

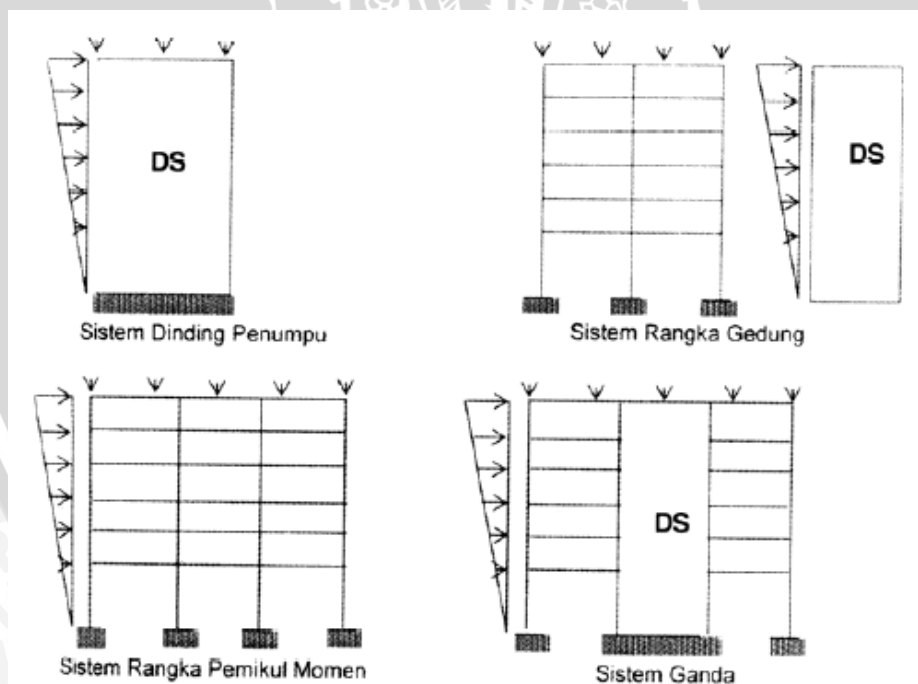
BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Sistem Struktur

Tinggi atau rendahnya suatu bangunan berkaitan erat dengan masalah sistem pembebanan lateral. Semakin tinggi suatu bangunan, maka sistem pembebanan lateral yang berupa beban angin dan beban gempa akan semakin besar pula. Pada perencanaan struktur bangunan tinggi, masalah yang timbul adalah kemampuan dari struktur tersebut sebagai suatu kesatuan sistem (*building system*) untuk menahan beban gempa. (Juwana, 2005: 24).

Semakin tinggi suatu bangunan, pentingnya aksi gaya lateral menjadi makin berarti. Pertimbangan kekakuan menentukan jenis rancangan. Derajat kekakuannya terutama bergantung pada jenis sistem struktur yang dipilih. (Schueller, 1991: 117)

Untuk itu, dikenal beberapa sistem struktur, terutama dalam kaitannya dengan kemampuan suatu struktur untuk menahan beban lateral seperti pada gambar berikut:



Gambar 2.1 Sistem struktur beton bertulang penahan gempa bumi
Sumber: Purwono (2005: 23)

Pada dasarnya setiap struktur pada suatu bangunan merupakan penggabungan berbagai elemen struktur secara tiga dimensi. Fungsi utama dari sistem struktur adalah untuk memikul secara aman dan efektif beban yang bekerja pada bangunan, serta menyalurkannya ke tanah melalui pondasi. Beban yang bekerja pada bangunan terdiri

dari beban vertikal, horizontal, perbedaan temperatur, getaran, dan sebagainya. Dalam berbagai sistem struktur, baik yang menggunakan bahan beton bertulang, baja, maupun komposit, selalu ada komponen (subsistem) yang dapat dikelompokkan dalam sistem yang digunakan untuk menahan gaya gravitasi dan sistem untuk menahan gaya lateral. (Juwana, 2005)

Terdapat 7 sistem dan subsistem struktur penahan gempa menurut SNI 03-1726-2002, yaitu:

1. Sistem dinding penumpu; yaitu sistem struktur yang tidak memiliki rangka ruang pemikul beban gravitasi secara lengkap. Dinding penumpu atau sistem bressing memikul hampir semua beban gravitasi. Beban lateral dipikul dinding geser atau rangka.
2. Sistem rangka gedung; yaitu sistem struktur yang pada dasarnya memiliki rangka ruang pemikul beban gravitasi secara lengkap. Beban lateral dipikul dinding geser atau rangka pengaku.
3. Sistem rangka pemikul momen; yaitu sistem struktur yang pada dasarnya memiliki rangka ruang pemikul beban gravitasi secara lengkap. Beban lateral dipikul rangka pemikul momen terutama melalui mekanisme lentur
4. Sistem ganda; yang terdiri dari rangka ruang yang memikul seluruh beban gravitasi dan pemikul beban lateral berupa dinding geser atau rangka pengaku dengan rangka pemikul momen. Rangka pemikul momen harus direncanakan secara terpisah mampu memikul sekurang-kurangnya 25% dari seluruh beban lateral. Kedua sistem harus direncanakan untuk memikul secara bersama-sama seluruh beban lateral dengan memperhatikan interaksi /sistem ganda.
5. Sistem struktur gedung kolom kantilever; yaitu sistem struktur yang memanfaatkan kolom kantilever untuk memikul beban lateral.
6. Sistem interaksi dinding geser dengan rangka
7. Subsistem tunggal; yaitu subsistem struktur bidang yang membentuk struktur gedung secara keseluruhan.

2.2. Sistem Rangka Pemikul Momen

Di Indonesia, sistem struktur gedung yang umum digunakan adalah Sistem Rangka Pemikul Momen, yang mana beban horizontal akibat gempa akan dipikul terutama melalui mekanisme lentur. Pada saat gempa terjadi, rangka pemikul momen harus berperilaku sebagai rangka daktail supaya integritasnya tetap terjaga sehingga

bangunan terhindar dari kemungkinan mengalami roboh dengan seketika. Perilaku daktail ini hanya dapat dicapai apabila pada saat terbentuknya sendi-sendi plastis pada pelat-balok-kolom mampu mentransfer efek beban lateral gempa tanpa kehilangan kekuatan dan kekakuannya.

Menurut tabel 3 SNI 03-1726-2002 tercantum tiga jenis SRPM yaitu SRPMB (Sistem Rangka Pemikul Momen Biasa), SRPMM (Sistem Rangka Pemikul Momen Menengah), dan SRPMK (Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus), yang mana masing-masing jenis SRPM dibedakan berdasarkan wilayah gempa.

2.2.1. Sistem Rangka Pemikul Momen Biasa (SRPMB)

Sistem Rangka Pemikul Momen Biasa (SRPMB) tidak perlu pendetailan spesial, komponen komponen strukturnya harus memenuhi Pasal 3 sampai dengan 20 SNI 03-2847-2002 dan hanya dipakai untuk wilayah gempa 1 dan 2. (Purwono, 2005: 24)

2.2.2. Sistem Rangka Pemikul Momen Menengah (SRPMM)

Prinsip yang dianut dalam perencanaan SRPMM adalah bahwa semua komponen struktur SRPMM tidak boleh runtuh oleh geser dengan menjamin kuat geser komponen lebih kuat dari kuat lentur nominalnya, dan menjamin tiap ujung komponen SRPMM baik balok maupun kolom tersedia cukup *confinement* atau pengekangan dengan jarak antar tulangan geser (*s*) maksimum tertentu. Tidak ada ketentuan khusus penulangan untuk hubungan balok kolom (HBK). (Purwono, 2005: 14)

2.2.3. Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK)

Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) harus dipakai di wilayah gempa 5 dan 6 dan harus memenuhi persyaratan desain pada pasal 23.2 sampai dengan 23.7 SNI 03-2847-2002 disamping pasal-pasal sebelumnya yang masih relevan. (Purwono, 2005: 25)

2.3. Sistem Ganda

Selain sistem rangka (*frame*) dengan elemen utama berupa balok dan kolom yang sudah lazim digunakan, juga dikenal istilah dinding geser. Dinding geser merupakan salah satu alternatif sistem pengaku lateral untuk gedung beton bertulang. Dalam hubungannya dengan dinding geser, dikenal Sistem Rangka Gedung yang sepenuhnya mengandalkan kekuatan dinding geser untuk menahan beban lateral, dan Sistem Ganda yang secara proporsional menahan beban lateral sesuai kekakuan relatif rangka (balok – kolom) dan dinding gesernya.

