

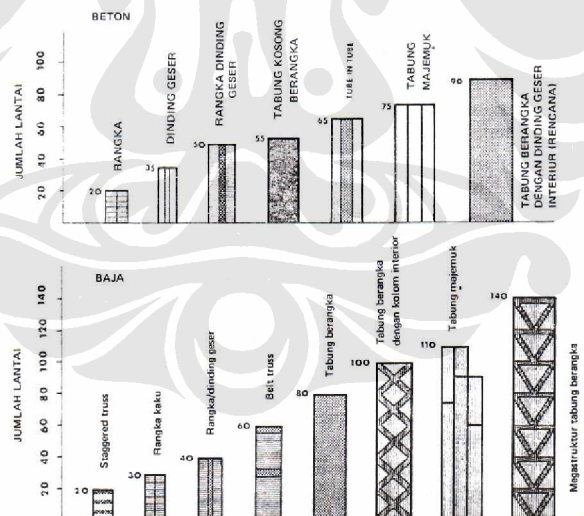
BAB II

DASAR TEORI

2.1 SISTEM STRUKTUR

Sistem struktur adalah kombinasi dari berbagai elemen struktur yang disusun sedemikian rupa sehingga membentuk satu kesatuan struktur yang dapat memikul beban-beban yang direncanakan⁴.

Sistem struktur sudah dikembangkan sejak zaman dahulu kala, akan tetapi sistem struktur modern baru mulai berkembang pada abad ke 19. Perkembangan sistem struktur pada saat ini sudah sangat maju, sehingga bangunan gedung dapat mencapai lebih dari 100 tingkat. Perbandingan berbagai sistem struktur terhadap ketinggian bangunan dapat dilihat pada gambar 2.1 dibawah ini. Perbandingan sistem struktur tersebut dikelompokkan dalam dua bagian berdasarkan materialnya, yaitu baja dan beton.



Gambar 2.1^[12]

Perbandingan umum antara sistem struktur dengan jumlah tingkat

⁴ Tumilar, Steffie, "Pelatihan Perencanaan Struktur Bangunan Tinggi", PT. Arkonin, Jakarta, 2006. (Hal. 12)

Pertimbangan dalam memilih sistem struktur bergantung pada hal-hal berikut ini⁵ :

1. Pertimbangan ekonomis
2. Kondisi tanah
3. Rasio tinggi dengan lebar bangunan
4. Pertimbangan fabrikasi dan pelaksanaan pembangunan
5. Pertimbangan mekanis
6. Pertimbangan tingkat bahaya kebakaran
7. Pertimbangan lokasi
8. Pertimbangan ketersediaan bahan konstruksi utama

Sistem dan subsistem struktur beton bertulang dapat berupa :

1. Portal
2. Dinding geser
3. Lantai diafragma
4. Sistem ganda
5. Outrigger
6. Core wall
7. Sistem tabung
8. Sistem majemuk

Sistem struktur yang dibahas dalam tugas akhir ini adalah sistem dan subsistem struktur beton bertulang, yaitu portal (*frame*), dinding geser dan sistem ganda. Pembahasan lebih lanjut mengenai sistem struktur tersebut dapat dilihat pada subbab-subbab selanjutnya berikut ini.

2.1.1 PORTAL BETON BERTULANG

Portal beton bertulang adalah gabungan dari elemen kolom dan balok beton bertulang dengan hubungan yang kaku atau monolit membentuk suatu kerangka.

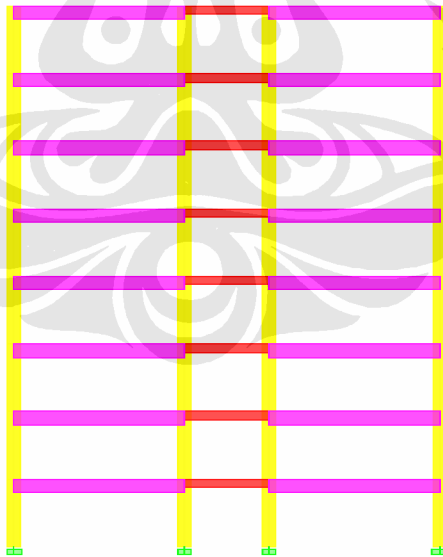
⁵ Schueller, Wolfgang, "High-Rise Building Structures", John Wiley & Sons, Inc, 1977. (Hal. 85)

Dalam Peraturan Gempa SNI 03-1726-2002, portal (*frame*) disebut sebagai rangka pemikul momen.

Portal merupakan sistem yang baik untuk menahan beban gravitasi dan gempa dengan mentransmisikan semua beban gravitasi dan gempa melalui kapasitas geser, aksial dan bending dari elemen struktur balok dan kolom struktur serta hubungan keduanya (*joint* balok-kolom).

Dalam menahan beban gempa, tipe struktur jenis portal merupakan struktur yang paling fleksibel. Hal tersebut disebabkan oleh kemampuan portal untuk berdeformasi dan tingkat daktilitasnya, sehingga portal dapat menyerap energi melalui proses deformasi tersebut. Deformasi yang terjadi pada portal adalah jenis deformasi mode geser.

Portal beton bertulang yang terdiri dari beton yang pada dasarnya bersifat getas, maka tulangan baja yang bersifat daktil sangat menentukan daktilitas struktur ataupun elemennya. Jenis, jumlah dan penempatan tulangan tersebut akan mempengaruhi perilaku struktur ataupun elemen struktur.



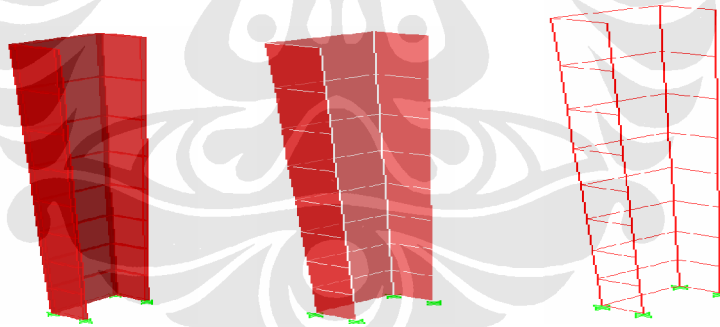
Gambar 2.2

Sistem Struktur Portal (Balok & Kolom)

2.1.2 DINDING GESER BETON BERTULANG

Struktur bangunan dengan dinding geser merupakan salah satu konsep penyelesaian masalah gempa dalam bidang Teknik Sipil. Berdasarkan Standar Perencanaan Gempa untuk Struktur Gedung SNI 03-1726-2002, dinding geser beton bertulang kantilever merupakan suatu subsistem struktur gedung yang fungsi utamanya adalah untuk memikul beban geser akibat pengaruh gempa rencana (dengan perioda ulang 500 tahun, probabilitas 10% pada umur gedung 50 tahun), yang runtuhnya disebabkan oleh momen lentur (bukan oleh gaya geser) dengan terjadinya sendi plastis pada kakinya, dimana nilai momen lelehnya dapat mengalami peningkatan terbatas akibat pengerasan tegangan⁶. Dengan kata lain dinding geser dapat didefinisikan sebagai suatu sub-struktur yang membantu struktur utama menahan gaya geser yang besar akibat pengaruh gempa yang direncanakan sedemikian rupa sehingga dapat runtuh akibat terjadinya sendi plastis pada kakinya dan bukan akibat gaya geser.

