

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1. Umum

Kerusakan bangunan yang terjadi akibat gempa bumi yang terjadi umumnya bersumber dari dua (2) hal utama yaitu yang pertama adalah kesalahan dalam perencanaan atau desain yang seringkali tidak sesuai dengan peraturan bangunan tahan gempa pada daerah dimana peristiwa gempa itu terjadi dan yang ke dua adalah buruknya aspek pendetailan elemen struktur beton bertulang pada bangunan yang mengalami keruntuhan. Kesalahan dalam perencanaan dapat terjadi karena sering dalam perencanaan, perencana berupa seorang arsitektur atau insinyur mengabaikan akibat-akibat fatal yang dapat timbul akibat gempa ketika merancang atau mendesain suatu bangunan. Sedangkan buruknya aspek pendetailan tulangan dapat disebabkan oleh mutu pekerjaan dilapangan yang tidak baik dan juga tidak sesuai standar yang ditetapkan sehingga bangunan tidak akan dapat mengembangkan kekuatan pikulnya sampai dengan batas maksimum secara daktail.

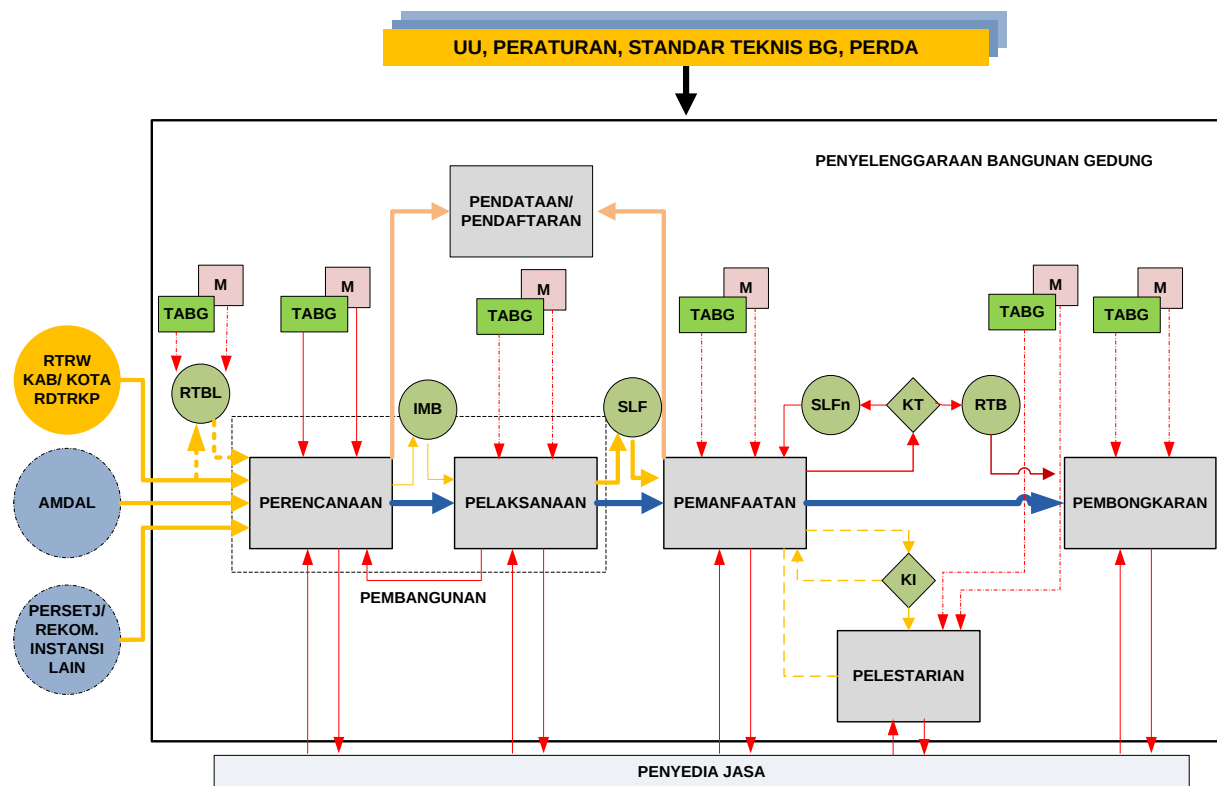
Pada tahun 1960 sampai 1970, negara-negara dengan resiko gempa yang tinggi mulai mengadopsi peraturan bangunan tahan gempa tersebut dalam peraturan bangunan mereka. Pada periode yang sama, dengan semakin meningkatnya pemahaman yang lebih baik dari perilaku dinamis tanah seperti halnya perilaku in-elastic struktur, hal ini membawa perkembangan yang lebih maju pada peraturan seismik.

Dalam kenyataannya, di era modern sekarang, peraturan-peraturan desain bangunan tahan gempa yang telah ada tidak sepenuhnya dijadikan pedoman dalam mendesain bangunan tahan gempa maupun menjadi pedoman pekerjaan dilapangan. Hal ini tentu saja merupakan masalah yang serius terhadap kondisi bangunan-bangunan yang semakin kompleks dari hari- ke hari. Oleh karena itu, bertolak belakang dari fakta yang terjadi bahwa kesalahan dalam desain bangunan dan buruknya pendetailan tulangan mengakibatkan bangunan rentan terhadap gempa bumi maka hendaknya kita belajar mendesain bangunan dan melakukan proses konstruksi (pembangunan) dengan belajar dari peristiwa gempa yang telah terjadi tersebut dengan melihat kesalahan-kesalahan yang terdapat pada bangunan-bangunan yang mengalami keruntuhan di timpa bencana gempa bumi di masa silam.

2.2. Tahap-Tahap Proses Penyelenggaraan Bangunan Gedung

Proses penyelenggaraan bangunan merupakan kegiatan pembangunan yang meliputi proses perencanaan teknis dan pelaksanaan konstruksi, serta kegiatan pemanfaatan, pelestarian dan pembongkaran bangunan gedung.

Bagan alir tahapan proses penyelenggaraan bangunan gedung menurut PERMENPU No. 24 Tahun 2007 adalah sebagai berikut:



Gambar 2.1. Proses Penyelenggaraan Bangunan Gedung

Sumber: PERMENPU No. 24 Tahun 2007

KETERANGAN:

- M = Masyarakat
- KT = Kajian Teknis
- KI = Kajian Identifikasi
- RTB = Rencana Teknis Pembongkaran
- TABG = Tim Ahli Bangunan Gedung
- SLF = Sertifikat Laik Fungsi
- SLFn = Perpanjang Sertifikat Laik Fungsi

-  Alur Proses Utama
-  Alur Proses Penunjang
-  Opsional
- 
- 

Uraian proses penyelenggaraan proyek sesuai dengan gambar diatas adalah sebagai berikut:

a. Dalam proses penerbitan IMB, dokumen rencana teknis:

- 1) Wajib mengikuti persyaratan dalam RTRW Nasional untuk bangunan gedung, RTRW provinsi, RTRW kabupaten/ kota, RDTRKP, dan/ atau RTBL.
- 2) Disusun dengan mengacu pada rekomendasi/ hasil Analisis Mengenai Dampak Lingkungan (AMDAL) yang diwajibkan untuk bangunan gedung tertentu, atau Upaya Pemantauan Lingkungan (UPL), dan Upaya Pengelolaan Lingkungan (UKL).
- 3) Pada lokasi yang terdapat program instansi yang terkait dalam penyelenggaraan prasarana dan sarana atau pelayanan kepentingan umum harus mendapat persetujuan/ rekomendasi dari instansi terkait atau Pembina penyelenggara prasarana dan saran yang dimaksud.
- 4) Dokumen rencana teknis melalui proses:
 - (a) Dokumen rencana teknis untuk bangunan gedung umum, diperiksa (dicatat dan diteliti) oleh pemerintah daerah melalui/cq. Instansi teknis Pembina penyelenggaraan bangunan gedung, dan dikaji oleh Tim Ahli Bangunan Gedung untuk disampaikan dalam dengar pendapat publik.
 - (b) Pertimbangan teknis oleh Tim Ahli Bangunan Gedung untuk dokumen rencana tekniis yang telah disetujui dalam dengar pendapat publik:
 - (1) Dokumen rencana teknis bangunan gedung untuk kepentingan umum, dinilai/ dievaluasi dan disetujui oleh pemerintah kabupaten/ kota, kecuali Provinsi DKI Jakarta adalah pemerintah provinsi.
 - (2) Dokumen rencana teknis bangunan gedung tertentu fungsi khusus, dinilai/ dievaluasi dan disetujui oleh Pemerintah cq. Departemen Pekerjaan Umum Direktorat Jenderal Cipta Karya Direktorat Penataan Bangunan dan Lingkungan berkoordinasi dengan pemerintah Provinsi DKI Jakarta yang menjadi lokasi pembangunan bangunan gedung tertentu fungsi khusus.
- 5) Pemeriksaan permohonan Izin Mendirikan Bangunan:
 - (a) Pencatatan dan penelitian kelengkapan dan kebenaran dokumen administratif.
 - (b) Pencatatan dan penelitian kelengkapan dokumen rencana teknis.

- (c) Penelitian kebenaran rencana teknis
- (d) Pengkajian oleh Tim Ahli Bangunan Gedung.
- (e) Penilaian/ evaluasi.
- (f) Persetujuan dan pengesahan.

b. Tahap Pelaksanaan

Setelah sebuah bangunan gedung telah mendapat Izin Mendirikan Bangunan maka tahap selanjutnya adalah tahap pelaksanaan. Dalam tahap pelaksanaan tersebut hal-hal yang perlu diperhatikan adalah sebagai berikut:

- 1) Pelaksanaan harus sesuai dengan rencana teknis yang telah disetujui dengan diberikannya IMB.
- 2) Pelaksanaan bangunan gedung yang menimbulkan dampak penting terhadap lingkungan, Tim Ahli Bangunan Gedung menerima pendapat dan pertimbangan dari masyarakat, serta memberi masukan dan pertimbangan dalam penyelesaian masalah secara langsung kepada pemerintah daerah, dan/ atau melalui forum dengan pendapat publik.
- 3) Tim Ahli Bangunan Gedung juga dapat memberikan pertimbangan teknis untuk membantu proses peradilan dan menjaga objektivitas serta nilai keadilan dan keputusan perkara tentang pelanggaran dan penyelenggaraan bangunan gedung.

Bangunan yang telah selesai dilaksanakan harus mendapat sertifikat laik fungsi. Syarat sebuah bangunan dapat diberikan sertifikat laik fungsi adalah sebagai berikut:

- 1) Bangunan yang memenuhi syarat administrative.
- 2) Bangunan yang memenuhi persyaratan teknisnya.

c. Tahap Pemanfaatan, Pelestarian dan Pembongkaran

Hal-hal yang perlu diperhatikan pada fase pemanfaatan suatu bangunan adalah sebagai berikut:

- 1) Setelah bangunan dimanfaatkan 20 tahun, maka bangunan tersebut harus diperpanjang sertifikat laik fungsinya (SLFn).
- 2) Pelaksanaan bangunan gedung yang menimbulkan dampak penting terhadap lingkungan, Tim Ahli Bangunan Gedung menerima pendapat dan pertimbangan dari masyarakat, serta memberi masukan dan pertimbangan dalam penyelesaian

masalah secara langsung kepada pemerintah daerah, dan/ atau melalui forum dengan pendapat publik.

- 3) Tim Ahli Bangunan Gedung juga dapat memberikan pertimbangan teknis untuk membantu proses peradilan dan menjaga objektivitas serta nilai keadilan dan pemutusan perkara tentang pelanggaran dan penyelenggaraan bangunan gedung.
- 4) Ketika suatu bangunan ingin di lakukan pembongkaran maka Tim Ahli Bangunan Gedung mempunyai fungsi melakukan Rencana Teknis Pembongkaran (RTB) serta melakukan kajian teknis dan memberikan pertimbangan –pertimbangan teknis dan menerima pendapat dari masyarakat serta memberi masukan dan penyelesaian masalah tersebut secara langsung maupun dalam forum dengar pendapat publik.

2.3. Konsep Umum Bangunan Tahan Gempa

Konsep umum bangunan tahan gempa ditentukan berdasarkan level kinerja dari struktur yang ditentukan berdasarkan pemahaman terhadap aspek resiko keselamatan (*safety*), kesiapan pakai (*occupancy*), dan resiko kerugian finansial yang timbul akibat gempa (*economic loss*) selama umur rencana bangunan. FEMA 356 (2000), menetapkan level kinerja untuk perancangan struktur tahan gempa sebagai berikut :

Tabel 2.1 Level Kinerja Struktur Berdasarkan FEMA 356

Level Kinerja	Probabilitas Gempa Rencana	Keterangan
<i>Operasional</i>	50% / 50 tahun	Tidak ada kerusakan structural dan non structural yang berarti bangunan dapat tetap berfungsi
<i>Immediate occupancy (IO)</i>	20% / 50 tahun	Tidak terjadi kerusakan structural, komponen non struktral masih berada ditempatnya dan bangunan masih tetap berfungsi tanpa terganggu masalah perbaikan
<i>Life safety (LS)</i>	10% / 50 tahun	Terjadi kerusakan structural akan tetapi tidak terjadi keruntuhan, komponen non struktur tidak dapat berfungsi akan tetapi bangunan dapat digunakan setelah perbaikan
<i>Collapse Prevention (CP)</i>	2% / 50 tahun	Kerusakan terjadi pada komponen structural dan non structural, bangunan hampir runtuh, dan kecelakaan akibat kejatuhan material sangat mungkin terjadi

Sumber : FEMA 356 2000

Secara umum aplikasi konsep bangunan tahan gempa diatas dapat dicapai melalui : (1) pengaturan konfigurasi bangunan; (2) pengaturan level beban gempa; (3) pemilihan sistem struktur; dan (4) pendetailan elemen struktur bangunan.

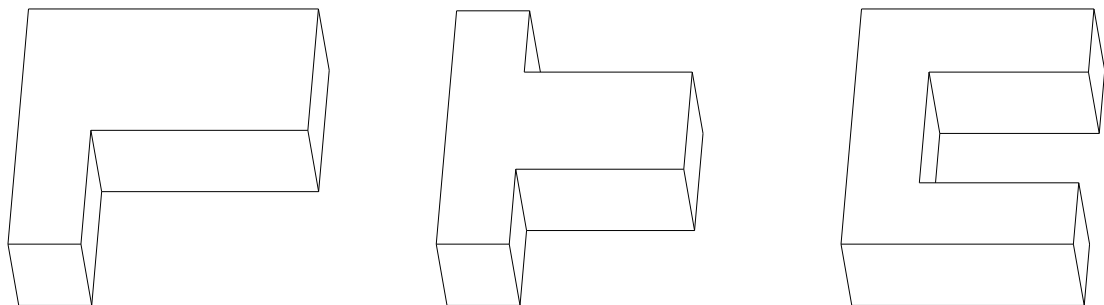
2.4. Kriteria Dasar Desain Bangunan Tahan Gempa

2.4.1. Pengaturan Konfigurasi Bangunan

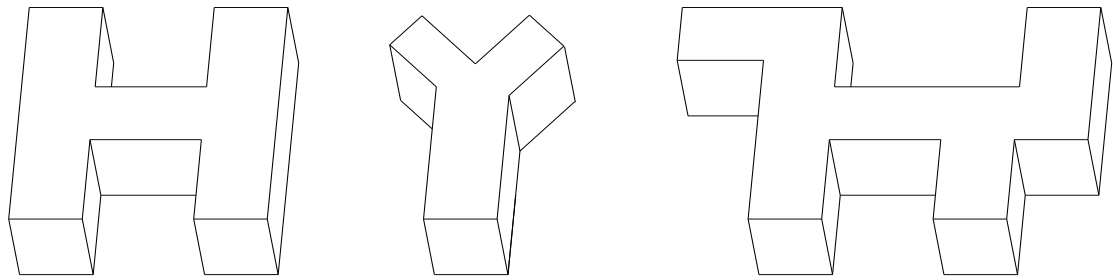
2.4.1.1. Denah Bangunan Sederhana dan Simetris (Konfigurasi Horizontal)

Denah dari struktur bangunan gedung harus diusahakan mempunyai bentuk yang sederhana, kompak, dan simetris, agar mempunyai perilaku dan kinerja yang baik pada saat terjadi gempa, serta mempunyai kekuatan yang besar terhadap pengaruh momen puntir akibat gempa. Pengalaman dari banyak gempa diwaktu yang lalu menunjukkan bahwa, struktur-struktur bangunan dengan bentuk yang sederhana dan simetris seperti bujursangkar, persegi panjang, atau lingkaran, mempunyai ketahanan yang paling baik terhadap pengaruh gempa. Sebab utama dari hal ini adalah, pada bangunan berbentuk simetris, perilaku dan respon dinamik struktur akibat pengaruh gempa dapat diperkirakan dengan lebih baik serta lebih rendahnya tingkat daktilitas struktur yang diperlukan, dibandingkan dengan struktur yang tidak simetris, yang pada umumnya menerima pengaruh momen puntir yang cukup besar pada saat terjadi gempa. Berhubungan dengan hal ini, maka hendaknya denah dari bangunan dibuat sesimetris mungkin dalam kedua arah sumbu utama bangunan.