Secara umum, menurut SNI-1726-2002 Tabel 3, Sistem Ganda dapat diartikan sebagai kesatuan sistem struktur yang terdiri dari rangka ruang yang memikul seluruh beban gravitasi dan pemikul beban lateral berupa dinding geser atau rangka pengaku dengan rangka pemikul momen. Rangka pemikul momen harus direncanakan secara terpisah mampu memikul sekurang-kurangnya 25% dari seluruh beban lateral. Kedua sistem harus direncanakan untuk memikul secara bersama-sama seluruh beban lateral dengan memperhatikan interaksi/Sistem Ganda.

Menurut Purwono (2005: 25) tipe sistem struktur ini memiliki 3 ciri dasar. Pertama, rangka ruang lengkap berupa SRPM untuk memikul beban gravitasi, yang sekaligus harus bisa memikul sedikitnya 25% dari beban lateral (gempa nominal V). Kedua, dinding struktural (DS) yang memikul sisa beban lateral. Ciri ketiga, SRPM dan DS harus direncanakan untuk menahan beban gempa V secara proporsional berdasarkan kekakuan relatifnya. Pada wilayah gempa 5 dan 6, rangka ruang itu harus didesain sebagai SRPMK dan DS harus sesuai ketentuan SNI 2847 Pasal 23.6.6 yaitu sebagai DSBK (Dinding Struktural Beton Khusus), termasuk ketentuan pada pasal-pasal sebelumnya yang masih berlaku. Untuk wilayah gempa 3 dan 4, SRPM harus didesain sebagai SRPMM dan DS tidak perlu *detailing* khusus. Sedangkan untuk wilayah gempa 1 dan 2, boleh dipakai SRPM biasa dan DS beton biasa.

2.4. Dinding Geser

Pada gedung tinggi, dibutuhkan kekakuan yang memadai untuk menahan beban lateral yang diakibatkan oleh angin dan gempa. Ketika gedung tinggi tidak didesain dengan baik untuk menahan beban tersebut, akan ada tegangan, getaran dan geser yang sangat besar saat beban bekerja. Dampaknya mungkin tidak hanya risiko kerusakan gedung, melainkan juga ketidaknyamanan penghuninya. Ketika dinding beton bertulang dengan kekakuannya yang tinggi ditempatkan pada posisi yang tepat dan strategis, maka hal ini bisa dikatakan sebagai solusi ekonomis untuk memberikan kekuatan yang cukup terhadap beban horizontal. (McCormac, 2006: 554)

Dinding struktural pada bangunan berbentuk rangka (frame building) harus dirancang sedemikian rupa sehingga memiliki kekakuan yang memadai yang diperlukan untuk mengurangi simpangan antar lantai yang disebabkan oleh gempa. Dinding seperti itu disebut dinding geser. Fungsi lainnya adalah untuk mengurangi kemungkinan kehancuran komponen nonstruktural yang ada pada gedung pada umumnya. (Nawy, 2005: 741)

Gedung yang diperkaku dengan dinding geser dianggap lebih efektif daripada gedung dengan rangka kaku, dengan mempertimbangkan pembatasan kehancuran, keamanan secara keseluruhan dan keandalan struktur. Hal ini berdasarkan fakta bahwa dinding geser dianggap lebih kaku daripada elemen rangka biasa sehingga dapat menahan beban lateral yang lebih besar akibat gempa, dan di saat yang bersamaan dapat membatasi simpangan antar lantai. (Nawy, 2005: 741)

Dinding geser adalah unsur pengaku vertikal yang dirancang untuk menahan gaya lateral atau gempa yang bekerja pada bangunan. Bentuk dan penempatan dinding geser mempunyai akibat yang besar terhadap perilaku struktural apabila dibebani secara lateral. (Schueller, 1991: 109)

Lantai yang berlaku sebagai diafragma horizontal meneruskan beban lateral secara merata ke dinding geser. Dianggap bahwa lantai cukup tebal dan tidak mempunyai bukaan besar, dengan kata lain lantai-lantai sangat kaku dan tidak berubah bentuk. Penyebaran gaya lateral ke dinding geser adalah fungsi dari susunan geometrisnya. Apabila resultan dari gaya lateral melalui titik berat dari kekakuan relatif bangunan, maka yang dihasilkan hanyalah reaksi translasi. (Schueller, 1991: 110)

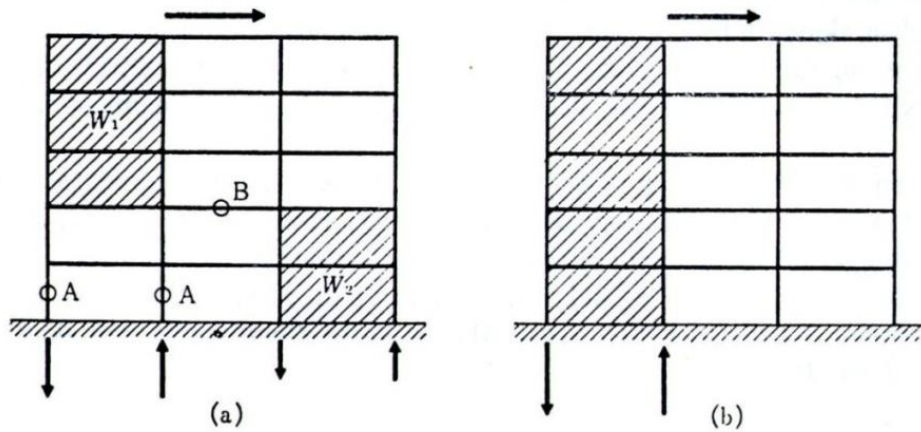
Salah satu hal pokok yang harus dipertimbangkan dalam perencanaan dinding geser pada Sistem Ganda adalah penempatan dinding geser. Dalam sistem gedung tinggi yang bentuknya tidak beraturan, seringkali terjadi eksentrisitas yang berlebihan. Eksentrisitas pada gedung terjadi karena tidak berimpitnya pusat massa dan pusat kekakuan gedung. Eksentrisitas yang besar dapat menyebabkan rotasi pada gedung. Untuk itu, dinding geser harus ditempatkan sedemikian rupa untuk membatasi eksentrisitas itu, atau dengan kata lain agar didapatkan eksentrisitas sekecil mungkin. Selain itu, yang harus menjadi pertimbangan adalah bentuk denah gedung dan tata guna lantai, di mana dinding geser yang menerus umumnya diletakkan di dekat tangga atau lift untuk menghindari terganggunya sirkulasi ruang dan menjaga kenyamanan pengguna gedung.

