperti pada jenis fondasi telapak dan rakit, atau yang diteruskan melalui tiang pancang atau tiang bor ke tanah pendukung seperti pada jenis fondasi tiang. Beban nominal  $Q_n$  dikalikan dengan faktor beban  $\gamma$  yang bersangkutan adalah beban terfaktor  $Q_u$  yang bekerja pada fondasi seperti pada Pers. (B.1) berikut ini,

$$Q_u = \sum \gamma_n Q_n \quad (\text{B.1})$$

**B.1.4** Menurut Perencanaan Tahanan dan Beban Terfaktor, harus dipenuhi persyaratan keadaan batas tahanan fondasi sebagai berikut:

$$R_d \geq Q_u \quad (\text{B.2})$$

di mana  $R_d$  adalah tahanan rencana atau daya dukung rencana fondasi, yang merupakan perkalian faktor tahanan  $\phi$  dan tahanan nominal fondasi  $R_n$  menurut persamaan:

$$R_d = \phi R_n \quad (\text{B.3})$$

di mana  $R_n$  ditentukan melalui perhitungan analitik atau empirik yang rasional dan/ atau melalui uji beban langsung.

**B.1.5** Faktor tahanan  $\phi$  untuk fondasi ditetapkan menurut Tabel L.1 untuk jenis fondasi telapak dan rakit, dan menurut Tabel L.2 untuk jenis fondasi tiang pancang dan tiang bor.

**Tabel L.1. Faktor tahanan  $\phi$  untuk jenis fondasi telapak dan rakit**

Jenis tanah	$\phi$
Pasir	0,35 – 0,55
Lempung	0,50 – 0,60
Batuan	0,60



**Tabel L.2 Faktor tahanan  $\phi$  untuk jenis fondasi tiang pancang dan tiang bor**

Jenis fondasi	Mekanisme tahanan	$\phi$	Sifat beban
Tiang pancang	geser + ujung	0,55 – 0,75	Tekan aksial
	geser saja	0,55 – 0,70	Tekan/ tarik aksial
	ujung saja	0,55 – 0,70	Tekan aksial
Tiang bor	geser + ujung	0,50 – 0,70	Tekan aksial
	geser saja	0,55 – 0,75	Tekan/tarik aksial
	ujung saja	0,45 – 0,55	Tekan aksial

## B.2 Penjelasan Perencanaan Tahanan dan Beban Terfaktor untuk fondasi

**B.2.1** Tahanan fondasi ditentukan oleh tahanan tanah yang mendukungnya. Tahanan struktur fondasi itu sendiri (telapaknya, rakitnya, tiangnya) tentu ditentukan oleh bahan fondasi tersebut, yang pada umumnya adalah beton bertulang. Jadi, untuk perhitungan tahanan struktur fondasi, berlaku ketentuan-ketentuan yang sama dengan untuk struktur atas dan struktur bawah gedung.

**B.2.2** Perencanaan tahanan unsur struktur atas dan struktur bawah dengan cara Perencanaan Tahanan dan Beban Terfaktor, sudah sejak lama diikuti dalam praktek di Indonesia. Tetapi untuk perencanaan tahanan fondasi, terdapat kecenderungan kuat untuk tetap memakai cara tegangan atau beban yang diizinkan. Inkonsistensi ini tentunya harus dihapuskan secepat mungkin. Karena itu, Lampiran B dari Standar ini dimaksudkan untuk mensosialisasikan cara Perencanaan Tahanan dan Beban Terfaktor untuk fondasi sebagai alternatif, yang diharapkan dapat segera menggantikan cara yang lama.

**B.2.3** Pada dasarnya beban nominal pada struktur bawah adalah juga beban nominal pada fondasi yang diteruskan ke tanah pendukung. Dengan demikian, faktor-faktor beban  $\gamma$  yang harus dikalikan pada beban nominal  $Q_n$  untuk mendapatkan beban terfaktor  $Q_u$  pada fondasi, harus diambil yang sama dengan yang berlaku untuk struktur atas dan struktur bawah gedung.

**B.2.4** Tahanan nominal fondasi dapat diartikan sebagai tahanan di mana tanah pendukungnya masih menunjukkan penurunan yang elastis, dengan suatu tahanan lebih yang cukup, terhadap tahanan di mana tanah pendukungnya mulai secara drastis menunjukkan penurunan yang besar. Karena itu, cara penentuan tahanan nominal fondasi yang langsung adalah dengan melakukan uji beban dan menetapkannya dari diagram beban-penurunan. Berapa besarnya nilai tahanan lebih, perlu dipertimbangkan dengan sebaik-baiknya dari bentuk diagram beban-penurunan, sehingga tidak dapat dirumuskan secara umum. Sebenarnya tahanan nominal fondasi harus ditentukan secara probabilistik, tetapi pada umumnya hal ini tidak dimungkinkan, karena jumlah uji beban dalam suatu proyek pada umumnya terbatas. Suatu perhitungan standar yang dilakukan dalam praktek selama ini adalah perhitungan daya dukung yang diizinkan. Sebagai pendekatan, daya dukung nominal dapat dianggap dua kali daya dukung yang diizinkan. Seperti diketahui, syarat yang harus dipenuhi pada uji beban adalah bahwa pada beban uji dua kali beban yang diizinkan, fondasi harus masih menunjukkan sifat elastis. Seperti dapat dilihat, tahanan rencana fondasi adalah lebih rendah dari tahanan nominalnya. Di dalam rekayasa fondasi pengertian tahanan rencana dan tahanan nominal sering terbalik. Dalam literatur Eropa, tahanan nominal disebut tahanan karakteristik.

**B.2.5** Faktor tahanan  $\phi$  sangat bergantung pada beberapa hal, seperti mutu pengerjaan fondasi, sebaran variasi parameter tanah, metoda perhitungan tahanan nominal, keandalan

parameter tanah serta metoda pengujian yang dipakai untuk mendapatkannya, sifat beban (tarik, tekan, momen, geser). Karena itu tidak dapat ditetapkan satu nilai  $\phi$  tetapi suatu kisaran, seperti ditunjukkan dalam Tabel L.1 dan Tabel L.2. Pada umumnya, nilai  $\phi$  terendah dalam kisaran diambil jika dalam penentuan daya dukung nominal digunakan korelasi dengan nilai Test Penetrasi Standar (SPT). Nilai  $\phi$  rerata dalam kisaran diambil jika digunakan korelasi dengan nilai Test Sondir (CPT). Nilai  $\phi$  tertinggi dalam kisaran diambil jika digunakan parameter kuat geser dari hasil uji laboratorium atau dari hasil uji beban langsung sampai gagal.