Adapun dalam penentuan dimensi dari dinding geser ini ada beberapa hal yang harus diperhatikan, dimana salah satunya adalah bahwa rasio antara tinggi dan lebar dinding geser tidak boleh kurang dari 2 dan lebar dinding geser tidak boleh kurang dari 1,5 meter⁷.



Gambar 2.3

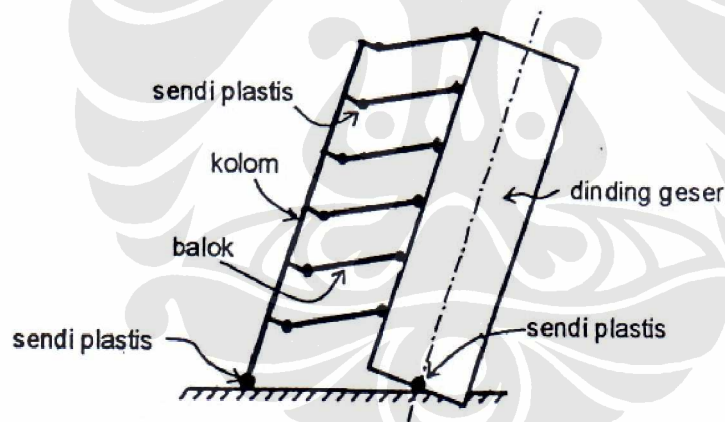
Sistem Struktur Dinding Geser (*Shear Wall*)

⁶ Departemen Pemukiman dan Pengembangan Prasarana Wilayah, “*Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Bangunan Gedung*”, SNI 03-1726-2002. (Hal. 6)

⁷ Departemen Pemukiman dan Pengembangan Prasarana Wilayah, “*Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Bangunan Gedung*”, SNI 03-1726-2002. (Hal. 6)

Pemasangan dinding geser pada struktur utama sebaiknya simetris. Hal ini dilakukan karena apabila pemasangan dinding geser tidak simetris, maka efek yang dapat ditimbulkan adalah terjadinya mode rotasi pada mode-mode awal struktur yang berbahaya bagi keamanan dan kenyamanan pengguna gedung.

Salah satu hal yang perlu diperhatikan dalam perencanaan dinding geser adalah bahwa dinding geser tidak boleh runtuh akibat gaya geser. Hal ini disebabkan karena fungsi utama dari dinding geser adalah untuk menahan gaya geser yang besar akibat gempa, sehingga apabila dinding geser tersebut runtuh akibat gaya geser itu sendiri, maka otomatis keseluruhan struktur akan runtuh karena tidak ada lagi yang dapat menahan gaya geser tersebut. Dinding geser hanya boleh runtuh akibat adanya momen plastis yang menyebabkan timbulnya sendi plastis pada bagian kakinya (lihat gambar 2.4). Penempatan dinding geser dilakukan sedapat mungkin pusat massa dan pusat kekakuan dinding berimpit, sehingga diharapkan tidak ada gaya torsi pada saat gempa bekerja⁸.



Gambar 2.4^[5]

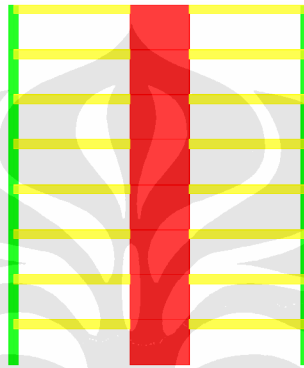
Mekanisme keruntuhan ideal suatu struktur gedung

dengan sendi plastis terbentuk pada ujung-ujung balok dan kaki kolom

⁸ Schueller, Wolfgang, "High-Rise Building Structures", John Wiley & Sons, Inc, 1977. (Hal. 109)

2.1.3 SISTEM GANDA BETON BERTULANG

Dalam Standar Perencanaan Gempa untuk Struktur Gedung SNI 03-1726-2002, Gabungan sistem antara Portal dan dinding geser disebut sebagai sistem ganda. Sistem ganda akan memberikan bangunan kemampuan menahan beban yang lebih baik, terutama terhadap beban gempa. Dengan sistem ganda, maka tinggi bangunan dapat mencapai sampai 50 tingkat untuk struktur beton, sedangkan bila digunakan struktur baja dapat mencapai sampai 40 tingkat.



Gambar 2.5

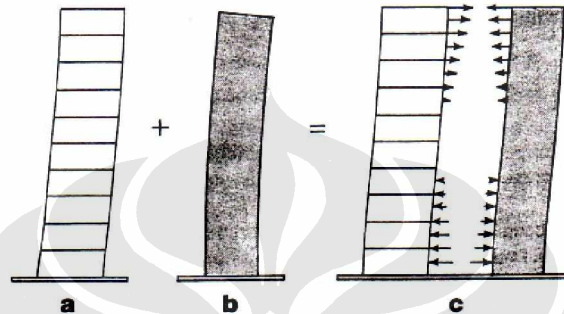
Struktur Sistem Ganda (*Dual System*)

Kemampuan yang tinggi dalam memikul gaya geser pada sistem gabungan antara portal dengan dinding geser disebabkan adanya interaksi antara keduanya. Interaksi tersebut terjadi karena kedua sistem tersebut mempunyai perilaku defleksi yang berbeda (lihat gambar 2.6). Akibat beban lateral, dinding geser akan berperilaku flexural / bending mode, sedangkan *frame* akan berdeformasi dalam shear mode, dengan demikian, gaya geser dipikul oleh *frame* pada bagian atas dan dinding geser memikul gaya geser pada bagian bawah⁹.