Lebih jauh, Muto (1990: 28) memberikan penjelasan karakteristik daya tahan dinding geser sebagai berikut:

1. Dinding geser sebaiknya menerus sampai atas

Bila letak dinding geser berbeda antara satu tingkat dengan tingkat lainnya seperti pada gambar 2.2 (a), gaya geser yang terpusat di dinding atas W_1 , harus disalurkan ke dinding bawah W_2 . Dalam hal ini, balok atau pelat B akan memikul gaya tarik dan tekan yang besar. Sebaliknya, pada dinding yang ditunjukkan pada gambar 2.2

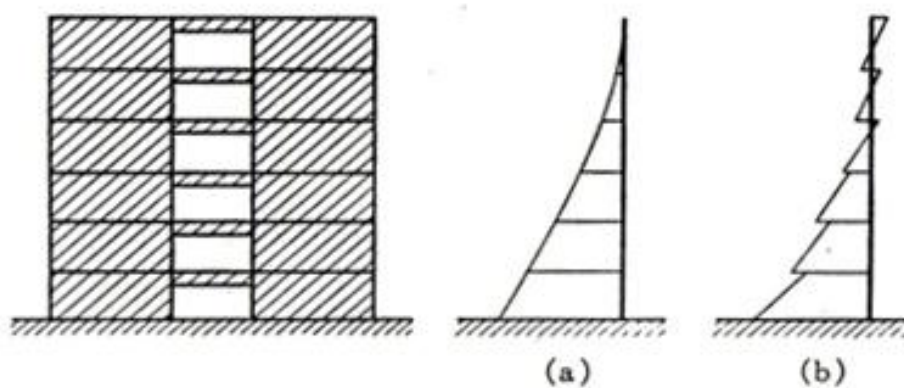
(b), pondasi memikul gaya yang besar karena guling (overtuning moment) dan tarikan ke atas bisa terjadi sehingga menyulitkan perencanaan. Namun, masalah ini bisa diatasi dengan melebarkan dinding di tingkat bawah, memperkuat dengan kerangka melintang yang tegak lurus pada kedua sisi dinding atau memperkuat balok pondasi.



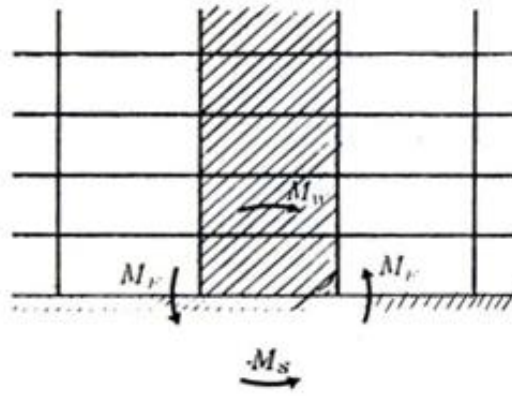
Gambar 2.2 Penempatan dinding struktural
Sumber: Muto (1990: 28)

- Untuk memperoleh dinding geser yang kuat, balok keliling dan balok pondasi sebaiknya diperkuat.

Untuk mengurangi deformasi lentur pada dinding, balok di sekitar dinding harus dibuat kuat dan tegar agar daya tahannya baik dan momen lentur dinding harus diusahakan mendekati momen lentur portal terbuka (Gambar 2.3 b) daripada momen lentur balok kantilever (Gambar 2.3 a). Walaupun balok pada tingkat tengah (*intermediate*) dibuat kuat dan tegar, momen M_w di pondasi tetap besar dan momen penahan M_s dari tanah dan tiang terlalu berbahaya untuk diandalkan. Balok pondasi M_F , sebaiknya memiliki daya tahan yang sangat besar (Gambar 2.4).



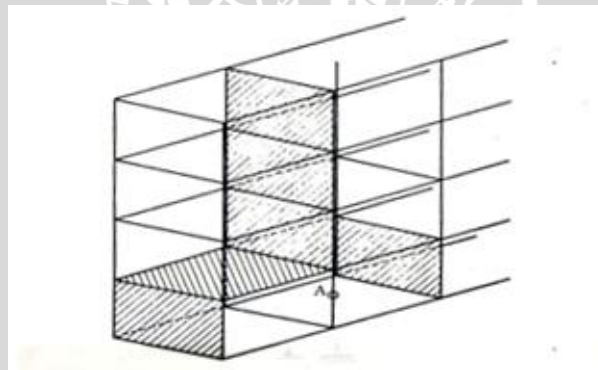
Gambar 2.3 Momen lentur balok kantilever dan portal terbuka
Sumber: Muto (1990: 29)



Gambar 2.4 Momen pada balok pondasi
Sumber: Muto (1990: 29)

3. Bila dinding atas dan bawah tidak menerus atau berseling, gaya gempa yang ditahan oleh dinding harus disalurkan melalui lantai.

Penyaluran gaya harus diperhatikan dengan seksama seperti yang telah dijabarkan sebelumnya. Pada kasus gambar 2.5, gaya aksial yang besar pada batang A harus diperhatikan.



Gambar 2.5 Penempatan dinding struktural yang berseling
Sumber: Muto (1990: 29)

2.5. Analisis Struktur

Analisis struktur menurut cara-cara mekanika teknik yang baku merupakan praperencanaan bagi desain beton bertulang. Bentuk dan besarnya ukuran penampang akibat pembebanan akan menentukan desain. Analisis dengan bantuan komputer dalam mendapatkan bentuk dan besarnya sistem struktur berupa gaya-gaya dalam harus dilakukan dengan model-model matematik yang mensimulasikan keadaan struktural yang sesungguhnya dilihat dari segi sifat bahan dan kekakuan unsur-unsurnya.

Analisis struktur menggunakan parameter-parameter yang sudah ditentukan, baik dalam peraturan maupun pemahaman terhadap sifat-sifat bahan. Analisis struktur

merupakan salah satu langkah terpenting dalam perencanaan struktur, karena hasil dari analisis struktur nantinya akan digunakan untuk menggambarkan kondisi riil dari struktur yang akan dirancang menggunakan model. Hasil yang dimaksud dapat berupa perpindahan (*displacement*), reaksi tumpuan dan gaya dalam.

Dengan berkembangnya teknologi, terutama sistem komputasi, pemodelan struktur bisa dilakukan dengan lebih mudah dan cepat. Banyak program komputer yang sudah lazim digunakan dalam analisis, di antaranya Staad Pro, SAP2000, Etabs, MIDAS, dan lain-lain. Di balik kemudahan yang ditawarkan oleh berbagai program komputer tersebut, perilaku struktural tiap elemen yang dimodelkan harus tetap dikontrol dalam tiap tahapan analisisnya dengan pemahaman yang sudah didapatkan dari literatur maupun pengalaman lapangan.

