

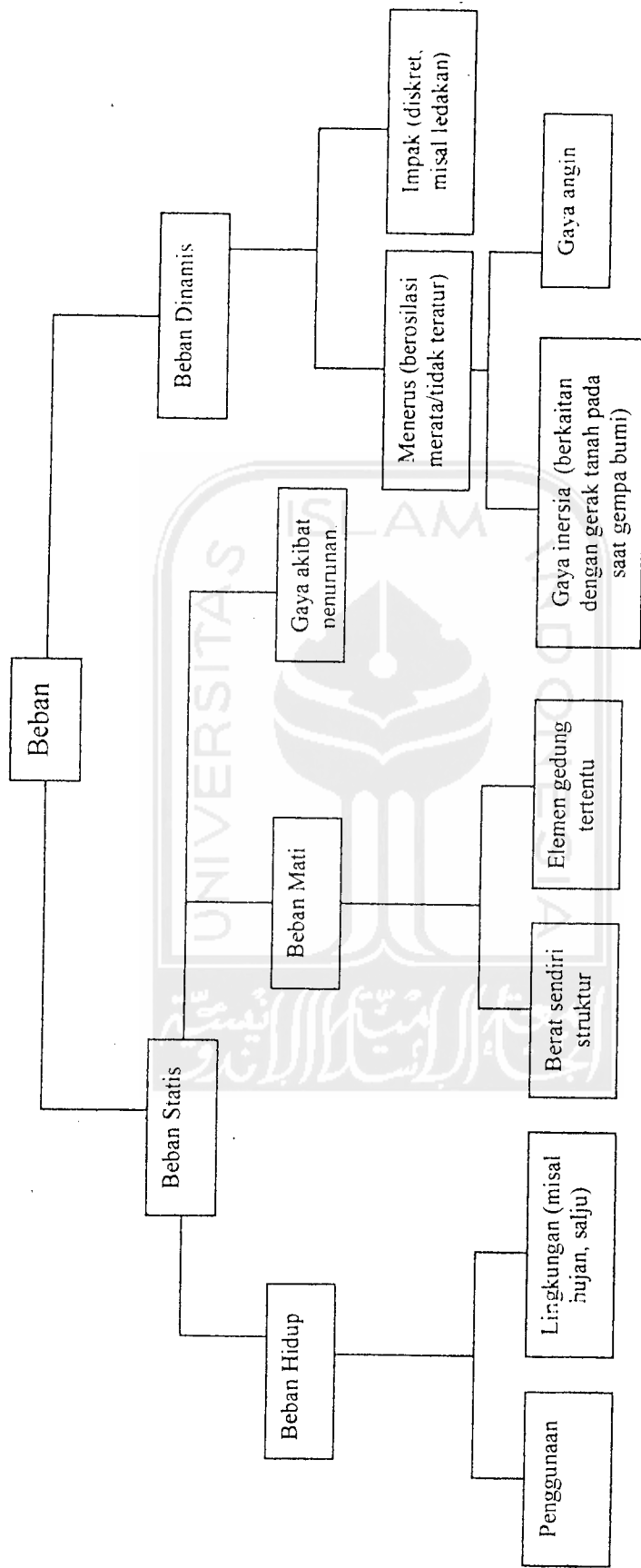
**BAB II**  
**PENGARUH INTERAKSI PEMBEBANAN**  
**PADA STABILITAS STRUKTUR**

**2.1 Pembebanan pada Struktur Bangunan Tinggi**

Pembebanan pada struktur bangunan tinggi berbeda dengan pembebanan pada bangunan tingkat rendah. Pada perencanaan bangunan tinggi perlu diperhatikan beban lateral yang berpengaruh terhadap kekuatan dan stabilitas struktur selain adanya beban gravitasi. Beban lateral tersebut bekerja pada setiap tingkat dan dianggap sebagai beban statis yang menirukan beban gempa riil akibat gerakan tanah.

Untuk beban gravitasi, pembebanan pada struktur bangunan tinggi hampir sama dengan pembebanan bangunan tingkat rendah. Beban gravitasi ini mencakup beban mati dari suatu struktur antara lain pelat dan balok, beban berguna dan beban hidup yang terjadi akibat hunian. Besar berat sendiri bahan bangunan dan komponen gedung serta beban hidup yang bekerja ditetapkan dalam Peraturan Pembebanan Indonesia Untuk Gedung (1983).