Menurut Standar Perencanaan Gempa untuk Struktur Gedung SNI 03-1726-2002, rangka pemikul momen harus sesuai dengan ketentuan dalam Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung RSNI 03-2847-2002 dan harus mampu memikul sekurang-kurangnya 25% dari keseluruhan beban lateral.

⁹ Schueller, Wolfgang, "*High-Rise Building Structures*", John Wiley & Sons, Inc, 1977. (Hal. 140 - 141)

Pemeriksaan terhadap rangka pemikul momen harus dilakukan apabila sistem rangka pemikul momen menerima beban geser akibat gempa lebih dari 10%. Bila beban lateral akibat gempa yang dipikul oleh sistem rangka pemikul momen kurang dari 10%, maka pemeriksaan terhadap kemampuan untuk memikul 25% beban lateral dapat diabaikan.



Gambar 2.6^[12]

Struktur Gabungan Frame dengan Dinding Geser

Dalam tugas akhir ini, sistem tersebut digunakan sistem gabungan antara dinding geser dengan rangka pemikul momen dari beton. Menurut Standar Perencanaan Gempa untuk Struktur Gedung SNI 03-1726-2002, rangka pemikul momen tersebut terbagi dalam dua jenis, yaitu :

a. Sistem rangka pemikul momen khusus (SRPMK)

SRPMK diharapkan dapat mengalami deformasi inelastis yang besar apabila dibebani oleh gaya-gaya yang berasal dari gempa rencana. SRPMK memiliki :
 $R_m = 8,5$ dan $\mu_m = 5,2$.

b. Sistem rangka pemikul momen menengah (SRPMM)

SRPMM diharapkan dapat mengalami deformasi inelastis secara moderat akibat gaya gempa rencana. SRPMM memiliki :

$R_m = 6,5$ dan $\mu_m = 4,0$.

(Keterangan : R_m = faktor reduksi gempa maksimum dan μ_m = daktilitas struktur maksimum)

2.2 FAKTOR REDUKSI GEMPA

Beban gempa rencana untuk gempa besar biasanya direpresentasikan sebagai respon spektra linier elastik yang memperhitungkan pergerakan tanah terbesar yang mungkin terjadi untuk suatu kurun waktu tertentu pada suatu lokasi untuk suatu bangunan yang harus tetap berperilaku elastik dan tidak mengalami kerusakan akibat beban gempa besar tersebut. Namun demikian, tidaklah ekonomis bila suatu perencanaan bangunan menggunakan beban gempa sesuai respon spektra linier elastik. Agar perencanaan bangunan lebih ekonomis, maka deformasi inelastis yang cukup besar dan terkontrol harus dapat diterima sebagai kriteria dasar perencanaan. Adanya deformasi inelastik tersebut memungkinkan untuk merencanakan beban gempa yang lebih kecil dengan faktor reduksi terhadap beban gempa. Reduksi ini dimungkinkan karena adanya penyerapan dan pemancaran energi gempa pada struktur-struktur yang direncanakan sedemikian rupa, sehingga memiliki daktilitas yang memadai. Faktor reduksi gempa tersebut dipengaruhi oleh daktilitas, faktor kuat dan *redundancy*¹⁰.

Dalam desain struktur gedung, aplikasi faktor reduksi gempa dapat dilakukan secara langsung, seperti telah dijelaskan pada subbab sebelumnya, ataupun dengan metode analisa berbobot. Cara pembobotan tersebut yaitu dengan menentukan faktor reduksi gempa representatif dari setiap model dengan metoda analisa nilai rata-rata berbobot berdasarkan gaya geser dasar yang dipikul oleh masing-masing jenis subsistem sebagai besaran pembobotnya

2.2.1 DAKTILITAS

Daktilitas merupakan hal yang penting untuk diperhatikan dalam perencanaan struktur terhadap gempa. Struktur harus direncanakan sedemikian rupa sehingga ketika struktur mengalami keruntuhan dapat berlaku daktail dan menimbulkan suatu tanda-tanda saat struktur tersebut mencapai deformasi maksimum. Dengan demikian maka keruntuhan total dapat dihindari dan korban jiwa manusia yang berada dalam bangunan dapat dihindari.

¹⁰ Firmansjah, Jodi, "Usulan Structural Reduction Factor (R) dan Structural Overstrength (Ω_0) untuk SNI-1726-1988", Jurnal HAKI Vol. 2, September 2001. (Hal. 35)

Daktilitas terbagi atas tiga jenis, yaitu :

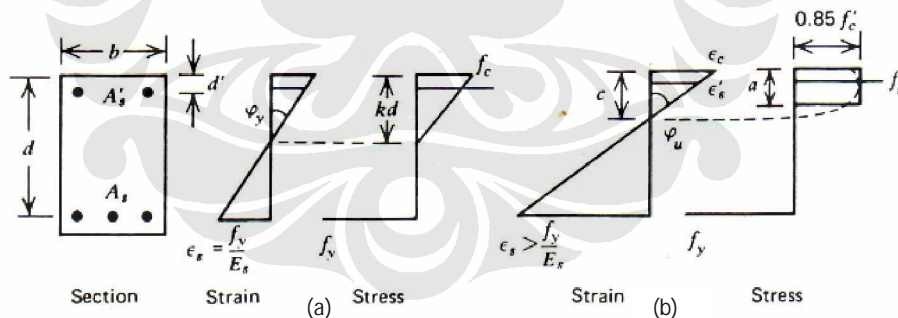
1. Daktilitas Material

Daktilitas material adalah kemampuan suatu material untuk berdeformasi. Pada umumnya kemampuan deformasi ini merupakan perbandingan antara deformasi ultimit dan dan deformasi pelelehan pertama. Dalam struktur beton bertulang, material beton merupakan material yang bersifat getas, sedangkan tulangan baja merupakan material yang bersifat daktail¹¹. Dengan demikian, kemampuan daktilitas material pada struktur beton bertulang lebih banyak dipengaruhi oleh tulangan baja.

2. Daktilitas Elemen

Daktilitas elemen adalah daktilitas kurvatur yang berupa perbandingan antara deformasi ultimit (ϕ_u) dengan deformasi pelelehan pertama(ϕ_y)¹². Elemen yang daktail adalah elemen yang mampu mempertahankan sebagian besar momen kapasitas pada saat mencapai daktilitas kurvatur yang diinginkan.

Sebagai contoh yaitu pada diagram tegangan-regangan penampang beton persegi (gambar 2.4). Pada gambar tersebut tampak adanya regangan leleh pada pada baja (ϕ_y) dan regangan ultimit pada beton (ϕ_u).