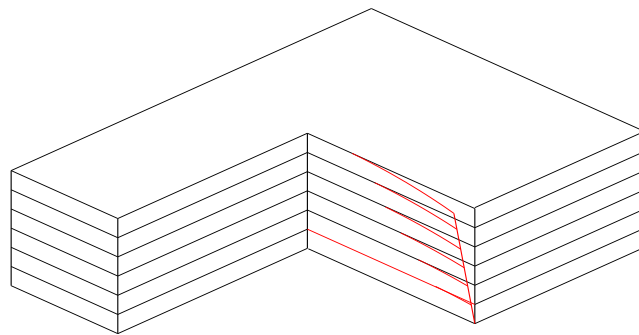
Pada struktur-struktur dengan bentuk denah yang tidak simetris, serta pada struktur yang mempunyai bagian-bagian yang menonjol seperti bentuk L, T, U, H, Y serta bentuk-bentuk lain (gambar 2.2), akibat pengaruh gempa, pada bagian-bagian ini kadang-kadang akan runtuh terlebih dahulu diakibatkan adanya konsentrasi tegangan didaerah ini (gambar 2.3).



Gambar 2.2. Bentuk-Bentuk Struktur Bangunan yang Tidak Beraturan ⁽³⁾

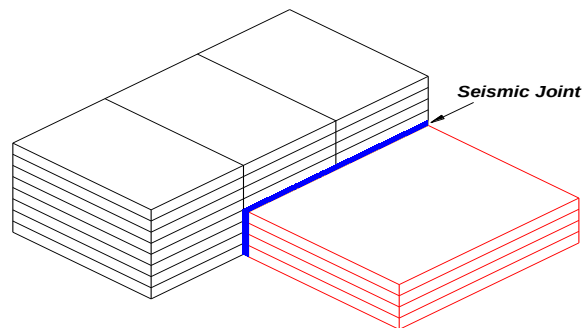


Sambungan Gambar 2.2. Bentuk-Bentuk Struktur Bangunan yang Tidak Beraturan ⁽³⁾

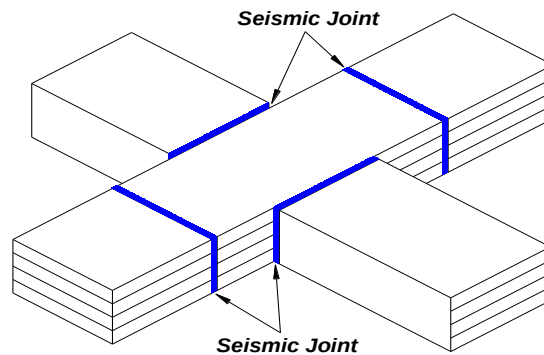


Gambar 2.3. Keruntuhan Pada Struktur dengan Bentuk Tidak Beraturan ⁽³⁾

Pada struktur-struktur bangunan dengan konfigurasi denah seperti ini, perlu adanya dilatasi gempa (*seismic joint*) untuk memisahkan bagian struktur yang menonjol dengan struktur utamanya (Gambar 2.4). Dilatasi gempa harus mempunyai jarak yang cukup (minimal 10 cm), agar bagian-bagian dari struktur yang dipisahkan tidak saling berbenturan pada saat berlangsungnya gempa. Pada struktur dengan bentuk denah yang panjang, mekanisme gaya gempa yang rumit dapat terjadi didalam struktur. Untuk mengatasi hal ini maka diperlukan juga adanya dilatasi gempa yang dipasang pada tempat-tempat yang tepat (Gambar 2.5).



Gambar 2.4. Dilatasi Gempa Pada Struktur yang Tidak Beraturan ⁽³⁾



Gambar 2.5. Dilatasi Gempa Pada Struktur Dengan Denah yang Panjang ⁽³⁾

Respon dari sayap-sayap pada struktur bangunan gedung dengan tonjolan-tonjolan, dapat berbeda dari respon gedung tersebut secara keseluruhan, sehingga dapat menimbulkan gaya-gaya setempat yang besar. Hal ini mungkin tidak dapat terungkap dengan baik jika bangunan ini dianalisis dengan prosedur analisis static. Karena itu dalam peraturan disyaratakan dilakukannya prosedur analisis dinamik untuk bangunan gedung dengan konfigurasi denah yang tidak simetris.

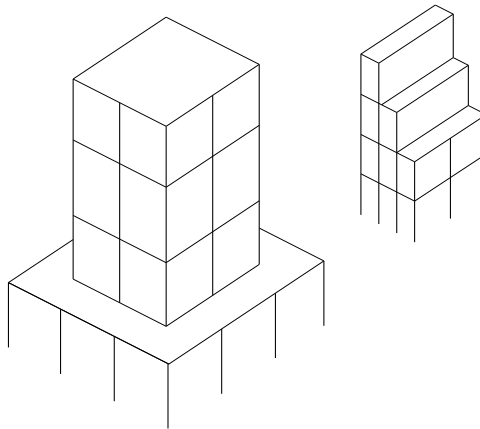
2.4.1.2. Konfigurasi Vertikal Bangunan

Pada arah vertikal dari struktur bangunan gedung, perlu dihindari adanya bentuk yang tidak menerus, seperti loncatan bidang muka akibat denah lantai tingkat yang tidak sama, atau perubahan kekakuan dan kekuatan akibat perubahan dimensi kolom yang mendadak dari suatu tingkat ke tingkat lainnya. Jika konfigurasi struktur dalam arah vertikal tidak seragam dan menerus (Gambar 2.6), maka suatu gerakan yang besar akan terjadi pada tempat-tempat tertentu pada struktur. Pada kasus seperti ini, perlu dilakukan prosedur analisis dinamis untuk mengetahui respon dari struktur.

Suatu struktur bangunan gedung yang mempunyai rasio antar tinggi (H) dan lebar (B) yang besar ($H/B > 4$), akan mengalami simpangan horizontal yang besar akibat pengaruh beban gempa, karena struktur bangunan tidak mempunyai kekuatan lateral yang cukup besar untuk menahan gaya horizontal akibat gempa. Meskipun dapat dikurangi dengan memasang dinding geser (*shear wall*), tetapi momen guling yang terjadi pada struktur akibat beban gempa, tetap akan berpengaruh pada stabilitas struktur.

Beban gempa dapat mengakibatkan momen guling yang besar pada struktur bangunan. Akibat momen guling ini, maka pada kolom-kolom luar dan pondasi-pondasi dari struktur bangunan akan bekerja gaya aksial tekan dan tarik yang cukup besar. Gaya tarik yang besar ini dapat mengakibatkan tertariknya pondasi bangunan.

Kearah tinggi dari bangunan, sebaiknya kelangsingan dari bangunan gedung dibatasi dengan perbandingan antara tinggi dan lebar bangunan, lebih kecil dari 4. Makin langsing konfigurasi dari struktur bangunan, maka akan semakin besar tegangan-tegangan yang terjadi pada kolom-kolom luar struktur, serta akan semakin besar gaya-gaya aksial dan momen lentur yang harus didukung oleh pondasi. Hal ini perlu kiranya menjadi perhatian bagi seorang perencana struktur.



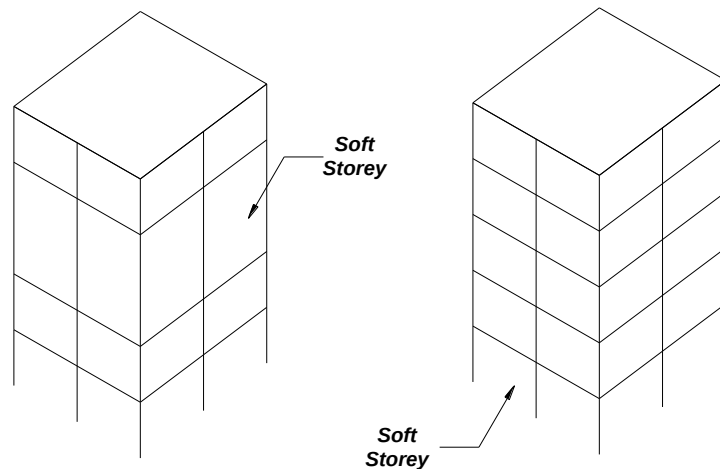
Gambar 2.6. Perubahan Bentuk Struktur Bangunan Pada Arah Vertikal ⁽³⁾

a. Menghindari Soft Storey

Jika pada struktur bangunan gedung terdapat suatu tingkat yang lemah (*soft storey*), dimana kekakuan dan kekuatan dari suatu tingkat lebih rendah dibandingkan dengan tingkat-tingkat yang berada diatas atau dibawahnya seperti diperlihatkan pada Gambar 2.7, maka pada saat terjadi gempa kuat, tegangan dan deformasi plastis akan terkonsentrasi pada tingkat ini, dan hal ini dapat mengakibatkan keruntuhan dari struktur.

Lantai tingkat yang lemah pada bangunan gedung bertingkat banyak, dapat disebabkan karena tidak seragamnya tinggi kolom tingkat dari bangunan. Lantai tingkat yang lemah terdapat juga pada bangunan gedung dengan lantai dasar yang terbuka tanpa dinding penyekat, sedangkan lantai-lantai di atasnya tertutup penuh oleh dinding-dinding penyekat.

Pada bangunan ini, lantai dasar yang terbuka umumnya digunakan sebagai tempat parkir, karena terbatasnya lahan yang tersedia. Struktur bangunan dengan lantai tingkat yang lemah sejauh keadaan memungkinkan harus dihindari, karena hal ini dapat menyebabkan keruntuhan dari struktur pada tingkat ini akibat terbentuknya sendi-sendi plastis di kolom.



Gambar 2.7. Lantai Tingkat yang Lemah (Soft Storey) ⁽³⁾

Untuk mendapatkan respon yang baik dari struktur, distribusi dari kekakuan sepanjang tinggi bangunan harus dengan seragam dan menerus. Konsep ini sangat berkaitan dengan prinsip kesederhanaan dan kesimetrisan. Struktur bangunan akan sangat tahan terhadap pengaruh gempa, jika persyaratan-persyaratan dibawah ini terpenuhi:

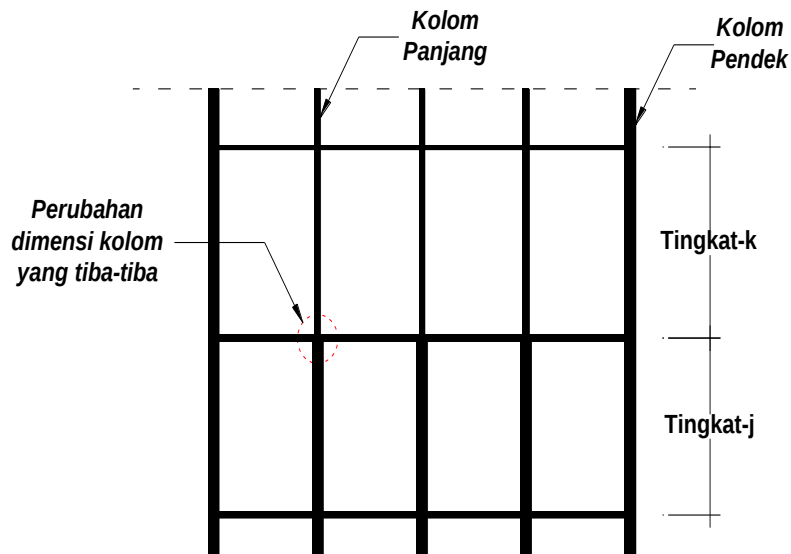
- Distribusi kekakuan dan kekuatan sepanjang tinggi bangunan harus seragam dan menerus.
- Semua kolom struktur dan dinding geser (jika ada), harus menerus dan tanpa pemutusan dari atap sampai pondasi.
- Semua balok struktur harus berhubungan secara menerus.
- Balok-balok dan kolom-kolom struktur diusahakan mempunyai sumbu yang sama.
- Penampang dari elemen-elemen struktur penahan gempa, tidak boleh berubah bentuk secara tiba-tiba.
- Elemen-elemen struktur sedapat mungkin harus berhubungan secara monolitik.

b. Menghindari Short Column Effect

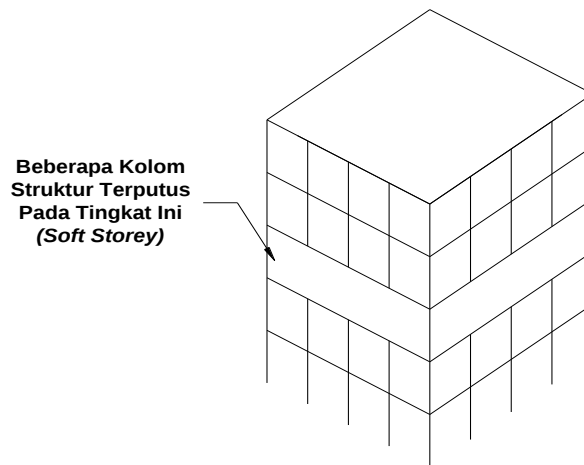
Dimensi dari kolom-kolom struktur yang terdapat pada suatu tingkat, sebaiknya mempunyai ukuran yang sama dan seragam. Jika pada suatu tingkat terdapat kolom-kolom struktur dengan beberapa ukuran yang tidak seragam (kolom pendek dan kolom panjang), maka gaya geser akibat gempa yang bekerja pada tingkat tersebut akan terkonsentrasi pada kolom-kolom yang lebih kaku, yaitu kolom-kolom pendek. Konsentrasi gaya geser dapat menyebabkan runtuhnya kolom pendek terlebih dahulu sebelum keruntuhan dari kolom panjang terjadi.

Gambar 2.8 dibawah ini menunjukkan kolom-kolom dari suatu tingkat dengan ukuran yang seragam (Tingkat-j), serta kolom-kolom dengan ukuran yang tidak seragam (Tingkat-k) yang terdapat pada suatu sistem struktur bangunan, serta perubahan yang mendadak dari ukuran kolom dari suatu tingkat ke tingkat yang lain diatasnya.

Masalah lainnya dalam perencanaan struktur adalah terputusnya elemen-elemen vertikal (kolom dan/ atau dinding geser) penahan gempa (Gambar 2.9). Bila hal ini terjadi maka meskipun analisis dan desain struktur menggunakan perhitungan dengan komputer, tegangan-tegangan yang terjadi pada elemen-elemen struktur tidak dapat dihitung secara akurat.



Gambar 2.8. Konfigurasi Kolom-Kolom Tingkat Pada Struktur Gedung⁽³⁾



Gambar 2.9. Soft Storey Pada struktur Bangunan Akibat Terputusnya Kolom ⁽³⁾

2.4.2. Kekakuan Yang Cukup

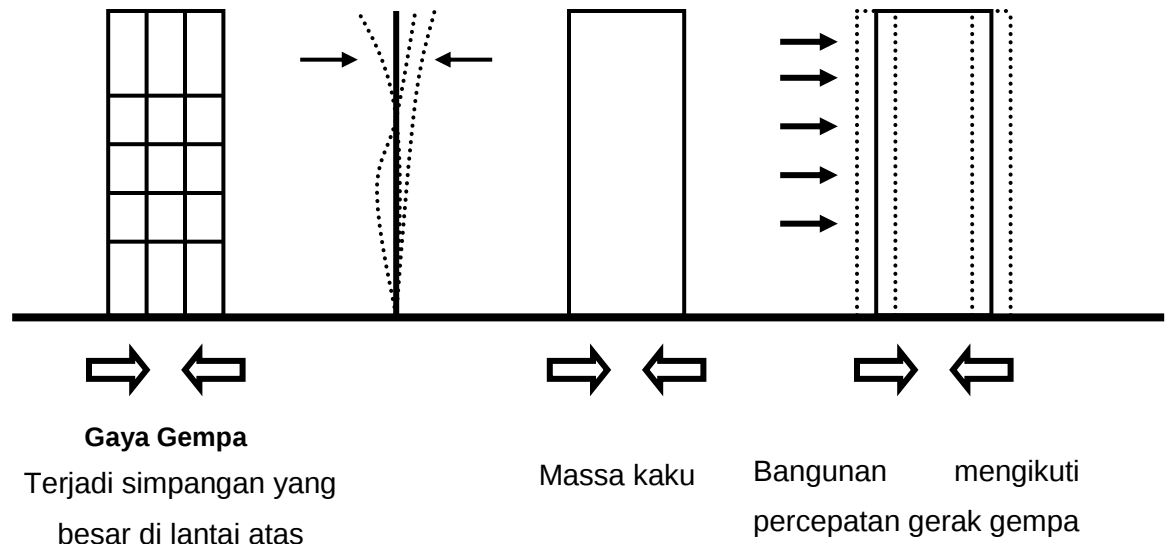
Suatu struktur harus memiliki kekakuan yang cukup sehingga pergerakannya dapat dibatasi. Kekakuan struktur dapat diukur dari besarnya simpangan antar lantai (drift) bangunan. Semakin kecil simpangan struktur maka bangunan tersebut akan semakin kaku (Smith dan Coull, 1991). Ada perbedaan antara *displacement* dan *drift*, *displacement* adalah simpangan suatu lantai diukur dari dasar lantai sedangkan *drift* adalah simpangan suatu lantai diukur dari dasar lantai dibawahnya. Kekakuan bahan itu sendiri dipengaruhi oleh modulus elastisitas bahan dan ukuran elemen tersebut. Dan modulus elastisitas berbanding lurus dengan kekuatan bahan, maka semakin kuat bahan maka bahan tersebut juga semakin kaku. Namun bahan yang terlalu kaku bisa menjadi getas (patah seketika).