2.5.1. Perencanaan Dimensi

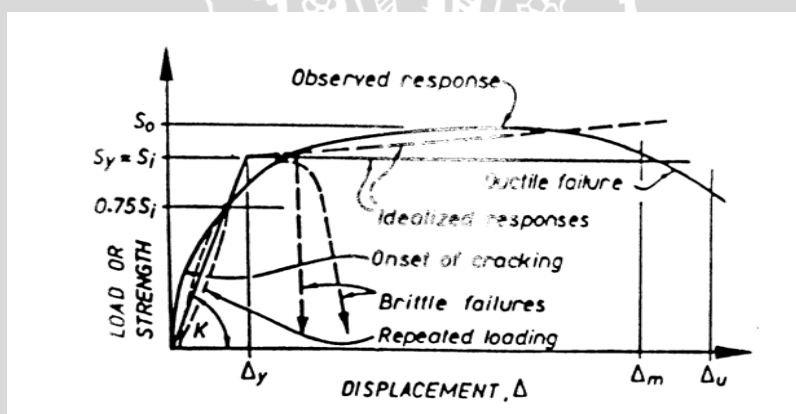
Susunan tubuh makhluk hidup yang ada di alam berbeda-beda tergantung ukuran tubuhnya. Sebagai contoh, susunan tubuh hewan besar seperti gajah tentu saja berbeda drastis dengan anjing ataupun hewan kecil seperti nyamuk. Namun, sampai dengan pertengahan abad ke-17, para ilmuwan berpendapat bahwa sangat memungkinkan untuk membuat struktur yang lebih besar hanya dengan menjiplak bentuk dan proporsi dari struktur yang lebih kecil. Opini yang berkembang adalah bahwa jika rasio antara elemen struktur yang lebih besar dibuat sama identik dengan rasio elemen struktur yang lebih kecil, dua struktur ini akan memiliki perilaku yang sama. Pada tahun 1638, Galileo menolak prinsip ini dengan membuat contoh dari struktur makhluk hidup dan benda mati, yang kemudian digunakan untuk merumuskan gagasan tentang ukuran ultimit untuk struktur. Dia dengan tegas mempertimbangkan pengaruh berat sendiri, gravitasi dan beban pada efisiensi struktur. Prinsip ini kemudian berkembang, dan para insinyur kemudian menyimpulkan bahwa untuk ukuran struktur yang berbeda, juga membutuhkan jenis struktur yang berbeda pula. Sebagai contoh, pada rekayasa jembatan, sudah dipahami bahwa efisiensi tiap jenis jembatan memiliki batas bentang maksimum dan minimum. (Taranath, 1988: 465)

Dari uraian di atas, dapat kita tarik kesimpulan, bahwa struktur dengan bentang dan sistem struktur yang berbeda mempunyai ukuran komponen struktur optimal yang berbeda pula, untuk selanjutnya dijadikan patokan bagi perancang untuk merencanakan desain dan menghitung kekuatan strukturalnya. Sebagai contoh, perancang umumnya membuat dimensi pra-perencanaan untuk komponen balok dengan kisaran minimum

sebesar $1/12$ panjang bentangnya dan maksimum sebesar $1/8$ panjang bentangnya. Dimensi komponen ini nantinya akan dievaluasi lagi, karena struktur yang dibahas adalah stuktur beton bertulang, yang artinya peranan dari tulangan tidak boleh dikesampingkan. Dimensi penampang komponen struktural akan mempengaruhi hasil desain, seperti penempatan dan jumlah tulangan, yang selanjutnya akan mempengaruhi perilaku stuktur secara keseluruhan, sehingga dari perancang yang berbeda masing-masing akan didapatkan pula hasil rancangan dan perilaku struktural yang berbeda.

2.5.2. Kekakuan Struktur

Jika deformasi karena gaya lateral akan dihitung dan dikontrol dengan cermat, perencana harus membuat perkiraan yang realistis dari sifat-sifat struktural yang terkait, yaitu kekakuan, yang merupakan hubungan antara beban atau gaya dengan deformasi struktural yang terjadi. Hubungan ini telah ditetapkan sejak dasar awal mekanika struktur, dengan menggunakan sifat geometris elemen struktur dan modulus elastisitas bahan. (Paulay & Priestley, 1992: 10)



Gambar 2.6 Hubungan beban dan perpindahan pada struktur beton bertulang
Sumber: Paulay & Priestley (1992: 11)

Hubungan nonlinear khusus antara beban yang bekerja dan perpindahan, yang menjelaskan respon dari komponen struktur beton bertulang terhadap perpindahan, ditunjukkan pada gambar 2.6. Jika S_y merupakan kekuatan ideal S_i dari masing-masing elemen, dan Δ_y merupakan deformasi struktural, kemiringan kurva respon elastis linier yang digambarkan, $K = S_y / \Delta_y$ digunakan untuk menghitung kekakuan. Rumus ini berdasarkan pada titik perpotongan kurva beban-perpindahan pada beban sekitar $0,75 S_y$ sebagaimana ditunjukkan pada gambar 2.6, yang dapat dipakai sebagai kekakuan efektif yang mendekati kekuatan lentur yang penting saat memperkirakan respon struktur untuk memenuhi syarat kemampuan layan. (Paulay & Priestley, 1992: 11)

Berdasarkan uraian di atas, kekakuan dapat diartikan sebagai gaya per satuan deformasi, atau dengan kata lain, gaya yang diperlukan untuk menahan satu satuan deformasi. Sehingga, untuk membatasi deformasi pada struktur, masing-masing komponennya harus direncanakan dengan baik agar memiliki kekakuan yang memadai. Jika gaya disimbolkan dengan P , dan perpindahan disimbolkan dengan Δ , maka rumus kekakuan dapat juga dituliskan:

$$K = \frac{P}{\Delta} \quad (2-1)$$

Kekakuan struktur merupakan salah satu parameter penting dalam kaitannya terhadap ketahanan terhadap gempa. Seringkali, untuk suatu struktur yang kekakuannya kurang memadai untuk ketahanan terhadap gempa, ditambahkan komponen untuk meningkatkan ketahanan terhadap beban lateral. Komponen yang dimaksud bisa berupa dinding geser yang sudah dijelaskan sebelumnya, rangka pengaku (*bracing*) dan sebagainya. Kekakuan struktur erat sekali kaitannya dengan dimensi tiap komponen strukturalnya, sehingga perencanaan dimensi akan sangat berpengaruh terhadap kekakuan struktur yang direncanakan secara keseluruhan. Dalam kaitannya dengan ketahanan struktur terhadap gempa, kekakuan geserlah yang menjadi parameter, sehingga momen inersia penampang dalam arah gempa yang ditinjau yang berperan besar. Sehingga rumus kekakuan dapat dituliskan sebagai berikut:

$$K = \frac{E.I}{l} \quad (2-2)$$

Keterangan:

K = kekakuan komponen struktur

E = modulus elastisitas bahan, dalam hal ini beton, $E_c = 4700\sqrt{f'c}$ (dalam Mpa)

I = momen inersia penampang

l = panjang komponen struktur

Dalam tingkat yang sama, yang berarti panjang tiap komponen struktur yang menahan gempa (kolom dan dinding geser) adalah sama, maka nilai kekakuan bisa didapatkan dengan membandingkan nilai momen inersia penampang komponen-komponen tersebut.

Dalam perencanaan struktur 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,

SNI-03-1726-2002 telah memberikan ketentuan momen inersia penampang unsur struktur dapat ditentukan sebesar momen inersia penampang utuh dikalikan dengan suatu persentase efektifitas penampang sebagai berikut:

- untuk kolom dan balok rangka beton bertulang terbuka : 75%
- untuk dinding geser beton bertulang kantilever : 60%

2.5.3. Pembebanan

Pada prinsipnya pembebanan yang akan diperhitungkan dalam perencanaan suatu gedung secara garis besar digolongkan dalam empat jenis pembebanan yaitu sebagai berikut: (Departemen Pekerjaan Umum, 1983: 7)

1. Beban Mati, yang mencakup semua beban yang disebabkan oleh berat sendiri struktur yang bersifat tetap, termasuk segala unsur tambahan, penyelesaian-penyelesaian, mesin-mesin, serta peralatan yang merupakan bagian yang sifatnya tidak terpisahkan oleh gedung.
2. Beban Hidup, mencakup semua beban yang terjadi akibat penghunian atau penggunaan gedung. Untuk penggunaan gedung secara umum, beban hidup bekerja pada lantai dan atap gedung. Beban hidup pada lantai gedung harus diambil menurut tabel 3.1 PPIUG 1983. Beban hidup tersebut sudah termasuk perlengkapan ruang sesuai dengan kegunaan lantai ruang yang bersangkutan. Sedangkan pada lantai bangunan, beban hidup termasuk beban dari air hujan (sesuai dengan kemiringan atap) dan struktur *canopy* serta landasan helikopter (bila ada).
3. Beban Angin, mencakup semua beban yang bekerja pada gedung atau bagian gedung yang disebabkan oleh selisih tekanan udara.
4. Beban Gempa, mencakup semua beban statik ekuivalen yang bekerja pada gedung atau bagian gedung yang menirukan pengaruh dari gerakan tanah akibat gempa tersebut. Dalam hal pengaruh gempa pada struktur gedung ditentukan berdasarkan suatu analisis dinamik, maka yang diartikan dengan beban gempa disini adalah gaya-gaya di dalam struktur tersebut yang terjadi oleh gerakan tanah akibat gempa tersebut. Beban gempa untuk gedung diatur dalam SNI 03-1726-2002.