Gambar 2.7^[11]

Penampang beton dengan tulangan rangkap dengan lentur pada (a) pelelehan pertama dan (b) ultimit

¹¹ Ambrose, James & Vergun Dimitry, "Simplified Building Design for Wind and Earthquake Force", John Wiley & Sons, Inc., 1980. (Hal. 28)

¹² R. Park & T. Pauley, "Reinforced Concrete Structure", John Wiley and Sons, Inc, 1975. (Hal. 203)

Rasio antara regangan leleh pada tulangan (ϕ_y) dan regangan ultimit pada beton (ϕ_u) dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\frac{\phi_u}{\phi_y} = \frac{\epsilon_c}{f_y/E_s} \frac{d(1-k)}{a/\beta_1} \dots\dots\dots(2.1)$$

Efek rasio ϕ_u/ϕ_y dapat dilihat pada gambar 2.5. Efek rasio ϕ_u/ϕ_y mempunyai hubungan terhadap sifat-sifat penampang sebagai berikut¹³ :

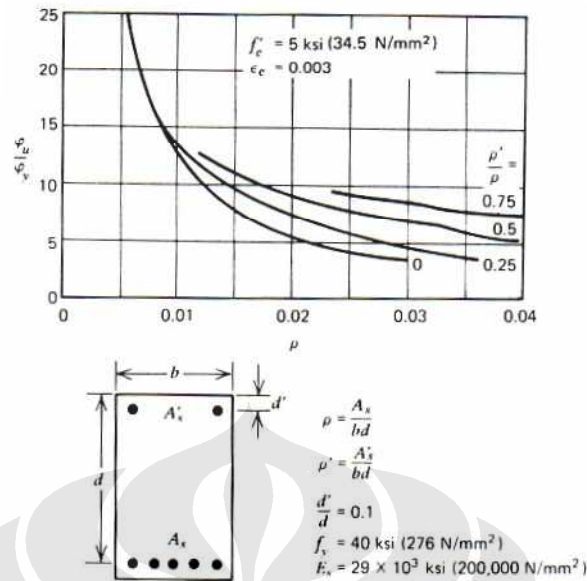
- a. Penambahan tegangan didaerah tulangan akan mengurangi daktilitas, karena nilai k dan a bertambah, sehingga ϕ_y bertambah dan ϕ_u berkurang.
- b. Penambahan tekanan didaerah tulangan akan menambah daktilitas, karena nilai k dan a berkurang, sehingga ϕ_y berkurang dan ϕ_u bertambah.
- c. Penambahan pada kekuatan leleh tulangan akan mengurangi daktilitas, karena nilai f_y/E_s dan a bertambah, sehingga ϕ_y bertambah dan ϕ_u berkurang.
- d. Penambahan pada mutu beton akan menambah daktilitas karena, karena nilai k dan a berkurang, sehingga ϕ_y berkurang dan ϕ_u bertambah.
- e. Penambahan tegangan yang ekstrem didaerah serat beton akan menambah daktilitas, karena nilai k dan a berkurang, sehingga ϕ_y berkurang dan ϕ_u bertambah.

3. Daktilitas Struktur

Daktilitas suatu struktur adalah kemampuan suatu struktur untuk mengalami simpangan pasca-elastik yang besar secara berulang kali dan bolak-balik akibat beban gempa yang menyebabkan terjadinya pelelahan pertama, sambil mempertahankan kekuatan dan kekakuan yang cukup, sehingga struktur tersebut tetap berdiri walaupun sudah berada dalam kondisi ambang keruntuhan¹⁴.

¹³ R. Park & T. Pauley, “*Reinforced Concrete Structure*”, John Wiley and Sons, Inc, 1975. (Hal. 207 - 208)

¹⁴ Departemen Pemukiman dan Pengembangan Prasarana Wilayah, “*Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Bangunan Gedung*”, SNI 03-1726-2002. (Hal. 5)



Gambar 2.8 ^[11]

Variasi rasio ϕ_u/ϕ_y pada balok beton dengan $f_y = 40$ ksi (276 N/mm^2)

Agar struktur gedung bertingkat tinggi memiliki daktilitas yang tinggi, harus diupayakan supaya sendi-sendi plastis yang terjadi akibat beban gempa maksimum ada didalam balok dan tidak terjadi di kolom, kecuali pada kaki kolom yang paling bawah dan pada bagian atas kolom penyangga atap. Hal ini dapat dicapai bila kapasitas (momen leleh) kolom lebih tinggi dari pada kapasitas balok yang bertemu pada kolom tersebut (konsep kolom kuat-balok lemah).

Nilai daktilitas suatu struktur adalah faktor daktilitas (μ) yang didefinisikan sebagai berikut ¹⁵ :

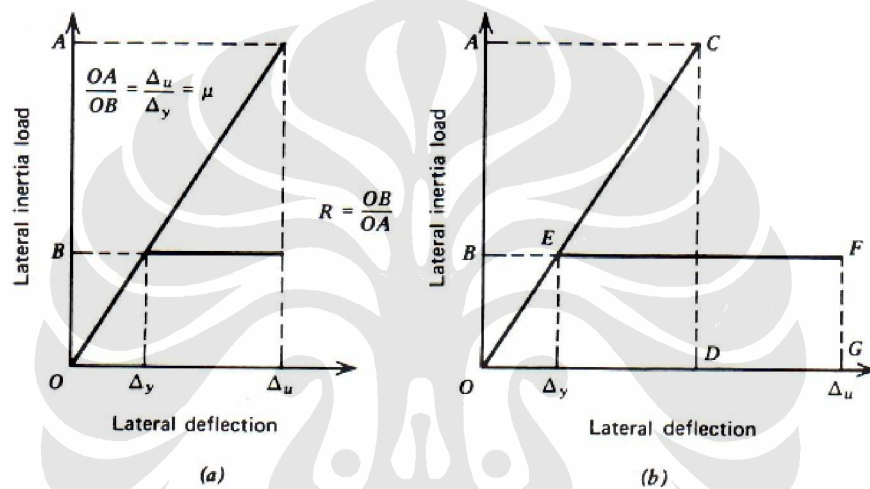
$$\mu = \frac{\text{Simpangan maksimum dibanding keruntuhan}}{\text{Simpangan saat pelepasan pertama}} = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \dots\dots\dots(2.2)$$

¹⁵ R. Park & T. Pauley, "Reinforced Concrete Structure", John Wiley and Sons, Inc, 1975. (Hal. 549)

Faktor daktilitas dipengaruhi oleh simpangan struktur. Kelakuan struktur berdasarkan asumsi simpangan struktur elastis dan elastoplastis mempunyai simpangan maksimum yang sama dapat dilihat pada dan gambar 2.9¹⁶.