Dalam melakukan analisis desain struktur, diperlukan gambaran yang jelas mengenai perilaku dan besar beban yang bekerja pada struktur. Gambar 2.1 mengilustrasikan diagram beban-beban yang perlu diperhatikan.



Gambar 2.1 Diagram beban-baban yang bekerja pada struktur

Beban lateral yang bekerja pada setiap tingkat merupakan hasil distribusi dari gaya dasar horisontal yang didistribusikan secara merata setiap tingkat, beban lateral yang bekerja itu tidak sama besar, hal ini disebabkan oleh berat lantai dan ketinggian tingkat tersebut. Semakin berat lantai dan tinggi suatu tingkat, semakin besar gaya lateral yang terjadi sehingga simpangan lateral yang terjadi akan semakin besar pula.

## **2.2 Analisis Beban Gempa Rencana dengan Metoda Statis Ekuivalen**

Indonesia merupakan wilayah dengan tingkat resiko gempa yang cukup tinggi. Kejadian gempa sering melanda Indonesia, baik dalam ukuran yang kecil yang frekuensi kejadiannya sampai ribuan kali pertahun, maupun gempa dengan kekuatan yang cukup besar yang dapat merusakkan bangunan. Hal ini tidak terlepas dari kondisi geografis Indonesia yang terletak di antara empat sistem lempeng tektonik yang aktif, yakni tapal batas lempeng Eurasia, lempeng Indo-Australia, lempeng Filipina dan lempeng Pasifik. Pada prinsipnya gempa yang umum terjadi adalah suatu peristiwa pelepasan energi pada suatu tempat di perbatasan lempeng-lempeng plat tektonik.

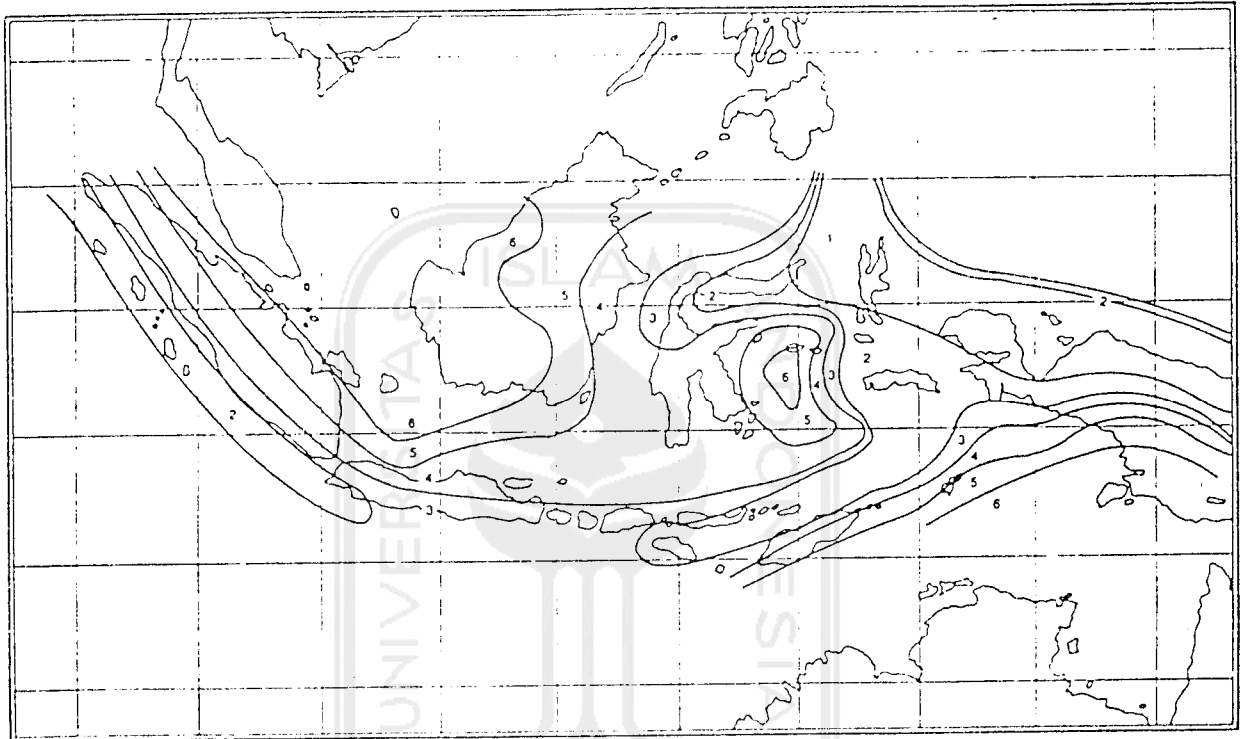
Gempa bumi merupakan suatu fenomena alam yang dapat terjadi dimana saja di permukaan Bumi. Hingga saat ini belum dapat diperkirakan kapan suatu daerah akan mengalami gempa dan seberapa besar kekuatan gempa yang akan terjadi. Kondisi ini menuntut para perencana untuk memberi perhatian yang serius agar konstruksi bangunan yang dibuat dapat tahan terhadap beban gempa.