Struktur dan komponen struktur harus direncanakan hingga semua penampang mempunyai kuat rencana minimum sama dengan kuat perlu, yang dihitung berdasarkan kombinasi beban dan gaya terfaktor yang sesuai dengan: (SNI 03-1726-2002, 2002: 59)

$$U = 1,4 D \quad (2-3)$$

$$U = 1,2 D + 1,6 L + 0,5 (A \text{ atau } R) \quad (2-4)$$

$$U = 1,2 D + 1,0 L \pm 1,6 W + 0,5 (A \text{ atau } R) \quad (2-5)$$

$$U = 0,9 D \pm 1,6 W \quad (2-6)$$

$$U = 1,2 D + 1,0 L \pm 1,0 E \quad (2-7)$$

$$U = 0,9 D \pm 1,0 E \quad (2-8)$$

Keterangan :

D : beban mati yang diakibatkan oleh berat konstruksi permanen,

L : beban hidup yang ditimbulkan oleh penggunaan gedung,

A : beban atap,

R : beban hujan,

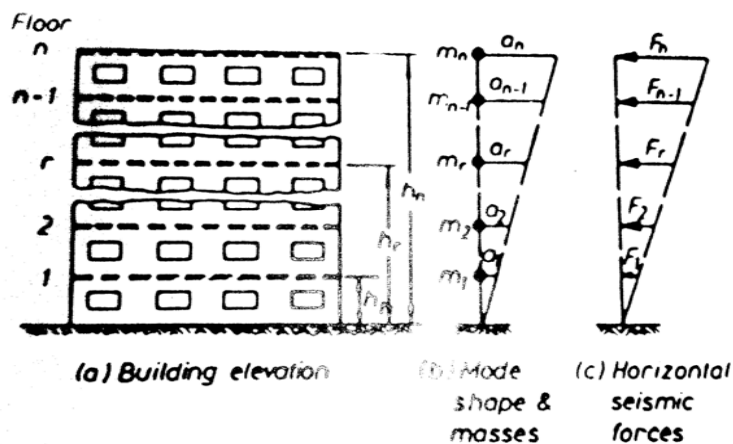
W : beban angin,

E : beban gempa.

Dalam perencanaan struktur gedung, arah utama pengaruh Gempa Rencana harus ditentukan sedemikian rupa, sehingga memberi pengaruh terbesar terhadap unsur-unsur subsistem dan sistem struktur gedung secara keseluruhan. Untuk mensimulasikan arah pengaruh Gempa Rencana yang sembarang terhadap struktur gedung, pengaruh pembebanan gempa dalam arah utama yang ditentukan menurut SNI 03-1726-2002 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%.

2.5.4. Analisis Statis Ekuivalen

Analisis statik ekuivalen merupakan metode yang paling sederhana dan paling banyak digunakan untuk menentukan beban gempa rencana. Jika metode ini digabungkan dengan filosofi desain kapasitas, maka sudah cukup untuk mendapatkan desain yang memadai, dengan syarat, daktilitas hanya berlaku pada zona plastis tertentu, dan deformasi inelastis, seperti akibat geser dibatasi. Metode ini memakai asumsi bahwa respon gedung terhadap beban gempa terjadi pada ragam dinamik pertama, yang ekuivalen dengan ragam statik. Untuk itulah metode ini disebut analisis statik ekuivalen. Respon yang terjadi, terutama pada gedung yang kurang dari 10 lantai, seringkali diasumsikan linier. (Paulay & Priestley, 1992: 83)



Gambar 2.7 Analisis Statik Ekuivalen untuk menentukan gaya geser dasar
 Sumber: Paulay & Priestley (1992: 83)

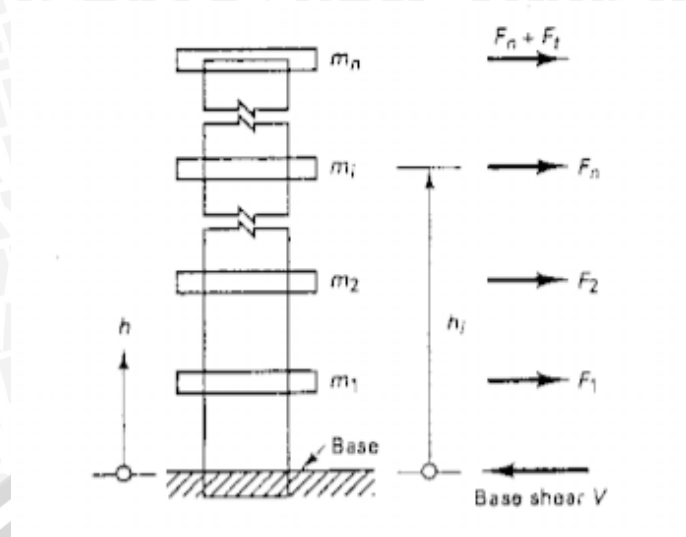
Berikut ini merupakan langkah-langkah analisis statik ekuivalen:

1. Hitung waktu getar alami pertama gedung
2. Tentukan koefisien gaya geser dasar yang memenuhi
3. Hitung gaya geser dasar (V) berdasarkan berat total gedung
4. Distribusikan gaya geser dasar untuk tiap lantai struktur gedung (F)
5. Analisis struktur dengan pengaruh beban lateral untuk mendapatkan gaya-gaya dalam, seperti momen lentur dan gaya geser
6. Perkirakan perpindahan struktur dan penyimpangan tiap lantai

Berikut ini akan dijelaskan secara rinci tiap langkah di atas:

1. Waktu getar alami pertama gedung
 Waktu getar alami pertama T dari sebuah sistem dengan satu derajat kebebasan adalah waktu yang dibutuhkan untuk melakukan satu siklus getar pada pembebanan dinamis. (Nawy, 2005: 715)

Struktur beton bertulang pada umumnya merupakan sistem berderajat kebebasan banyak (lebih dari satu), seperti pada gambar 2.8. Dalam kasus ini, massa struktural dapat diasumsikan terpusat pada *node* yang terletak pada tiap lantai, yang menghasilkan banyak ragam dengan frekuensi yang berbeda untuk tiap ragamnya. Periode alami gabungan T kemudian dievaluasi dengan mempertimbangkan distribusi massa dan kekakuan. (Nawy, 2005: 716)



Gambar 2.8 Model struktur gedung bertingkat
 Sumber: Nawy (2005: 716)

Harus dipahami, bahwa sebuah struktur dirancang untuk mampu menahan beban gempa melalui deformasi inelastis yang besar dan energi disipasi melalui mekanisme retak dan kerusakan material secara terbatas, tanpa kehilangan stabilitasnya secara keseluruhan. Maka akan sangat tidak ekonomis untuk merancang sistem yang mampu menahan gempa yang hanya berdeformasi secara elastis. Peraturan-peraturan mencantumkan hal ini sebagai prinsip dasar, khususnya untuk gempa besar yang memungkinkan kerusakan struktural. (Nawy, 2005: 716)

Untuk mencegah penggunaan struktur gedung yang terlalu fleksibel, nilai waktu getar alami fundamental T_1 dari struktur gedung harus dibatasi, bergantung pada koefisien untuk Wilayah Gempa tempat struktur gedung berada dan jumlah tingkatnya n menurut persamaan:

$$T_1 < \zeta \cdot n \tag{2-9}$$

di mana koefisien ζ ditetapkan menurut Tabel 8 SNI 03-1726-2002.