Dari hasil percobaan analisa dinamis, seperti ditunjukkan gambar 2.9 (a) bahwa nilai faktor pembatasan beban (R) untuk sistem elastis dan elastoplastis mempunyai hubungan yang sama :

$$R = \frac{1}{\mu}$$



Gambar 2.9^[14]

Respon struktur yang berperilaku elastis dan elastoplastis saat terjadi gempa

Namun nilai diatas tidak konservatif. Dari beberapa analisa dinamis yang lain, diperoleh nilai faktor pembatasan beban (R) yang lebih mendekati dalam proses pemancaran energi. Nilai faktor pembatasan beban tersebut¹⁷ :

$$R = \frac{1}{\sqrt{2\mu - 1}} \dots\dots\dots (2.3)$$

¹⁶ R. Park & T. Pauley, "Reinforced Concrete Structure", John Wiley and Sons, Inc, 1975. (Hal. 550)

¹⁷ R. Park & T. Pauley, "Reinforced Concrete Structure", John Wiley and Sons, Inc, 1975. (Hal. 550)

Persamaan tersebut berdasarkan konsep persamaan energi, dimana dapat dibuktikan bahwa energi potensial yang disimpan sistem elastis penuh pada saat simpangan maksimum sama dengan energi potensial yang disimpan oleh sistem elastoplastis. Hal tersebut menjelaskan bahwa luas bidang OCD sama dengan luas bidang OEFG.

2.2.2 FAKTOR KUAT LEBIH

Faktor kuat lebih yang harus diperhitungkan dalam menentukan faktor reduksi gempa adalah kuat lebih perencanaan (Ω_D), kuat lebih material (Ω_M) dan kuat lebih struktur (Ω_S)¹⁸. Faktor kuat lebih (f_1) merupakan perkalian antara kuat lebih perencanaan (Ω_D) dengan kuat lebih material (Ω_M). Faktor kuat (f_2) adalah kuat lebih struktur (Ω_S). Faktor reduksi gempa merupakan perkalian antara f_1 dengan f_2 . Dalam Peraturan Gempa SNI 03-1726-2002, nilai $f_1 = 1,6$ dan nilai $f_2 = 1,0 - 1,75$.

Kuat lebih perencanaan (Ω_D) adalah perbandingan antara beban geser dasar teoritis, dimana sendi plastis teoritis pertama terjadi dengan beban geser dasar rencana V dan umumnya kuat lebih perencanaan tergantung pada beberapa faktor, yaitu *load factor* untuk beban gempa, sistem struktur yang digunakan dan konservatisme dari perencanaan struktur. Biasanya harga kuat lebih perencanaannya dikontrol oleh kekuatan (*Strength controlled*) seperti *braced frames* dan *shear wall structures*, dan harga kuat lebih akan semakin besar untuk sistem struktur yang dalam perencanaannya dikontrol oleh kekakuan (*Drift controlled*).

Kuat lebih material adalah perbandingan antara beban geser dasar aktual (V_y) dimana sendi plastik aktual pertama terjadi dengan beban geser teoritis (V_d) dan umumnya Ω_M tergantung dari beberapa faktor yaitu: (1) rasio antar *actual static yield strength* dengan *nominal static strength* yang digunakan dalam perencanaan, (2) adanya *strain rate effect* pada waktu gempa berlangsung, (3) pengaruh *strain hardening* dan (4) penggunaan *capacity factor* dalam perencanaan¹⁹.

¹⁸ Firmansjah, Jodi, "Usulan Structural Reduction Factor (R) dan Structural Overstrength (Ω_o) untuk SNI-1726-1988", Jurnal HAKI Vol. 2, September 2001. (Hal. 37)

¹⁹ Firmansjah, Jodi, "Usulan Structural Reduction Factor (R) dan Structural Overstrength (Ω_o) untuk SNI-1726-1988", Jurnal HAKI Vol. 2, September 2001. (Hal. 38)

Kuat lebih struktur (Ω_s) adalah perbandingan antara gaya lateral ultimit yang mampu dipikul oleh struktur dengan beban geser dasar aktual dan umumnya Ω_s tergantung pada *redundancy* dari struktur yang bersangkutan. Pada struktur yang mempunyai satu elemen penahan gaya gempa seperti pada sistem pendulum, maka nilai Ω_s struktur tersebut sama dengan 1,0. Sedangkan untuk struktur yang mempunyai banyak elemen penahan gaya gempa atau mempunyai pertahanan yang berlapis terhadap gaya gempa maka nilai Ω_s lebih dari 1,0.

2.3 DETAILING

Pada struktur beton bertulang, tulangan baja yang bersifat daktail sangat menentukan daktilitas struktur ataupun elemennya. Jenis, jumlah dan penempatan tulangan tersebut akan mempengaruhi perilaku struktur. Detailing tulangan akan menentukan tingkat daktilitas struktur yang direncanakan. Semakin tinggi tingkat daktilitas, maka semakin rumit detailing tulangannya.

Detailing tulangan yang baik akan menjadikan suatu struktur mempunyai kemampuan berdeformasi yang tinggi sampai keadaan inelastisnya tanpa menunjukkan keruntuhan²⁰.

Berdasarkan detailing tulangan, maka jenis-jenis portal dapat dibagi atas²¹ :

1. *Ordinary moment resisting frame*
2. *Intermediate moment resisting frame*
3. *Special moment resisting frame*

2.3.1 Ordinary Moment Resisting Frame (OMRF)

Ordinary moment resisting frame (OMRF) atau sistem rangka pemikul momen biasa (SRPMB) biasanya digunakan didaerah dengan resiko gempa kecil. Perhitungan gaya geser dan momen tidak mempertimbangkan efek kapasitas geser

²⁰ Kusuma, Gideon & Andriono, Takim, "*Desain Struktur Rangka Beton Bertulang di Daerah Rawan Gempa*", Erlangga, 1993. (Hal. 4)

²¹ CSI ETABS, "*Concrete Frame Design Manual*", Computer and Structure, Inc, Berkeley, 2002. (Hal. 234)

terhadap beban gempa untuk kolom ataupun balok. Penulangan hanya berdasarkan pada kombinasi pembebanan. Daerah panel (*joint*) tidak perlu diperiksa terhadap gaya geser. Batasan tulangan kolom $1\% < \rho < 6\%$.