Selama terjadi gempa bumi, bangunan akan mengalami gerakan vertikal dan gerakan horisontal. Gaya gempa baik dalam arah vertikal maupun arah horisontal, akan timbul di titik-titik pada massa struktur. Dari kedua gaya gempa tersebut, gaya gempa dalam arah vertikal seringkali tidak diperhitungkan karena cukup kecil jika dibandingkan dengan besar gaya akibat beban gravitasi yang bekerja pada struktur, sedangkan struktur direncanakan terhadap gaya vertikal dengan faktor keamanan yang cukup memadai. Oleh karena itu, struktur jarang sekali runtuh akibat gaya gempa vertikal. Sebaliknya, gaya gempa dalam arah horisontal akan bekerja langsung pada titik lemah struktur yang mempunyai kekuatan tidak memadai, sehingga dapat menyebabkan struktur runtuh (“failure”). Atas dasar inilah prinsip utama dalam perencanaan tahan gempa adalah meningkatkan kekuatan struktur terhadap gaya lateral (gaya horisontal) yang secara umum tidak memadai (Muto,1987).

Besar taraf pembebanan gempa tidak berlaku universal melainkan sangat bervariasi antara satu wilayah dengan wilayah lain tergantung pada kondisi seismotektonik, geografis dan geologi setempat. Berbagai peraturan perencanaan bangunan tahan gempa menetapkan suatu taraf beban gempa rencana yang menjamin suatu struktur tidak akan rusak pada saat dilanda gempa kecil atau sedang, dan pada saat dilanda gempa kuat, struktur tersebut mampu berperilaku duktail dengan memencarkan energi gempa dan sekaligus membatasi beban gempa yang masuk ke dalam struktur.

Berdasarkan intensitas dan kekuatan gempa yang pernah terjadi, wilayah Indonesia dibagi menjadi enam wilayah gempa yang berbeda-beda, dengan

wilayah 1 merupakan daerah paling rawan terhadap gempa, dan wilayah 6 merupakan daerah aman gempa. Pembagian wilayah gempa di Indonesia dapat dilihat pada gambar 2.2 berikut :



Gambar 2.2 Pembagian daerah gempa di Indonesia

Beban statis ekuivalen merupakan representasi dari beban gempa yang telah disederhanakan, yaitu penyederhanaan gaya inersia yang bekerja pada suatu massa dan disederhanakan menjadi suatu beban statik. Meskipun cara ini merupakan penyederhanaan, tetapi cara ini didasari oleh prinsip-prinsip dinamis seperti faktor keutamaan gedung, berat total struktur, faktor jenis struktur, dan faktor koefisien gempa. Adapun faktor-faktor penentu beban gempa rencana dengan metode statis ekuivalen adalah sebagai berikut :

### 2.2.1 Beban geser dasar akibat gempa

Besarnya beban geser rencana ( $V$ ) menurut peraturan yang ditetapkan dalam Pedoman Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Rumah dan Gedung, 1987 adalah

$$V = C \cdot I \cdot K \cdot W_t \quad (2.1)$$

dengan

$V$  = Gaya geser dasar horisontal akibat beban gempa,

$C$  = Koefisien gempa dasar seperti yang ditentukan dari spektrum respon percepatan,

$I$  = Faktor keutamaan struktur,

$K$  = Faktor jenis struktur,

$W_t$  = Berat total bangunan.