Kekakuan struktur adalah gaya yang diperlukan oleh struktur untuk mengalami deformasi sebesar satu satuan. Nilai kekakuan struktur ditentukan oleh property material, dimensi elemen struktur, persentase penulangan, kondisi batas, tegangan dan nilai deformasi struktur. Bangunan harus diberikan kekakuan secukupnya, sehingga $F = m.a$ yang terjadi tidak besar dan lendutan atau simpangan (*deviasi/sway-drift*) antar tingkat bangunan/ lantai bangunan masih terletak pada batas yang diizinkan.

Apabila kekakuan bangunan sangat kecil, maka pada saat tanah bergerak akibat gempa, bangunan praktis tidak mengalami percepatan atau tidak terbawa untuk bergerak. Bangunan terasa mengayun secara fleksibel atau dengan istilah bangunan lebih elastic. Bangunan yang demikian dikatakan memiliki respon yang kecil terhadap gempa. Apabila kekakuan bangunan-bangunan sangat besar, maka massa bangunan akan dipaksa untuk

mengikuti sepenuhnya gerakan tanah, sehingga percepatan yang dialami bangunan akan praktis sama percepatan tanah. Bangunan yang demikian dikatakan mempunyai respon yang besar terhadap gempa.

Optimasi yang ideal adalah gabungan komposisi kedua prinsip diatas dalam batas yang diizinkan dengan tidak terlalu kaku dan tidak terlalu lentur. Dalam hal ini material struktur, sistim sambungan struktur sangat berpengaruh terhadap pergerakan massa bangunan.



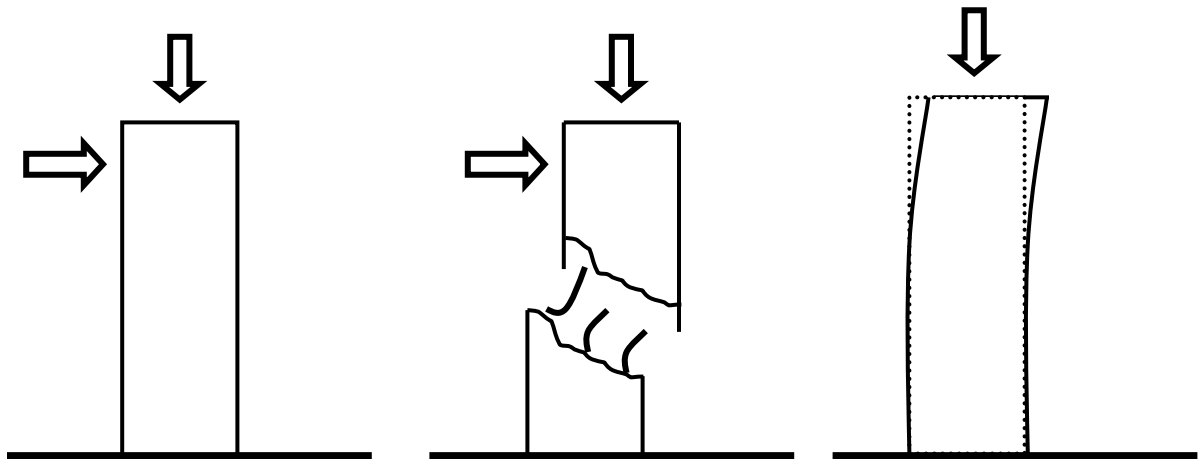
Gambar 2.10. Pola Kekakuan Bangunan Gedung ⁽³⁾

2.4.3. Kekuatan Yang Cukup

Pada prinsipnya struktur diberi kekuatan secukupnya, sehingga akibat gempa berkekuatan sedang, struktur tersebut tetap elastic tanpa mengalami kerusakan struktur tetapi kerusakan elemen non-struktural dapat diterima misalnya untuk gempa bumi dengan periode waktu ulang 20 tahun.

Akibat gempa kuat, struktur bangunan secara keseluruhan harus masih dapat bertahan tanpa runtuh walaupun sudah terjadi kerusakan pada bagian struktur maupun non-struktur. Misalnya untuk gempa besar dengan periode ulangan 500 tahun.

Sendi-sendii plastis sebaiknya terbentuk pada balok dan bukan pada kolom sehingga keruntuhan balok bisa diterima akan tetapi keruntuhan total struktur bangunan seperti kolom/ pilar dapat dihindari.



Gambar 2.11. Pola Keruntuhan Akibat sendi Plastis Terbentuk Pada Kolom ⁽³⁾

Beban Pada Kolom

Keruntuhan Geser

Tulangan geser tidak mencukupi pada struktur.

Keruntuhan Lentur

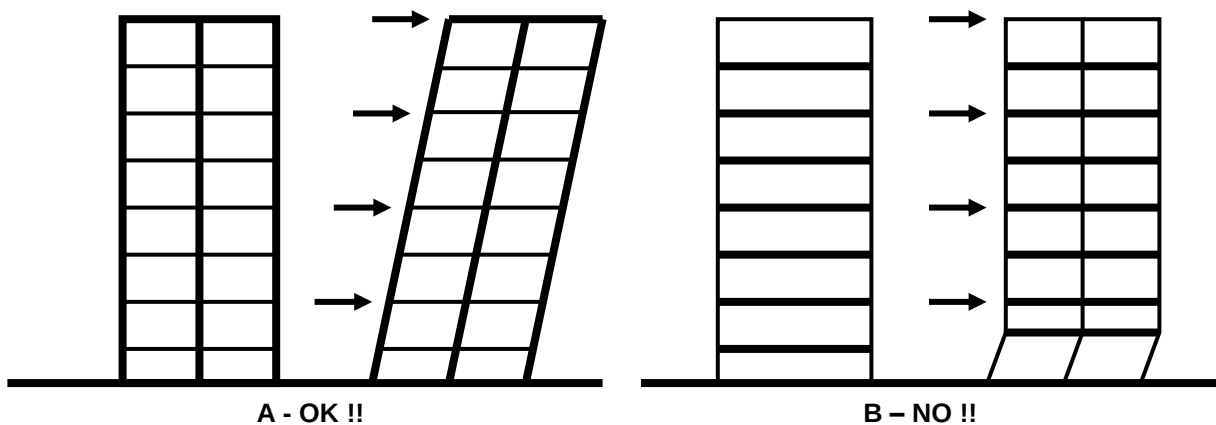
Retak-retak lentur akibat per"lelah"an tarik dari tulangan memanjang

2.4.4. Memiliki Duktilitas Yang Cukup

Duktilitas suatu struktur merupakan kemampuan suatu struktur untuk mengalami simpangan pasca-elastik yang besar secara berulang kali dan bolak-balik akibat beban gempa yang menyebabkan terjadinya pelelehan pertama. Besar kecilnya duktilitas didalam struktur bangunan sangat bergantung pada detail unsur-unsur bangunan terutama didalam sambungan-sambungannya.

Beberapa hal yang perlu diperhatikan pada agar duktilitas pada suatu bangunan dapat tercapai adalah sebagai berikut:

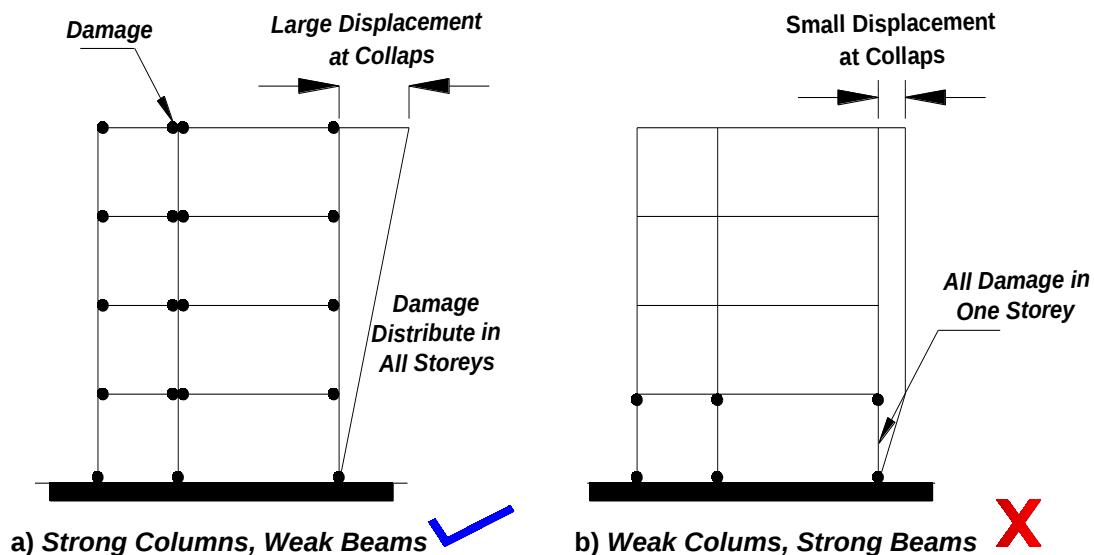
- Sistem sambungan pada elemen struktur vertical maupun horizontal sangat menentukan faktor duktilitas.
- Salah satu syarat mutlak untuk tercapainya duktilitas yang tinggi adalah kolom-kolom harus lebih kuat dari pada balok-balok sehingga sendi plastis selalu akan terjadi dalam balok dan tidak pada kolom struktur.
- Kemungkinan terjadinya sendi plastisitas pada portal-portal terbuka adalah lebih besar dari pada dinding geser. Hal ini dimungkinkan sistem portal mempunyai duktilitas yang lebih tinggi dari pada dinding geser.



Gambar 2.12. Pola Pergoyangan Duktilitas Bangunan ⁽³⁾

Gambar A. Perilaku struktur diatas bisa diterima sebagai pemecahan sistem portal bangunan, dimana kolom lebih kuat dari sistem balok. Gambar B. Elemen kolom lebih lemah dari balok atau sistem plat sehingga sendi plastis terjadi pada kolom. Perilaku struktur seperti ini dapat lebih dikenal dengan istilah “Lantai Lemah” atau “*Soft Storey*”. Kerusakan yang terjadi dapat meruntuhkan bangunan.

Pemecahannya adalah dengan mendisain kekuatan kolom lebih besar dari kekuatan balok. Jika dalam segi arsitektural balok-balok tinggi dibutuhkan sebaiknya rencanakan sistem balok tersebut dengan pra-cetak. Hal ini dimungkinkan sambungan pra-cetak tidak terlalu kaku atau “rigid” sehingga dapat berfungsi sebagai sambungan sendi.

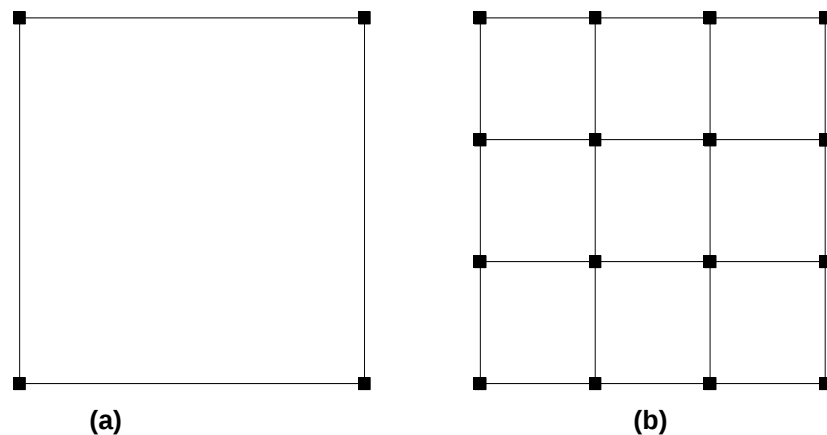


Gambar 2.13. Mekanisme Kolom Kuat, Balok Lemah ⁽¹⁸⁾

2.4.5. Bangunan Memiliki Redudancy yang Tinggi

Faktor redudansi berfungsi untuk meningkatkan gaya geser dasar pada struktur. SNI 03-1726-2012 pasal 7.3.4 menetapkan bahwa faktor redudansi, p harus ditetapkan pada sistem penahan gaya gempa dalam masing-masing kedua arah orthogonal untuk semua sistem struktur.

Sebagai contoh, untuk kedua denah dibawah ini keduanya simetris dan tidak mempunyai “re-entrant corner”. Denah struktur (b) lebih “redundant” dibandingkan dengan struktur (a). Dengan demikian struktur (b) berperilaku lebih baik dibandingkan dengan (a) bila dibebani beban gempa. Logikanya adalah bila pada suatu struktur dengan elemen lebih banya, bila salah satu runtuh maka masih banyak elemen lain yang dapat membantu memberikan ketahanan terhadap gempa.



Gambar 2.14. Redudancy Pada Struktur ⁽²⁰⁾

2.4.6. Sistem Struktur Bangunan Gedung Harus Jelas

Dalam mendesain suatu struktur bangunan gedung, aplikasi sistem struktur yang digunakan harus sesuai dengan sistem struktur yang telah direncanakan. Keseragaman antara sistem struktur yang direncanakan dan yang digunakan di lapangan sangat menentukan respon struktur terhadap beban gempa yang dikenai pada struktur.

Ada dua jenis sistem struktur yang sering digunakan yaitu sistem rangka pemikul momen dan sistem rangka dengan diafragma vertikal. Sistem rangka yang berbentuk rangka

pemikul momen (*momen resisting frame*), merupakan sistem rangka yang paling banyak digunakan dari pada sistem dengan diafragma vertical.

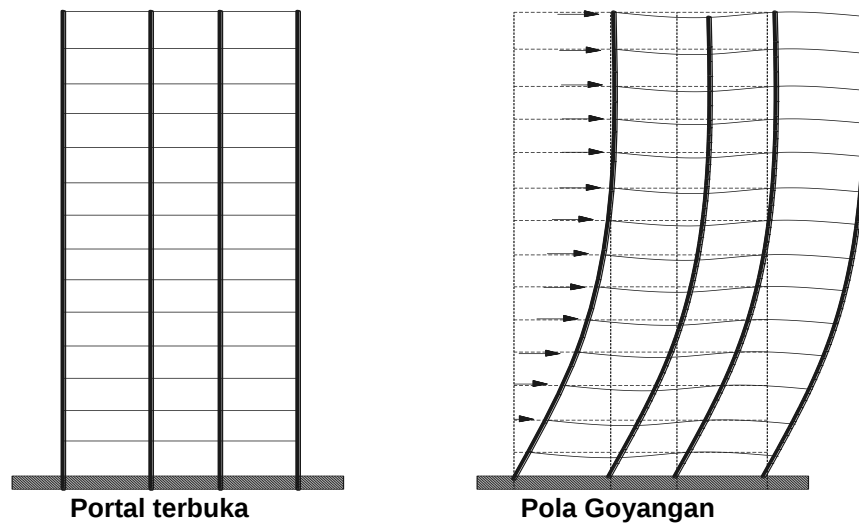
2.4.6.1. Sistem Rangka Pemikul Momen

Sistem rangka pemikul momen adalah sistem rangka yang mampu dirancang untuk memikul beban grafitasi maupun beban lateral. Sistem rangka pemikul momen merupakan gabungan antara balok dan kolom yang dihubungkan secara kaku atau bersifat jepit penuh. Dengan demikian gaya grafitasi maupun gaya lateral akibat gempa ditransfer melalui join balok kolom menjadi gaya dalam berupa momen lentur, gaya geser dan gaya normal. Dalam kasus gaya lateral, momen lentur yang terjadi pada join balok kolom menjadi lebih dominan.

Secara umum terdapat tiga jenis SRPM yakni: Sistem Rangka Pemikul Momen Biasa (SRPMB), Sistem Rangka Pemikul Momen Menengah (SRPMM) dan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK).

SRPM termasuk sistem struktur yang bersifat fleksibel, yaitu mampu berubah cukup besar, karena anggota-anggotanya yaitu balok dan kolom bertampang ramping. Karena fleksibilitasnya, struktur portal (*frame*) akan mempunyai periode T yang relatif besar. Dengan kondisi seperti itu maka kekuatan portal akan sangat bergantung pada kekakuan dasar balok dan kolom EI. Konstanta EI akan sangat bergantung pada jenis, mutu bahan dan dimensi potongan (Widodo, 2012).