2.3.2 Intermediate Moment Resisting Frame (IMRF)

Intermediate moment resisting frame (IMRF) atau sistem rangka pemikul momen menengah (SRPMM) biasanya digunakan didaerah dengan resiko gempa sedang. IMRF memperhitungkan kapasitas geser pada kolom dan balok berdasarkan nilai nominal kapasitas momen dari beban gravitasi berfaktor, namun dalam memperhitungkan kapasitas geser yang terjadi, nilai dari kuat lebih pada tulangan sama dengan satu. Beban gempa dijadikan dua kali lipat untuk analisa gaya lintang pada kolom dan balok. Disamping itu harus diperhitungkan kuat lentur positif pada muka kolom tidak boleh lebih kecil dari $1/3$ kuat lentur negatifnya. Batasan tulangan kolom $1\% < \rho < 6\%$.

2.3.3 Special Moment Resisting Frame (SMRF)

Special moment resisting frame (SMRF) atau sistem rangka pemikul momen khusus (SRPMK) biasanya digunakan didaerah dengan resiko gempa tinggi. Pada sistem struktur SMRF, kualitas pendetailan pada daerah sendi-sendi plastis perlu didetail secara khusus. SMRF memperhitungkan kapasitas geser pada kolom dan balok untuk menghindari tekuk inelastis prematur pada balok dan menjamin terjadinya sendi plastis pada balok, sedangkan didaerah luar sendi plastis tidak perlu didetail secara khusus. Daerah sambungan (*joint*) antara balok-kolom harus diperhatikan persyaratan *strong column-weak beam* dan persyaratan kuat geser.

Untuk lebih jelasnya, persyaratan sistem struktur tahan gempa pada SRPMM dan SRPMK dapat dilihat pada Tata Cara Perencanaan Struktur Beton Bertulang untuk Bangunan Gedung (SNI 03-2847-2002 Pasal 23).

2.4 DESAIN KAPASITAS

Struktur bangunan mempunyai nilai kekakuan lateral yang beraneka ragam sehingga mempunyai waktu getar alami yang berbeda-beda pula. Oleh karenanya, respon percepatan maksimum suatu struktur tidak selalu sama besar dengan percepatan getaran gempa. Mengingat kemungkinan besarnya gaya inersia gempa yang bekerja pada titik pusat massa bangunan, maka tidaklah ekonomis untuk merencanakan suatu struktur-struktur umum sedemikian kuatnya sehingga tetap berperilaku elastis saat dilanda gempa. Pada dasarnya struktur didesain agar tidak rusak ketika terjadi gempa kecil dan sedang, tetapi saat dilanda gempa kuat, struktur tersebut masih mampu berperilaku duktail dengan memancarkan energi dan membatasi beban gempa yang masuk ke struktur tersebut.

Konsep desain kapasitas adalah suatu filosofi perencanaan gempa yang berupaya untuk mengatur atau mengendalikan pembentukan sendi-sendi plastis pada struktur²². Hal ini dilakukan agar saat terjadi gempa kuat, struktur dapat berperilaku memuaskan dan tidak runtuh. Guna menjamin terjadinya mekanisme goyangan dengan pembentukan sebagian besar sendi plastis pada balok, maka konsep desain kapasitas diterapkan agar kolom-kolom portal lebih kuat dari balok-baloknya. Hal lain yang harus diperhatikan yaitu mengenai keruntuhan geser pada balok yang bersifat getas harus dihindari terlebih dahulu dari kegagalan akibat lentur pada sendi-sendi plastis balok setelah mengalami rotasi-rotasi yang cukup besar.

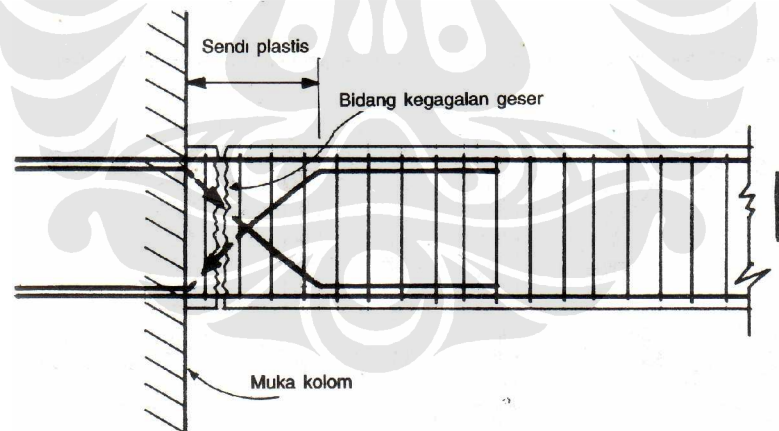
Pada prinsipnya, dengan konsep desain kapasitas elemen-elemen utama penahan beban gempa dapat dipilih, direncanakan dan didetail sedemikian rupa, sehingga mampu memancarkan energi gempa dengan deformasi inelastis yang cukup besar tanpa runtuh. Sedangkan elemen-elemen lainnya diberi kekuatan yang cukup, sehingga mekanisme yang telah dipilih dapat dipertahankan saat terjadi gempa kuat.

²² Kusuma, Gideon & Andriano, Takim, "Desain Struktur Rangka Beton Bertulang di Daerah Rawan Gempa", Erlangga, 1993. (Hal. 8)

Faktor-faktor yang perlu diperhatikan agar mekanisme tersebut dapat tercapai adalah²³ :

1. Faktor peningkatan kuat lentur balok sebagai elemen utama pemencar energi gempa.
2. Faktor pengaruh beban dinamis pada kolom.
3. Redistribusi momen pada perencanaan balok-balok portal.
4. Pendetailan elemen struktur.

Momen positif dan momen negatif yang bergantian pada ujung penampang balok didaerah sendi plastis akibat dari beban gempa yang bersifat siklis, akan mengakibatkan penampang balok didaerah tersebut retak karena serat atas dan serat bawah mengalami regangan tarik yang berlebihan secara bergantian. Agar penampang yang retak tetap dalam kesatuan dengan struktur dan tulangan lentur tetap berfungsi dengan baik, maka diperlukan sengkang tertutup sebagai penyokong lateral batang tulangan tekan. Disamping itu diperlukan juga pemasangan tulangan diagonal terhadap beban gempa yang bersifat siklik (lihat gambar 2.10). Pemasangan tulangan diagonal ini penting untuk portal jenis Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK).