Koefisien gempa dasar ( $C$ ) berfungsi untuk menjamin agar struktur mampu memikul beban gempa yang dapat menyebabkan kerusakan besar pada struktur. Dalam penentuan nilai koefisien gempa dasar dipengaruhi oleh beberapa faktor berikut meski secara eksplisit tidak tampak :

#### 1. Faktor “over strength” struktur ( $f_1$ )

Faktor  $f_1$  diperhitungkan untuk memperkirakan kemampuan struktur memikul beban gempa yang lebih besar dari beban gempa rencana karena :

- a. Berat bangunan relatif lebih kecil daripada berat yang diperkirakan.
- b. Beban gempa mungkin sudah dikalikan dengan faktor 4 (struktur dengan nilai daktilitas 4) sebelum didistribusikan menjadi gaya-gaya rencana pada elemen struktur.

- c. Dalam proses perencanaan struktur, telah diperhitungkan faktor reduksi kapasitas
- d. Pendekatan-pendekatan perencanaan yang konservatif dan peningkatan luas tulangan karena pembulatan.
- e. Bahan-bahan yang dipakai lebih kuat daripada yang sebenarnya dibutuhkan. Alasan ini mengakibatkan nilai kekuatan struktur jauh melebihi kekuatan gempa rencana. Oleh karena itu diperlukan suatu faktor agar resiko gempa yang diberikan pada waktu perencanaan tidak terlalu berlebihan. Untuk Indonesia diusulkan nilai  $f_1$  sebesar 1,6 berdasarkan beberapa data dari kekuatan baja tulangan, perkiraan persentase tulangan yang berlebihan dan pengaruh dari faktor-faktor yang diperhitungkan dalam perencanaan struktur.

## 2. Faktor $f_2$

Faktor ini diberikan untuk memperhitungkan kemampuan struktur memikul beban gempa yang lebih besar dari beban gempa rencana akibat kemungkinan redistribusi momen setelah terbentuk sendi plastis. Nilai  $f_2$  diperkirakan sebesar 2,0 untuk struktur-struktur portal pada umumnya.

### 2.2.2 Koefisien gempa dasar

Pembagian wilayah gempa yang masing-masing memiliki karakteristik berbeda, menyebabkan koefisien gempa dasar suatu tempat akan berbeda dengan tempat lain, sehingga memberikan pengaruh pembebanan yang berbeda pula pada struktur. Nilai koefisien gempa dasar bergantung pada frekuensi gerakan tanah

yang bersifat sangat merusak, yang berbeda-beda pada tiap wilayah gempa dan waktu getar alami struktur portal beton bertulang dihitung dengan rumus:

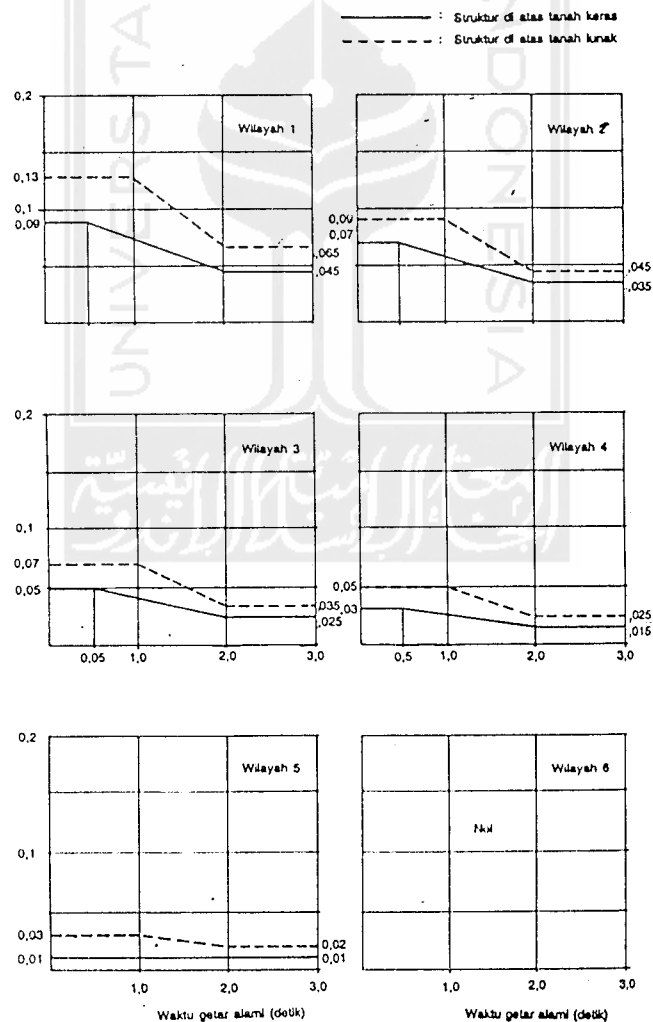
$$T = 0.06 \cdot H^{0.75} \quad (2.2)$$

dengan

$T$  = Waktu getar alami struktur portal beton bertulang,

$H$  = Tinggi bangunan

Berdasarkan pembagian wilayah gempa di Indonesia, nilai koefisien gempa dasar untuk masing-masing wilayah ditunjukkan gambar berikut :



Gambar 2.3 Koefisien gempa dasar



### 2.2.3 Faktor keutamaan

Faktor keutamaan gedung ( $I$ ) adalah faktor yang dipengaruhi oleh kepentingan bangunan tersebut terhadap pelayanan usaha penyelamatan setelah terjadi gempa dan tingkat bahaya bila terjadi keruntuhan. Tingkat kepentingan suatu struktur terhadap bahaya gempa dapat berbeda-beda tergantung pada fungsinya. Oleh karena itu semakin penting suatu struktur tersebut semakin besar perlindungan yang harus diberikan. Faktor keutamaan dipakai untuk memperbesar beban gempa rencana agar struktur mampu memikul beban gempa dengan periode ulang yang lebih panjang, dengan demikian struktur akan mampu menahan beban gempa yang lebih besar. Faktor keutamaan untuk berbagai jenis gedung harus diambil menurut tabel 2.1 Pedoman Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Rumah dan Gedung, 1987.

### 2.2.4 Faktor jenis struktur

Faktor jenis struktur ( $K$ ) dipengaruhi oleh perilaku struktur bila menerima beban gempa. Faktor ini dimaksudkan agar struktur mempunyai kekuatan lateral yang cukup untuk menjamin bahwa sifat daktilitas struktur yang dituntut tidak lebih besar dari daktilitas yang tersedia pada saat terjadi gempa kuat. Faktor  $K$  sangat bergantung pada jenis struktur dan bahan konstruksi yang dipakai. Struktur yang mempunyai daktilitas yang cukup dan mampu memancarkan energi gempa pada sejumlah besar elemen struktur memerlukan faktor  $K$  yang rendah. Sedangkan struktur yang mempunyai mekanisme pemancaran energi yang sedikit,

memerlukan faktor K yang lebih tinggi agar struktur mempunyai ketahanan yang cukup selama terjadi gempa.

Beban geser dasar gempa yang diperoleh dari analisis diatas didistribusikan ke setiap tingkat sepanjang tinggi struktur sebagai beban horisontal terpusat dengan rumus

$$F_i = \frac{W_i \cdot h_i}{\sum W_i \cdot h_i} V \quad (2.3)$$

dengan

$F_i$  : beban horisontal yang terpusat pada lantai i

$h_i$  : ketinggian sampai tingkat i diukur dari tinggi penjepit lateral seperti yang ditentukan dalam pasal 1.3 PPTGUGI, 1987.

Rumus tersebut harus memenuhi ketentuan di bawah ini:

1. Bila  $H/A$  atau  $H/B < 3$ , maka gaya geser horisontal total harus dibagikan ke seluruh tinggi gedung menjadi beban terpusat yang menangkap pada masing-masing tingkat.
2. Bila  $H/A$  atau  $H/B > 3$ , maka gaya geser horisontal total harus dibagikan 0,1 menjadi beban terpusat yang bekerja pada atap dan 0,9 sisanya dibagikan sepanjang tinggi gedung menurut rumus di atas.

### 2.3 Prinsip Dasar Desain Bangunan

Salah satu kriteria yang dapat dipakai sebagai ukuran suatu struktur dapat diterima untuk penggunaan yang diinginkan atau untuk maksud desain tertentu adalah kemampuan layan ("serviceability"), struktur harus mampu memikul baban rancang secara aman, tanpa kelebihan tegangan pada material dan

mempunyai deformasi yang masih dalam daerah yang diijinkan. Dengan memilih ukuran dan bentuk elemen struktur serta bahan yang digunakan, taraf tegangan pada struktur ditentukan pada tingkat yang dipandang masih dapat diterima, sehingga kelebihan tegangan pada material yang ditunjukkan dengan kegagalan material maupun anjakan elemen struktur tidak terjadi.