Portal akan berdeformasi utamanya secara horisontal akibat *shear deformation* atau struktur berdeformasi menurut sifat-sifat elemen atau bangunan geser. *Shear deformation* pada rangka pemikul momen 90% diantaranya diakibatkan oleh gaya horisontal dan hanya 10% diakibatkan oleh beban grafitasi. Pola goyangan tipe itu mengakibatkan simpangan antara-tingkat Δ (*interstory drift*) pada tingkat-tingkat bawah akan sangat besar dan akan semakin besar pada bangunan yang semakin tinggi dan akan semakin mengecil pada tingkat-tingkat diatasnya, tampak pada Gambar 2.15 (Widodo, 2012).



Gambar 2.15. Pola Simpangan Pada Portal
Sumber : Widodo, 2012

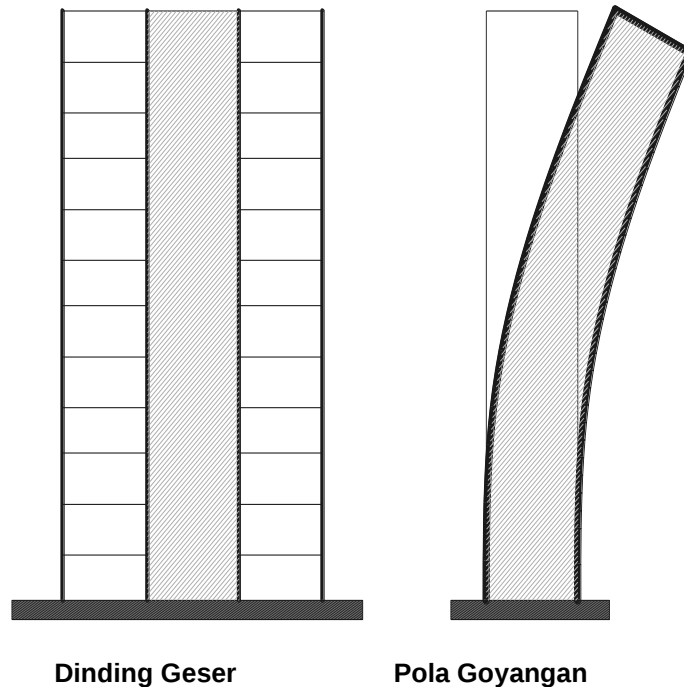
2.4.6.2. Dinding Geser (Sistem Dinding Struktural)

Menurut SNI Gempa 2012 disebutkan dinding geser adalah suatu subsistem struktur gedung yang fungsi utamanya adalah untuk memikul beban geser akibat pengaruh gempa rencana, 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 pergeseran regangan.

Jenis dinding geser dikategorikan berdasarkan geometrinya terdiri dari 3 jenis (Imran, et, al, 2010), yaitu :

1. *Flexural wall* (dinding langsing), yaitu dinding geser yang memiliki rasio $h_w/l_w \geq 2$, dimana desain dikontrol oleh perilaku lentur.
2. *Squat wall* (dinding pendek), yaitu dinding geser yang memiliki rasio $h_w/l_w \leq 2$, dimana desain dikontrol oleh perilaku geser.
3. *Coupled shear wall* (dinding berangkai), dimana momen guling yang terjadi akibat beban gempa ditahan oleh sepasang dinding, yang dihubungkan oleh balok-balok perangkai, sebagai gaya-gaya tarik dan tekan yang bekerja pada masing-masing dasar pasangan dinding tersebut.

Dinding geser yang relatif langsing umumnya akan berperilaku seperti batang kantilever yaitu berperilaku menurut lentur. Pada bagian bawah hanya terjadi simpangan yang relatif kecil, tetapi akan terjadi simpangan yang cukup besar pada bagian atas (Widodo, 2012). Lihat gambar 2.16

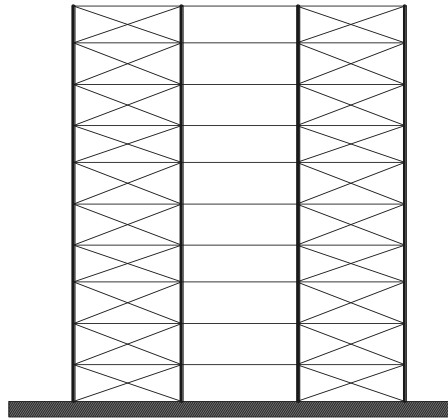


Gambar 2.16 Pola Simpangan Pada Dinding Geser

Sumber : Widodo, 2012

2.4.6.3. Rangka pengaku (*Braced Frame*)

Braced frame merupakan sistem penahan gaya lateral berupa balok dan kolom yang ditambahkan balok diagonal, dengan karakteristik kekakuan elastik yang tinggi. Kekakuan yang tinggi diperoleh dari *diagonal brace* yang menahan gaya lateral pada struktur *frame* yang meningkatkan aksi gaya dalam aksial dan aksi lentur yang kecil. Dari segi arsitektur penambahan pengaku berupa balok diagonal dapat menurunkan fungsi ruang sehingga sistem ini menjadi jarang digunakan para arsitektur dalam perencanaan bangunan bertingkat. Lihat gambar 2.17



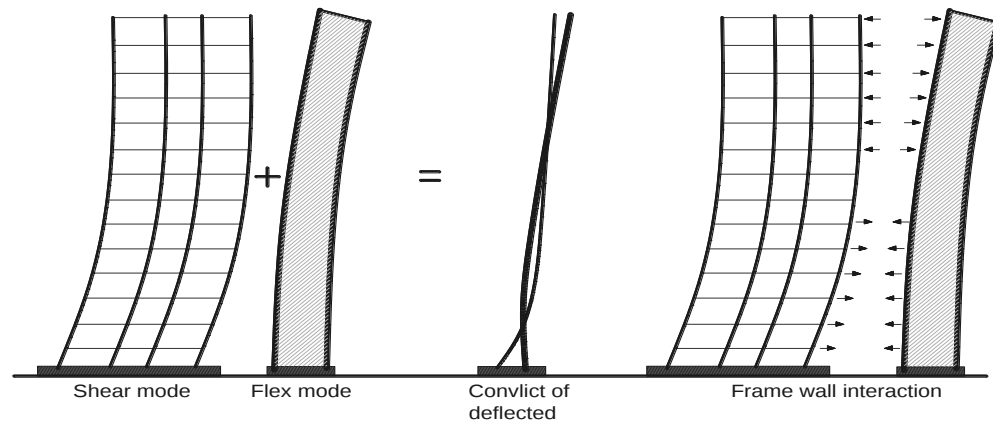
Gambar 2.17. Sistem Struktur Rangka Pengaku (*Breced Frame*)
Sumber : Widodo, 2012

2.4.6.4. Sistem Ganda (Kombinasi Sistem Rangka Pemikul Momen dan Dinding Geser)

Sistem Ganda merupakan salah satu sistem struktur tahan gempa untuk daerah resiko gempa kuat yang memiliki 3 ciri dasar. Yaitu 1, rangka ruang lengkap berupa sistem rangka pemikul momen khusus (SRPMK) yang penting berfungsi memikul beban gravitasi. 2, pemikul beban lateral dilakukan oleh dinding struktural dan sistem rangka pemikul momen khusus (SRPMK) dimana SRPMK harus mampu menahan paling sedikit 25 persen gaya gempa desain. 3, dinding struktural dan sistem rangka pemikul momen khusus (SRPMK) direncanakan untuk menahan beban dasar geser nominal secara proporsional berdasarkan kekakuan relatifnya. Tujuan dari ciri kedua sistem ganda ini agar pada saat terjadi gempa bolak balik yang mengakibatkan dinding geser sudah mulai retak-retak atau dengan kata lain sudah terjadi sendi plastis pada pangkal-pangkal dinding geser lantai dasar, maka kemampuan portal 25 persen inilah yang harus dimanfaatkan dalam menahan gempa sisa yang terjadi agar struktur tidak mengalami keruntuhan.

Mengingat Portal termasuk struktur fleksibel, maka struktur akan mengalami simpangan antara tingkat yang cukup besar dengan demikian periode getar pada struktur juga akan besar pada kombinasi beban vertikal dan beban gempa. Apabila simpangan dan periode getar ini tidak dikendalikan maka akan mudah sekali terbentuk sendi-sendi plastis pada balok yang besar. Untuk itu pemakaian portal tidak cukup efektif bila digunakan pada bangunan bertingkat tinggi dan berada pada wilayah gempa kuat, maka usaha untuk memperkaku portal dapat dilakukan dengan memasang dinding geser. Dengan adanya dinding geser ini maka kekakuan tingkat-tingkat akan bertambah, dan tujuanya selain memperkuat struktur

juga dapat mengurangi simpangan dan periode getar yang terjadi, (Widodo, 2012). Lihat gambar 2.17.



Gambar 2.18 Interaksi Dinding Geser Dan Portal Terbuka
Sumber : Widodo, 2012

2.5. Pengaturan Pendetailan Bangunan Tahan Gempa

2.5.1. Konsep Pendetailan Tulangan

Integritas struktur dalam rentang perilaku inelastik harus dipertahankan mengingat beban gempa nominal yang ditentukan SNI 03-1726-2012 hanya merupakan sebagian dari beban gempa rencana. Karena itu selisih energi beban gempa itu harus disebar dan diserap oleh struktur yang bersangkutan dalam bentuk kemampuan yang berdeformasi secara inelastik. Kemampuan ini yang disebut sebagai daktilitas struktur, yang akan dapat terwujud melalui *detailing* yang sesuai dengan syarat yang diatur oleh SNI 03-2847-2013 Pasal 21 untuk berbagai komponen struktur beton bertulang yang berada pada wilayah yang berpotensi terjadinya gempa mulai dari potensi gempa ringan sampai pada yang berpotensi gempa kuat.

Pada daerah yang berpotensi mengalami gempa ringan, SNI 03-2847-2013 mensyaratkan untuk dapat menggunakan *detailing* tulangan yang diatur dalam ketentuan *detailing* Struktur Rangka Pemikul Momen Biasa (SRPMB). Untuk Struktur Rangka Momen Biasa ketentuan *detailing* tulangan dapat di ambil pada Pasal 1 sampai Pasal 18 dan Pasal 21.2 SNI 03-2847-2013. Pada daerah yang berpotensi mengalami gempa sedang ketentuan *detailing* diatur dalam ketentuan *detailing* Struktur Rangka Pemikul Momen Menengah (SRPMM) yang diatur pada Pasal 21.3 dan Pasal 21.4. Sebagai tambahan untuk Rangka

Momen Menengah, ketentuan *detailing* untuk Rangka Momen Biasa harus dipenuhi. Sedangkan untuk daerah yang berpotensi mengalami gempa kuat, ketentuan *detailing* diatur dalam ketentuan *detailing* Struktur Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) yang diatur pada Pasal 21.5 sampai Pasal 21.7. Sebagai tambahan untuk Rangka Momen Khusus, ketentuan *detailing* Rangka Momen Biasa harus dipenuhi.

2.5.2. Pengaturan Pendetailan Bangunan Tahan Gempa Menurut SNI 03-2847-2013

2.4.2.1. Selimut Beton

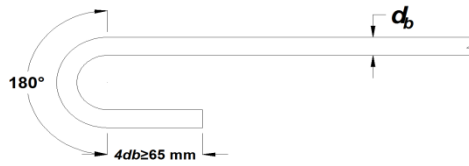
Selimut beton adalah beton yang dibuat untuk menyelimuti tulangan yang ditanam untuk dapat melindungi tulangan dari pengaruh luar seperti cuaca yang dapat menyebabkan tulangan mengalami korosi (karatan). Selimut beton untuk semua komponen struktur yang menggunakan beton cor setempat (prategang) disyaratkan oleh SNI 03-2847-2013 Pasal 7.7.2 sebagai berikut:

- a. Beton yang dicor di atas dan selalu berhubungan dengan tanah 75 mm
- b. Beton yang dihubungkan dengan tanah atau cuaca:
 - Batang tulangan D-19 hingga D-57 50 mm
 - Batang tulangan D-16, kawat M-16 ulir atau polos, dan yang lebih kecil 40 mm
- c. Beton yang tidak berhubungan dengan cuaca atau berhubungan dengan tanah:
 - Slab, dinding, balok rusuk:
 - Batang tulangan D-44 dan D-57 40 mm
 - Batang tulangan D-36 dan yang lebih kecil..... 20 mm
 - Balok, kolom:
 - Tulangan utama, pengikat, sengkang dan spiral..... 40 mm

2.4.2.2. Kait Standar

Kait standar adalah panjang penjangkaran minimum yang disyaratkan untuk dapat mengekang inti beton yang dilingkupinya. SNI 03-2847-2013 Pasal 7.1.1 sampai Pasal 7.1.4 menetapkan beberapa tipe kait standar untuk tulangan longitudinal, sengkang dan kait pengikat sebagai berikut:

- a. Bengkokan 180 derajat ditambah perpanjangan $4d_b$, tetapi tidak kurang dari 65 mm pada ujung bebas batang tulangan.



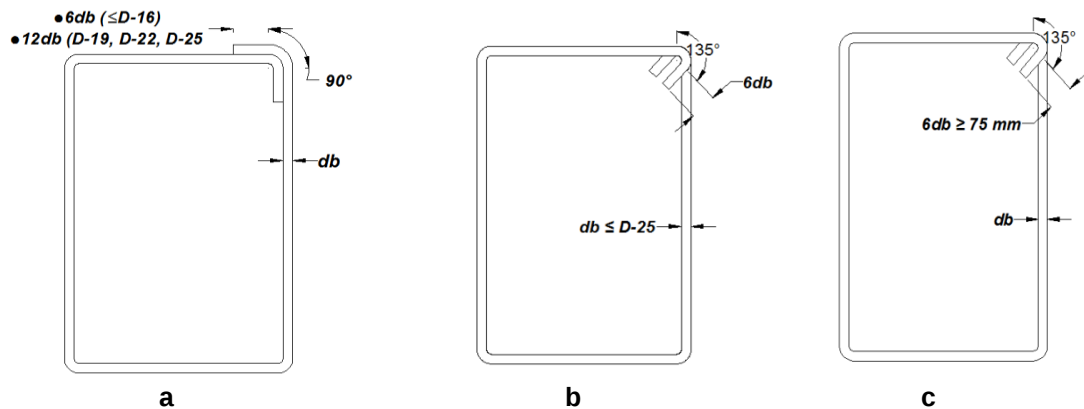
Gambar 2.19. Kait Standar Bengkokan 180 Derajat
Sumber Gambar : Konsep SNI 03-2847-2013

- b. Bengkokan 90 derajat ditambah perpanjangan $12d_b$ pada ujung bebas batang tulangan.



Gambar 2.20. Kait Standar Bengkokan 90 Derajat
Sumber Gambar : Konsep SNI 03-2847-2013

- c. Untuk sengkang dan kait pengikat
- (a) Batang tulangan D-16 dan yang lebih kecil, bengkokan 90° ditambah perpanjangan $6d_b$ pada ujung bebas batang tulangan; atau
 - (b) Batang tulangan D-19, D-22, D-25, bengkokan 90° ditambah perpanjangan $12d_b$ pada ujung bebas batang tulangan; atau
 - (c) Kait pada sengkang, atau pengikat silang yang mempunyai bengkokan tidak kurang dari 135 derajat, kecuali sengkang tertutup melingkar harus mempunyai bengkokan tidak kurang dari 90 derajat. Kait harus mempunyai perpanjangan $6d_b$ (tetapi tidak kurang dari 75 mm) yang mengikat tulangan longitudinal dan menjorok ke bagian dalam sengkang atau sengkang tertutup.

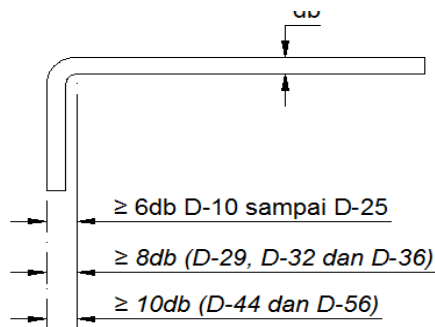


Gambar 2.21. Kait Standar Tulangan Sengkang
Sumber Gambar : Konsep SNI 03-2847-2013

2.5.2.3. Diameter Bengkokan Minimum

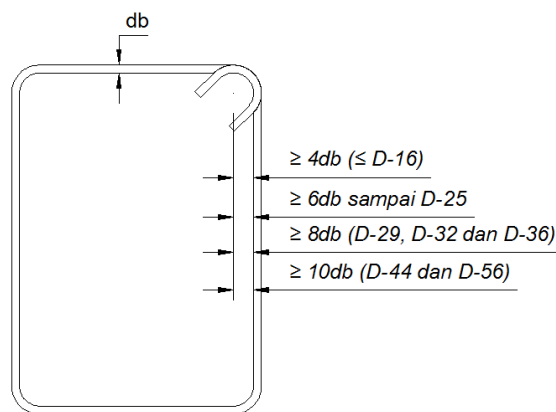
Diameter bengkokan minimum adalah besarnya diameter yang disyaratkan untuk tulangan longitudinal, sengkang dan kait pengikat dengan tujuan agar tulangan yang dikenakan diameter bengkokan minimum tersebut akan terikat secara efektif dengan tulangan yang akan dilingkupinya. SNI 03-2847-2013 Pasal 7.2.1 sampai Pasal 7.2.3 menetapkan besarnya diameter bengkokan minimum untuk tulangan longitudinal, sengkang dan kait pengikat sebagai berikut:

- a. Diameter bengkokan yang diukur pada bagian dalam batang tulangan, selain dari untuk sengkang dan pengikat dengan ukuran D-10 hingga D-16, tidak boleh kurang dari nilai dalam tabel 2.2.