Tabel 2.1 Koefisien yang membatasi waktu getar alami Fundamental gedung

Wilayah Gempa	ζ
1	0,20
2	0,19
3	0,18
4	0,17
5	0,16
6	0,15

Sumber: SNI 03-1726-2002 (2002: 22)

2. Koefisien gaya geser dasar

Koefisien gaya geser merupakan faktor pengali yang dipengaruhi oleh faktor respons gempa C berdasarkan zona gempa, faktor keutamaan gedung I, faktor reduksi gempa R berdasarkan jenis struktur.

Untuk berbagai kategori gedung, bergantung pada probabilitas terjadinya keruntuhan struktur gedung selama umur gedung dan umur gedung tersebut yang diharapkan, pengaruh Gempa Rencana terhadapnya harus dikalikan dengan suatu Faktor Keutamaan I menurut persamaan:

$$I = I_1 \cdot I_2 \quad (2-10)$$

Di mana I_1 adalah Faktor Keutamaan untuk menyesuaikan perioda ulang gempa berkaitan dengan penyesuaian probabilitas terjadinya gempa itu selama umur gedung, sedangkan I_2 adalah Faktor Keutamaan untuk menyesuaikan perioda ulang gempa berkaitan dengan penyesuaian umur gedung tersebut. Faktor-faktor Keutamaan I_1 , I_2 dan I ditetapkan menurut Tabel 1 SNI 03-1726-2002.

Tabel 2.2 Faktor Keutamaan I untuk berbagai kategori gedung dan bangunan

Kategori Gedung	Faktor Keutamaan		
	I_1	I_2	I
Gedung umum seperti untuk perumahan, perniagaan dan perkantoran	1,0	1,0	1,0
Monumen dan bangunan monumental	1,0	1,6	1,6
Gedung penting pasca gempa seperti rumah sakit, instalasi air bersih, pembangkit tenaga listrik, pusat penyelamatan dalam keadaan darurat, fasilitas radio dan televisi.	1,4	1,0	1,4
Gedung untuk menyimpan bahan berbahaya seperti gas, produk minyak bumi, asam, bahan beracun.	1,6	1,0	1,6
Cerobong, tangki di atasa menara.	1,5	1,0	1,5

Sumber: SNI 03-1726-2002 (2002: 12)

Faktor reduksi gempa R berdasarkan jenis struktur, dipengaruhi oleh perilaku dan kemampuan masing-masing sistem struktur untuk menahan gempa, dalam hal ini membentuk sendi-sendi plastis untuk memancarkan gaya gempa (disipasi energi) tanpa kehilangan stabilitasnya, atau dikenal dengan duktilitas.

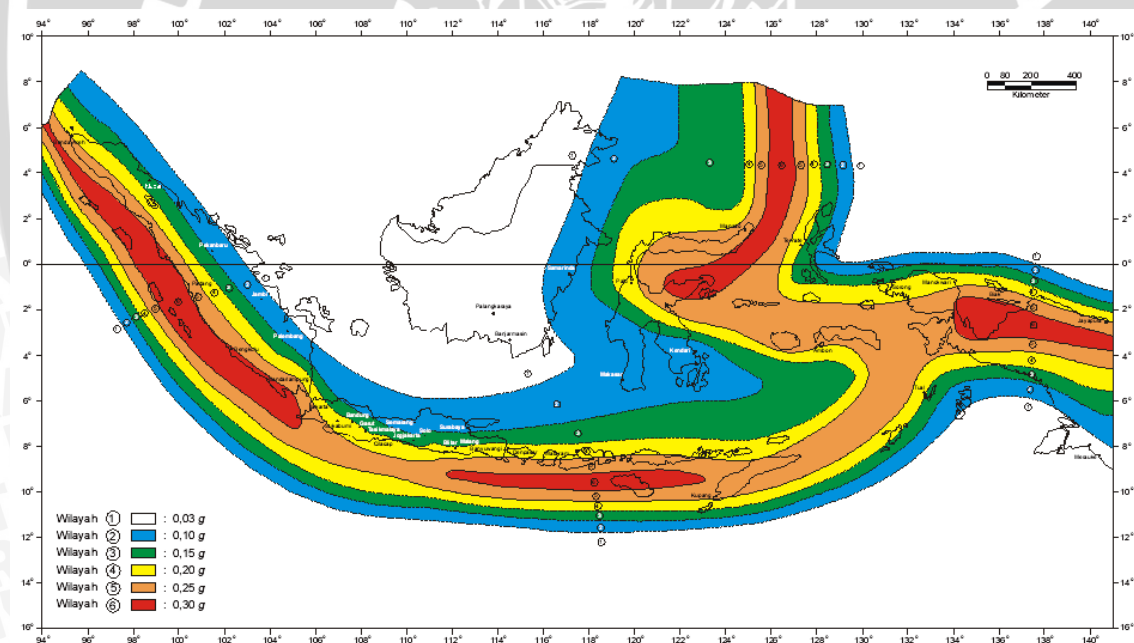
Tabel 3 SNI 03-1726-2002 memberikan batasan maksimum untuk faktor reduksi berdasarkan sistem struktur. Khusus untuk Sistem Ganda yang merupakan topik skripsi ini disajikan pada tabel berikut:

Tabel 2.3 Faktor daktilitas maksimum, faktor reduksi gempa maksimum, faktor tahanan lebih struktur dan faktor tahanan lebih total untuk Sistem Ganda

Sistem dan subsistem struktur gedung	Uraian sistem pemikul beban gempa	μ_n	R_n Pers. (6)	f Pers. (39)
4. Sistem ganda (Terdiri dari: 1) rangka ruang yang menikul 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

Sumber: SNI 03-1726-2002 (2002: 12)

Dalam kaitannya dengan faktor respons gempa, telah diatur pembagian zona gempa dalam SNI-03-1726-2002 pasal 4.7.