Prinsip desain bangunan adalah suatu hal yang penting di era modern. Prinsip ini dimulai dari bagaimana menentukan atau mendesain beban-beban, konfigurasi bangunan yang tepat, mekanisme goyangan (“sway mechanism”) yang dipakai dan pengoptimalan prinsip pelepasan energi (“energy dissipation”) pada elemen-elemen struktur. Konfigurasi bangunan secara umum meliputi perencanaan bentuk, ukuran bangunan secara tiga dimensi, pemilihan jenis bangunan, kombinasi tempat dan orientasi struktur utama penahan beban horisontal (“lateral load resisting system”) dan penempatan bagian pengisi (“nonstructural element”). Mekanisme goyangan yang dipilih apakah “beam sway mechanism” atau “column sway mechanism”, dengan pemilihan pola goyangan yang tepat akan bergantung pada jenis struktur utama. Optimalisasi pelepasan energi sangat penting agar energi yang tersimpan di dalam struktur dapat diminimalkan.

Sebagai akibat dari cacat perencanaan konfigurasi bangunan yang berhubungan dengan kekakuan struktur akan terjadi tingkat yang lemah atau biasa disebut dengan “soft storey”. “Soft storey” dapat terjadi pada struktur bangunan bertingkat yang menggunakan portal sebagai struktur utama. Pada bangunan bertingkat, umumnya tingkat dasar didesain menjadi ruangan yang lebih leluasa

dengan cara pada tingkat yang bersangkutan tidak dipasang dinding-dinding. Sebaliknya pada tingkat atas seringkali dipasang dinding-dinding dari pasangan batu bata yang kaku dan masif. Menurut hasil penelitian Bertero dan Brokken (1983) dinding-dinding bata yang masif dapat menaikkan kekakuan tingkat sampai beberapa ratus persen dan dapat menurunkan periode getar kira-kira 50%. Dengan demikian, pada tingkat dasar akan menjadi tingkat yang relatif lemah ("soft storey") dibanding dengan tingkat-tingkat di atasnya.

"Soft storey" juga akan terbentuk pada kondisi mekanisme goyangan yang salah. Persepsi umum sering menganggap bahwa struktur yang menggantung, seperti balok harus memikul beban vertikal yang lebih besar. Oleh karena itu sering dijumpai bahwa perhatian untuk desain balok lebih diutamakan daripada desain kolom, tanpa mengetahui bagaimana sebaiknya mendesain kekuatan antar keduanya. Kolom akan mengalami tegangan paska elastik (inelastik) lebih dulu dibanding balok, sehingga kolom dapat saja rusak lebih dulu dari balok. Hal semacam ini menyebabkan mekanisme goyangan kolom ("column-sway mechanism").

Perilaku dinamik pada bagian "soft storey" terutama simpangan horisontal, akan berbeda dengan bagian-bagian yang lain. Simpangan horisontal yang berlebihan pada tingkat dasar akan mengakibatkan pengaruh P-delta menjadi signifikan. Kombinasi antara momen guling ("overtuning moment") akibat gaya horisontal dan pengaruh P-delta ini banyak mengakibatkan keruntuhan bangunan.

## 2.4 Pendekatan Deformasi pada Struktur Portal

Beban yang bekerja pada elemen struktur selalu menyebabkan terjadinya perubahan dimensional pada elemen struktur tersebut, dimana struktur akan mengalami perubahan ukuran atau bentuk atau kedua-duanya. Perubahan dimensional dikelompokkan ke dalam dua jenis, yaitu deformasi elastis dan deformasi plastis yang terjadi secara berurutan dengan semakin bertambahnya beban. Apabila elemen struktur mula-mula dibebani, maka deformasi yang terjadi masih dalam daerah elastis dari material. Pada daerah ini, elemen struktur masih dapat kembali kepada keadaan semula jika beban dihilangkan. Apabila beban bertambah terus, maka akan terjadi deformasi yang termasuk ke dalam daerah plastis dari material. Hal ini terjadi apabila tegangan pada material cukup besar sehingga dapat menyebabkan terjadinya perubahan permanen dalam struktur. Apabila perubahan internal material ini telah terjadi, struktur tidak akan dapat kembali ke keadaan semula meskipun beban telah dihilangkan.