Gambar 2.22. Diameter Bengkokan Tulangan Longitudinal
Sumber Gambar : Konsep SNI 03-2847-2013

- b. Diameter dalam bengkokan untuk sengkang dan pengikat tidak boleh kurang dari **4db**, untuk batang tulangan D-16 dan yang lebih kecil. Untuk batang tulangan yang lebih besar dari D-16, diameter bengkokan harus sesuai dengan tabel 2.2.



Gambar 2.23 Diameter Bengkokan Tulangan Sengkang
Sumber Gambar : Konsep SNI 03-2847-2013

- c. Diameter dalam bengkokan pada tulangan kawat las untuk sengkang dan pengikat tidak boleh kurang dari $4d_b$ untuk kawat ulir yang lebih besar dari D-7 dan $2d_b$ untuk semua kawat lainnya. Bengkokan dengan diameter dalam kurang dari $8d_b$ tidak boleh berada kurang dari $4d_b$ dari persilangan las yang terdekat.

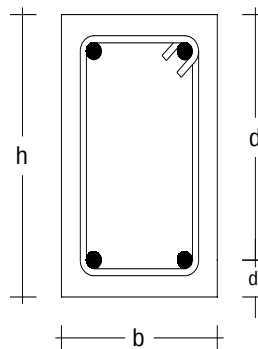
Tabel 2.2 Diameter Bengkokan Minimum

Ukuran batang tulangan	Diameter minimum
D-10 sampai D-25	$6d_b$
D-29, D-32, dan D-56	$8d_b$
D-44 dan D-56	$10d_b$

Sumber: Tabel 7.2 SNI 03-2847-2013

2.5.2.4. Jarak (spasi) Tulangan Sengkang

SNI 03-2847-2013 Pasal 11.4.5.1 menetapkan jarak maksimum untuk tulangan geser (sengkang) balok maupun kolom tidak boleh melebihi $d/2$ pada komponen struktur non-prategang dan $0,75h$ pada komponen struktur prategang, ataupun 600 mm. Dimana d adalah jarak dari serat tekan terjauh ke pusat tulangan tarik longitudinal (satuan dalam mm).



Gambar 2.24 Jarak Serat Tekan Terjauh Ke Pusat Tulangan Longitudinal

Sumber Gambar : Konsep SNI 03-2847-2013

2.5.2.5. Penyaluran Tulangan

Panjang penyaluran tulangan adalah panjang minimum yang dibutuhkan oleh baja tulangan yang tertanam di dalam beton dimana dengan panjang tertanam tersebut baja tulangan mampu mengembangkan tegangan lelehnya tanpa mengalami kegagalan. Semakin

dalam baja tulangan tertanam dalam beton maka baja tulangan semakin mampu untuk mengembangkan kekuatannya atau panjang penyaluran adalah panjang yang diperlukan untuk menyalurkan keseluruhan gaya dari tulangan beton disebaliknya. Panjang penyaluran tulangan berhubungan dengan kuat rekatan antara tulangan dengan beton, yang dipengaruhi oleh faktor-faktor antara lain: kuat tekan beton, bentuk permukaan tulangan, tebal selimut beton, jarak tulangan, prosentase kekangan serta kondisi pengecoran.

Berdasarkan SNI 03-2847-2013, penyaluran tulangan terbagi atas 2 jenis yaitu penyaluran tulangan ulir lurus dan penyaluran tulangan ulir berkait. Untuk penyaluran tulangan ulir lurus, penyaluran tulangan dianggap dapat tersalurkan dalam kondisi tarik maupun tekan sedangkan untuk penyaluran tulangan yang di akhiri dengan kait standar pada ujung bebasnya, penyaluran tulangan dianggap selalu dalam kondisi tarik.

2.5.2.6. Penyaluran Tulangan Ulir Lurus Kondisi Tarik

Pasal 12.2.2 SNI 03-2847-2013, panjang penyaluran ℓ_d untuk batang tulangan ulir lurus kondisi tarik diambil minimum sebesar 300 mm, untuk beberapa tipe diameter tulangan mengikuti persamaan yang diberikan dalam tabel berikut ini:

Tabel 2.3 Panjang penyaluran tulangan ulir lurus dalam kondisi tarik

	Batang tulangan atau kawat ulir D-19 dan yang lebih kecil	Batang tulangan D-22 dan yang lebih besar
Spasi bersih batang tulangan atau kawat yang disalurkan atau disambung tidak kurang dari d_b , selimut bersih tidak kurang dari d_b , dan sengkang atau pengikat sepanjang ℓ_d tidak kurang dari minimum Tata Cara atau Spasi bersih batang tulangan atau kawat yang disalurkan atau disambung tidak kurang dari $2d_b$ dan selimut bersih tidak kurang dari d_b	$\left(\frac{f_y \Psi_t \Psi_e}{2,1 \lambda \sqrt{f_c'}} \right) d_b$	$\left(\frac{f_y \Psi_t \Psi_e}{1,7 \lambda \sqrt{f_c'}} \right) d_b$
Kasus-kasus lain	$\left(\frac{f_y \Psi_t \Psi_e}{1,4 \lambda \sqrt{f_c'}} \right) d_b$	$\left(\frac{f_y \Psi_t \Psi_e}{1,1 \lambda \sqrt{f_c'}} \right) d_b$

Sumber: Tabel 12.2.2 SNI 03-2847-2013

Dimana:

ℓ_d = panjang penyaluran, mm $\ell_d > 300$ mm

- d_b = diameter batang tulangan yang digunakan, mm
- f_y = kuat leleh tulangan
400 MPa jika digunakan tulangan ulir
320 MPa jika digunakan tulangan polos
- ψ_t = faktor lokasi penulangan
1,3 jika tulangan berada di atas beton segar setebal > 300 mm
1,0 untuk situasi lainnya.
- ψ_e = faktor pelapis tulangan
1,5 untuk batang tulangan dilapisi ganda bahan seng dan epoksi, atau kawat dilapisi epoksi dengan selimut kurang dari $3d_b$, atau spasi bersih kurang dari $6d_b$.
1,2 untuk batang tulangan dilapisi ganda bahan seng dan epoksi, atau kawat dilapisi epoksi lainnya.
1,0 untuk batang tulangan tidak dilapisi dan dilapisi bahan seng (dikalvanis).
- $\psi_t \cdot \psi_e$ tidak perlu lebih besar dari 1,7.
- λ = faktor jenis beton
 $\leq 0,75$ jika digunakan beton ringan kecuali jika f_{ct} ditetapkan.
1,0 jika digunakan berat beton normal.

2.5.2.7. Penyaluran Tulangan Ulir Dalam Kondisi Tekan

Pasal 12.3 SNI 03-2847-2013, panjang penyaluran tulangan ulir lurus dalam kondisi tekan ℓ_{dc} diambil minimum sebesar 200 mm, untuk semua tipe tulangan ℓ_{dc} harus diambil yang terbesar dari 2 persamaan berikut ini:

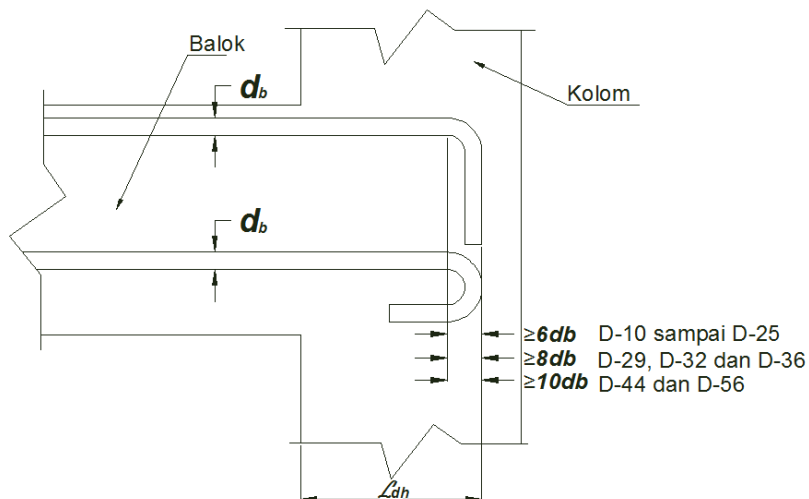
$$\ell_{dc} = \left(\frac{0,24f_y}{\lambda\sqrt{f_c}} \right) d_b \dots\dots\dots (2.1)$$

$$\ell_{dc} = (0,043f_y) d_b \dots\dots\dots (2.2)$$

dimana faktor-faktor diatas diambil sesuai Sub Bab 2.5.2.6.

2.5.2.8. Penyaluran Tulangan Ulir Kait 90° dan 180° Kondisi Tarik

Berdasarkan Pasal 12.5 SNI 03-2847-2013, panjang penyaluran tulangan ulir yang diakhiri dengan kait standard sesuai Sub Bab 2.5.2.2 (a) dan (b) dalam kondisi tarik diambil sesuai persamaan di bawah tetapi tidak boleh kurang dari **8d_b** dan 150 mm.



Gambar 2.25 Panjang Penyaluran Tulangan Ulir Kondisi Tarik

Sumber Gambar : Konsep SNI 03-2847-2013

$$l_{dh} = \left(\frac{0,24f_y}{\lambda\sqrt{f_c'}} \right) d_b \dots\dots\dots (2.3)$$

dimana:

ψ_e = faktor pelapis tulangan
 1,2 untuk tulangan dilapisi epoksi.
 1,0 untuk kondisi lainnya.

λ = faktor jenis beton
 0,75 jika digunakan beton ringan.
 1,0 untuk kondisi lainnya.

Panjang l_{dh} di atas harus diizinkan untuk di kalikan dengan faktor-faktor modifikasi berikut:

- a. Kait tulangan $\leq$ D-36 dengan selimut beton $\geq$ 65 mm, dan kait 90° dengan selimut pada perpanjangan batang tulangan sesudah kait $\geq$ 50 mm.....**0,7**

- b. Kait 90° dari tulangan $\leq D-36$ yang dilingkupi sengkang/ sengkang ikat yang dipasang sepanjang ℓ_{dh} dengan spasi tidak melebihi $3d_b$**0,8**
- c. Kait 180° dari tulangan $\leq D-36$ dilingkupi sengkang/ sengkang pengikat tegak lurus ℓ_{dh} dengan spasi tidak lebih dari $3d_b$**0,8**

2.5.2.9. Penyaluran Tulangan Kawat Polos Las Dalam Kondisi Tarik

Pasal 12.8 SNI 03-2847-2013, panjang penyaluran tulangan polos las dalam kondisi tarik diambil sesuai persamaan dibawah ini tetapi tidak kurang dari 150 mm.

$$\ell_d = 3,3 \frac{A_b}{s} \frac{f_y}{\lambda \sqrt{f_c}}, \dots\dots\dots (2.4)$$

Dimana:

- λ = faktor jenis beton
 $\leq 0,75$ jika digunakan beton ringan kecuali jika f_{ct} ditetapkan.
 $1,0$ jika digunakan berat beton normal.
- A_b = Luas tulangan, mm².
- s = Spasi kawat yang disalurkan, mm.

2.5.2.10. Sambungan Tulangan

Dalam pembuatan struktur beton bertulang sering diperlukan penyambungan tulangan, karena panjang tulangan yang tersedia tidak bisa mengikuti panjang yang diinginkan karena panjang tulangan yang ada telah di batasi panjangnya pada saat pabrikasi. Menurut Lancelot (1985), penyambungan tulangan dapat dilakukan dengan tiga cara, yaitu sambungan lewatan (*lap splices*), sambungan las (*welded splices*), dan sambungan mekanis (*mechanical connections*).

Menurut Dipohusodo (1994) sambungan lewatan merupakan sambungan yang paling ekonomis. Oleh karena itu hampir seluruh konstruksi beton bertulang menggunakan sambungan jenis ini. Sambungan lewatan (*splices*) dapat dibuat dengan cara membuat *overlap* tulangan yang saling bersentuhan ataupun terpisah (Wang dan Salmon, 1993).

Sambungan lewatan adalah panjang minimal yang diperlukan oleh tulangan, yang disambung dengan cara *overlapping* pada beton bertulang, agar dapat memberikan transver kekuatannya secara penuh pada tulangan penyambungannya. Berdasarkan SNI 03-2847-2013, sambungan harus ditinjau terhadap 2 kondisi yaitu sambungan yang mengalami gaya tarik dan tekan.

a. Sambungan Batang Tulangan dan Kawat Ulir Dalam Kondisi Tarik

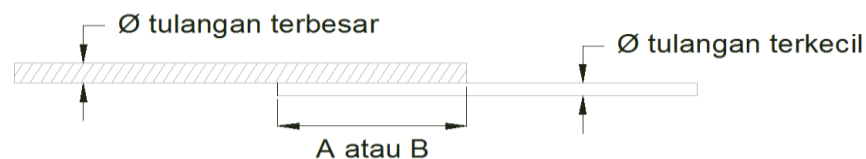
SNI 03-2847-2013 Pasal 12.5.1, panjang minimum sambungan lewatan tarik harus mempertimbangkan nilai ℓ_d seperti pada Sub Bab 2.6.2.6. Panjang minimum sambungan untuk sambungan lewatan tarik harus seperti disyaratkan untuk sambungan kelas A atau B, tetapi tidak boleh kurang dari 300 mm, dimana:

Sambungan Kelas A..... $1,0\ell_d$(2.5)

Sambungan Kelas B..... $1,3\ell_d$(2.6)

Sambungan lewatan tulangan ulir dan kawat ulir dalam kondisi tarik merupakan sambungan kelas B kecuali sambungan Kelas A diperbolehkan bilamana luas tulangan yang disediakan paling sedikit dua kali yang diperlukan oleh analisis sepanjang panjang keseluruhan sambungan dan setengah atau kurang tulangan total disambung dalam panjang lewatan yang disyaratkan.

Bila batang tulangan dengan ukuran berbeda disambung lewatkan dalam kondisi tarik, panjang sambungan harus merupakan ℓ_d dari tulangan yang terbesar.



Gambar 2.26 Sambungan Tulangan Ulir dan Kawat Ulir Kondisi Tarik

Sumber Gambar: Konsep SNI 03-2847-2013

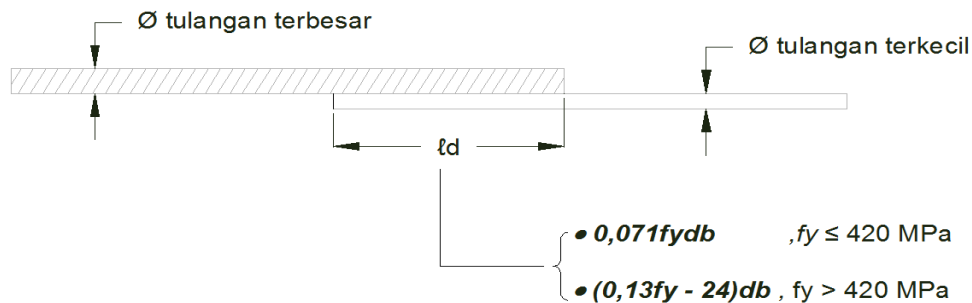
b. Sambungan Batang Tulangan Ulir Dalam Kondisi Tekan

SNI 03-2847-2013 Pasal 12.16, panjang sambungan lewatan tekan tidak boleh kurang dari 300 mm, untuk setiap nilai f_y harus diambil sesuai dengan persamaan:

$$0,071f_y d_b \quad , \text{untuk } f_y \leq 420 \text{ MPa} \dots\dots\dots (2.7)$$

$$(0,13f_y - 24)d_b \quad , \text{untuk } f_y > 420 \text{ MPa} \dots\dots\dots (2.8)$$

Untuk f_c' yang kurang dari 21 MPa, panjang lewatan harus ditambah sepertiga dari panjang lewatan normal. Jika batang tulangan dengan ukuran berbeda disambung lewatan maka panjang lewatan harus sesuai dengan panjang lewatan dari tulangan terbesar.