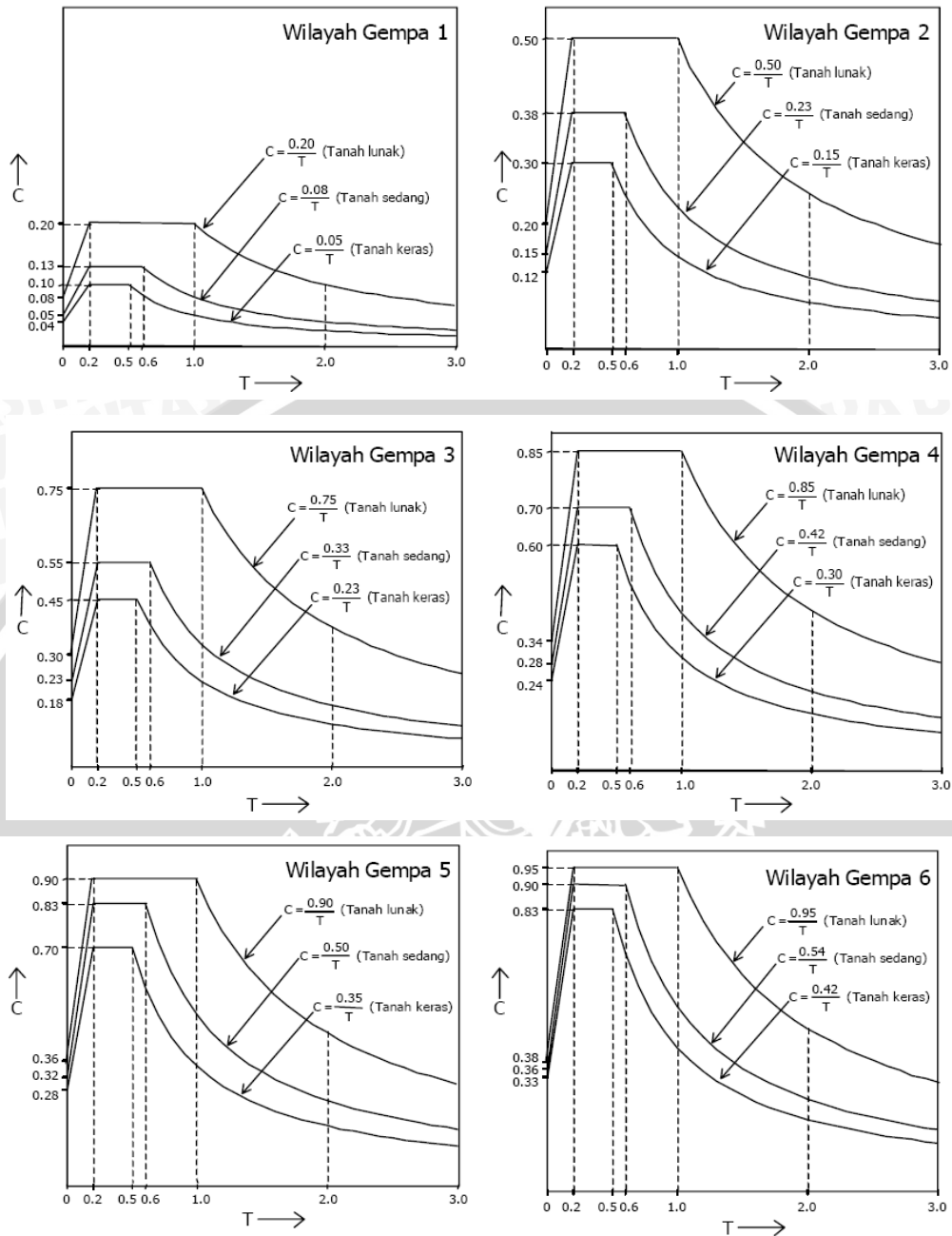


Gambar 2.9 Wilayah Gempa Indonesia dengan percepatan puncak batuan dasar dengan periode ulang 500 tahun

Sumber: SNI 03-1726-2002 (2002: 22)

Selanjutnya, dari peta gempa tersebut dapat digambarkan respon spektrum pada masing-masing wilayah gempa dan jenis-jenis tanah, seperti ditampilkan pada Gambar 2.10 berikut ini:





Gambar 2.10 Respons Spektrum Gempa Rencana
Sumber: SNI 03-1726-2002 (2002: 22)

3. Gaya geser dasar (V) berdasarkan berat total gedung
Gaya geser dasar nominal dirumuskan sebagai berikut:

$$V = \frac{C_1 \cdot I \cdot W_t}{R} \quad (2-11)$$

Keterangan:

C_1 = Faktor Respons Gempa dari Spektrum Respons Gempa Rencana untuk T_1

I = Faktor Keutamaan gedung

W_t = Berat total gedung

R = Faktor reduksi gempa representatif dari struktur gedung yang bersangkutan

4. Distribusi gaya geser dasar untuk tiap lantai struktur gedung (F)

Gaya geser dasar nominal yang didapatkan pada langkah ke-3 di atas akan didistribusikan menjadi gaya geser dasar horizontal untuk tiap lantainya (F_i) yang dirumuskan sebagai berikut:

$$F_i = \frac{W_i \cdot z_i \cdot V}{\sum W_i \cdot z_i} \quad (2-12)$$

Keterangan:

F_i = Gaya geser horizontal pada lantai ke- i

V = Gaya geser total

W_i = Berat bangunan lantai ke- i

z_i = Tinggi lantai ke- i terhadap muka tanah

2.6. Kinerja Struktur Gedung

2.6.1. Kinerja Batas Layan

Kinerja batas layan struktur gedung ditentukan oleh simpangan antar-tingkat akibat pengaruh gempa rencana, yaitu untuk membatasi terjadinya pelelehan baja dan peretakan beton yang berlebihan, disamping untuk mencegah kerusakan non-struktur dan ketidaknyamanan penghuni. Simpangan antar-tingkat harus dihitung dari simpangan struktur gedung tersebut akibat pengaruh gempa nominal yang telah dibagi dengan faktor skala. Menurut SNI 03-1726-2002 pasal 8.1.2, untuk memenuhi persyaratan kinerja batas layan struktur gedung, dalam segala hal simpangan antar-tingkat yang dihitung dari simpangan struktur gedung tidak boleh melampaui $0,03/R$ kali tinggi tingkat yang bersangkutan atau 30 mm, bergantung yang mana yang nilainya terkecil.

2.6.2. Kinerja Batas *Ultimate*

Kinerja batas ultimit struktur gedung ditentukan oleh simpangan dan simpangan antar-tingkat maksimum struktur gedung akibat pengaruh gempa rencana dalam kondisi struktur gedung diambang keruntuhan, yaitu untuk membatasi kemungkinan terjadinya keruntuhan struktur gedung yang dapat menimbulkan korban jiwa dan untuk mencegah benturan berbahaya antar gedung atau antar bagian struktur gedung yang dipisah dengan sela pemisah (sela dilatasi). Sesuai SNI-03-1726-2002 pasal 8.2.1, simpangan dan simpangan antar-tingkat harus dihitung dari simpangan struktur gedung akibat dari

pembebanan gempa nominal, dikalikan dengan suatu faktor pengali ξ yaitu sebagai berikut :

- Untuk struktur gedung beraturan $\xi = 0,7 R$
- Untuk struktur gedung tidak beraturan $\xi = 0,7 R/\text{faktor skala}$

2.7. Penulangan Dinding Geser

2.7.1. Penulangan Geser

Nawy (2005: 742) menjelaskan, jika dinding geser direncanakan untuk menerima gaya geser akibat gempa $V_u > A_{cv}\sqrt{f'_c}$ maka harus dipasang tulangan dengan ratio $\rho_v \geq 0,0025$. Jarak penulangan tidak boleh melebihi 18 inci (45 cm). Jika $V_u < A_{cv}\sqrt{f'_c}$ maka ratio tulangan bisa dikurangi menjadi 0,0012 untuk tulangan no.5 atau yang lebih kecil dan 0,0015 untuk tulangan deform yang lebih besar. Penulangan geser harus menerus dan menyebar pada bidang geser. Setidaknya harus dipakai dua lapis tulangan bila gaya geser terfaktor di dalam bidang dinding melebihi $2A_{cv}\sqrt{f'_c}$.