Analisis dan perencanaan kolom beton bertulang yang sering dibahas terbatas pada kolom pendek tanpa memperhitungkan kemungkinan terjadinya tekuk ("buckling"). Peraturan perhitungan beton untuk bangunan gedung SK-SNI-T-15-1991-03 menetapkan digunakannya suatu proses evaluasi kelangsingan pada batas nilai rasio kelangsingan tertentu. Dengan cara demikian, komponen struktur tekan digolongkan menjadi dua, yaitu struktur kolom pendek dan kolom langsing. Elemen kolom pendek adalah jenis kolom yang cenderung mengalami kegagalan material (ditentukan oleh kekuatan material). Kolom langsing cenderung mengalami fenomena tekuk, untuk mencegah tekuk yang tidak dikehendaki,

diperlukan evaluasi terhadap reduksi kekuatan yang harus diberikan dalam perhitungan struktur kolom.

Fenomena tekuk merupakan hal yang menarik. Tekuk adalah suatu ragam kegagalan yang diakibatkan oleh ketidakstabilan elemen struktur yang dipengaruhi oleh aksi beban. Pada saat tekuk terjadi, taraf gaya internal dapat sangat rendah. Deformasi yang terjadi pada elemen kolom dibedakan atas deformasi lentur, deformasi geser dan deformasi akibat fondasi (Muto K,1963).

#### 2.4.1 Deformasi Geser

Sebagaimana telah disinggung di depan bahwa beban gempa yang bekerja pada struktur mengakibatkan struktur mengalami goyangan dalam tiga arah, dua pada arah lateral dan satu pada arah aksial. Deformasi pada arah lateral mengakibatkan portal cenderung untuk mengalami kondisi tidak stabil. Deformasi aksial yang terjadi pada kolom tidak begitu berpengaruh jika dibandingkan dengan besarnya beban gravitasi dan dapat diabaikan. Beban aksial kritis untuk elemen struktur yang mengalami deformasi akibat geser ditunjukkan dengan penurunan rumus-rumus berikut

$$P_{icrg} = \frac{12E}{h_i \left( \frac{1}{C_i} + \frac{1}{G_i} \right)} \quad (2.5)$$

dengan

$C_i : \Sigma (I_c/h)_i$  ,  $I_c$  : inersia kolom,  $h$  : tinggi kolom,

$G_i : \Sigma (I_g/L)_i$  ,  $I_g$  : inersia balok,  $L$  : panjang balok

### 2.4.2 Deformasi Lentur

Deformasi dipengaruhi oleh letak tingkat dan keadaan distribusi gaya luar di atas dan di bawah tingkat yang ditinjau. Pada tingkat-tingkat bawah, pengaruh yang ditimbulkan lebih besar dibandingkan pada tingkat-tingkat atas. Struktur dengan kelangsingan yang lebih besar akan mudah mengalami tekuk, karena beban tekuk merupakan fungsi dari momen inersia. Umumnya anjakan maksimum terjadi di tengah kolom. Beban tekuk kritis pada mode ini diperhitungkan dengan rumus berikut

$$P_{icrl} = \frac{7.83EI}{h^2} (1 - 0.2297\beta) \quad (2.6)$$

dengan

$P_{icrl}$  : beban gravitasi total kritis,

$h_2$  : tinggi total struktur,

$\beta$  : rasio bagian fleksibel kolom dengan tinggi kolom.

### 2.4.3 Kombinasi Deformasi Akibat Geser dan Lentur

Untuk kasus kombinasi geser dan lentur mungkin memberikan kontribusi pada terjadi tekuk dapat digambarkan dengan sebuah struktur dengan beban lateral dan beban gravitasi di puncak, besar P kritis pada struktur dengan kondisi di atas adalah

$$\frac{1}{P_{icr}} = \frac{1}{P_{icrg}} + \frac{1}{P_{icrl}} \quad (2.8)$$

dengan

$P_{cr}$  : beban tekuk kritis untuk kombinasi lentur dan geser yang menyebabkan tekuk,

$P_f$  : beban tekuk pada mode deformasi lentur,

$P_s$  : beban tekuk pada mode deformasi geser.