Gambar 2.27 Sambungan Tulangan Ulir dan Kawat Ulir Kondisi Tekan

Sumber Gambar: Konsep SNI 03-2847-2013

c. Ketentuan Sambungan Lewatan Pada Kolom

Untuk komponen struktur tekan dengan sengkang/ sengkang ikat, panjang sambungan lewatan l_d sesuai Sub Bab 2.6.2.10 dapat dikalikan dengan faktor 0.83 tetapi tidak boleh kurang dari 300 mm. Sambungan harus merupakan sambungan lewatan tarik Kelas B kecuali sambungan tulangan ditempatkan selang-seling pada suatu irisan penampang maka sambungan harus merupakan sambungan lewatan tarik Kelas A.

Jika kolom yang digunakan adalah kolom dengan sengkang tertutup melingkar atau spiral, panjang sambungan lewatan dapat dikalikan dengan faktor 0.75 tetapi tidak boleh kurang dari 300 mm.

2.5.2.11. Detailing Tulangan Untuk Struktur Tahan Gempa

Pasal 21 dalam SNI 03-2847-2013 mengatur tentang ketentuan detail tulangan untuk struktur tahan gempa. Ketentuan detail yang telah disebutkan diatas (dari Sub Bab

2.5.2.1 sampai Sub Bab 2.5.2.10) berlaku untuk struktur-struktur yang tidak direncanakan tahan gempa, untuk struktur tahan gempa semua ketentuan tersebut harus digantikan oleh ketentuan yang tercantum dalam Pasal 21. Sebagai contoh sebuah struktur yang direncanakan hanya terhadap beban gravitasi tetapi dikehendaki agar mampu tahan gempa berarti ketentuan detail mengikuti ketentuan dalam Pasal 21.

Dalam SNI 03-2847-2013 diatur beberapa ketentuan detail tulangan sesuai dengan sistem rangka yang digunakan. Untuk sistem rangka yang direncanakan berperilaku elastik dapat menggunakan ketentuan detail tulangan dari Sub Bab 2.5.2.1 sampai Sub Bab 2.5.2.10, untuk sistem rangka yang direncanakan berperilaku daktail menengah (Sistem Rangka Pemikul Momen Menengah/ SRPMM) atau daktail penuh (Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus/ SRPMK) harus mengikuti ketentuan detail tulangan pada Sub Bab ini.

a. Ketentuan Detail Tulangan SRPMB

SRPMB adalah sistem rangka pemikul momen biasa yang membentuk bagian dari sistem penahan gaya gempa. SRPMB biasa digunakan pada daerah-daerah yang tidak berpotensi gempa maupun daerah yang berpotensi gempa ringan. Dalam SNI 03-2847-2013 dikatakan bahwa SRPMB adalah rangka beton cor ditempat atau pracetak yang memenuhi persyaratan Pasal 1 sampai 18 SNI 03-2847-2013 dan Pasal 21.3. Oleh Karena itu ketentuan detail dari Pasal 1 sampai Pasal 18 merupakan ketentuan detail untuk SRPMB yang artinya dalam ketentuan detail tulangan untuk SRPMB harus diambil sesuai ketentuan detail tulangan dari Sub Bab 2.5.2.1 sampai Sub Bab 2.5.2.10.

b. Ketentuan Detail Tulangan SRPMM

SRPMM adalah sistem rangka pemikul momen menengah dimana struktur rangka beton bertulang direncanakan berperilaku daktail menengah artinya tidak semua kapasitas daktilitas strukturnya dikerahkan semuanya. Desain tersebut dilakukan dengan membagi gaya gempa elastik dengan sebuah faktor yang sedang hingga struktur direncanakan dengan nilai beban gempa yang lebih kecil tapi dengan pendetailan tulangan yang sesuai diharapkan saat terjadi gempa tidak terjadi kerusakan-kerusakan yang berat. Karena daktilitas yang

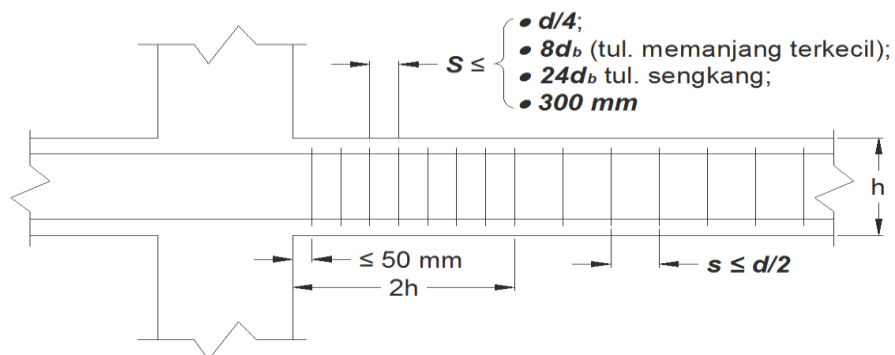
dikerahkan masih dalam tingkat menengah maka detail tulangan yang disyaratkan juga tidak terlalu ketat, terutama dalam pendetailan elemen-elemen vertikalnya.

Dalam SNI 03-2847-2013, ketentuan detail tulangan untuk SRPMM diizinkan dapat menggunakan ketentuan detail tulangan untuk SRPMB yang artinya dalam ketentuan detail tulangan untuk SRPMM harus di ambil sesuai Pasal 21.3 SNI 03-2847-2013 dan sebagai tambahannya ketentuan dalam SRPMB harus dipenuhi karena ketentuan detail tulangan untuk SRPMM dapat diaplikasikan pada daerah yang berpotensi mengalami gempa sedang hingga gempa ringan.

a) Ketentuan Detail Tulangan Balok

Untuk elemen lentur balok, SNI 03-2847-2013 mensyaratkan beberapa ketentuan detail tulangan SRPMM sebagai berikut:

- (a) Pada kedua ujung balok, sengkang harus disediakan sepanjang panjang tidak kurang dari **$2h$** diukur dari muka komponen struktur penumpu ke arah tengah bentang. Sengkang pertama harus ditempatkan tidak lebih dari 50 mm dari muka komponen struktur penumpu. Spasi sengkang tidak boleh melebihi yang terkecil dari (a), (b), (c), dan (d):
- (b) **$d/4$** ;
- (c) Delapan kali diameter batang tulangan longitudinal terkecil yang dilingkupi;
- (d) 24 kali diameter batang tulangan sengkang;
- (e) 300 mm.
- (f) Sengkang harus dispasikan tidak lebih dari **$d/2$** sepanjang panjang balok.



Gambar 2.28. Detail Tulangan Sengkang Untuk Balok
Sumber Gambar: Konsep SNI 03-2847-2013

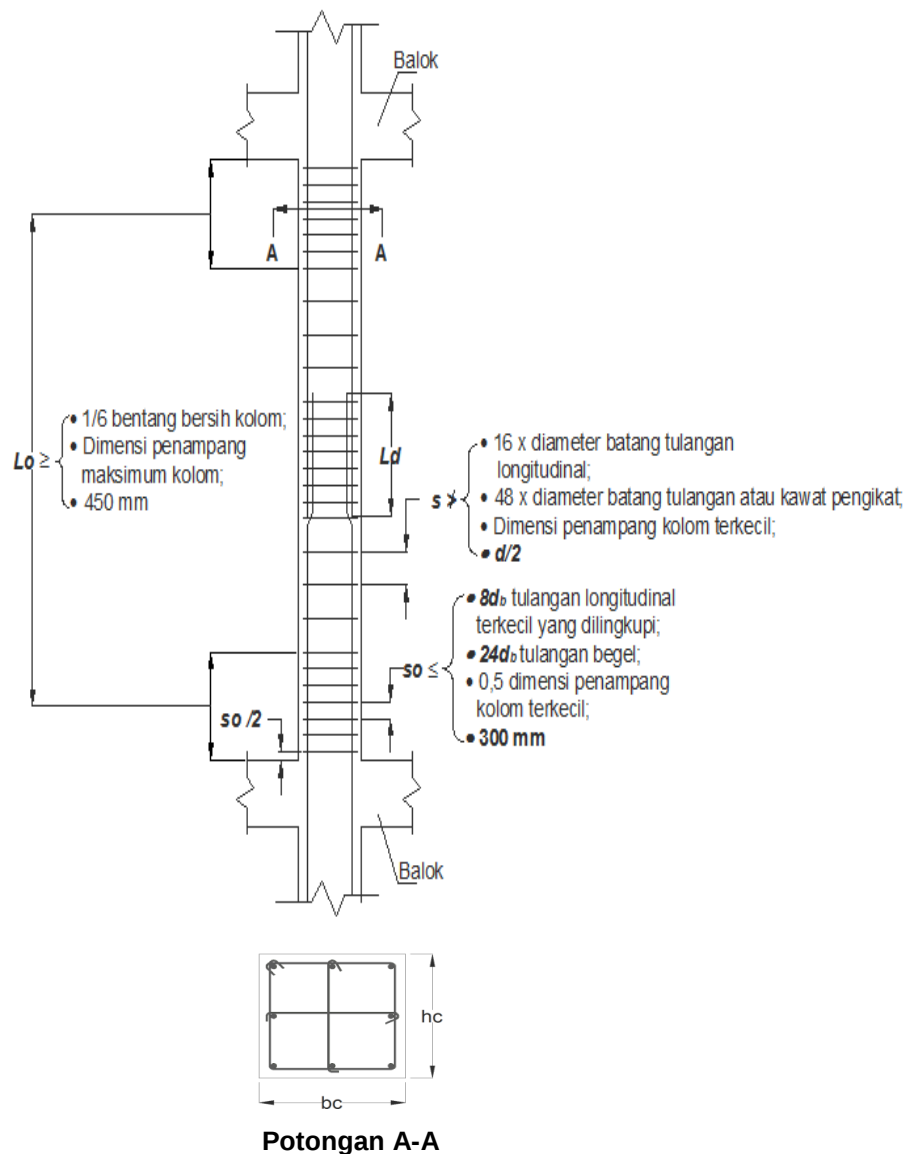
b) Ketentuan Detail Tulangan Kolom

Untuk elemen aksial-lentur kolom, SNI 03-2847-2013 mensyaratkan beberapa ketentuan detail tulangan yang perlu diperhatikan sebagai berikut:

- (a) Pada kedua ujung kolom, sengkang harus disediakan dengan spasi s_o sepanjang panjang ℓ_o diukur dari muka joint. Spasi s_o harus tidak boleh melebihi yang terkecil dari:
 - (b) Delapan kali diameter batang tulangan longitudinal terkecil yang dilingkupi;
 - (c) 24 kali diameter batang tulangan begel;
 - (d) Setengah dimensi penampang kolom terkecil;
 - (e) 300 mm.

Panjang ℓ_o tidak boleh kurang dari yang terbesar dari:

- (1). Seperenam bentang bersih kolom;
 - (2). Dimensi penampang maksimum kolom;
 - (3). 450 mm.
- (f) Sengkang tertutup pertama harus ditempatkan tidak lebih dari $s_o/2$ dari muka joint.
 - (g) Di luar panjang ℓ_o yang ditetapkan diatas, spasi tulangan transversal tidak boleh lebih dari:
 - (1). 16 kali diameter batang tulangan longitudinal;
 - (2). 48 kali diameter batang tulangan atau kawat pengikat;
 - (3). Ukuran terkecil komponen struktur
 - (4). $d/2$



Gambar 2.29. Detail Tulangan Sengkang Kolom
Sumber Gambar: Konsep SNI 03-2847-2013

c. Ketentuan Detail Untuk SRPMK

SRPMK adalah sistem rangka pemikul momen khusus dimana struktur rangka beton bertulang yang direncanakan berperilaku daktail penuh artinya semua kapasitas daktalitas strukturnya dikerahkan secara maksimal. Desain tersebut dilakukan dengan membagi gaya gempa elastic dengan sebuah faktor yang besar sehingga struktur direncanakan dengan nilai beban gempa yang kecil sekali tapi dengan pendetailan tulangan yang sesuai diharapkan

saat terjadi gempa tidak terjadi kerusakan-kerusakan yang berat karena strukturnya mampu mengembangkan daktilitasnya secara penuh. Karena daktilitas yang dikerahkan sudah maksimal maka detail tulangan yang disyaratkan juga cukup ketat, terutama dalam pendetailan elemen-elemen vertikalnya.

Dalam SNI 03-2847-2013, ketentuan detail tulangan untuk SRPMK diizinkan dapat menggunakan ketentuan detail tulangan untuk SRPMB yang artinya dalam ketentuan detail tulangan untuk SRPMK harus di ambil sesuai Pasal 21.5 SNI 03-2847-2013 dan sebagai tambahannya ketentuan dalam SRPMB harus dipenuhi karena ketentuan detail tulangan untuk SRPMK dapat diaplikasikan pada daerah yang berpotensi mengalami gempa ringan hingga gempa tinggi. Tetapi ketentuan detail tulangan untuk SRPMK tidak diizinkan untuk mengikuti ketentuan detail dari SRPMM.

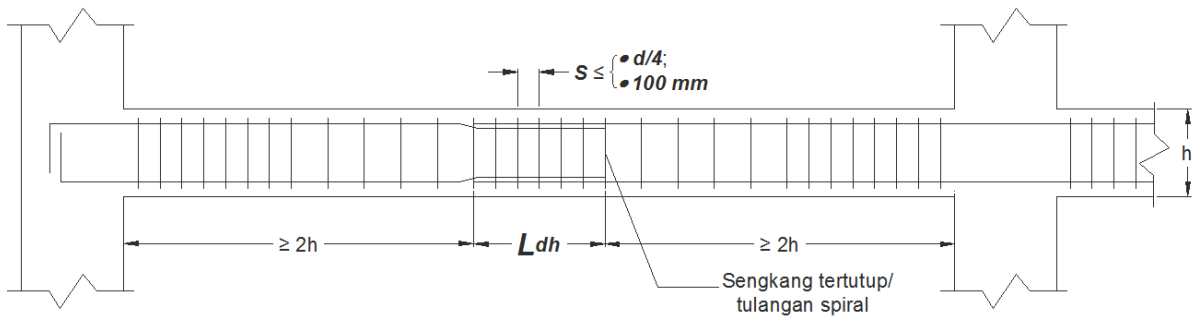
a) Ketentuan Detail Tulangan Balok SRPMK

Untuk elemen aksial-lentur balok, SNI 03-2847-2013 Pasal 21.5.2 mensyaratkan beberapa ketentuan detail tulangan yang perlu diperhatikan sebagai berikut:

1) Persyaratan sambungan lewatan tulangan

Ada beberapa persyaratan sambungan lewatan tulangan yang perlu diperhatikan pada perencanaan komponen struktur lentur SRPMK, diantaranya adalah:

- a. Panjang sambungan lewatan mengikuti ketentuan panjang sambungan lewatan tulangan yang ada pada Sub Bab 2.5.2.6.
- b. Sambungan lewatan untuk penyambungan tulangan lentur harus diberi tulangan spiral atau sengkang tertutup disepanjang sambungan tersebut.
- c. Spasi tulangan transversal yang melingkupi batang tulangan yang disambung lewatan tidak boleh melebihi yang lebih kecil dari $d/4$ dan 100 mm
- d. Sambungan lewatan tidak boleh digunakan pada daerah-daerah yang ditentukan berikut ini:
 - 1) Dalam joint;
 - 2) Dalam jarak dua kali tinggi komponen struktur dari muka joint;
 - 3) Bila analisis menunjukkan pelelehan lentur diakibatkan oleh perpindahan lateral inelastic rangka.



Gambar 2.30. Persyaratan Sambungan Lewatan Balok SRPMK

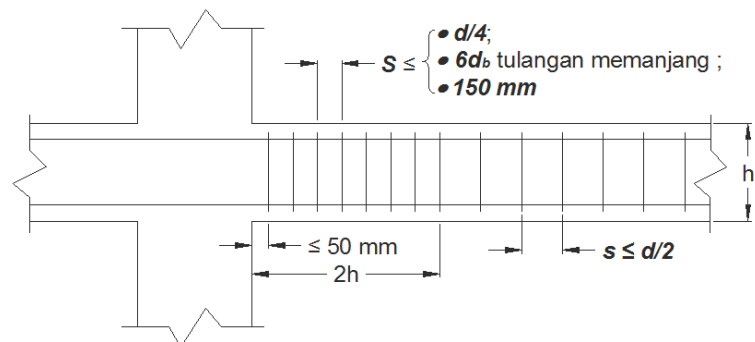
Sumber Gambar: Konsep SNI 03-2847-2013

2) Persyaratan tulangan transversal

- a) Di kedua ujung balok harus dipasang sengkang sepanjang lokasi 2h (h=tinggi balok) diukur dari muka kolom ke tengah bentang.
- b) Spasi sengkang pertama harus ditempatkan tidak lebih dari 50 mm dari muka komponen struktur penumpu (kolom).
- c) Spasi sengkang pada daerah sepanjang 2h dari muka tumpuan ke tengah panjang balok tidak boleh lebih dari:
 - (a) $d/4$;
 - (b) Enam kali diameter terkecil batang tulangan lentur utama;
 - (c) 150 mm.