Gambar 2.10^[9]

Pemasangan tulangan diagonal untuk mengurangi deformasi geser yang berlebihan didaerah sendi plastis

²³ Kusuma, Gideon & Andriono, Takim, "Desain Struktur Rangka Beton Bertulang di Daerah Rawan Gempa", Erlangga, 1993. (Hal. 8)

Pada bagian kolom saat terjadi gempa perlu adanya pengekan tambahan pada tulangan transversal untuk menjaga terhadap regangan besar yang mungkin terjadi. Panjang sambungan lewatan pada bagian kolom harus diperhatikan dengan memberikan tambahan tulangan geser agar terjadi pengekan yang menahan gaya geser friksi pada bidang retak akibat beban gempa siklis. Sambungan penulangan tidak boleh digunakan pada daerah-daerah sendi pastis.

Pada daerah *joint* balok-kolom harus diperhatikan hal-hal berikut ini²⁴ :

1. Kekuatan *joint* tidak boleh lebih kecil dari kekuatan komponen struktur yang dihubungkan.
2. *Joint* harus dianggap dalam keadaan elastis untuk menghindari kesulitan dalam perbaikan dan menghindari penurunan kemampuan dalam memancarkan energi.
3. Kekuatan kolom tidak boleh diperlemah oleh karena perilaku *joint* yang berada didekatnya.
4. Deformasi *joint* tidak boleh memperbesar deformasi antar tingkat.
5. Pengaturan penulangan *joint* tidak boleh mengakibatkan kerumitan dalam perencanaan.

2.5 RAGAM KERUNTUHAN

Ragam keruntuhan perlu untuk diperhatikan karena menyangkut perilaku struktur saat terjadinya beban gempa yang dapat menyebabkan suatu keuntuhan yang berakibat pada kerusakan suatu bagian struktur karena suatu mekanisme tertentu. Kerusakan struktur tersebut dapat mengakibatkan suatu kehancuran bagi struktur ataupun bagian struktur yang pada akhirnya menyebabkan kehancuran total yang tidak disertai dengan suatu tanda tertentu, seperti akibat keruntuhan geser yang bersifat getas. Dalam sistem ganda, maka yang harus diperhatikan adalah keruntuhan pada portal dan dinding geser.

²⁴ Kusuma, Gideon & Andriono, Takim, "Desain Struktur Rangka Beton Bertulang di Daerah Rawan Gempa", Erlangga, 1993. (Hal 19)

2.5.1 Ragam Keruntuntuhan Portal

Ada dua ragam keruntuhan yang perlu diperiksa. Dari kedua ragam ini yang terpenting adalah ragam yang berhubungan dengan kekuatan geser. Gaya geser yang didapat dari perencanaan kapasitas besarnya dapat mencapai 4 sampai 5 kali gaya yang terjadi pada kolom yang berdekatan dan keruntuhan ini akan menyebabkan keruntuhan diagonal tarik, bila dalam *joint* tersebut tidak terdapat penulangan geser yang cukup. Keruntuhan ini dapat terjadi sebelum daktilitas didalam sendi-sendi plastis pada balok struktur tercapai.

Keruntuhan berikutnya adalah keruntuhan ikatan. Suatu pemeriksaan sederhana menunjukkan bahwa tegangan lekat pada penulangan yang melewati *joint* dalam, besarnya 3 sampai 4 kali lebih besar dari pada yang disyaratkan dalam peraturan. Suatu keruntuhan penjangkaran akibat penarikan tulangan pada *joint* luar dapat mengakibatkan keruntuhan total. Pada *joint-joint* dalam, slip tulangan yang lewat inti *joint* balok terjadi dan ini akan mengakibatkan penurunan kekakuan yang cukup drastis serta berkurangnya kemampuan struktur rangka beton bertulang untuk memancarkan energi.

1. Keruntuhan Geser pada Joint

Kuat geser *joint* balok-kolom sangat ditentukan oleh interaksi dua mekanisme berikut ini²⁵ :

- Mekanisme pertama
Beban tekan lentur yang bekerja pada keempat komponen struktur yang berdekatan secara bersama-sama akan membentuk suatu strat diagonal sepanjang *joint*. Apabila sendi-sendi plastis dibatasi terjadi pada balok-balok yang bersebelahan dan tegangan geser nominal *joint* tidak terlalu besar, seperti yang biasanya terjadi, maka tegangan-tegangan diagonal tekan pada inti *joint* menjadi tidak terlalu besar dan masih dapat ditahan.
- Mekanisme kedua

²⁵ Kusuma, Gideon & Andriono, Takim, "Desain Struktur Rangka Beton Bertulang di Daerah Rawan Gempa", Erlangga, 1993. (Hal. 19 – 20)

Pada mekanisme yang kedua, *joint* harus dapat mengimbangi gaya lekat yang disalurkan tulangan kolom dan balok. Setelah terjadi retak diagonal pada *joint*, maka suatu *shear flow* disekeliling penampang membentuk daerah-daerah tekan diagonal. Apabila *joint* mempunyai gaya-gaya kekang horizontal dan vertikal yang memadai, maka *joint* akan dapat menahan gaya tekan diagonal tersebut. Gaya kekang horizontal dapat diperoleh dengan memasang tulangan geser horizontal. Sedangkan tulangan geser vertikal dapat digantikan oleh gaya tekan kolom, bila pada *joint* ada gaya tekan kolom.

Kegagalan mekanisme kedua akibat keruntuhan lekatan tulangan utama dapat mengakibatkan hanya berfungsinya mekanisme pertama. Hal ini akan menyebabkan *joint* kendur (*slack*).

2. Keruntuhan Ikatan²⁶

Kuat lekatan tulangan sangat dipengaruhi kondisi pada tepi-tepi *joint*. Selama balok dalam keadaan pembebanan yang normal maka balok dapat dalam keadaan elastis, namun setelah terjadi pembebanan gempa bolak-balik dan terjadi sendi plastis, maka tegangan pada lekatan pada daerah inti dan terjadi juga kehilangan penjangkaran selimut beton. Pelelehan tulangan lambat-laun akan masuk menuju inti *joint*. Hal ini akan mengakibatkan tegangan lekat yang sangat besar yang dapat mengakibatkan keruntuhan sehingga balok akan slip sepanjang inti *joint*. Untuk itu, maka diameter tulangan pada balok dan kolom harus diatur sedemikian rupa untuk mencegah terjadinya keruntuhan ikatan.