SNI 03-2847-2002 pasal 23.2.6)(1) menyebutkan bahwa rasio penulangan ρ_v dan ρ_n untuk dinding struktural tidak boleh kurang dari 0,0025 pada arah sumbu-sumbu longitudinal dan transversal. Spasi tulangan untuk masing-masing arah pada dinding struktural tidak boleh melebihi 450 mm. Paling sedikit dua lapis tulangan harus dipasang pada dinding apabila gaya geser bidang terfaktor yang dibebankan ke dinding melebihi $\frac{1}{6}A_{cv}\sqrt{f'_c}$. Kuat geser nominal, V_n , dinding struktural tidak diperkenankan lebih daripada:

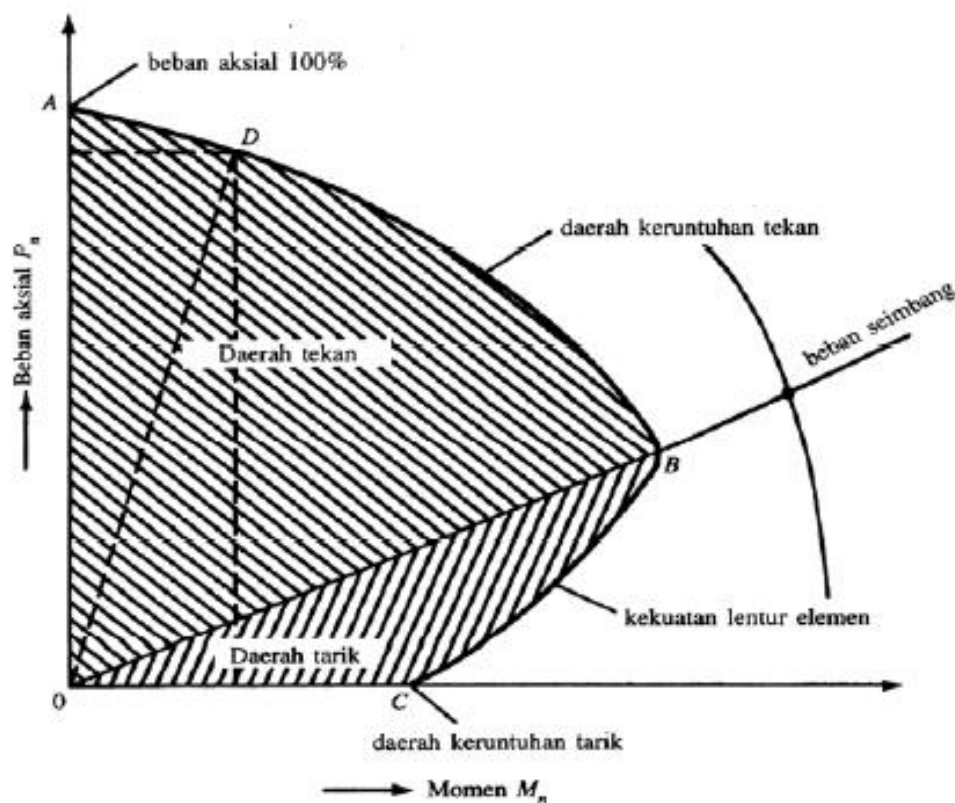
$$V_n = A_{cv}(\alpha\sqrt{f'_c} + \rho_n f_y) \quad (2-13)$$

Di mana koefisien $\alpha = 1/4$ saat $h_w/l_w \leq 1,5$ dan $\alpha = 1/6$ saat $h_w/l_w \geq 2,0$, dan dapat digunakan interpolasi linier untuk nilai-nilai di antaranya.

Dinding harus mempunyai tulangan geser tersebar yang memberikan tahanan dalam dua arah orthogonal pada bidang dinding. Apabila rasio h_w/l_w tidak melebihi 2,0, rasio penulangan ρ_v tidak boleh kurang daripada rasio penulangan ρ_n . Kuat geser nominal sistem dinding struktural yang secara bersama-sama memikul beban lateral tidak boleh melebihi $(\frac{2}{3})A_{cv}\sqrt{f'_c}$, dengan A_{cv} adalah luas penampang total sistem dinding struktural, dan kuat geser nominal tiap dinding individual tidak boleh melebihi $(\frac{5}{6})A_{cp}\sqrt{f'_c}$, dengan A_{cp} adalah luas penampang dinding yang ditinjau.

2.7.2. Penulangan Lentur dan Aksial pada Komponen Batas

Menurut Nawy (2005: 741) dinding geser yang rasio tinggi dibanding panjangnya melebihi 2, perilakunya lebih seperti kantilever vertikal. Untuk itu, kekuatan lenturnya lebih menentukan dibandingkan kekuatan gesernya. Dengan kata lain, dinding geser dapat dimodelkan seperti kolom. Sehingga, tulangan geser vertikal yang telah terpasang, dapat dianalisis kapasitasnya dengan bantuan diagram interaksi seperti pada kolom.



Gambar 2.11 Diagram Interaksi
Sumber: McCormac (2006: 288)

Diagram interaksi sangat berguna untuk mempelajari kekuatan kolom dengan proporsi beban dan momen yang bervariasi. Jika kombinasi beban berada di dalam kurva, maka menunjukkan belum terjadi keruntuhan pada penampang. Namun jika kombinasi beban berada di luar kurva berarti menunjukkan sudah terjadi keruntuhan. Jika kolom dibebani sampai runtuh hanya dengan beban aksial, maka keruntuhan akan terjadi pada titik A (Gambar 2.11). Beranjak dari titik A pada kurva, kapasitas beban aksial makin berkurang sesuai dengan peningkatan kekuatan lentur. Pada dasar kurva, titik C menunjukkan kekuatan lentur jika penampang hanya menerima beban lentur tanpa terjadi beban aksial. Dan di antara titik ekstrim antara A dan C, keruntuhan

penampang terjadi karena kombinasi aksial dan lentur. Titik B disebut titik seimbang yang menunjukkan terjadi beban seimbang, yang secara teoretis berarti keruntuhan tekan dan kelelahan tarik terjadi secara bersamaan.

Komponen batas menurut SNI 03-2847-2002 pasal 23.1 adalah bagian sepanjang tepi dinding dan diafragma yang diperkuat oleh tulangan longitudinal dan transversal. Komponen batas tidak perlu diberi ketebalan melebihi tebal dinding atau diafragma. Pasal 23.6(6(2a)) menyatakan bahwa daerah tekan pada dinding geser perlu diberi komponen batas apabila:

$$c > \frac{l_w}{600(\delta_u / h_w)} \quad , \text{ dengan } \frac{\delta_u}{h_w} \geq 0,007 \quad (2-14)$$

Nilai c merupakan jarak dari serat tekan terluar ke sumbu netral. Untuk menghitung c , perlu dihitung terlebih dahulu kebutuhan tulangan vertikal DS yang kedua ujung memiliki komponen batas dengan ketebalan minimal sama dengan dinding geser atau lebih besar. l_w merupakan panjang bentang bersih dinding geser, δ_u merupakan simpangan total yang terjadi pada gedung akibat beban gempa, dan h_w merupakan tinggi bersih dinding geser. Nilai c ditentukan konsisten dengan terjadinya δ_u dan harus diperoleh dari dua kombinasi beban aksial yaitu:

$$P_u = 1,2 D + 0,5 L \quad \text{dan} \quad (2-15)$$

$$P_u = 0,9 D \quad (2-16)$$

Bila komponen batas khusus diperlukan sesuai 23.6(6(2(a))) maka tulangnya harus diteruskan secara vertikal dari penampang kritis sejarak tidak kurang daripada nilai terbesar dari l_w atau $M_u/4V_u$.

Bila komponen batas pada dinding struktural tidak diperlukan, maka persyaratan berikut harus dipenuhi, yaitu:

$$\rho_g > \frac{2,8}{f_y} \quad , \text{ dan} \quad (2-17)$$

$$V_u \geq A_{cv} \sqrt{f'_c} \quad (2-18)$$