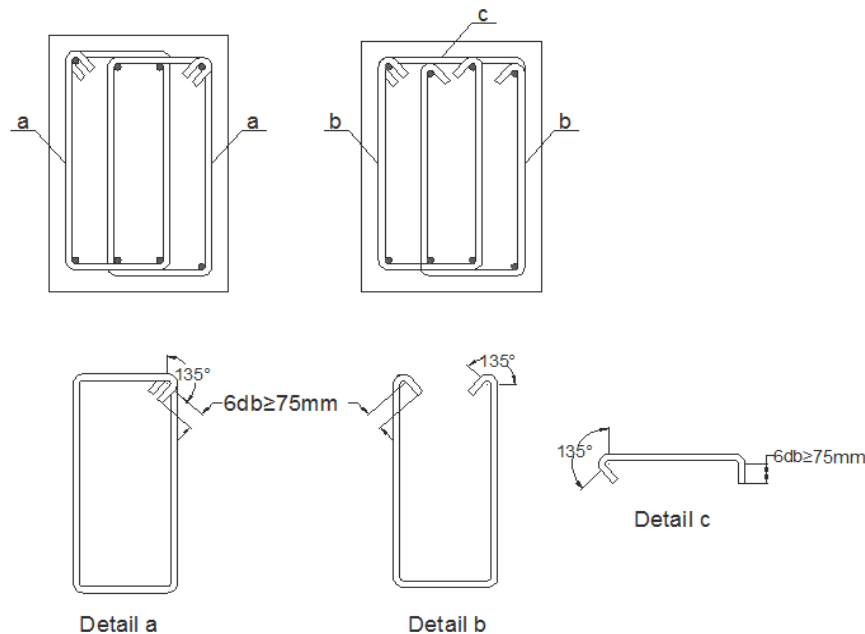
Lokasi sepanjang 2h adalah lokasi dimana diharapkan terjadi sendi plastis.

- d) Sengkang di sepanjang bentang balok tidak boleh dipasang dengan spasi melebihi $d/2$.



Gambar 2.31. Persyaratan Tulangan Transversal SRPMK

Sumber Gambar: Konsep SNI 03-2847-2013



Gambar 2.32. Sengkang Tertutup (Hoops) dan Rangkap

Sumber Gambar: Konsep SNI 03-2847-2013

b) Ketentuan Detail Tulangan Kolom

Untuk elemen aksial-lentur kolom, SNI 03-2847-2013 Pasal 21.6 mensyaratkan beberapa ketentuan detail tulangan yang perlu diperhatikan sebagai berikut:

1) Persyaratan sambungan lewatan

Beberapa ketentuan sambungan lewatan tulangan longitudinal kolom yang perlu diperhatikan dalam perencanaan SRPMK yaitu:

- a. Sesuai dengan Pasal 21.1.6, sambungan lewatan tulangan kolom adalah sambungan lewatan tipe 1 dimana sambungan tidak boleh digunakan dalam:
 - (a) Jarak yang sama dengan dua kali tinggi komponen struktur dari muka kolom atau balok;
 - (b) Dari penampang dimana pelelehan lentur sepertinya terjadi sebagai akibat dari perpindahan lateral inelastic.
- b. Sesuai Pasal 21.5.3.3, sambungan lewatan diizinkan hanya dalam setengah pusat panjang komponen struktur yaitu kolom itu sendiri dan harus didesain sebagai

sambungan lewatan tarik dan harus dilingkupi tulangan sengkang tertutup atau spiral pada daerah ℓ_o .

- c. Sesuai Pasal 12.17.2.4, sambungan lewatan kolom $1,3\ell_d$ diizinkan untuk di kalikan dengan 0,83 jika panjang sambungan lewatan masuk dalam daerah ℓ_o .

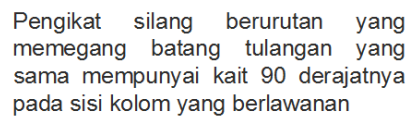
2) Persyaratan tulangan transversal

Berdasarkan SNI 03-2847-2013 Pasal 21.6.4, tulangan transversal yang dipasang pada kolom harus memenuhi persyaratan-persyaratan berikut ini:

- a. Perlu di sediakan daerah ℓ_o dari muka hubungan balok kolom dikedua ujung kolom dimana pelelehan lentur sepertinya terjadi sebagai akibat dari perpindahan inelastic rangka. Panjang ℓ_o yang dimaksud tidak boleh lebih kecil atau kurang dari:
 - (a) Tinggi komponen struktur pada muka joint atau pada penampang dimana pelelehan lentur sepertinya terjadi;
 - (b) Seperenam bentang bersih kolom;
 - (c) 450 mm.
- b. Jika terdapat pengikat silang (kaki sengkang) maka jarak atau spasi, h_x , antar pengikat silang tersebut tidak boleh melebihi 350 mm dari pusat ke pusat.
- c. Spasi tulangan sengkang sepanjang daerah ℓ_o tidak boleh melebihi yang terkecil dari:
 - (a) Seperempat dimensi komponen struktur minimum;
 - (b) Enam kali diameter batang tulangan longitudinal/ tulangan memanjang yang terkecil;
 - (c) S_o , sesuai persamaan dibawah ini tetapi tidak boleh lebih dari 150 mm dan tidak perlu lebih kecil dari 100 mm.

$$S_o = 100 + \left(\frac{350 - h_x}{3} \right) \dots\dots\dots (2.9)$$

Dua pengikat silang yang mengikat tulangan yang sama harus dipasang selang-seling kait pengikatnya.



Sumber Gambar: Konsep SNI 03-2847-2013

c) Ketentuan Detail Tulangan Joint

Berdasarkan Pasal SNI 03-2847-2013, joint (*joint*) merupakan bagian struktur yang dipakai bersama pada komponen struktur yang berpotongan. Oleh Karena joint merupakan daerah yang dipakai bersama maka joint memiliki fungsi yang lebih besar dari komponen struktur yang lainnya karena joint memikul beban-beban dari komponen struktur yang merangka pada daerah joint itu sendiri sehingga joint harus direncanakan dengan baik termasuk dalam hal detail tulangan pada joint tersebut.

Sesuai Pasal 21.7, syarat-syarat detail tulangan untuk daerah joint adalah sebagai berikut:

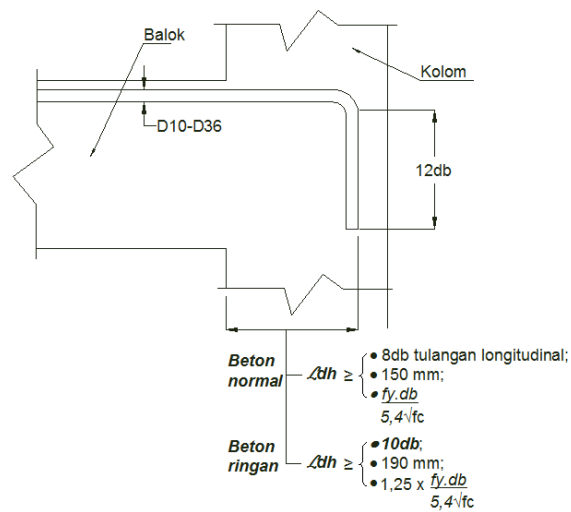
1. Tulangan longitudinal balok yang dihentikan dalam suatu kolom harus diteruskan ke muka jauh inti kolom terkekang dan diangkur dalam kondisi tarik dan kondisi tekan. Tulangan yang diteruskan ke muka jauh inti kolom tersebut dinamakan panjang penyaluran tulangan.

- a. Panjang penyaluran tulangan kait 90 derajat

- (a) Panjang penyaluran dalam kondisi tarik

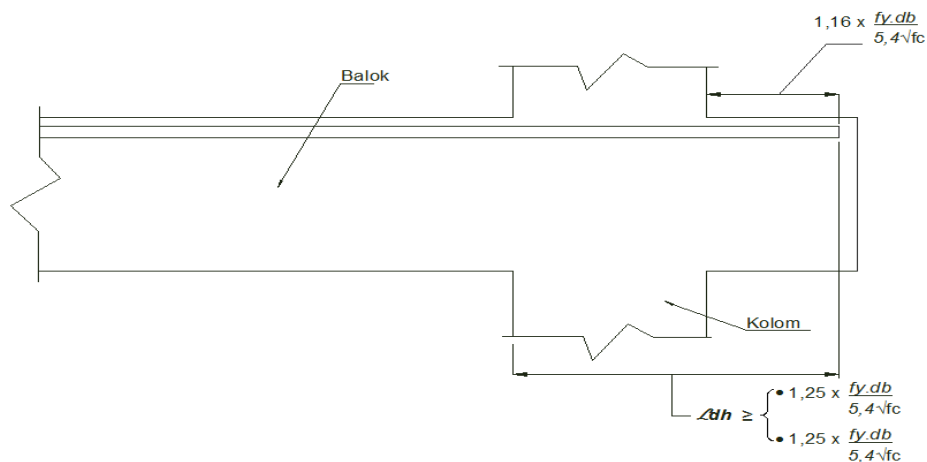
Tulangan D-10 sampai D-36, panjang penyaluran, ℓ_{dh} , dengan kait 90 derajat untuk beton normal (*normalweight*) harus sesuai dengan persamaan dibawah ini tetapi tidak boleh kurang dari $8d_b$ dan 150 mm. Sedangkan untuk beton ringan (*lightweight*), ℓ_{dh} tidak boleh kurang dari maksimum antara $10d_b$, 190 mm dan 1,25 kali panjang yang ditentukan oleh persamaan dibawah.

$$\ell_{dh} = \frac{f_y d_b}{5,4 \sqrt{f_c}} \dots\dots\dots (2.10)$$



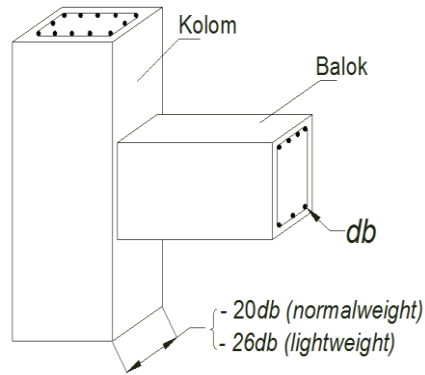
Gambar 2.34. Panjang Penyaluran SRPMK Dalam Kondisi Tarik
Sumber Gambar: Konsep SNI 03-2847-2013

- (b) Panjang penyaluran dalam kondisi tekan
- Panjang penyaluran tulangan balok ke kolom untuk SRPMK diambil sesuai Sub Bab 2.5.2.7.
- b. Panjang penyaluran tulangan yang tidak berkait
- (a) Panjang penyaluran batang tulangan lurus harus lebih besar dari 2,5 kali pers.(2.9) bila tinggi joint tidak lebih dari 300 mm dan 3,25 kali bila tinggi joint lebih besar dari 300 mm.
- (b) Batang tulangan lurus yang berhenti pada joint harus diteruskan keluar dari daerah joint tersebut. Panjang tulangan yang diteruskan tersebut diambil sebesar 1,6 kali panjang yang disyaratkan oleh pers (2.9).



Gambar 2.35. Penyaluran Tulangan Lurus
Sumber Gambar: Konsep SNI 03-2847-2013

2. Dimensi kolom yang sejajar terhadap tulangan longitudinal balok tidak boleh kurang dari 20 kali diameter tulangan balok terbesar untuk beton normal (*normalweight*). Untuk beton ringan (*lightweight*), dimensinya tidak boleh kurang dari 26 kali diameter tulangan longitudinal.



Gambar 2.36. Dimensi Kolom Yang Sejajar Tulangan Balok

Sumber Gambar: Konsep SNI 03-2847-2013

3. Tulangan transversal (sengkang) pada daerah joint harus dipasang pada daerah tulangan kolom dengan spasi antar tulangan sengkang harus sesuai dengan spasi tulangan sengkang pada daerah ℓ_o kolom yang telah ditentukan pada Sub Bab 2.5.2.10.
a) ketentuan detail tulangan balok SRPMK item (2,c).

2.6. Pola Kerusakan Bangunan Akibat Gempa Bumi

2.6.1. Pola Kerusakan Akibat Kesalahan Perencanaan

2.6.1.1. Kerusakan *Soft Storey*

(a) *Soft Storey* Pada Lantai Dasar

Banyak bangunan runtuh selama gempa mungkin berhubungan dengan fakta bahwa elemen pengaku, seperti tembok, yang tersedia di lantai atas, dihilangkan pada lantai dasar dan diganti dengan kolom. Dengan demikian lantai dasar menjadi lemah pada arah horizontal. Seringkali kolom dirusak oleh perpindahan siklik antara pergerakan tanah dan bagian atas bangunan. Deformasi plastis (sendi plastis) pada atas dan bawah ujung kolom membahayakan mekanisme pergoyangan (mekanisme lantai) dengan sebuah konsentrasi besar pada deformasi plastis pada ujung kolom.

Contoh pola kerusakan akibat lantai yang lemah (*soft storey*) yang terdapat di lantai dasar adalah sebagai berikut:



(a)

(b)

Gambar 2.37. Kerusakan Pada Bangunan Karena *Soft Storey* Pada Lantai Dasar ⁽²²⁾

Yoshimura dan Kuroki (1999) menyatakan bahwa keruntuhan kedua bangunan diatas lebih parah di lantai dasarnya karena sistem struktur yang diadopsi atau digunakan pada bangunan tersebut adalah rangka pemikul momen beton bertulang dengan lantai dasar yang lemah. Efek dari sistem struktur ini mengakibatkan lantai dasar tidak mampu memikul beban-beban bangunan diatasnya yang lebih besar dari kekuatan pikulnya.

(b) *Soft Storey* Pada Lantai atas

Pada lantai atas bisa juga menjadi lemah dibandingkan dengan lainnya jika pengaku lateral dilemahkan atau dihilangkan, atau jika penahan horizontal betul-betul dikurangi khusus di lantai atas. Akibatnya mungkin membahayakan mekanisme pergoyangan.

Contoh pola kerusakan yang terjadi pada bangunan yang memiliki *soft storey* di lantai atas adalah seperti Gambar 2.38. Bangunan tersebut adalah bangunan kantor 3 lantai di wilayah Wakayabashi, Kota Sendai sebagian runtuh pada lantai 2 dan mengalami kemiringan. Hanya pada lantai dua yang memiliki bukaan pada dinding di bagian segitiga (orange) seperti ditunjukkan pada Gambar 2.38. Untuk alasan ini, diperkirakan bahwa bukaan tersebut mengalami kerusakan dan mengakibatkan kegagalan geser kolom pendek

yang dibentuk oleh dinding gantung dan dinding spandrel. Kegagalan geser pada kolom panjang di lantai 3 setelah diamati kemungkinan disebabkan oleh pengaruh keruntuhan pada lantai dua. Kerusakan pada kolom dan balok pada lantai 1 tidak terlihat, hanya retak geser pada dinding non-struktur.



Gambar 2.38. Kerusakan Pada Bangunan Karena *Soft Storey* Pada Lantai Tengah, Gempa Tohoku, Jepang ⁽¹⁹⁾

2.6.1.2. Kerusakan Geser Kolom (*Short Column Effect*)

Kegagalan geser biasa disebut “kolom pendek” yang sering menyebabkan keruntuhan selama gempa. Ini karena tebal kolom pendek secara relative berbanding terbalik dengan tingginya, dan seringkali kolom tersebut dirusak oleh kekuatan balok atau pelat lantai.

Menurut Cogurcu (2014) bahwa bila terdapat perbedaan antara panjang kolom pada lantai yang sama, hal tersebut dapat menjadi sebuah mekanisme kerusakan saat terjadi gempa (Gambar 2.39). Jendela-jendela kecil yang dibuat dari kolom ke kolom di lorong-lorong struktur seperti pada sekolah-sekolah dan rumah sakit dan kehadirannya yang tidak diperhatikan dalam proyek statis dapat menyebabkan kolom mengalami kegagalan.

Kolom pendek terbentuk pada struktur terutama karena dinding bata yang tidak menerus. Dinding bata (dinding partisi) dianggap beban mati dalam analisis structural. Namun, dinding bata yang diterima sebagai bukan penyalur beban yang berkontribusi untuk

menyalurkan beban pada frame dibawah beban horizontal sebagai penahan diagonal. Mereka meningkatkan kekakuan frame dan membatasi perpindahan horizontal.



(a) (b)
Gambar 2.39. (a) Kegagalan kolom akibat Short Column Effect ⁽²¹⁾
(b) Kegagalan kolom akibat Short Column Effect ⁽¹⁹⁾

2.6.1.3. Kerusakan Akibat Kesalahan Konfigurasi Bangunan

Bangunan dengan konfigurasi yang tidak beraturan dalam arah vertical maupun horizontal akan berperilaku/ berespon dengan buruk saat terjadi gempa. Ini dikarenakan bangunan dengan konfigurasi tidak beraturan memiliki pusat massa yang berbeda-beda di tiap lantainya yang merupakan titik tangkap gempa pada saat terjadi gempa.