2.5.2 Ragam Keruntuhan Dinding Geser²⁷

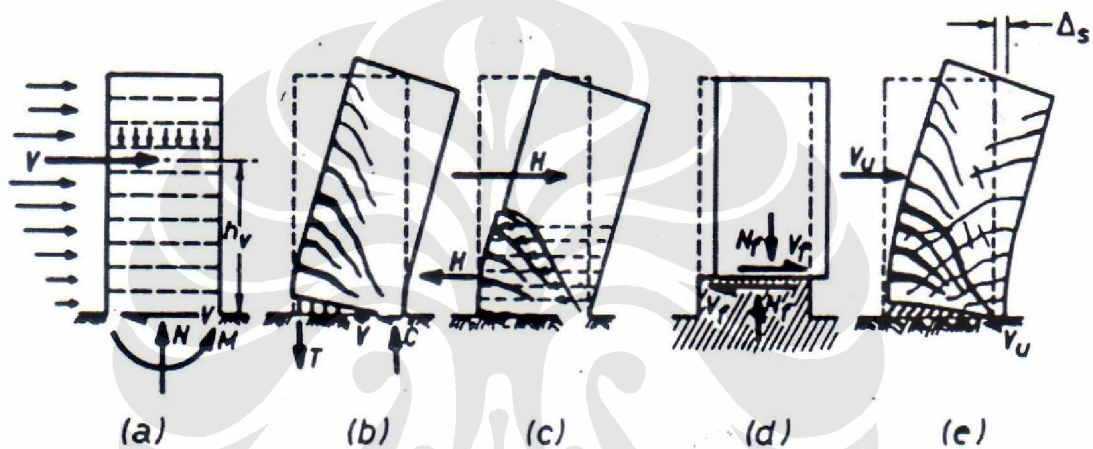
Hal yang harus diperhatikan pertama kali dalam desain dinding struktural daktail adalah mengenai keruntuhan akibat lentur yang terbentuk pada daerah plastis akan mengontrol kekuatan, deformasi inelastis dan disipasi energi pada keseluruhan sistem struktur. Oleh karena itu keruntuhan yang getas akibat mekanisme geser

²⁶ Kusuma, Gideon & Andriano, Takim, “*Desain Struktur Rangka Beton Bertulang di Daerah Rawan Gempa*”, Erlangga, 1993. (Hal. 21)

²⁷ T. Pauley & MJN Priestly, “*Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*”, John Wiley & Sons, Inc, 1992. (Hal. 389 – 390)

harus dihindari. Secara prinsip energi disipasi akibat beban lateral pada dinding kantilever harus terjadi akibat pelelehan tulangan lentur didaerah sendi plastis pada bagian dasar dinding (gambar 2.11b & 2.11e).

Kegagalan yang harus dihindari adalah keruntuhan diagonal tarik atau diagonal tekan (gambar 2.8c) akibat geser, ketidakstabilan dinding yang terlalu tipis, ataupun akibat kegagalan pada tulangan tekan. Kegagalan geser secara gelincir pada pertemuan konstruksi (gambar 2.11d) dan kegagalan pada geser atau ikatan sepanjang pengangkuran.



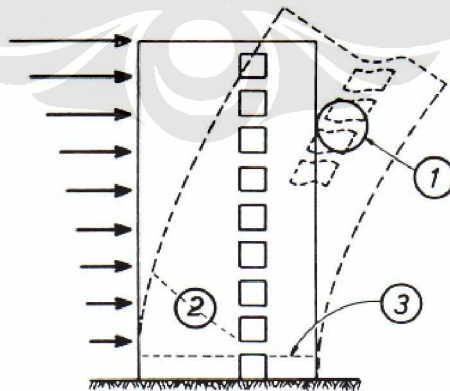
Gambar 2.11^[14]

Keruntuhan pada dinding geser kantilever

Dinding geser dengan banyak bukaan memerlukan balok perangkai. Adanya bukaan pada dinding geser akan mengurangi kemampuan dinding geser dalam menahan gaya lateral. Pola keruntuhannya yaitu dengan terbentuknya sendi plastis terlebih dahulu pada elemen-elemen balok perangkai dari struktur dinding geser berangkai. Kemudian setelah sendi plastis terbentuk pada ujung-ujung balok perangkai tersebut, maka juga akan terbentuk sendi plastis didasar atau kaki-kaki dinding geser yang terbentuk secara simultan selama proses perpanjangan pelelehan dari sendi plastis dibalok perangkai. Dinding geser jenis berangkai ini, mempunyai daerah kritis, yaitu²⁸ (lihat gambar 2.12) :

²⁸ R. Park & T. Pauley, "Reinforced Concrete Structure", John Wiley and Sons, Inc, 1975. (Hal. 644 – 645)

1. Adanya bukaan pada dinding geser berangkai dapat menyebabkan area balok perangkai menjadi getas pada saat gempa yang sangat besar terjadi, dimana seluruh sistem struktur dinding geser berangkai harus mencapai kekuatan batasnya. Elemen balok perangkai diharapkan memiliki daktilitas yang besar untuk dapat melakukan pergoyangan yang besar. Balok perangkai diharapkan mempunyai dimensi yang cukup untuk dapat menyalurkan gaya geser pada dua bagian dari dinding geser.
2. Pada saat gempa terjadi maka salah satu bagian dinding geser akan mengalami gaya tarik yang besar sebagai tambahan dari gaya lentur dan gaya geser. Beban tarik tersebut akan memberikan efek pada kapasitas tarik diagonal dari dinding geser. Beban gempa bersifat siklik, sehingga kekuatan geser dari salah satu dinding dipengaruhi oleh gaya aksial tarik dinding yang lain. Hal tersebut dapat menyebabkan retak diagonal bila dinding geser tidak mampu menahan gaya tarik ini. Keruntuhan diagonal ini, dapat juga terjadi bila jumlah tulangan geser yang dipasang kurang dari yang dibutuhkan.
3. Area ini merupakan tempat sambungan konstruksi, dimana gaya geser horizontal harus ditransfer melalui sambungan konstruksi arah horizontal (*horizontal construction joint*). Dari hasil beberapa studi mengenai gempa yang pernah terjadi, area ini merupakan sambungan terlemah dalam menahan gaya akibat gempa. Oleh karena itu, bagian ini harus diperhatikan agar tidak terjadi retak akibat pelaksanaan yang buruk.



Gambar 2.12 ^[11]

Area kritis dinding geser berangkai (dinding geser dengan bukaan)