(a) (b)
Gambar 2.40. Keruntuhan Karena Konfigurasi Vertikal (a) Gempa San Fernando, 1997, (b) Gempa Kashmir 2005 ⁽²¹⁾

2.6.1.4. Kerusakan Akibat Balok Kuat, Kolom Lemah (*Strong Beam, Weak Column*)

Salah satu faktor utama yang seringkali menyebabkan bangunan mengalami keruntuhan saat terjadi gempa adalah mekanisme desain kolom yang tidak sesuai dengan peraturan yang dibuat yaitu kolom kuat, balok lemah (*strong column, weak beam*). Jika balok lebih kuat dari kolom maka sendi-sendi plastis akan terbentuk pada kolom sehingga kolom akan lebih mudah runtuh.

Contoh pola kerusakan yang terjadi pada bangunan karena mekanisme kolom kuat, balok lemah tidak terpenuhi seperti ditunjukkan pada Gambar 2.41.



Gambar 2.41. Pola Kerusakan akibat Balok Kuat, Kolom Lemah (Gempa Kashmir 2005) ⁽²¹⁾

2.6.2. Pola Kerusakan Akibat Masalah Detailing Tulangan

(a) Masalah Kait Tulangan Senggang Dan Pola Kerusakannya

Tulangan *confinement* berupa sengkang (*ties*) berfungsi untuk membungkus inti beton sehingga penampang inti beton ditahan agar tidak mengembang ke arah radial. Bila penjangkaran (kait) sengkang tidak kuat, sengkang akan terlepas dari posisinya dan *effect confinement* pada sengkang tersebut akan hilang, jarak antara dua sengkang akan menjadi lebih besar dan batang-batang tulangan longitudinal akan tertekuk karena panjang tekuk akan menjadi lebih besar (Kristanto, A. dkk, 2010).

Untuk daerah rawan gempa disyaratkan tulangan sengkang diberi kait pada bagian ujungnya hingga 135 derajat. Kait ini memiliki panjang tertentu sampai masuk kedalam inti beton sehingga memberikan tahanan yang baik dan efektif. Tulangan pengekan dengan kait 90 derajat memiliki kemampuan yang lebih rendah dalam menahan inti beton. Hal ini terjadi karena tidak adanya gaya yang menahan kait untuk tetap pada posisi semula, yang nantinya mengakibatkan kait bengkok keluar sehingga tidak dapat mengekan inti beton.

Pola Kerusakan yang diakibatkan oleh tidak terpenuhinya detail kait tulangan sengkang seperti di tunjukkan pada gambar dibawah ini yang terjadi pada 23 Oktober 2011 di Propinsi Van, Turkey.



Gambar 2.42. Pola Kerusakan Akibat Detail Kait yang buruk ⁽⁸⁾

(b) Pola Kerusakan Akibat Masalah Jarak Sengkang Balok

- a) Tulangan geser di pasang rapat terutama pada bagian struktur yang mengalami kelelahan seperti balok dan kolom untuk mencegah keruntuhan geser.
- b) Spasi tulangan sengkang didaerah sendi plastis harus dipasang lebih rapat karena jika dimana beban gempa terjadi, pada ujung-ujung balok dan kolom sistem portal dapat termobilisasi gaya geser yang tinggi.

Pola kerusakan pada balok yang diakibatkan oleh jarak atau spasi sengkang yang tidak memenuhi syarat seperti ditunjukkan pada gambar dibawah ini yang terjadi pada 23 oktober 2011 di Propinsi Van, Turkey.



Gambar 2.43. Pola Kerusakan Akibat Spasi Sengkang yang besar ⁽⁸⁾

(c) Pola Kerusakan Akibat Detail Jarak Sengkang Pada Sambungan Tulangan Balok

Sengkang yang dipasang sepanjang sambungan lewatan baik itu dalam bentuk tulangan spiral maupun sengkang tertutup sangat penting untuk mengekang beton di daerah sambungan dan mengantisipasi terkelupasnya selimut beton pada saat penampang mengalami deformasi inelastik yang signifikan.

Pola kerusakan yang terjadi jika jarak pada daerah sambungan tulangan balok tidak memenuhi syarat adalah seperti ditunjukkan pada gambar di bawah ini.



Gambar 2.44. Pola Kerusakan Akibat Spasi Sengkang yang besar ⁽⁸⁾

Kerusakan pada daerah sambungan tulangan balok seperti pada gambar diatas terjadi karena sambungan diletakkan pada daerah sendi plastis, panjang sambungan yang tidak memenuhi serta jarak/ spasi sengkang pada daerah sambungan tersebut besar.

(d) Pola Kerusakan Kesalahan Detailing Sengkang Kolom

Tulangan sengkang yang dipasang dengan jarak yang lebih rapat memiliki kinerja yang lebih baik dari pada jarak sengkang yang lebih besar karena jarak sengkang yang lebih kecil akan mengikat inti beton dalam luasan yang kecil sehingga inti beton dapat terkekang dengan baik dan juga tulangan sengkang dapat mengikat tulangan longitudinal dengan baik sehingga tulangan longitudinal tidak mengalami tekukan ketika mengalami gaya tekan yang radikal.

Contoh kerusakan yang terjadi pada kolom karena tidak memenuhinya tulangan sengkang kolom adalah seperti yang terjadi pada gempa Chi-chi, Taiwan tahun 1999 dan gempa di Turkey.



(a)

(b)

- Gambar 2.45. a) Kerusakan kolom akibat detail tulangan sengkang yang tidak memenuhi syarat yaitu jarak sengkang yang besar sehingga menyebabkan tertekuknya (*buckling*) tulangan longitudinal kolom⁽²²⁾
- b) Jarak tulangan geser 20-30 cm menyebabkan sendi plastis terbentuk pada ujung kolom sehingga menyebabkan *strong beam-weak column*⁽¹⁷⁾

(e) Pola Kerusakan Kesalahan Detailing Jarak Senggang Pada Sambungan Tulangan Kolom

Senggang yang dipasang sepanjang sambungan lewatan baik itu dalam bentuk tulangan spiral maupun sengkang tertutup sangat penting untuk mengekang beton di daerah sambungan dan mengantisipasi terkelupasnya selimut beton pada saat penampang mengalami deformasi inelastik yang signifikan.

Contoh pola kerusakan yang terjadi pada struktur kolom jika jarak sengkang pada daerah sambungan tulangan kolom yang tidak memenuhi syarat adalah seperti gambar dibawah ini.



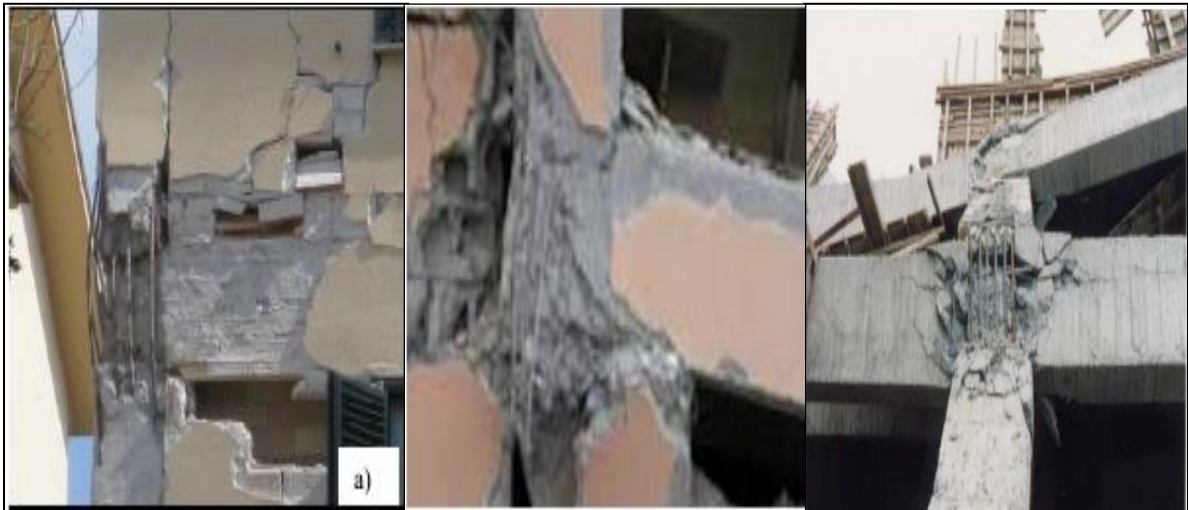
Gambar 2.46. Kegagalan pada sambungan tulangan kolom tidak terdapat sengkang sehingga sambungan tulangan ⁽¹⁷⁾

(f) Pola Kerusakan Kesalahan Detailing Sengkang Pada Joint Balok-Kolom

Kegagalan joint balok-kolom umumnya disebabkan karena tidak terpenuhinya tulangan geser pada daerah tersebut. Kekurangan tulangan geser pada daerah joint akan menyebabkan element joint tidak dapat mengembangkan efek daktilitasnya sehingga

ketika terjadi gempa elemen joint akan mengalami kegagalan sebelum mencapai daktilitasnya seperti yang direncanakan.

Contoh kerusakan yang terjadi pada elemen joint adalah seperti yang terjadi saat gempa Turkey, Italia, Taiwan, dll.



**Gambar 2.47. (a) Kegagalan joint akibat kurangnya tulangan geser joint, Gempa L'Aquila ⁽¹⁴⁾
(b) Kegagalan joint akibat tidak adanya tulangan geser joint, Gempa Turkey ⁽⁸⁾
(c) Kegagalan joint akibat tidak adanya tulangan geser joint, Gempa Taiwan ⁽²²⁾**

(g) Pola Kerusakan Kesalahan Panjang Sambungan Lewatan.

Tulangan yang disambung dapat mengalami kegagalan atau keruntuhan karena terjadinya slip yang besar pada bagian *overlapnya*. Kondisi ini dapat terjadi akibat beban yang bekerja melebihi kuat rekatan dari tulangan tersebut. Keruntuhan sambungan lewatan secara garis besar dapat di kelompokkan menjadi 2 jenis yaitu jenis keruntuhan *pull-out*, untuk *overlapping* yang pendek dan jenis keruntuhan *splitting*, untuk *overlapping* yang panjang.

Pada tulangan dengan *overlapping* yang pendek, slip yang besar terjadi akibat hancurnya beton disekitar tulangan tekan akibat tekan dan geser, sehingga batang tulangan sambungan tercabut dari beton. Sedangkan untuk tulangan yang *overlappingnya* panjang, keruntuhan terjadi akibat beton mengalami tegangan tarik radikal yang besar sehingga timbul retak yang mengakibatkan tulangan kehilangan daya rekatnya. Kondisi ini

terjadi akibat ketebalan beton antar tulangan atau ketebalan selimut beton tidak mencukupi.

Overlapping pada daerah sambungan tulangan dapat dilakukan dengan membuat jarak antar ke dua tulangan tersebut yang dinamakan *non-contact lap splice*, atau dengan menempelkan kedua tulangan, yang dinamakan *contact lap-splice*. Pada *non-contact lap-splice*, ada beton pemisah diantara kedua tulangan. Dengan adanya beton ini maka seluruh permukaan pada masing-masing tulangan dapat memberikan gaya rekatan. Ini berbeda jika kedua tulangan tersebut disambung bersentuhan pada *contact lap-splice*. Permukaan tulangan yang bersentuhan tersebut otomatis tidak terisi oleh beton sehingga mengurangi gaya rekatan antara tulangan dari beton.

Contoh pola kegagalan struktur akibat panjang sambungan tulangan yang tidak memenuhi syarat adalah seperti terjadi pada gempa di Turki seperti gambar dibawah ini.



Gambar 2.48. Kegagalan pada sambungan tulangan kolom karena panjang sambungan lewatan tulangan yang terlalu pendek (tidak memenuhi syarat) ⁽¹⁷⁾

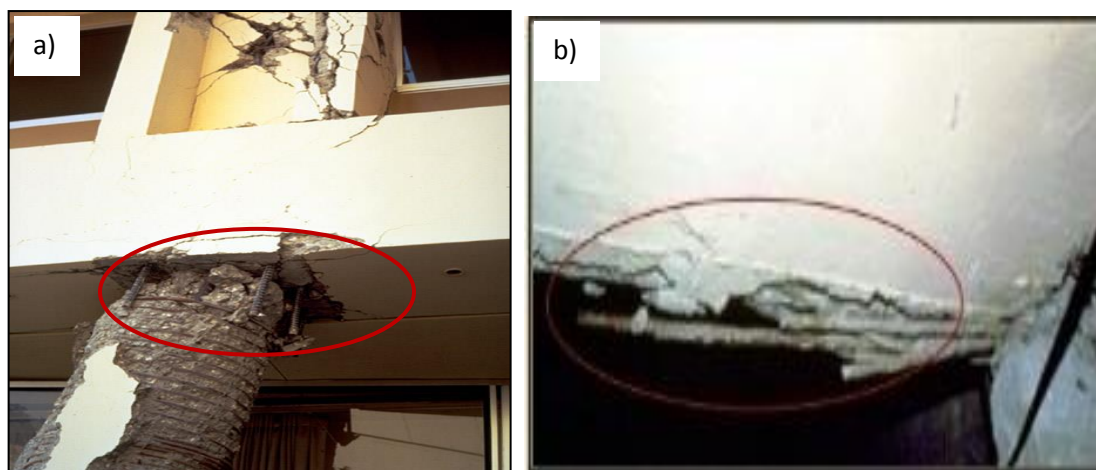
(h) Pola Kerusakan Kesalahan Lokasi Sambungan Lewatan Tulangan

Pada lokasi-lokasi tertentu (disyaratkan oleh SNI) tidak diperbolehkan adanya sambungan lewatan tulangan karena:

- a. Daerah-daerah tersebut paling berpotensi terjadinya sendi plastis pada saat beban bekerja karena memiliki tingkat momen yang cukup besar;

- b. Batasan-batasan lokasi sambungan lewatan pada balok perlu diperhatikan, karena sambungan lewatan tidak dapat di andalkan bila menerima beban siklik yang dapat memaksa penampang berdeformasi dalam rentang inelastiknya.
- c. Pada daerah ujung kolom merupakan daerah yang memiliki momen lentur yang cukup besar pada saat beban gempa terjadi. Hal ini mengakibatkan bagian pada ujung kolom menjadi daerah yang paling berpotensi untuk terjadi deformasi plastis. Oleh sebab itu, pendetailan pada daerah ini harus direncanakan sebaik-baiknya sehingga memungkinkan kolom untuk dapat mengalami deformasi plastis yang cukup besar sebelum kolom tersebut mengalami kegagalan.
- d. Penelitian Kim, T. H, dkk 2009 memberikan gambaran perilaku histeris dari kolom yang tidak menggunakan sambungan lewatan pada ujung kolom dan yang menggunakan sambungan lewatan pada ujung kolom. Dari hasil penelitian tersebut disimpulkan bahwa sambungan lewatan yang tidak dibuat pada ujung kolom daktilitas strukturnya lebih besar jika dibandingkan dengan yang menggunakan sambungan lewatan pada ujung kolom dimana mengakibatkan daktilitas struktur menjadi sangat kecil.
- e. Jika sambungan terletak pada daerah *beam-column joint*, maka akan mengakibatkan tegangan geser yang terjadi antara tulangan dan beton di daerah tersebut akan meningkat dua kali lebih besar dari tegangan geser normalnya.

Contoh pola kerusakan struktur akibat penempatan sambungan lewatan pada tulangan kolom dan balok yang tidak tepat adalah seperti yang ditunjukkan oleh gambar berikut ini.



**Gambar 2.49. a) Kegagalan kolom akibat sambungan lewatan pada daerah pangkal kolom ⁽¹⁷⁾
b) Kegagalan balok akibat lokasi sambungan pada daerah sendi plastis ⁽²²⁾**

(i) Pola Kerusakan Kesalahan Detail Penyaluran Tulangan

Bila panjang penyaluran tidak cukup maka tulangan biasanya terlepas dari ikatannya dengan beton dan akan menimbulkan kerusakan pada ujung balok. Karena arah beban lateral gempa dapat berubah-ubah (bolak-balik) maka baik tulangan atas maupun bawah balok perlu di jangkar pada daerah kolom sesuai kebutuhan (peraturan). Kolom juga dapat mengalami kegagalan di daerah pangkal kolom lantai dasar karena panjang penyaluran atau angkur tulangan kolom ke dalam pondasi yang kurang panjang.

Contoh kerusakan yang terjadi akibat dari penyaluran tulangan yang tidak memenuhi syarat adalah seperti yang terjadi saat gempa di Pakistan dan Turki.



(a)



(b)

Gambar 2.50. (a) Pola kerusakan struktur akibat panjang penyaluran/ tulangan angkur yang tidak memenuhi ⁽⁶⁾

(b) Tercabutnya joint balok-kolom karena angkur tulangan yang buruk ⁽⁸⁾